مروری بر روش‌های بازیابی انرژی از خطوط انتقال آب توسط توربین‌های پمپی

زهرا محمدی دوقزلو [۱]، مرتضی خشه‌چی [۲،*]، مسعود دهقانی صوفی [۳]، سعید مقدم [۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (Zahra.mohammadi76@ut.ac.ir)
۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (m.khashehchi@ut.ac.ir)
۳. استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (dehghanisoufi@ut.ac.ir)
۴. استادیار گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (saiedmoghaddam@ut.ac.ir)

چکیده

آب و انرژی از جمله منابع اساسی توسعه زندگی بشر و جامعه است. گرمایش جهانی، افزایش روزافزون جمعیت و روند پرشتاب توسعه صنعتی، بحران کمبود آب و عدم توازن در روند عرضه و تقاضای انرژی را تشدید کرده است. این بدان معناست که باید اقدامات عملی بیشتری در جهت التزام به مبانی توسعه پایدار، به ویژه در کشورهای در حال توسعه صورت گیرد. در ایران، سالانه ۱۵ درصد از منابع آب آشامیدنی به دلیل نشت در سامانه‌های توزیع آب هدر می‌رود. از طرفی انرژی برق‌آبی با سهم ۱۱ درصد، مهم‌ترین انرژی تجدیدپذیر تولیدی در ایران است. در این مطالعه انواع میکروتوربین‌های تولید انرژی برق‌آبی از فشار مازاد خطوط شبکه انتقال آب با تاکید بر میکروتوربین‌های پمپی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در نتیجه با قرار دهی میکروتوربین پمپی به عنوان جایگزین یا مکمل یک شیر کاهش فشار می‌توان از هدر رفت آب و انرژی آن جلوگیری کرد و از انرژی بازیابی شده به عنوان برق مورد نیاز حسگرها استفاده نمود.

کلمات کلیدی:
انرژی برق آبی، انرژی تجدیدپذیر، فشار مازاد، میکروتوربین آبی

***نویسنده مسئول**
m.khashehchi@ut.ac.ir

مروری بر روش‌های بازیابی انرژی از خطوط انتقال آب توسط توربین‌های پمپی

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان، تقاضا برای مصرف انرژی بطور پیوسته در حال افزایش است. از این رو توانمندی و خودکفایی در تامین انرژی از طریق منابع بومی، یکی از سنجه‌های پیشرفت و امنیت کشورها به شمار می‌رود. در حالی که امروزه ۸۰ درصد از انرژی مصرفی سراسر جهان از سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود که حجم بالای مصرف سوخت‌های فسیلی، جهان را با چالش‌های متعددی روبرو کرده است. بنابراین جوامع امروزه به دنبال دست‌یابی به منابع انرژی تجدیدپذیر که دارای کمترین چالش و برقرار کننده‌ی توازن قدرت در میان کشورها است می‌باشند و بی شک یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی نهفته در آب جاری می‌باشد. انرژی و آب منابع اساسی هستند که در دسترس بودن و کیفیت آنها کاملاً با سبک زندگی انسان و میزان توسعه یافتگی جامعه ارتباط دارد. با توجه به چالش های پیش رو و نیاز به کنار آمدن با کمبود چنین منابعی برای بهینه سازی بهره برداری از آنها به روشی نوآورانه و چند رشته ای، نیاز اساسی وجود دارد.

هدف از مقاله حاضر بررسی فرصت‌های برداشت انرژی از آب توسط نیروگاه‌های برق‌آبی می‌باشد و در حال حاضر هیدروالکتریسیته چیزی در حدود ۳۰ درصد از کل انرژی الکتریکی تولیدی جهان را پوشش می‌دهد. بیشترین مزیت استفاده از نیروگاه‌های برق‌آبی عدم نیاز به استفاده از سوخت‌ها و در نتیجه حذف هزینه‌های مربوط به تامین سوخت است. همچنین عمر متوسط نیروگاه‌های برق‌آبی در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی بیشتر است، به طوری که عمر برخی از نیروگاه‌های آبی که هم‌اکنون در حال استفاده هستند به ۵۰ تا ۱۰۰ سال می‌رسد. امروزه تأسیسات بزرگ آبی هنوز در بسیاری از کشورهای در حال توسعه در حال ساخت است، در حالی که در مناطق صنعتی بیشتر مکان‌هایی با شرایط ایده‌آل مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند و بازار کارخانه‌های بزرگ تقریباً به اشباع رسیده است[۱]. اما شرایط اقتصادی فعلی و انگیزه ایجاد یک ترکیب تولید انرژی با کمترین آسیب زیست‌محیطی منجر به اجرای نیروگاه‌های آبی در مقیاس کوچک در سراسر جهان می‌شود که تولید انرژی بهره‌برداری، از جریان سیالات دارای انرژی هیدرولیکی کم است. چنین شرایطی عموماً به دلیل کم بودن هد موجود (H) یا کاهش جریان‌های حجمی (Q) است مانند استفاده در مسیر رودخانه و خطوط لوله می‌باشد. همچنین، امکان برداشت پتانسیل جریان آب در لوله‌ها یا در کانال‌های باز اغلب به وجود تجهیزات مخصوص طراحی شده بستگی دارد.

برای تامین جریان در خطوط انتقال آب نیازمند ایجاد سطح فشار توسط پمپ‌های خطی می‌باشد. که برای اطمینان از تامین دائمی آب، از فشار اضافی در خطوط انتقال استفاده می‌شود که این فشار مضاعف در برخی نقاط منجر به نشت و ترکیدن لوله می‌شود و بطور میانگین باعث هدر رفتن سالانه ۳۲ میلیارد مترمکعب آب می‌شود [۲]. برای کنترل و حفظ ایمنی شبکه در برابر فشارهای اضافی از حسگرها و شیرهای کاهش فشار مکانیکی و الکتریکی استفاده می‌شود. تغذیه حسگرها توسط باتری‌های سنتی و به روش تعویض مکرر صورت می‌گیرد که از لحاظ فنی و اقتصادی اشکالاتی ایجاد می‌کند. همچنین عمر مفیدشیرهای فشارشکن تقریبا ۵ سال است و تعمیرات و تعویض آنها هزینه گزافی درپی دارد و همچنین فشار اضافی موجود در آب نیز هدر می‌رود؛ بنابراین می‌توان به‌جای شیرهای کاهش فشار و تامین برق مورد نیاز حسگرها از میکروتوربین‌های مخصوصی استفاده کرد [۳]. تاکنون تلاش‌های فراوانی برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر دیگر در این حوزه صورت گرفته که با شکست مواجه شده است. به دلیل اینکه این نوع از انرژی قابل کنترل و همیشه در دسترس نیست و به فضای نصب زیادی نیاز دارد و تجهیزات پایش مورد نیاز در زیرزمین یا

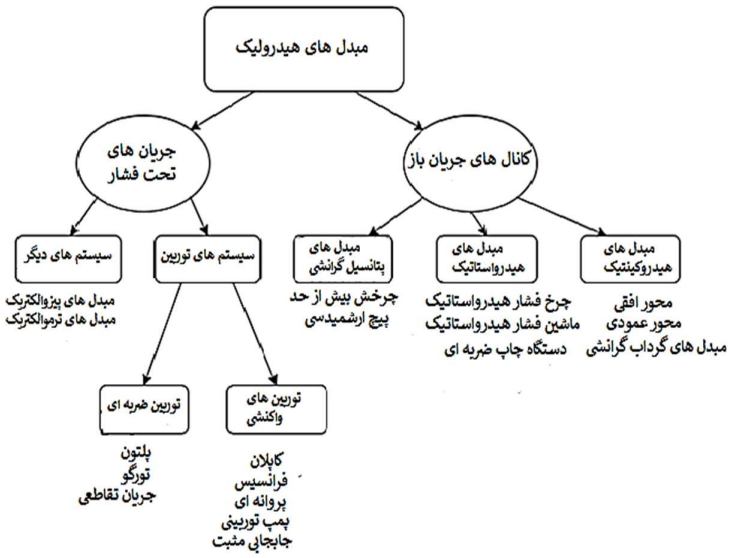
فضای محدود نصب می‌شوند [٤] امروزه با استفاده از میکروتوربین‌های آبی ویژه، که طول عمر مفیدشان چند برابر شیرهای فشارشکن می‌باشد، می‌توان ضمن کاهش فشار آب، با استحصال انرژی الکتریکی از خطوط انتقال و توزیع آب شرب، از مقدار انرژی مفیدی که تاکنون به هدر میرفته بهره‌برداری بهینه کرد. توربینی که در این مطالعه در نظر گرفته شده توربین پمپی (PAT[1]) است که جریان آب را به انرژی الکتریکی قابل استفاده تبدیل می‌کند. در مقایسه با توربین های سنتی، PAT ها، به این معنی که پمپ های گریز از مرکز به صورت معکوس به عنوان توربین برای تولید برق کار می کنند، دارای مزایای مهمی هستند ، از جمله: موجود در بازار ، هزینه کم سرمایه گذاری، نصب و نگهداری آسان و غیره [۹].

توربین‌ها

توربین‌های آبی به عنوان یکی از اصلی‌ترین المان‌های نیروگاه‌های برق‌آبی می‌باشند که با توجه به پتانسیل‌های موجود آبی، در انواع مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند.

کلیه ماشین‌هایی که از طریق دوران محور خود به سیال انرژی می‌دهند یا از سیال انرژی دریافت می‌نمایند و عامل انتقال قدرت، دوران محور ماشین است، توربوماشین نامیده می‌شوند.

توربوماشین‌ها را از منظرهای متفاوتی تقسیم بندی می‌کنند که از نظر نوع سیال مورد استفاده، به دو دسته‌ی تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر مثل آب، روغن، سوخت مایع و غیره کار می‌کنند و دانسیته در طول آن‌ها ثابت می‌ماند، توربوماشین‌های هیدرولیکی یا اصطلاحا آبی گویند که در شکل ۱ نمای کلی از فن آوری‌های ممکن نشان داده شده است.



شکل ۱: انواع فن آوری های برق آبی.

توربین‌های هیدرولیکی معمولاً به دو دسته تقسیم می‌شوند [۵]:

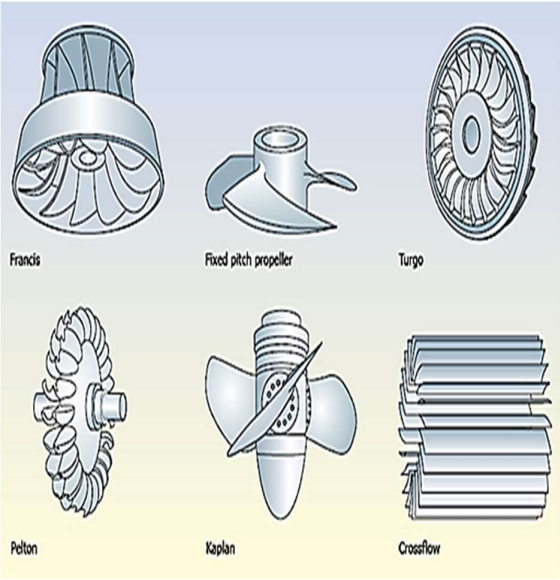
[1] Pump As Turbine

توربین‌های ضربه ای (یا 'اکشن')، که توسط جت‌های آزاد در فشار اتمسفر کار می‌کنند.

توربین‌های واکنشی که در جریان‌های تحت فشار کار می‌کنند.

توربین‌های کوچک آبی (پلتون، تورگو و توربین‌های جریان تقاطعی) جزء توربین‌های ضربه‌ای و توربین‌های (فرانسیس، کاپلان، و پروانه‌ای) جزء توربین‌های واکنشی هستند. توربین پلتون یکی از ساده‌ترین و پربازده‌ترین طرح‌ها برای میکروتوربین با ارتفاع هیدرولیکی بالا است و برای ارتفاع هیدرولیکی پایین استفاده از توربین فرانسیس پیشنهاد می‌گردد [٦]. از قرن نوزدهم چندین مدل توربین طراحی و صنعتی شده متعلق به هر دو طبقه ضربه‌ای یا واکنشی است . نمایش تصویری انواع اصلی قسمت متحرک توربین آب در شکل ۲ نشان داده شده است.

همچنین انواع توربین‌ها و دامنه کاربرد آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است [۷]



شکل۲: متداول ترین انواع گردنده توربین آب

جدول۱: انواع توربین های هیدرولیک و دامنه کاربرد.

توربین‌های هیدرولیک		H(m)	Q(m^3/s)	P(kW)	Ns,p
واکنشی	کاپلانوپروانه‌ای	۲-۲۰	۳-۵۰	۵۰-۵۰۰۰	۲۵۰-۷۰۰
	فرانسیس، Ns زیاد	۱۰-٤۰	۰.۷-۱۰	۱۰۰-۵۰۰۰	۱۰۰-۲۵۰
	فرانسیس، Ns کم	٤۰-۲۰۰	۱-۲۰	۵۰۰-۱۵۰۰۰	۳۰-۱۰۰
ضربه‌ای	پلتون	٦۰-۱۰۰۰	۰.۲-۵	۲۰۰-۱۵۰۰۰	<۳۰
	تورگو	۳۰-۲۰۰	-	۱۰۰-٦۰۰۰	-
	پروانه‌ای	۲-۵۰	۰.۰۱-۰.۱۲	۲-۱۵	-

در ادامه توضیحات مختصری جهت آشنایی با چند مورد از این توربین‌ها ارائه می‌گردد.

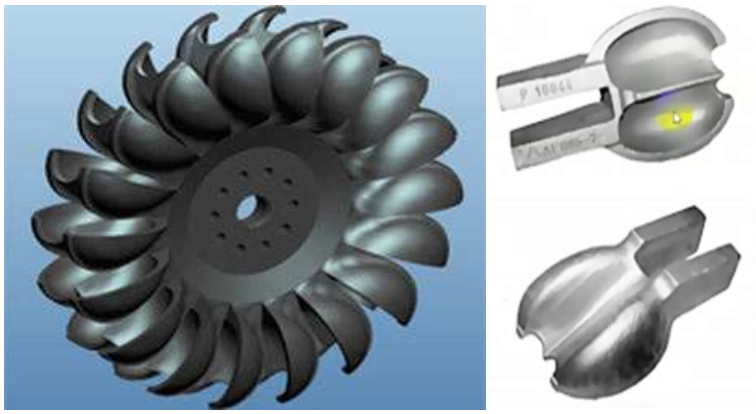
پلتون

توربین پلتون یکی از انواع توربین‌های ضربه‌ای می‌باشد که در ارتفاعات زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اینکه چرخ توربین پلتون به نظر ساده است ولی تحلیل کامل آن بسیار پیچیده می‌باشد زیرا جریان در آن هیچوقت به حالت پایدار نمی‌رسد (به دلیل تغییر پیوسته جریان داخل توربین).

طراحی توربین پلتون همیشه نسبت به توربین‌های عکس‌العملی سخت تر و راندمان آن نیز پایین‌تر است و در واقع توربین پلتون دارای ٤ نوع جریان می‌باشد[٨]:

1. **جریان پایدار سیال داخل لوله و انژکتور؛**
2. **جت آزاد آب[2]؛**
3. **جریان آزاد و غیر پایدار سه بعدی داخل پره؛**
4. **جریان دو فاز[3] سیال پراکنده شده داخل محفظه توربین؛**

توربین پلتون دارای سرعت مخصوص ۲ تا ١٦ دور در دقیقه می‌باشد که معمولا در ارتفاعات حدوده ٥٠٠ تا ٦٠٠ متری قرار دارند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود این توربین‌ها متشکل از یک چرخ متحرک که در روی محیط خارجی آن به فواصل معین، تعدادی پره به شکل قاشقک یا شیپوره نصب شده است می‌باشد[٩]. مطلب با اهمیت دیگر این است که در ارتفاعات زیاد، خوردگی پره‌ها به علت سرعت زیاد فواره‌ها بیشتر می‌شود[٩]. بنابراین هنگام استفاده از توربین پلتون با سرعت مخصوص زیاد در ارتفاعات زیاد باید در جنس و شکل پره‌ها و طراحی آن دقت کافی به عمل آید.



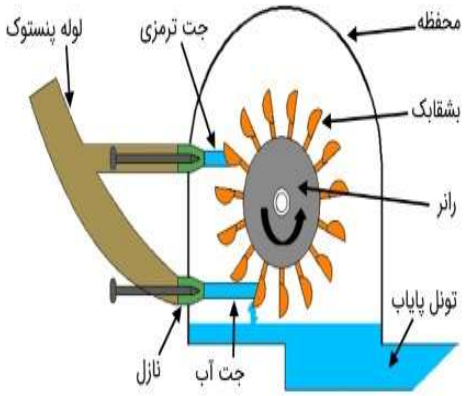
شکل۳: نمای کلی توربین پلتون

عملکرد میکروتوربین‌های پلتون

آب با برخورد به قاشقک‌های توربین باعث انتقال انرژی پتانسیل آب، که در موقع خروج از نازل به صورت انرژی جنبشی درآمده است می‌شود و این انرژی توسط چرخ توربین به انرژی مکانیکی تبدیل می‌گردد که قابل انتقال در محور توربین می‌باشد. همچنین فواره آب با برخورد به پره‌ها از مسیر خود منحرف می‌شود و به دو قسمت مساوی

[2] Free Surface Water
[3] Two Phase Flow

تقسیم می‌گردد و هر قسمت از فواره مسیری مماس بر جداره پره‌ها را طی می‌کند و در این وضعیت، انرژی جنبشی به چرخ انتقال داده می‌شود[۱۰]. در توربین پلتون در حوالی تمامی بارها راندمان هیدرولیکی بین ۹۰ تا ۹۳ درصد تغییر می‌کند، و ضریب سرعت نیز بین ۹۶ تا ۹۸ درصد می‌باشد. که در شکل ٤ اجزا و نحوه کارکرد توربین پلتون را نشان می‌دهد[۹].



شکل٤: نحوه کارکرد توربین پلتون

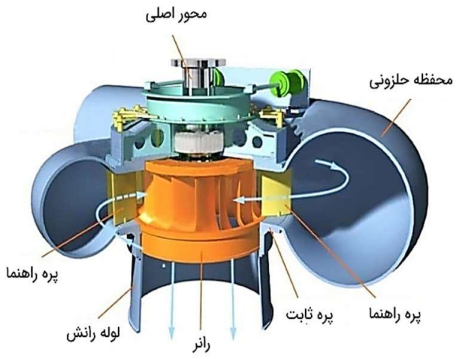
مزایای این توربین عبارتند از نگهداری آسان، قابل استفاده در هدهای[4] بالا و تخلیه کم، عدم رخ دادن پدیده کاویتاسیون و همچنین به دلیل
ورود و خروج آب در فشار جوی نیاز به لوله برش ندارد. معایب آن نیز عبارتند از کارکرد مناسب در هدهای بالا، بزرگ بودن سایز توربین، کاهش کارایی آن با گذشت زمان، و همچنین به دلیل هد زیاد، کنترل تغییرات در هد عملیاتی بسیار دشوار است .

توربین فرانسیس

در حال حاضر، رایج‌ترین و محبوب‌ترین توربین در صنعت، توربین فرانسیس است که از نوع واکنشی به حساب می‌آید. امروزه توربین فرانسیس در هدهای متوسط و زیاد، بیشترین کاربرد را دارد[۹] .

بیشتر توربین‌های فرانسیس طوری ساخته می‌شوند که محورشان عمودی قرار بگیرد. برخی توربین‌های کوچکتر می‌توانند محورهای افقی هم داشته باشند. در شرایطی که محدودیتی برای اندازه وجود نداشته باشد، توربین عمودی انتخاب اول است. شکل ٥، قسمت‌های مختلف توربین فرانسیس را نشان می‌دهد. شکل پره‌ها در توربین فرانسیس طوری است که می‌تواند به صورت همزمان از انرژی جنبشی و پتانسیل سیال برای تولید توان استفاده کند. در نتیجه، دیگر نگرانی برای افت هد وجود نخواهد داشت.

[4] Head

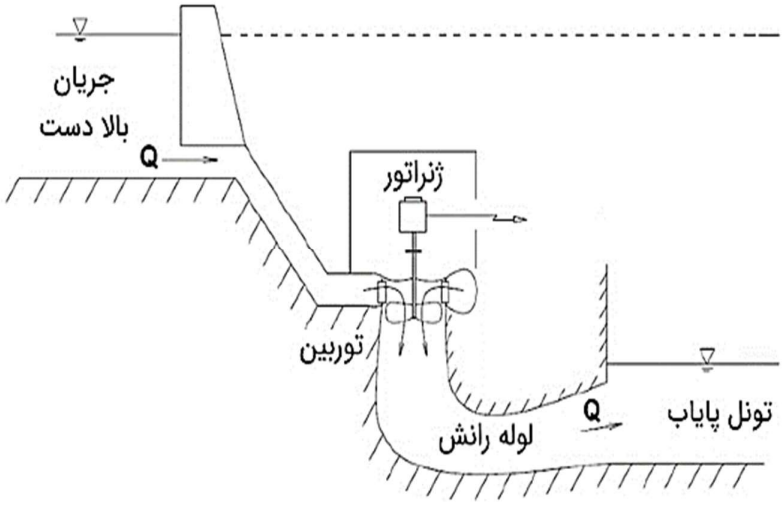


شکل۵: قسمت‌های مختلف توربین فرانسیس

عملکرد توربین فرانسیس

آب از طریق محفظه حلزونی توربین، به سمت پره‌های ثابت و راهنما روانه می‌شود. حالت مارپیچی در اینجا با قطر کاهنده نگهداری می شود تا فشار جریان حفظ شود. با رسیدن آب به پره‌های ثابت، پره‌های ثابت موجب می‌شوند تا چرخش از حرکت آب حذف شود و جریان آب، رفتار خطی و مستقیم پیدا کند. خطی بودن جریان آب، در مرحله بعد به کمک پره‌های راهنما خواهد آمد. زیرا منحرف کردن جریان خطی توسط این پره‌ها راحت‌تر انجام می‌گیرد و زاویه پره‌های راهنما، زاویه حمله را در پره‌های رانر[5] تعیین می‌کند. از طرف دیگر، پره‌های رانر هم ثابت هستند و زاویه آنها قابل تغییر نیست. در نتیجه، با تنظیم پره‌های راهنما، می‌توان خروجی توان توربین را کنترل کرد. عملکرد و کارایی توربین فرانسیس به طراحی پره‌های رانر بستگی دارد و در یک توربین فرانسیس، پره‌های رانر به دو قسمت تقسیم می‌شوند. نیمه پایینی به شکل یک سطل کوچک ساخته شده است به طوری که از فشار ضربه‌ای آب برای چرخش توربین استفاده می‌کند قسمت دیگر یا همان قسمت بالای تیغه ها از نیروی واکنش آب جاری شده در آن استفاده می‌کند. بنابراین، پره‌های دونده هم از انرژی فشار و هم از انرژی جنبشی آب استفاده می‌کنند و دونده را با کارآیی بیشتر می‌چرخانند و حداکثر توان خروجی توربین فرانسیس می‌تواند به ۳۵۰ مگا وات برسد[۹].

[5] Runner



شکل ٦: عملکرد توربین فرانسیس

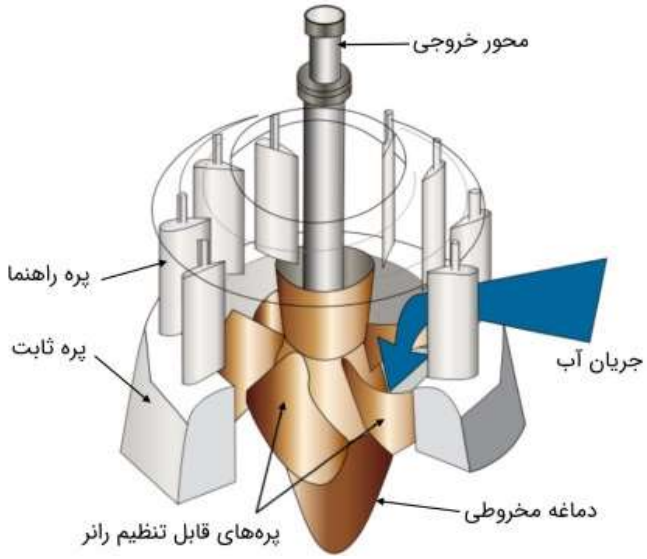
مزایای این توربین عبارتند از کوچک بودن اندازه‌ی رانر، کنترل آسان تغییرات هد، کنترل آسان تفاوت در هد عملیاتی نسبت به توربین پلتون، عدم رخ دادن هیچ گونه شکستگی هد در هنگام تخلیه کم آب و بازده مکانیکی توربین چرخ پلتون با سرعت بیشتری نسبت به توربین فرانسیس کاهش می‌یابد. معایب این توربین نیز عبارتند از دسترسی سخت به رانر، تعمیر و بازرسی بسیار دشوار و وجود حفره.

کاپلان

این نوع توربین در محدوده هدهای متوسط برای تولید برق در برخی از نقاط کشور، به عنوان یک انتخاب جدی مطرح می‌باشد. مسئله عملکرد این نوع توربین‌ها در شرایط کاری متفاوت و شناسایی دقیق از چگونگی تاثیر برخی پارامترهای هندسی و یا عملکردی در راندمان و توان تولیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با اضافه شدن پره‌های قابل تنظیم، توربین کاپلان در طیف وسیعی از دبی و ارتفاع هد قادر است راندمان مناسبی را فراهم کند. شکل ۳، شماتیک این توربین را نشان می‌دهد.

همچنین گشتاور انتقالی در این توربین‌ها بسیار بالا و طول پره‌ها نیز بزرگ است. در نتیجه، برای برطرف کردن نیازمندی‌های مربوط به مقاومت پره‌ها، وتر ایرفویل آنها باید بزرگ انتخاب شود. معمولاً کارخانه‌ها نسبت تاب به وتر (Pitch-Chord Ratio)را عددی بین ۱ تا ۱/۵ طراحی می‌کنند. بنابراین، تعداد پره‌ها کم و در حدود چهار، پنج یا شش عدد است. در روتور توربین کاپلان، می‌توان زاویه قرارگیری (Stagger Angle) پره را کنترل کرد. این ویژگی در هیچ یک از سایر انواع توربین وجود ندارد و فقط منحصر به توربین کاپلان است. در شرایط بار جزئی، زاویه قرار گرفتن پره‌های رانر به صورت خودکار تنظیم می‌شود تا بهینه‌ترین حالت ممکن حاصل شود.

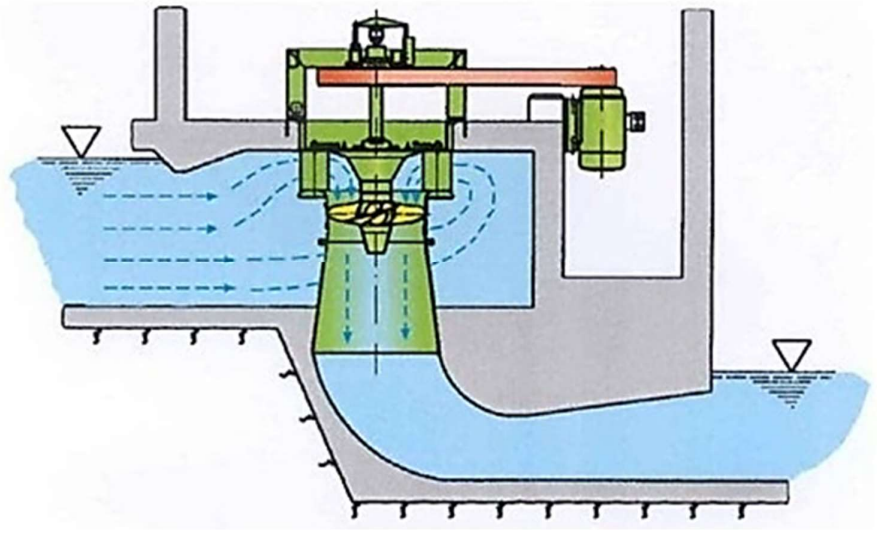


شکل۳: شماتیک توربین کاپلان

عملکرد توربین کاپلان

هد فشار مورد نیاز برای این توربین در مقایسه با توربین فرانسیس بسیار کمتر است. در توربین کاپلان برای رسیدن به توان زیاد، به دبی حجمی بسیار زیادی نیاز است. به عبارت دیگر، عبارت $Q\times HE$ باید بزرگ باشد. در حین عبور آب از داخل توربین کاپلان، دبی عبوری از جهت شعاعی به جهت محوری تغییر می‌کند. شکل ٤، برشی از محل نصب توربین کاپلان را نشان می‌دهد.

آب از طریق محفظه حلزونی به پره‌های راهنما می‌رسد. پره‌های راهنما به اندازه‌ی مورد نیاز رانر، در حرکت آب، چرخش ایجاد می‌کنند. آبی که از پره‌های راهنما عبور می‌کند، به دلیل شکل مجرا در جهت محوری حرکت می‌کند و حرکت چرخشی به ورتکس آزاد تبدیل می‌شود. ورتکس آزاد تشکیل شده را می‌توان با رابطه $rc\theta=a$ نشان داد که a یک مقدار ثابت است. پره‌های رانر، شباهت زیادی به پره‌های روتور در توربین‌های محوری دارند. با این تفاوت که در اینجا، لبه پره‌ها کمی خم شده است تا برای جریان ورتکس آزاد در ورودی و جریان محوری در خروجی مناسب باشد.



شکل٤: محل نصب توربین کاپلان

این توربین‌ها دارای مزایایی می‌باشند که عبارتند از این‌که این توربین برای هد فشار کم مناسب است پس می‌توان از آن در نیروگاه‌های واقع در مناطق کم ارتفاع استفاده کرد همچنین با توجه به فراهم بودن دامنه وسیعی از اندازه توربین و توان خروجی، قادر به جایگزینی میکروتوربین‌ها با سدهای بزرگ می‌باشد و نیازمندی‌های مربوط به عامل هد فشار کم در کنار کوچک بودن لندازه این توربین، موجب پایین آمدن هزینه‌ها می‌شود همچنین سدهایی که با طراحی توربین کاپلان ساخته می‌شوند، اثرات مخرب کمتری برای محیط زیست (از نظر وقوع سیلاب) به همراه دارند و معایب آن نیز عبارتند از توربین‌های کاپلان بیشتر در مناطقی نصب می‌شوند که مسیر مهاجرت ماهی‌ها از آن می‌گذرد. به همین دلیل، الگوی مهاجرتی ماهی‌ها و نرخ مرگ و میر آنها به شدت از وجود این توربین تأثیر می‌پذیرد و سرعت بالای این توربین می‌تواند منجر به نشت روان‌کننده‌های پایه روغنی و آلودگی محیطی شوند همچنین نرخ بالای تخلیه در این توربین، باعث کاهش فشار آب در نزدیکی آن می‌شود. در نتیجه، توربین کاپلان در مقابل بروز پدیده کاویتاسیون، بسیار آسیب‌پذیر خواهد بود .

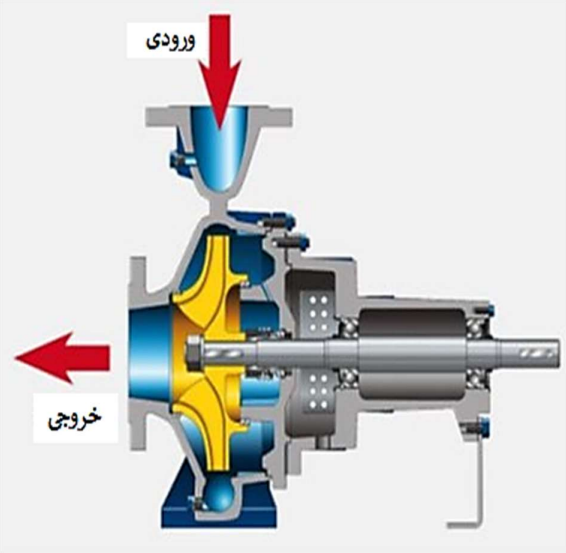
PATها

PAT ها به عنوان راه حل‌های مقرون به صرفه برای تجهیز نیروگاه‌ها در سیستم‌های آبرسانی (WSS[6])، جایی که نصب واحدهای برق آبی معمولی غیرممکن است، نشان داده می شوند [۱۵]. این امر عمدتا توسط نیروی هیدرولیکی کم موجود برای بازیابی ایجاد می‌شود. PAT ها، پمپ‌هایی هستند که به صورت صنعتی ساخته می‌شوند و جریان در آن‌ها برعکس می‌شود. در نتیجه، PAT به جای تبدیل نیروی شافت مکانیکی به نیروی هیدرولیک سیال (عملکرد عادی پمپ)، از انرژی اضافی موجود در سیال استفاده می‌کند و آن را به قدرت شافت مکانیکی تبدیل می‌کند، سپس برای راه اندازی ژنراتور برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. میزان جریان و هد دو پارامتر اصلی

[6] water supply systems

طراحی برای انتخاب PAT **هستند. در مقایسه با رودخانه‌ها، آب فاضلاب یا منابع دیگر برای تأمین نیروگاه برق آبی، به دلیل تغییر تقاضای کاربر در طول زمان، آب شیرین در** WSS **یک ساختمان بلند مرتبه دارای نوسان بیشتری است. این ویژگی برای تعیین میزان جریان طراحی برای انتخاب** PAT **دارای یک چالش است.**

بازیابی انرژی از WSS **شامل دو هدف اساسی می‌باشد: ۱. با بهره برداری از منابع محلی موجود، بهره‌وری انرژی زیرساخت‌ها را افزایش می دهد. و ۲. همزمان با تولید انرژی برق‌آبی تجدیدپذیر به طور همزمان منجر به صرفه جویی در انرژی و افزایش درآمد شرکت آب در طول عمر زیرساخت‌ها می‌شود. همچنین با ادغام نیروگاه‌های میکرو آبی در** WSS **نیاز کمتری به کارهای ساختمانی مشاهده می‌شود و در مقایسه با نیروگاه های معمولی دارای تأثیرات زیست محیطی کمتری است، زیرا نصب این نیروگاه ها فقط به حداقل کارهای سازگاری در زیرساخت های موجود نیاز دارد. یک روش معمول برای کاهش فشار مازاد در خطوط انتقال آب قرار دادن مخازن فشارشکن** (BPT[7]) **است که باعث اتلاف انرژی اضافی می‌شود**. چنین سیستم‌هایی می‌توانند به طور موثر توسط یک توربین معمولی، PAT جایگزین شوند. رفتار فیزیکی PATها **مشابه توربین‌های فرانسیس است**، اما بدون امکان تنظیم جریان است. نمایشی از PAT گریز از مرکز در شکل ۵ نشان داده شده است.

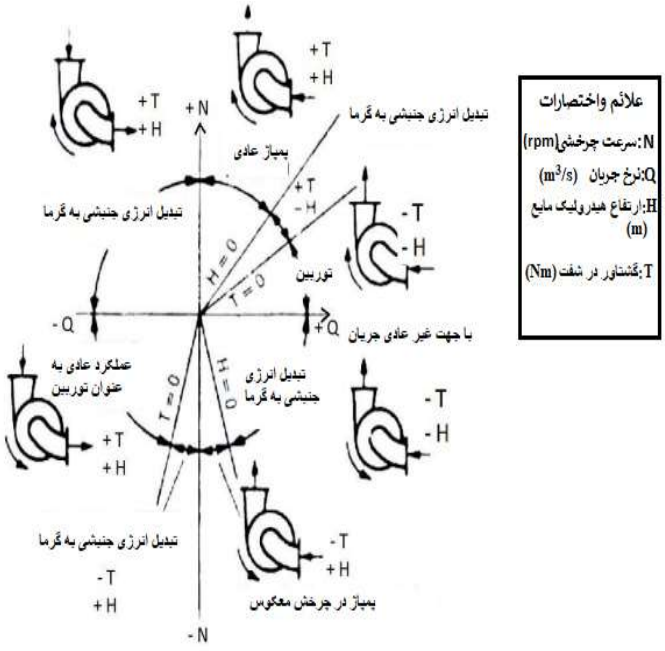


شکل۵: پمپ گریز از مرکز توربینی

تعویض یا جایگزینی شیر کاهش فشار (PRV[8]) **با** PAT **یکی از اصلی‌ترین تمرکز شرکت‌های آب برای تضمین فشار کافی در سراسر شبکه‌های لوله برای رسیدن به مصرف کنندگان و جلوگیری از آلودگی است. اپراتورهای سیستم سعی می‌کنند از چنین فشارهای زیادی جلوگیری کنند، زیرا علت افزایش نشتی از طریق اتصالات یا لوله‌های شکاف‌دار است که به معنی اتلاف منابع، کاهش بهره‌وری کلی سیستم، افزایش نیازهای نگهداری و خسارات اقتصادی است. معمول‌ترین راه برای کنار آمدن با فشارهای زیاد استفاده از شیرهای کاهش فشار است. قدمت شیرهای کاهش فشار مدرن به اوایل قرن ۲۰ برمی گردد و در اندازه‌ها و انواع مختلفی موجود است. در طول دهه‌های گذشته، علاقه‌مندی به نصب** PAT **در داخل لوله‌های آب افزایش یافته است تا بتواند پتانسیلی را که در غیر این صورت با استفاده از** PRV

[7] Pressure breaker tanks
8 Pressure relief valve

از بین می‌رود، بازیابی کند. همانطور که توسط زاکور تخمین زده شده است در سال ۲۰۰۲، تنها در انگلیس پتانسیل بازیابی انرژی از جایگزینی PRV با PAT می‌تواند حدود ۱۷ مگاوات باشد [۱۱]. منطقه عملیاتی یک پمپ را می‌توان با توجه به سرعت چرخش شافت (N) و سرعت جریان پردازش شده (Q) به چهار بخش تقسیم کرد که در شکل ٦ نشان داده شده است. علائم عملیات پمپاژ به طور معمول مثبت هستند [۱۲].



شکل ٦: چهار ربع عملکرد جریان شعاعی PAT

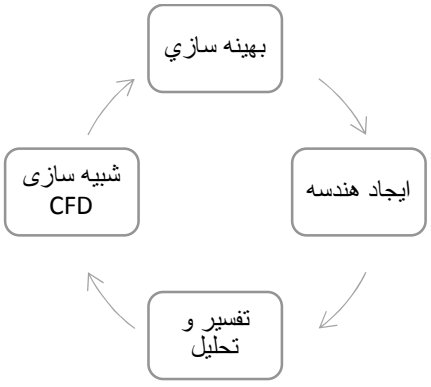
ربع اول به عملیات پمپاژ طبیعی با N، Q و H مثبت و گشتاور مقاوم اعمال شده T اشاره دارد. با این حال، در ربع سوم، همان ماشین به عنوان توربین با معکوس کردن جریان (-Q) کار می‌کند؛ که در این صورت اگر هد موجود(H) برای غلبه بر گشتاور مقاوم در برابر T کافی است، این موتور، موتور ژنراتور متصل را قادر می‌سازد تا با چرخش شافت با سرعت برابر با N انرژی تولید کند. شکل ۹ منحنی‌های مشخصه PAT را به فضای H-Q منتقل می‌کند. آشکار است تأثیر سرعت چرخش بر روی منحنی‌های عملکرد در هر دو حالت توربین و پمپاژ برای یک پمپ گریز از مرکز همچنین، همانطور که توسط سینگ بیان شده است [۱۳]، می‌توان متوجه شد که عملیات توربین محدود به منطقه‌ای است که بین پیکربندی 'سرعت صفر' (N = 0) و 'خط بدون بار' تشکیل شده است، و خط دوم مربوط به مشخصه فرار است (M = 0) . شرایط فراری یکی از مهم‌ترین مواردی است که هنگام طراحی نصب PAT نگران کننده است، زیرا افزایش سرعت پروانه می‌تواند باعث ایجاد پدیده چکش آب شود که نمایانگر خطری برای دستگاه هیدرولیک است [۱۳]

۱. مزایای این توربین عبارتند ازهزینه های سرمایه گذاری، ممکن است کمتر از ۵۰٪ هزینه های یک توربین قابل مقایسه باشد (به خصوص برای واحدهای کوچک زیر ۵۰ کیلووات) و عدم وجود دستگاه کنترل جریان، که معمولاً به عنوان یک نقص احساس می‌شود، در عین حال یک مزیت است زیرا ساخت پمپ را ساده‌تر می‌کند همچنین به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها (آبیاری ، صنعت ، تأمین آب)، پمپ‌های استاندارد به راحتی در دسترس هستند و تولید کنندگان و نمایندگان آن‌ها در سراسر جهان حضور دارند همچنین قطعات یدکی

به راحتی در دسترس هستند زیرا تولید کنندگان عمده پمپ خدمات پس از فروش را تقریباً در سراسر جهان ارائه می‌دهند و نگهداری آن‌ها نیز آسان می‌باشد و این توربین دارای معایبی نیز می‌باشد که شامل عدم وجود دستگاه کنترل هیدرولیک می-باشد بنابراین برای راه اندازی و توقف PAT، باید یک شیر کنترل در خط پنست گنجانده شود (هزینه های اضافی). افزایش تلفات هیدرولیکی هنگام استفاده از شیر برای سازگاری با تغییرات فصلی جریان. حداکثر کارایی: بازده PAT ها نسبت به توربین های پیچیده از دامنه متوسط تا زیاد تولید که به بیش از ۹۰٪ می رسند ، پایین ترند. PAT ها در صورت عدم برتر بودن از توربین های پلتون و جریان متقاطع که به صورت محلی تولید می شوند ، به بازدهی قابل مقایسه ای می رسند.

دلیل ارجحیت PATها نسبت به بقیه میکروتوربین‌ها

توربین‌های پلتون و تورگو می‌توانند در هدهای متوسط یا زیاد مورد استفاده قرار گیرند، اما معمولاً در محیط‌های باز نصب می‌شوند و رانر در آب غوطه‌ور نمی‌شود، بنابراین این توربین‌ها برای استفاده در WSS مناسب نیستند. همچنین بر اساس تحقیقات قبلی، توربین جریان متقاطع هنگام استفاده در WSS برای تولید برق عملکرد خوبی دارد، اما عملکرد آن در کاهش هد آب بسیار ضعیف است [۱۴]. مشابه توربین‌های جریان متقاطع، توربین پروانه‌ای وسیله‌ای امیدوار کننده برای تولید برق در WSS به اثبات رسیده است، اما کاهش هد از طریق آن بسیار کمتر از تقاضای تأمین آب در ساختمان‌های بلند مرتبه است [۱۵]. همچنین بازده توربین‌های فرانسیس هنگامی که در سایت‌های میکرو استفاده می‌شود معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است، با این وجود هزینه طراحی و ساخت توربین‌های فرانسیس نسبتاً زیاد است [۱۶]. بنابراین یکی از بهترین گزینه‌ها استفاده از PATها است که از نظر هزینه و منابع محاسباتی به صرفه‌تر می‌باشد. همچنین این روش باید انعطاف‌پذیر باشد تا بتواند در آینده برای انجام بهینه‌سازی مشابه با مشکلات جدید استفاده شود. روش بهینه‌سازی به چهار مرحله تقسیم شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. با اتمام طراحی هندسه مدنظر وارد مرحله مش زنی شده که یک شبکه مشبک ساخته می‌شود. سپس تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[9]) در شبکه انجام می‌شود و در نهایت، نتایج حاصل شده در الگوریتم بهینه‌سازی ارزیابی می‌شود و طرح جدیدی پیشنهاد می‌گردد.

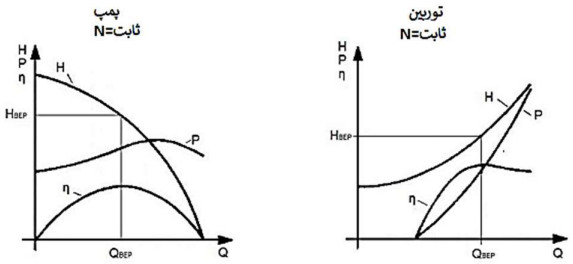


شکل۷: مروری بر روند بهینه سازی

مطالعات صورت گرفته در این زمینه

[9] Computational fluid dynamics

پمپ‌های سانتریفیوژ برای کاربردهای گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بسیاری از کشورها سراسر دنیا تولید می‌شوند. اولین اشاره به احتمال استفاده از PAT به اوایل دهه ۱۹۳۰ برمی‌گردد و مربوط به آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط توما و کیتردژ است [۱۷]. انگیزه جدیدی از تحقیقات پس از نیمه دوم قرن بیستم از برخی صنایع تولید پمپ حاصل شد، که برای دستیابی به درک عمیق از پدیده‌های مرتبط با استفاده از PAT با چندین موسسه تحقیقاتی همکاری ایجاد کرد. تلاش‌های ویژه‌ای برای توسعه روش های پیش‌بینی منحنی مشخص و کارایی در بهترین نقطه کارایی (BEP[10]) ماشین آلات در حالت توربین مربوط به مشخصات آن هنگام استفاده به عنوان پمپ انجام شد [۱۳]. به دلیل تفاوت در تلاطم جریان و تلفات اصطکاک، نقطه کار با بالاترین بازده در حالت پمپ‌به طور قابل توجهی با موقعیت BEP در حلت توربین متفاوت خواهد بود. از نظر هیدرولیکی، یک PAT قادر به پردازش دبی بیشتر با توجه به عملیات پمپاژ معمولی خواهد بود. نمایش گرافیکی منحنی عملکرد معمول برای پمپ گریز از مرکز در هر دو حالت در شکل ۸ نشان داده شده است [۱۲].



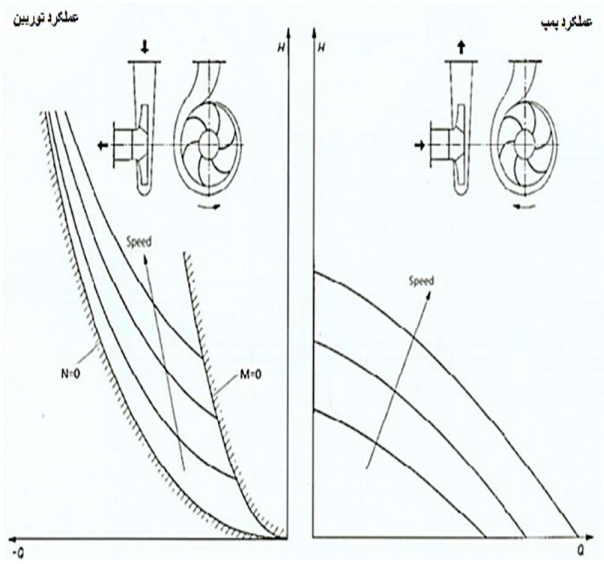
شکل ۸: منحنی عملکرد عمومی پمپ ها و توربین‌ها [۱۸]

در مقایسه با توربین‌های سنتی، PAT ها به این معنی که پمپ‌های گریز از مرکز به صورت معکوس به عنوان توربین برای تولید برق کار می‌کنند. یک مطالعه موردی در مورسیا، اسپانیا نشان داد که حداکثر ظرفیت نصب در لوله اصلی تأمین آب با سرعت جریان ۳۰۰ متر مکعب در ساعت و هد آب ۳۰ متر می‌تواند با استفاده از PAT به ۱۰۰ کیلووات برسد [۱۹]. در آلمان، از هشت پمپ سانتریفیوژ موازی با ظرفیت نصب ۳۰۰ کیلووات در WSS برای کنترل فشار و تولید برق در خطوط لوله استفاده شد و سپس برق تولید شده به شبکه تزریق گردید [۲۰]. فونتانا و همکاران سیستم توزیع آب در یک منطقه از ناپل را مورد بررسی قرار داد تا با استفاده از PATها، پتانسیل انرژی تولید برق آبی را ارزیابی کنند [۲۱]. PATها اگرچه تنظیم دقیق هد آب ندارند، اما توازن خوبی بین بازیابی انرژی برق و کاهش هد آب به دست می‌آورند. در تحقیقات فرکاروتا، یک پمپ چند مرحله‌ای برای کاربرد WSS با استفاده از روش‌های عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۲]. نتایج نشان داد که عملکرد PAT بسیار متفاوت از PRV است. برای یک PRV، می‌توان با تغییر درجه دهانه آن، کاهش هد آب را تنظیم کرد. همانطور که برای PAT، با توجه به فضای جریان داخلی، عملکرد آن در کاهش هد به راحتی با تغییر سرعت جریان تأثیر پذیرفت. به منظور حل این مشکل، کاراویتا و همکاران یک طرح نصب PAT طراحی کردند، که در آن یک بای‌پس و دو شیر تنظیم‌کننده برای همکاری با PAT برای تنظیم هد آب و میزان جریان از طریق PAT تصویب شد [۲۳]، بنابراین شرایط کاری PAT می‌تواند در بهترین نقطه کارایی خود باقی بماند و همچنین از کاهش فشار آب اطمینان حاصل شد. تجزیه و تحلیل مربوط به هزینه و فایده این طرح، در یک شبکه لوله آب نصب و مورد آزمایش قرار گرفت، نتایج نشان داد که طرح نصب پیشنهادی از

[10] Best Performance Point

نظر اقتصادی قابل قبول است و تأثیر کمی بر قابلیت اطمینان شبکه های لوله دارد [۲٤]. تحقیقات فعلی در مورد PATهای اعمال شده در WSS عمدتاً بر روی خطوط لوله اصلی، که دارای دبی نسبتاً پایدار و کافی هستند، متمرکز شده‌اند. اولین کاربرد صنعتی PATها را می‌توان در زمینه‌های کاربردی بسیار خاصی در نظر گرفت، یعنی واحدهای بزرگی برای تجهیز نیروگاه‌های آبی پمپاژ شده و واحدهای کوچک برای بازیابی انرژی از جریان مایع فشار بالا در صنایع شیمیایی . در عوض، طی دهه‌های گذشته تعداد زیادی PAT به عنوان مولد نیرو در بسیاری از زمینه‌ها مانند طرح‌های کوچک تولید برق آبی با ویژگی‌های هد کم، WSS و کاربردهای صنعتی به عنوان جایگزینی دریچه‌های گاز، مورد مطالعه و اجرا قرار گرفته‌اند. همانطور که توسط باومگارتن و همکاران توصیف شده است. به طور معمول مثبت هستند [۱۲].

.



شکل ۹: منحنی مشخصه برای عملکرد توربین و پمپ PAT با سرعت متغیر [۱۲]

نتیجه‌گیری

مقایسه بین نتایج پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که PATها برای جلوگیری از کاهش بیش از حد هدآب با سرعت جریان بالاتر عملکرد خوبی دارد و همچنین به جای اتلاف انرژی اضافی، بازیابی انرژی از WSS با استفاده از توربین‌های میکروهیدرولیکی یا PAT به عنوان یک روش موثر برای کنترل سطح فشار در خطوط انتقال آب و استفاده از انرژی بازیابی شده از این خطوط برای تامین برق مورد نیاز حسگرها استفاده شده در شبکه انتقال آب می‌باشد. بازده پمپ به عنوان توربین [۲۰] معمولاً کمتر از توربین های آبی معمولی است. با این وجود ، کارایی معیار اصلی انتخاب اینگونه میکروتوربین‌ها نیست و توصیه می‌شود که از این میکروتوربین‌ها با حداکثر بازدهی استفاده گردد.

مراجع

1. Copeland, C. and N.T. Carter, *Energy-water nexus: The water sector's energy use*. 2014, Congressional Research Service Washington, DC, USA.
2. Xu, Q., et al., *Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits*. Journal of Environmental Sciences, 2014. **26**(5): p. 955-961.
3. Du, J., et al., *Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines*. Energy, 2017. **137**: p. 431-440.
4. Akhtar, F. and M.H. Rehmani, *Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 769-784.
5. Narrain, P., *Low head hydropower for local energy solutions*. 2017: CRC Press.
6. Amjadi, H., M. Khashehchi, and J. Soltani, *Experimental investigation and numerical simulation of an inline low-head microhydroturbine for applications in water pipelines*. IET Renewable Power Generation, 2020. **14**(16): p. 3209-3219.
7. Paish, O., *Small hydro power: technology and current status*. Renewable and sustainable energy reviews, 2002. **6**(6): p. 537-556.
8. Thake, J., *The micro-hydro Pelton turbine manual: Design, Manufacture and Installation for Small-scale Hydropower*. 2000, ITDG publishing.
9. Hassan, M.M., *Current studies on intrusion detection system, genetic algorithm and fuzzy logic*. arXiv preprint arXiv:1304.3535, 2013.
10. Lieberman, M. *Visualizing big data: Social network analysis*. in *Digital research conference*. 2014.
11. Estrada Tarragó, F., *Micro-hydro solutions in Alqueva Multipurpose Project (AMP) towards water-energy-environmental efficiency improvements*. 2014, Universitat Politècnica de Catalunya.
12. Novara, D., W. Stanek, and H. Ramos, *Energy harvesting from municipal water management systems: from storage and distribution to wastewater treatment*. Extended Abstract (Not Peer-Reviewed), 2016.
13. Singh, P., *Optimization of the internal hydraulic and of system design in pumps as turbines with field implementation and evaluation*. 2005.
14. Chen, J., et al., *A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines*. Energy, 2013. **54**: p. 184-193.
15. Caxaria, G.A., D.d.M. e Sousa, and H.M. Ramos. *Small scale hydropower: generator analysis and optimization for water supply systems*. in *World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden*. 2011. Linköping University Electronic Press.
16. Coelho, B. and A. Andrade-Campos, *Efficiency achievement in water supply systems—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **30**: p. 59-84.
17. Thoma, D. and C. Kittredge, *Centrifugal pumps operated under abnormal conditions*. Journal of Power Sources, 1931. **73**(1): p. 881-884.
18. Chapallaz, J.-M., P. Eichenberger, and G. Fischer, *Manual on pumps used as turbines*. 1992.
19. Pérez García, J., A. Cortés Marco, and S. Nevado Santos. *Use of centrifugal pumps operating as turbines for energy recovery in water distribution networks. Two case study*. in *Advanced Materials Research*. 2010. Trans Tech Publ.
20. Jain, S.V. and R.N. Patel, *Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **30**: p. 841-868.
21. Fontana, N., M. Giugni, and D. Portolano, *Losses reduction and energy production in water-distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012. **138**(3): p. 237-244.

22. Fecarotta, O., A. Carravetta, and H. Ramos, *CFD and comparisons for a pump as turbine: Mesh reliability and performance concerns.* International Journal of Energy & Environment, 2011. **2**(1).
23. Carravetta, A., et al., *PAT design strategy for energy recovery in water distribution networks by electrical regulation.* Energies, 2013. **6**(1): p. 411-424.
24. Carravetta, A., et al., *Cost-benefit analysis for hydropower production in water distribution networks by a pump as turbine.* Journal of Water Resources Planning and Management, 2014. **140**(6): p. 04014002.

An overview of energy recovery methods from water transmission lines by pump turbines

Zahra Mohammadi Doqzlu, Morteza Khashechi, *, Masoud Dehghani Sufi, Saeed Moghadam

1. Master student of Biosystems Mechanical Engineering, Abu Reihan Campus, University of Tehran, Iran
2. Assistant Professor of Biosystems Mechanical Engineering, Abu Reihan Campus, University of Tehran,Iran
3. Assistant Professor of Biosystems Mechanical Engineering, Abu Reihan Campus, University of Tehran,Iran
4. Assistant Professor of Food Industry Engineering, Abu Reihan Campus, University of Tehran, Iran

Abstract

Water and energy are among the basic resources for the development of human life and society. Global warming has exacerbated population growth and the rapid pace of industrial development, the water shortage crisis, and the imbalance in energy supply and demand. This means that more practical steps need to be taken to commit to the principles of sustainable development, especially in developing countries. In Iran, 840 million cubic meters of drinking water resources are wasted annually due to leaks in water distribution systems. On the other hand, hydropower with a share of 11% is the most important renewable energy produced in Iran. In this study, the types of microturbines generating hydropower from excess pressure of water transmission network lines with emphasis on pump microturbines have been studied and compared. As a result, by placing a pump microturbine as a replacement or complement to a pressure relief valve, water and energy waste can be prevented and the recovered energy can be used as electricity required by the sensors.

Key words: Hydroelectric energy, renewable energy, surplus pressure, microturbine hydro
*Corresponding authorE-mail: m.khashehchi@ut.ac.ir