Archive of SID

مقاله

# بررسی توربین‌های آبی و راه‌کارهایی برای کاهش اثرات زیست – محیطی آنها

**مونا محمدی، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، سازمان آب و برق خوزستان،**
**معاونت طرح و توسعهٔ سد و نیروگاه**
**moona_mohammadi@yahoo.com**

محمدرضا محمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک،
دانشگاه سیستان و بلوچستان، پردیس بین‌الملل چابهار
**mhrz_mohammadi@yahoo.com.au**

**چکیده**
**به‌دلیل اهمیت مسائل زیست - محیطی در نیروگاه‌های برق‌آبی، یکی از برنامه‌های جدید طراحان توسعهٔ توربین‌های آبی جهت بهینه‌سازی شرایط عبور ماهیان از توربین به‌همراه افزایش راندمان کلی آنهاست. بررسی این شرایط یکی از مسائل مهم جهت جایگزینی رانرهای قدیمی در نیروگاه‌هایی با هد پایین است. با توجه به اهمیت بسیار زیاد موضوع و عدم در دسترس‌بودن منابع داخلی، جهت این بررسی منابع خارجی مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس، از سال ۱۹۹۴ م، در بخش انرژی دفتر فناوری‌های برق‌آبی و باد آمریکا[1] جهت ایمن‌سازی مسیر عبور ماهیان و افزایش بقای آنها تحقیقاتی درخصوص بهینه‌سازی توربین‌های موجود به لحاظ عملکرد و طراحی انجام شده است. این تحقیقات در دو بخش مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های سازنده انجام و دلایل صدمات وارده و اثرات مستقیم و غیرمستقیم آنها بر مرگ‌ومیر ماهیان بررسی شده است. در این مقاله به اجمال نتایج تحقیقات انجام‌شده درخصوص ملاحظات زیستی و معیارهای طراحی به‌دست آمده، سازوکارهای صدمه، توربین جدید و تحلیل‌های انجام‌شده به‌کمک دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه‌سازی توربین‌های موجود ارائه شده است.**

**واژه‌های کلیدی:** توربین دوست‌دار محیط زیست، گذرگاه ماهی، بقای ماهی در توربین‌های آبی



www.SID.ir

Archive of SID

## مقدمه

یکی از روش‌های تولید انرژی، استحصال انرژی از آب است که باوجود مزیت‌های فراوان، چالش‌هایی نیز برای محیط زیست به‌همراه دارد. متأسفانه فوائد انرژی برق‌آبی غالباً با تقابل‌های زیست - محیطی کم‌رنگ می‌شود. در آینده، درصورت غلبه بر این مسائل، این انرژی نقش مؤثری در تأمین برق خواهد داشت. یکی از این چالش‌ها، مرگ‌ومیر ماهی‌ها به‌هنگام عبور از توربین (به خصوص در ماهی‌هایی که از بالادست به پایین‌دست و برعکس مهاجرت می‌کنند) می‌باشد. البته با بهینه‌نمودن شرایط معبر توربین، مرگ‌ومیر ماهی‌ها کاهش می‌یابد. بر این اساس، با توجه به تحقیقات انجام‌شده، صدمات و مرگ‌ومیر ماهی‌ها می‌تواند ناشی از یکی از شرایط زیر باشد [۱، ۲، ٤ و ٥]:

- تغییرات سریع و زیاد فشار: فشار آب درون توربین می‌تواند به چندین برابر فشار اتمسفر برسد و سپس، طی چند ثانیه، به کمتر از فشار اتمسفر کاهش یابد.
- کاویتاسیون: فشار بسیار پایین آب سبب ایجاد حباب‌های بخار می‌شود که با حرکت حباب‌ها به ناحیهٔ پرفشار، فروپاشی شدیدی در آنها ایجاد خواهد شد.
- تنش برشی: نیروهای اعمالی موازی به سطح ماهی از برخورد دو سطح آب با سرعت‌های متفاوت ایجاد می‌شود.
- آشفتگی: حرکت نامنظم آب می‌تواند منجر به صدمات محلی و یا سبب گیج‌شدن ماهی و گم‌شدن آن شود.
- برخورد با سازه‌ها: برخورد با سازه‌هایی چون تیغه‌های رانر، پره‌های ثابت، ویکت‌گیت‌ها و ستون‌های درافت تیوب
- سایش: له‌شدن در فواصل نزدیک به هم، میان سازه‌های ثابت و متحرک

برای رفع این مشکلات، مؤسسه‌های تحقیقاتی و شرکت‌های سازندهٔ توربین تحقیقات وسیعی درخصوص طراحی توربین‌های دوست‌دار محیط زیست و یا تصحیح طراحی‌های موجود انجام داده‌اند [۱، ۲، ٤، ٥، ٦، ۷ و ۸]. در این مطالعات، برخی به معیارهای زیستی پرداخته‌اند و برخی دیگر با توجه به مطالعات انجام‌شده دربارهٔ مرگ‌ومیر ماهیان، طراحی‌های جدیدی را پیشنهاد کرده‌اند. همچنین جهت مشخص‌شدن سرعت جریان و توزیع فشار در توربین و چگونگی صدمات وارده به ماهیان، علاوه بر تحلیل‌های انجام‌شده به‌وسیلهٔ دینامیک سیالات محاسباتی از روش‌های آزمایشگاهی نیز استفاده شده است. مفاهیم به‌دست آمده برای بهبود مفاهیم زیستی و ایجاد آبراه مطمئن جهت عبور ماهی، نوسازی توربین‌های موجود و ساخت توربین‌های جدید قابل استفاده‌اند. شرکت‌های سازنده بر این باورند که بهبود طراحی پیشنهادشده می‌تواند منجر به تولید بیشتر و کاهش هزینه‌های تعمیرات شود.

## ملاحظات زیستی و معیارهای طراحی

گفتیم که یکی از چالش‌های مهم در بسیاری از نیروگاه‌های برق - آبی، گذرگاه ماهی است. از سوی دیگر بهبود کیفیت آب عبوری از توربین (نظیر افزایش اکسیژن حل‌نشده) و نیز شرایط عملکردی نیروگاه دارای اولویت است. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که هریک از عوامل افت سریع فشار (همچون کاویتاسیون)، وجود هد بالا، راندمان پایین توربین و تغییر فشار (ناشی از اختلاف فشار بالادست توربین و فشار خروجی از میان درافت تیوب) می‌تواند سبب


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

صدمه و مرگ‌ومیر ماهیان شود [۵ و ٦]. بـه هـر حـال، عدم امکان مشخص‌نمودن نواحی صدمه و نیز مشـاهدهٔ سازوکار صدمه به ماهیان عبوری از توربین، مشـکلاتی را جهت بیان علل مرگ‌ومیر ماهی‌ها ایجاد کرده اسـت. همچنین این مطالعات نشان می‌دهند که در ورودی رانر توربین‌های فرانسیس (ویکت‌گیت‌ها و تیغه‌ها) سـرعت محیطی بالاتر است و بازشدگی بیشتر ویکت‌گیت منجر به مرگ‌ومیر بیشتر ماهی‌ها خواهد شـد [۱ و ۲]. میـزان این مرگ‌ومیر با تغییر هـد عملکـردی در تـوربین‌هـای فرانسیس تغییر نمی‌کند (مرگ‌ومیـر در ۱۲ متـر و ۱۲۰ متر یکسان است).

در توربین‌های کاپلان نیز مقایسه سرعت محیطی و هد عملکردی نتیجه مشـابهی را خواهـد داشـت [۱ و ۲]. نتایج بـه‌دسـت‌آمـده بـرخلاف بـاور عمـومی موجـود درخصوص نقش مؤثر هد هیـدرولیکی در مـرگ‌ومیـر ماهیان است. در هر حال، فضای میان نـوک تیغـه‌هـا و رینگ تخلیه (محلی که ماهی‌ها گرفتار می‌شوند) حـائز اهمیت است. به‌طور متوسط در توربین‌هـای فرانسـیس میزان مرگ‌ومیر ۲۰ درصد، در توربین‌هـای کـاپلان ۱۲ درصد و در توربین‌های بالب ۹ درصـد گـزارش شـده است [۱ و ۲]. همچنین این مطالعات نشان می‌دهند که نرخ واقعی مرگ‌ومیر ماهی‌ها در مقایسه با مـاهی‌هـایی که به‌طور مجازی در مدل‌های کامپیوتری مدل می‌شوند کمتر است (به‌طور متوسط مرگ‌ومیـر در تـوربین‌هـای کاپلان و فرانسیس ٦ درصد است) که علت آن اختلاف در نوع طراحی ماهی اسـت. مـاهی‌هـایی کـه بـه‌طـور مجازی طراحی می‌شوند دارای اندازهٔ بزرگتری نسـبت بـه نـوع واقعـی آن هسـتند. سـازوکارهای صـدمه و مرگ‌ومیر بستگی به منطقهٔ عبور ماهی از تـوربین دارد. مثلاً در نیروگاه سد واناپوم آمریکا، ماهی‌های عبوری از نواحی نزدیک به کاسهٔ چرخ توربین دارای مرگ‌ومیری حدود ۵ درصد بیش از مـاهی‌هـای عبـوری از نـواحی میانی رانر هستند. همچنین مـاهی‌هـایی کـه از نـواحی اطراف تیغه‌ها عبور می‌کنند، با صدماتی نظیر برخورد با تیغه‌ها و اثرات محلی جریان سیال مواجه خواهند شـد. نکتهٔ قابل توجه این است که برآورد میزان این صدمات و مرگ‌ومیرها از طریق اندازه‌گیری مشکل است.

## سازوکارهای آسیب

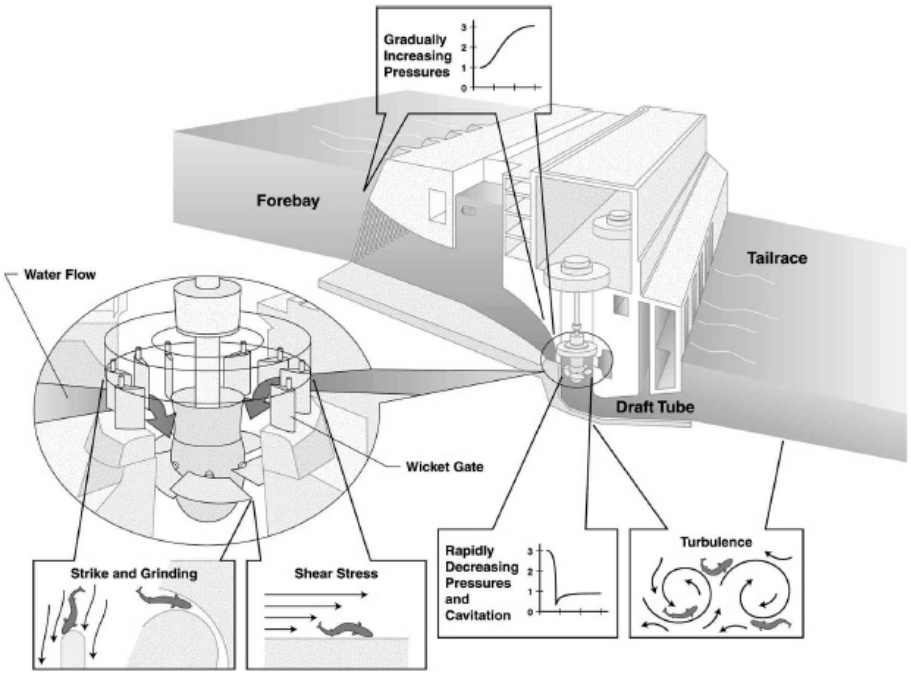
بقای ماهی به مسیر عبوری از سیسـتم تـوربین بسـتگی دارد. با توجه به هندسـهٔ مجـرا و مشخصـات جریـان، ماهیان ورودی به سیستم تـوربین در نـواحی گونـاگون آسیب می‌بیننـد. ایـن نـواحی در شـکل ۱ نمـایش داده شده‌اند [۱ و ۲].

بر این اساس، سازوکار صدمات وارده بـه چهـار گـروه طبقـه‌بنـدی مـی‌شـوند: مکـانیکی، فشـاری، برشـی و کاویتاسیون [۱، ۲، ٤ و ۵].

هریک از این عوامل به مشخصـه‌هـای جریـان بسـتگی دارند. صدمات مکانیکی شامل برخورد، خراشـیدگی و ساییدگی است. میزان آسیب ناشـی از خراشـیدگی بـه مشخصات جریان، سرعت، تعـداد تیغـه‌هـای تـوربین، فضای میان آنها و هندسهٔ مجرای جریـان بسـتگی دارد. آسیب ناشی از سایش هنگامی اتفاق می‌افتد کـه مـاهی درون فضای‌های کوچک (شکاف‌هایی با اندازهٔ نزدیـک به انـدازهٔ مـاهی) قـرار گیـرد. ایـن فضـاها بـا منـاطق پرسرعت میان لبهٔ تیغه و کاسهٔ چرخ توربین، تیغه‌هـا و رینگ دهانه، ویکت‌گیت‌هـا و پـره‌هـای ثابـت و میـان ویکت‌گیت‌ها و رینگ توزیع‌کننده قرار دارند. پیش‌بینی میزان آسیب ناشی از خراشیدگی و سایش امکان پـذیر نیست و اطلاعات لازم برای تعیین میزان یـا تشـخیص


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۱. سازوکار وقوع صدمات خاص**
**به ماهیان عبوری از توربین [۲]**

صدمات ناشی از سایش موجود نمی‌باشند. علاوه بر این، سایش می‌تواند از دیگر سازوکارهای آسیب به ماهی نیز ناشی شود. در سازوکار برخورد، ماهی‌ها با برخورد به اجزای سیستم توربین، آسیب می‌بینند و احتمال مرگ ناشی از آن متفاوت است. میزان این آسیب به چند عامل همچون اندازهٔ ماهی، تعداد تیغه‌ها و فضای میان آنها، سرعت توربین، سرعت جریان و دبی بستگی دارد. معادلات متعددی برای محاسبهٔ احتمال برخورد، با فرض اینکه برخورد منجر به مرگ شود (که البته غالباً این فرض صحیح نیست)، در توربین‌های نوع کاپلان و فرانسیس به‌دست آمده است. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سرعت محیطی رانر، میزان مرگ‌ومیر افزایش می‌یابد. در توربین‌های فرانسیس کم‌ترین مقدار مرگ‌ومیر در سرعت محیطی ۴۰ فوت بر ثانیه یا کمتر پیش بینی شده است. در سرعت‌های ۲۰ فوت بر ثانیه یا کمتر، برخورد قابل اغماض است [۱ و ۲]. توربین‌های با هد بالا دارای واحدهای کوچک‌تر و نرخ بالای تغییر فشار به ازای واحد زمان هستند و توربین‌های با هد پایین دارای واحدهای بزرگ و نرخ پایین‌تر تغییر فشار به ازای واحد زمان. بقای ماهیان کاملاً به تغییرات فشار درون سیستم توربین بستگی دارد و آسیب ناشی از آن به مقدار و نرخ تغییر فشار و نیز نوع ماهی وابسته است. بیشترین نرخ تغییرات در ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه اتفاق می‌افتد. تحقیقات نشان می‌دهند که ماهیان به کاهش فشار بیش از افزایش آن حساس می‌باشند [۱، ۲ و ۵].

یکی دیگر از عوامل بسیار تأثیرگذار بر ماهیان عبوری کاویتاسیون ایجادشده در توربین است. کاویتاسیون فرایند تبخیر و چگالش سریع مایع است و هنگامی روی می‌دهد که فشار محلی در مایع به مقدار فشار بخار یا کمتر از آن افت کند و حباب‌ها در مایع شکل بگیرند. این حباب‌ها در ناحیهٔ فشار پایین رشد می‌کنند


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

و هنگامی‌که به ناحیهٔ با فشار بالاتر برسند، فرو می‌پاشند. این فروپاشی می‌تواند منجر به ایجاد سروصدا، ارتعاش، نوسان فشار، فرسایش سطوح و کاهش راندمان یا ظرفیت جریان شود. هریک از این عوامل می‌تواند منجر به افزایش مرگ‌ومیر شود. همچنین کاویتاسیون می‌تواند امواجی با فشار بالا یا میکروجت‌هایی با سرعت بالا ایجاد کند. مطالعات نشان می‌دهد که مرگ‌ومیر ناشی از کاویتاسیون در حدود ۲ تا ٦ درصد و مرگ‌ومیر ناشی از تغییر فشار ۱۹ درصد است [۱ و ۲].

علاوه بر عوامل مذکور، تنش برشی نیز از جمله عوامل مرگ‌ومیر ماهیان است. تنش برشی در میدان جریان ناشی از تغییر سرعت نسبت به فاصله یا نرخ تغییرشکل سیال است و ایجاد منطقهٔ تنش برشی به گرداب‌های درون جریان بستگی دارد. بیشترین مقدار تنش برشی در سطوحی چون تیغه‌ها، نوک لبه‌ها، پره‌ها و دریچه‌ها دیده می‌شود. میزان صدمهٔ ناشی از تنش برشی به نوع ماهی و اندازه و چگونگی ورود به منطقهٔ برش بستگی دارد. توربین‌های کاپلان دارای فواصلی نزدیک به ویکت‌گیت‌ها و تیغه‌های رانر هستند. آب نشتی از میان این فواصل و همچنین عملکرد غیربهینهٔ توربین منجر به جدایش جریان می‌شود و گرداب‌هایی با نواحی تنش برشی بالا ایجاد می‌کند. با اتخاذ راهکارهایی چون بیشینه‌نمودن شیب تیغه‌ها و هماهنگی زاویهٔ نوک آنها با بردار سرعت ورودی می‌توان گرداب‌ها را در توربین کاپلان کمینه کرد که به‌دنبال آن مناطق با تنش برشی نیز کاهش می‌یابند.

چرخش گرداب‌ها نیز در درافت تیوب منجر به ایجاد تنش برشی می‌شود و می‌توان از آن به‌عنوان یک منبع اولیهٔ آسیب ناشی از تنش برشی در توربین‌های فرانسیس یاد کرد.

## مفاهیم طراحی توربین جدید

در برخی مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های سازنده، تحقیقات جداگانه‌ای دربارهٔ طراحی توربین دوست‌دار محیط زیست انجام شده است. این مؤسسات تحقیقاتی براساس مطالعات انجام‌شده و جمع‌آوری دلایل مرگ‌ومیر ماهیان عبوری از توربین، معیارهای زیستی را در طراحی مطرح کرده، رانری جدید جهت عبور بی‌خطر ماهیان پیشنهاد کرده‌اند. همچنین این مؤسسات از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی به‌همراه روش‌های مدل‌سازی استفاده نموده‌اند. شرکت‌های سازنده نیز براساس توربین‌های موجود و یا جدید، مفاهیم نوینی در طراحی مطرح کرده‌اند. این مطالعات روی مجرای ماهی، گازهای حل‌نشده در آب و کمترین میزان جریان پایین‌دست متمرکز شده است. با استفاده از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی در توربین‌های کاپلان و فرانسیس، توزیع فشار و سرعت در توربین و چگونگی تأثیر این دو در آسیب به ماهیان بررسی شده است. شرکت‌های سازنده بر این باورند که طرح‌های پیشنهادی برای بهینه‌سازی توربین‌های موجود منجر به عملکرد و قدرت تولیدی بیشتر و کاهش هزینه‌های تعمیرات خواهند شد.

در این مقاله برای توضیح یافته‌های هریک از این گروه‌ها، از عناوین مطالعات دستهٔ نخست (مؤسسات تحقیقاتی) و مطالعات دستهٔ دوم (شرکت‌های سازنده) استفاده می‌شود.

## نتایج مطالعات دسته نخست

در صنایع غذایی برای انتقال ماهی‌ها و سبزیجات با کمترین مقدار آسیب، به‌طور گسترده‌ای از پمپ پروانه‌ای یک تیغه‌ای، که ترکیبی از پمپ پیچی و گریز از مرکز


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

است، استفاده می‌شود. همچنین برای پمپ‌نمودن مطمئن و بی‌خطر ماهی‌ها حول سازه‌ها و سیستم‌های بای پس می‌توان از آن استفاده کرد [۱ و ۲]. بنابراین با الهام از این طرح – که در حال حاضر نیز استفاده می‌شود و با توجه به پایین‌بودن راندمان این پمپ (حدود ۷۹ درصد) – محققان اقدام به طراحی رانر جدیدی کرده‌اند. این طراحی شامل سه مرحله است:

۱. مدل یک‌بعدی جهت به‌دست آوردن ابعاد کلی رانر
۲. طراحی هندسی با استفاده از مدل جریان شبه سه‌بعدی که به‌کمک آن شکل بهینهٔ رانر به‌دست می‌آید.
۳. تحلیل CFD جهت بررسی دقیق سه‌بعدی مشخصه‌های جریان در توربین و نهایی‌نمودن طراحی.

در روش آخر، معادلات پیچیدهٔ ناویر – استوکس حاکم بر جریان به‌صورت عددی حل می‌شوند و از نتایج به‌دست آمده برای برآورد نهایی استفاده می‌گردد. برای انتخاب نهایی تعداد تیغه‌ها، طرح‌های رانر با دو و سه تیغه با پمپ یک تیغه‌ای مقایسه شده، به‌دلیل تعداد تیغهٔ کمتر (به‌لحاظ آسیب کمتر به ماهیان)، رانر با دو تیغه انتخاب شده است. جدول ۱ مشخصات سه نوع طراحی را نشان می‌دهد.

نکاتی که در این طراحی مورد توجه قرار گرفته‌اند عبارتند از [۱ و ۲]:

- قطر رانر در بهترین راندمان است
- جهت محاسبهٔ هد، فاصلهٔ میان ورودی اسپیرال کیس و پایاب در نظر گرفته شده است.
- راندمان با لحاظ تلفات در درافت تیوب و اسپیرال کیس محاسبه می‌شود.
- در مدل (۳)، راندمان کلی با ۳۰ درصد کاهش در قطر رانر حدود ۱ درصد کاهش می‌یابد (قطر ۱۲/۳ فوت و طول ۹/٤ فوت)

همچنین در بهینه‌سازی طراحی، فاکتورهای زیر در نظر گرفته شده است [۱، ۲، ٤، ٥، ٦، ۷ و ۸]:

- جلوگیری از جدایش جریان جهت کمینه‌کردن افت و آشفتگی‌ها
- جلوگیری از کاهش فشار به میزان کمتر از مقدار تعیین‌شده
- کمینه‌نمودن پتانسیل آسیب به ماهی با متعادل‌کردن فاکتورهایی چون هد، شکل تیغه، قطر رانر و تعداد و طول تیغه‌ها. هریک از این فاکتورها می‌توانند سرعت محیطی رانر را تحت تأثیر خود قرار دهند.
- کمینه‌نمودن مناطق با تنش برشی بالا

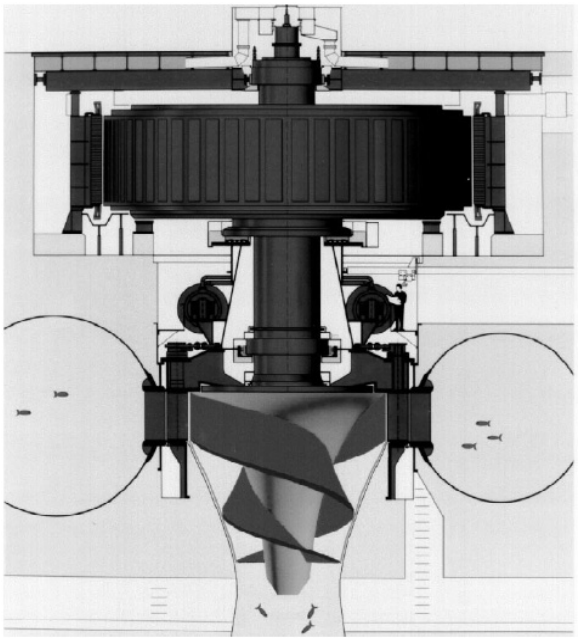
براساس بررسی‌های انجام شده، طرح نهایی به‌صورت رانر با شفت عمودی و با دو تیغه است. راندمان توربین در ۸٤ فوت و ۱۰۰۰ فوت مکعب بر ثانیه، ۹۰ درصد می‌باشد. این راندمان با راندمان توربین‌های متداول قابل رقابت است. بررسی توزیع سرعت در نزدیکی تیغه‌ها نشان می‌دهد که جریان در راستای پایین‌دست حرکت می‌کند و از سطح تیغه‌ها جدا نمی‌شود. در طراحی جدید، توزیع فشار و میزان کاهش آن از ورودی رانر تا خروجی به‌صورت یکنواخت به‌دست آمده است. در این توربین کاویتاسیون در هیچ مکانی رخ نخواهد داد. تحلیل CFD رانر جدید نشان‌دهندهٔ عملکرد خوب آن براساس معیارهای طراحی است و در هیچ جای معبر، آسیبی به ماهیان وارد نمی‌شود. راندمان و قدرت خروجی این توربین در مقایسه با انواع دیگر توربین موجود در بازار کمتر است. در تحلیل اولیه این رانر ویکت‌گیت یا اسپیرال کیس در نظر گرفته نشده است و در گام‌های بعدی طراحی علاوه بر در نظر گرفتن موارد یادشده، درافت تیوب نیز لحاظ شده است. شکل ۲ طرح رانر جدید را نشان می‌دهد.


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

**جدول ۱. طرح اولیهٔ رانر جدید، مقایسهٔ حالت‌های گوناگون [۱]**

| مدل | وضعیت طراحی | تعداد تیغه‌ها | قطر رانر برحسب فوت | طول رانر برحسب فوت | سرعت چرخشی برحسب دور بر دقیقه | هد برحسب فوت | راندمان کلی (درصد) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | توربین پروانه‌ای | ۱ | ۲۲/۲ | ۱۰/۸ | ۶۱/۲ | ۹۶ | ۷۹ |
| ۲ | طرح توربین جدید | ۳ | ۱۶/۲ | ۱۲/۳ | ۷۳ | ۸۴ | ۹۰ |
| ۳ | طرح توربین جدید | ۲ | ۱۷/۵ | ۱۳/۳ | ۶۸ | ۸۵ | ۸۹ |



**شکل ۲. طرح رانر جدید [۱]**

## نتایج مطالعات دسته دوم

معمولاً در طراحی‌های جدید توربین‌های آبی، به موضوع دوست‌دار محیط زیست بودن توجه نمی‌شود و هدف طراحی را راندمان و ملاحظات اقتصادی تعیین می‌کند. بنابراین برای رقابت توربین‌های دوست‌دار محیط زیست با توربین‌های متداول سعی بر این است که این توربین‌ها تولیدکنندهٔ قدرت با مناسب‌ترین راندمان، عبوردهندهٔ ایمن آبزیان و دارای کمترین هزینهٔ تعمیر و نگه‌داری باشند. خاطر نشان می‌شود که معیارهای دوست‌دار محیط زیست بودن تفاوتی با معیارهای بهینه‌سازی هیدرولیکی معمول ندارد.

برای درک بهتر شرایط فیزیکی، مسیر، شرایط معبر و نیز تعیین فشار از ابزارهایی با چندین حسگر استفاده می‌شود این حسگرها، حسگر ماهی نامیده می‌شوند و با دقتی بالا، امکان اندازه‌گیری شرایط فیزیکی و مسیر عبوری ماهیان را فراهم می‌کنند [٤]. هدف از بررسی‌های انجام‌شده بهینه‌سازی قطعات موجود در توربین (نظیر پره) جهت کاهش آسیب‌های وارده به ماهی‌هاست. در این میان شیب لبهٔ ورودی پره‌های ثابت یکی از مکان‌های مهم است؛ زیرا به‌هنگام تغییر هد یا دبی، زاویهٔ سیال کمترین تأثیر را از میزان بازشدگی دریچه‌های راهنما خواهد داشت. بنابراین بهینه‌سازی باید به‌گونه‌ای باشد که امکان کاهش سرعت محلی و افزایش تدریجی سرعت فراهم شود.

علاوه بر شیب لبهٔ ورودی موارد زیر می‌توانند از منابع آسیب در توربین باشند [٤]:

۱. عدم هم‌ترازی و فاصلهٔ اندک میان پره‌های ثابت و پره‌های راهنما

۲. چگونگی پروفیل پره‌ها (شامل موارد هندسی نظیر تعداد، قطر گام و دیگر موارد)

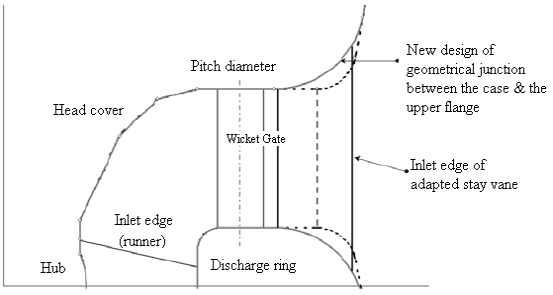
۳. چگونگی طراحی نوک پره

٤. پیش‌آمدگی پرهٔ راهنما

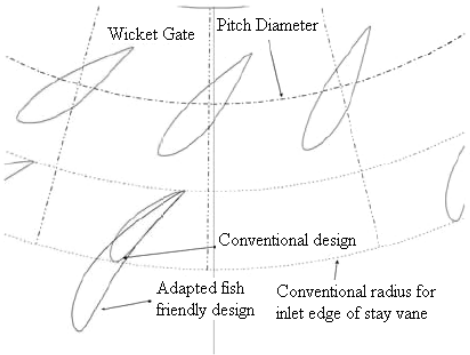
به‌طور معمول هم‌ترازی پره‌های ثابت و راهنما و چگونگی بهینه‌سازی، به‌ترتیب به اطلاعات پروژه و محدودهٔ عملکرد بستگی دارند. در مقایسه با


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

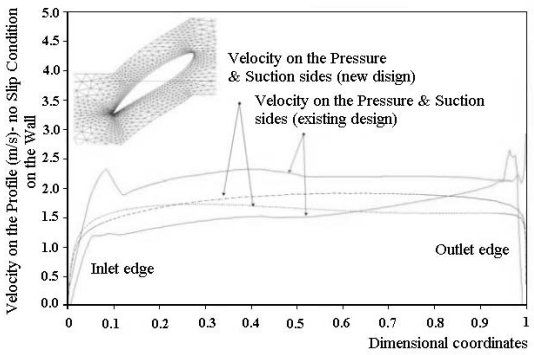



(الف)

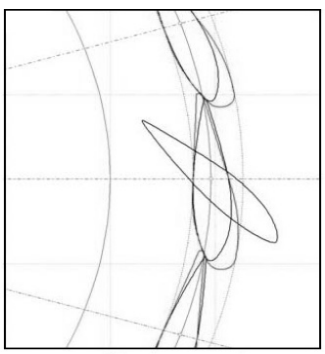



(ب)

**شکل ۳. الف) بهینه‌سازی ویکت‌گیت‌ها، ب) بهینه‌سازی شکل ورودی پره‌ها جهت بهبود اثر آنها بر ماهیان [۴]**




(الف)



(ب)

**شکل ۴. الف) پروفیل سرعت در راستای ویکت‌گیت، ب) مقایسهٔ هندسه [۴]**

توربین‌های کاپلان (با تیغه‌های متغیر) که هد و جریان در آنها حائز اهمیت است، طراحی توربین با تیغه‌های ثابت (فرانسیس) آسان‌تر است. در طراحی‌های پیشرفتهٔ پرهٔ راهنما، گرادیان فشار کاهش یافته و پروفیل سرعت براساس ملاحظات مکانیکی بهینه می‌شود (نظیر هد و گشتاور پره راهنما). طول پره‌ها نیز وابستگی اندکی به میزان بازشدگی و طراحی اتصالات میان فلانچ پایینی و رینگ تخلیه دارد ( شکل ٤).

با توجه به طراحی پرهٔ راهنما و نیز بار توربین، تنش برشی ایجادشده در پیش‌آمدگی (فاصلهٔ میان پرهٔ راهنما و فلانچ پایینی) به‌عنوان یکی از منابع آسیب به‌شمار می‌آید. جهت کاهش این پیش‌آمدگی می‌توان از یکی از دو روش زیر استفاده کرد [٤]:

۱. کاهش مقطع پرهٔ راهنما (در نزدیکی نوک لبهٔ پره و سطح کاسه چرخ توربین)

۲. کاهش شعاع میان فلانج پایینی و رینگ تخلیه (شکل ۵).

با توجه به اینکه در طراحی‌های جدید افزایش دبی و کاهش کاویتاسیون مدنظر است، کاهش شعاع چندان مناسب نیست.

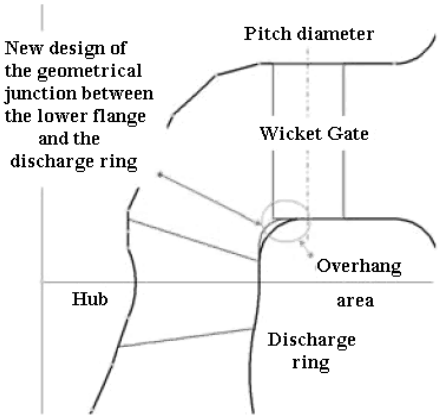
در توربین‌های آبی، اعم از کاپلان یا فرانسیس، عملکرد توربین در شرایط راندمان بالا و بدون کاویتاسیون الزامی است؛ زیرا این امر منجر به کاهش احتمال آسیب به ماهیان و کاهش هزینهٔ جایگزینی رانر می‌شود. حذف پیش‌آمدگی ویکت‌گیت در توربین‌های کاپلان و فرانسیس راندمان توربین را افزایش و فواصل را کاهش می‌دهد. نشتی از میان این فواصل سبب ایجاد گرداب‌های شدید با تنش برشی و پتانسیل آسیب بالا خواهد شد. نحوهٔ حذف پیش‌آمدگی ویکت‌گیت در توربین فرانسیس در شکل ٦ نمایش داده شده است.



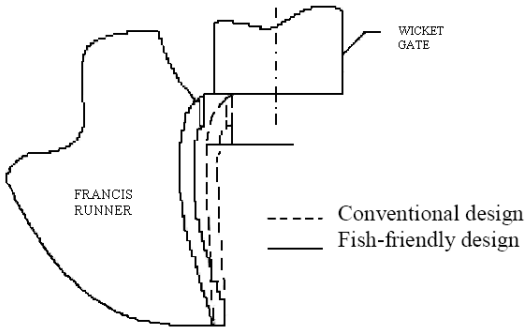
Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir

www.SID.ir

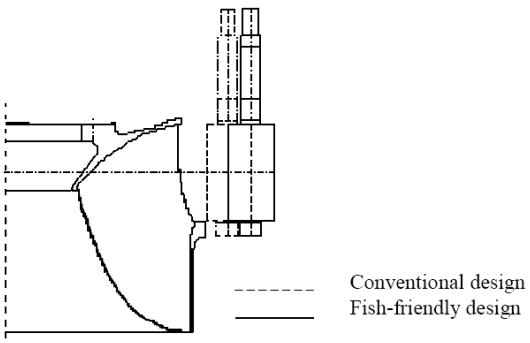
Archive of SID




**شکل ۵. کاهش شعاع فلانج [۴]**




**شکل ۶. حذف پیش‌آمدگی ویکت‌گیت با استفاده از رینگ تخلیهٔ کروی در توربین فرانسیس [۱]**



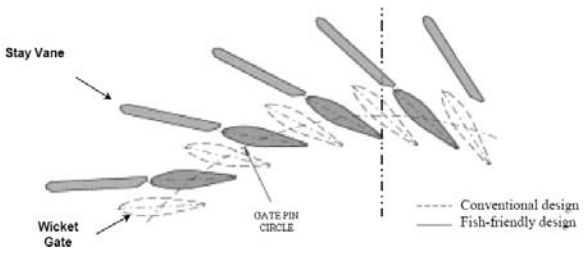

**شکل ۷. افزایش فاصلهٔ میان ویکت‌گیت و رانر [۱]**

همچنین در توربین‌های فرانسیس می‌توان با افزایش فاصلهٔ ویکت‌گیت تا رانر و همراستا کردن ویکت‌گیت با پره‌های ثابت آسیب ضربه و سایش را کاهش داد (شکل ۷).

افزایش فاصلهٔ میان لبهٔ ویکت‌گیت و رانر می‌تواند با افزایش قطر پین دایره‌ای به‌دست آید. می‌توان با استفاده از روش CFD محل قرارگیری ویکت‌گیت‌ها و پره‌های ثابت را بهینه کرد و آشفتگی سیال و ضربه‌های مکانیکی ناشی از بازشدگی‌های متفاوت دریچه‌ها را کمینه نمود.

شکل ۸ قرارگیری مناسب ویکت‌گیت‌ها را در برابر پره‌های ثابت نمایش می‌دهد. این وضعیت قرارگیری، راندمان را بیشینه و احتمال برخورد را کمینه می‌کند. از سوی دیگر استفاده از گریس و سیال زیست تجزیه‌پذیر ویژهٔ روغن‌کاری در کاسهٔ چرخ توربین و نیز استفاده از بوش‌های ویکت‌گیت بدون گریس می‌تواند از ایجاد آلودگی جلوگیری کرده و کیفیت آب را برای آبزیان پایین‌دست نیروگاه در حد قابل قبولی نگه دارد.

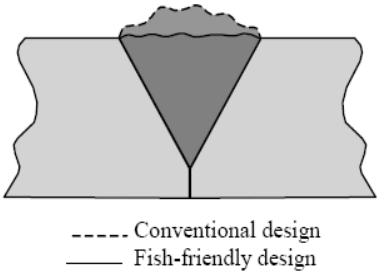
یکی دیگر از عوامل آسیب به ماهیان زبری سطوح جوشکاری‌شده است. با پرداخت سطوح جوشکاری‌شده نظیر پره‌های ثابت توربین، ویکت‌گیت‌ها و مخروط درافت تیوب می‌توان احتمال ایجاد خراشیدگی در ماهیان را کاهش داد. شکل ۹ الگویی از محل جوش پرداخت‌شده و پرداخت‌نشده را نمایش می‌دهد.



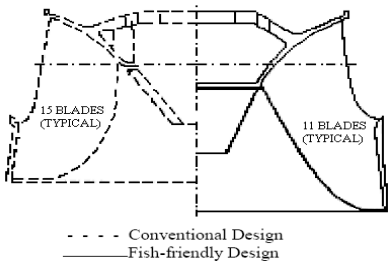

**شکل ۸ .قرارگیری مناسب ویکت‌گیت‌ها در برابر پره‌های ثابت [۱]**


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۹. الگویی از اتصال جوشکاری پرداخت‌شده و پرداخت‌نشده [۱]**




**شکل ۱۰. طرح نهایی به‌دست آمده با کاهش تعداد تیغه‌های توربین فرانسیس [۱]**

در مکان‌های که سرعت پایین است، صاف‌کردن سطوح ضروری نیست و این کار می‌تواند باعث افزایش هزینه شود. ترمیم سطوح تخریب‌شده، استفاده از پوشش‌های خاص و کاهش زبری جوشکاری از جمله راه‌کارهای پیشنهادی جهت کاهش زبری است. از جمله مکان‌هایی که صاف‌بودن آنها حائز اهمیت است، ستون‌های درافت تیوب می‌باشد. با توجه به اینکه به‌دلایل سازه‌ای برداشتن ستون‌های درافت تیوب امکان‌پذیر نیست، بنابراین لازم است طراحی ستون‌های درافت تیوب به‌طور کاملاً صاف باشد (گردکردن برجستگی‌ها) تا جدایش جریان و احتمال برخورد را کاهش دهد.

تعداد تیغه‌ها در توربین‌های فرانسیس بسیار حائز اهمیت است. با استفاده از تعداد کمتر تیغه‌ها احتمال برخورد کاهش و اندازهٔ معبر جریان افزایش می‌یابد. همچنین احتمال آسیب خراشیدگی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. در ظرفیت برابر قدرت تولیدی تعداد کمتر تیغه‌ها به معنی داشتن تیغه‌هایی طویل‌تر است. شکل ۱۰ طرح نهایی به‌دست آمده براساس کاهش تعداد تیغه‌ها را نشان می‌دهد.

در توربین‌های فرانسیس جهت ایجاد مشخصه‌های عملکرد یکنواخت‌تر متناسب با هد از تیغه‌هایی با لبهٔ ورودی ضخیم‌تر استفاده می‌شود؛ که در هدهای بالا، لبهٔ ورودی باعث جدایش نخواهد شد. بنابراین آسیب ناشی از تنش‌های سیال به حداقل مقدار ممکن خواهد رسید. همچنین لبهٔ ضخیم‌تر شانس ماهیان برای عبور بی‌خطر و بدون برخورد از اطراف آن را افزایش می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

به‌دلیل اهمیت مسائل زیست – محیطی در نیروگاه‌های برق – آبی، یکی از برنامه‌های جدید طراحان توسعهٔ توربین‌های آبی جهت بهینه‌سازی شرایط عبور ماهیان از توربین به‌همراه افزایش راندمان کلی است. با توجه به اهمیت موضوع و عدم در دسترس بودن منابع داخلی، جهت این بررسی منابع خارجی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، از سال ۱۹۹٤ م، در بخش انرژی دفتر فناوری‌های برق – آبی و باد کشور آمریکا جهت ایمن‌سازی مسیر عبور ماهیان و افزایش بقای آنها تحقیقاتی درخصوص بهینه‌سازی توربین‌های موجود انجام شده است. این مطالعه، در دو بخش مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های سازنده، با هدف طراحی توربینی جدید، قابل استفاده در نیروگاه‌های جدید و یا جایگزینی با توربین‌های موجود انجام شده است. در بخش نخست، طراحی رانری جدید با قدرت تولیدی مؤثر و دوست‌دار محیط زیست مورد نظر بوده است در حالی‌که در بخش دوم با استفاده از نتایج مطالعات انجام‌شده، علاوه بر طراحی رانر


Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

جدید، به بهینه‌سازی توربین‌های موجود جهت عبور ایمن ماهیان پرداخته شده است. در سال ۲۰۰۰ م، آزمایش روی این نوع توربین آغاز شد و در سال ۲۰۰۱ م دو نوع طراحی مربوط به رودخانه‌های بزرگ و رودخانه‌های کوچک صورت گرفت. مراحل مربوط به طراحی و تست این توربین‌ها تا سال ۲۰۰۹ م به اتمام رسید و در سال ۲۰۱۰ م مؤسسات تحقیقاتی مقدمات کار جهت تجاری‌سازی این نوع توربین و گسترش آن را به انجام رساندند [۳].


## سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از دفتر تحقیقات سد و نیروگاه، معاونت طرح و توسعه سد و نیروگاه، سازمان آب و برق خوزستان تشکر و قدردانی کنند.


## منابع


[1] Odeh M., "A Summary of Environmentally Friendly Turbine Design Concepts", U.S. Department of Energy Idaho Operations Office, (1999).

[2] Glenn F. Cada, "The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival ", Fisheries, Vol. 26, pp. 14-23, (1999)

[3] "Fish- Friendly Hydropower Turbine Development and Deployment: Phase II", Electric Power Research Institute, on-line available at: www.epri.com, (2008).

[4] Loiseau F., Davison R.A., Coutston M., Sabourin M., "Fish Environment & New Turbines Design", 23rd IAHR Symposium – Yokohama, (2006).

[5] Sale M.J., Cada G. F., Rinehart B. N., Sommers G. L., Brookshier P. A. and Flynm J. V., " Status of The U.S. Department of Energy's Advanced Hydropower Turbine Systems Program", U.S. Department of Energy Idaho Operations Office, (2001).

[6] Gooch E., "Virtual Fish Help Voith Hydro Make Green Power Source Greener", International Journal on Hydropower & Dams, Issue of Civil Engineering, (2001).

[7] "Advanced Hydropower", U.S. Climate Change Technology Program- Technology Options for the near and Long Term, pp.23-24, (2005).

[8] Gada G., Carlson T.J, Dauble D.D, Haunt R.T, Sale M.J, Sommers G.L, "DOE Hydropower Program Annual Report for FY 2003", U.S. Department of Energy, (2004).


## پی‌نوشت

1. The U.S. Department Of Energy (D.O.E), part of the office of Wind and Hydropower Technologies

* * *

www.SID.ir