

پتانسیل سنجی قابلیت تولید انرژی از شبکه توزیع و خطوط انتقال آب

فاطمه یاس باقری نیک

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- گرایش مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

این مقاله بدنبال بررسی پتانسیل سنجی قابلیت تولید انرژی از شبکه توزیع و خطوط انتقال آب با روش توصیفی و تحلیلی می باشد. انرژی برق آبی بعنوان یکی از انرژیهای پاک همواره و درطول سالیان متمادی مورد استفاده بشر بوده که محور اصلی این مقاله نیز مطالعه فنی و اقتصادی استفاده از نیروگاه آبی خیلی کوچک در مسیر پمپاژ آب شرب برای تولید انرژی پاک بدون مصرف سوخت می باشد. استفاده کلان از این انرژی در نیروگاه های برق آبی بر روی سدها بوده و در مقیاسی کوچکتر شرکت های آب شهری و روستایی به واسطه دراختیار داشتن خطوط و کانالهای انتقال آب دارای پتانسیل عظیمی از انرژی می باشند. مزایای اصلی استفاده از پتانسیل برق آبی ذکرشده شامل افزایش پتانسل تولید پراکنده، امکان بهره برداری از حداقل پتانسیل آبی، پایین بودن قیمت تمام شده انرژی به نسبت سایر منابع انرژی پاک، کوتاهی زمان ساخت، کاهش چالش های زیست محیطی و اجتماعی، افزایش ضریب ایمنی و پایداری شبکه برق در مقابل حوادث غیرمترقبه و ... آینده بسیار روشنی را پیش روی این موضوع گشوده و بستر بسیار مناسبی را برای ورود سرمایه گذاران بخش خصوصی به فرآیند تولید انرژی برق و همچنین حل معضلات پیشروی شرکت های تامین و انتقال برق ایجاد کرده است. محدودیت استفاده از منابع انرژی فسیلی، افزایش نگرانی های زیست محیطی به واسطه ی مصرف بی رویه ی منابع انرژی فسیلی، افزایش جمعیت و مصرف انرژی، تلفات شبکه های برق، راندمان پایین نیروگاه های حرارتی، همگی مباحثی اند که اهمیت بهبود بازدهی انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر را نشان می دهند. خطوط انتقال آب به واسطه ی در اختیار داشتن امکانات و تسهیلاتی مانند مخازن زیرزمینی، پتانسیل بالقوه ی انرژی تجدیدپذیر را دارد. این موضوع سبب شده به دلایلی نظیر فناپذیرنبودن انرژی های تجدیدپذیر، کم بودن قیمت تمام شده، بهره برداری از حداقل پتانسیل آبی، مشکلات اجتماعی و زیست محیطی کمتر به منظور کاهش تولید گازهای گلخانه ای، افزایش تعداد مولدهای تولید پراکنده ی مقیاس کوچک، جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی برای تولید برق باشد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل تولید انرژی، شبکه توزیع و خطوط انتقال آب

مقدمه

در شرایطی که شهرهای بزرگ با چالش‌های روزافزون ناشی از مصرف بالای انرژی، فشار زیاد بر منابع آب، و نیاز به زیرساخت‌های پایدار مواجه هستند، بازیابی انرژی از شبکه‌های موجود به‌عنوان یک راهکار هوشمند و کم‌هزینه برای ارتقاء بهره‌وری مطرح شده است. این پژوهش با تمرکز بر شبکه آبرسانی، به بررسی امکان استخراج انرژی از فشارهای اضافی موجود در خطوط توزیع و انتقال آب می‌پردازد؛ ظرفیتی که اغلب به‌دلیل نبود سیستم‌های بازیافتی، به‌صورت تلف‌شده از طریق شیرهای فشارشکن از بین می‌رود. آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای بشر، در طول تاریخ نقشی حیاتی در شکل‌گیری تمدن‌ها ایفا کرده و همواره از دغدغه‌های اصلی جوامع انسانی به‌شمار آمده است. با افزایش جمعیت، توسعه صنایع و شهرنشینی، تقاضا برای آب آشامیدنی افزایش یافته و در مقابل، منابع تأمین این نیاز حیاتی با محدودیت‌هایی جدی روبه‌رو شده‌اند. بر اساس مطالعات برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد، تا سال ۲۰۲۵، بخش زیادی از جمعیت جهان با تنش‌های آبی مواجه خواهند شد و این بحران تا سال ۲۰۵۰ دامنگیر بیش از نیمی از کشورها خواهد شد [۱].

شبکه‌های توزیع آب شهری یکی از زیرساخت‌های مهم و حیاتی در راستای پاسخ به این نیاز روبه‌فزونی هستند، اما این شبکه‌ها نیز با چالش‌هایی چون نشت گسترده مواجه‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روزانه حدود ۴۵ تا ۸۸ میلیون مترمکعب آب به‌واسطه نشت در شبکه‌های آبرسانی در سطح جهان هدر می‌رود [۲]. این پدیده نه‌تنها به اتلاف منابع آب منجر می‌شود بلکه هزینه‌های تصفیه و توزیع را افزایش داده و مصرف انرژی مضاعفی را به سیستم تحمیل می‌کند.

در این تحقیق، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی شبکه توزیع آب، از طریق نرم‌افزارهای تخصصی، عملکرد هیدرولیکی شبکه مدل‌سازی شده و میزان انرژی قابل بازیافت در نقاط هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مدیریت فشار، که به‌عنوان یکی از موثرترین راهکارهای کنترل نشت شناخته شده است، نه‌تنها به کاهش تلفات آب کمک می‌کند بلکه می‌تواند با به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به منبعی برای تولید انرژی پاک نیز تبدیل شود [۳].

یکی از روش‌های نوین در این زمینه، استفاده از پمپ به‌عنوان توربین (PAT) است. در این روش، به‌جای تخلیه فشار اضافی توسط شیر فشارشکن (PRV)، از این فشار برای چرخش پمپ در حالت معکوس بهره گرفته می‌شود تا انرژی هیدرولیکی به انرژی برقی تبدیل شود [۴]. این فناوری نسبت به توربین‌های کلاسیک هزینه راه‌اندازی کمتری دارد و به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه به‌دلیل عدم دسترسی به تجهیزات پیشرفته و هزینه بالای آن‌ها، گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه تلقی می‌شود [۵]. ویژگی برجسته این پروژه، بررسی و امکان‌سنجی استفاده از فناوری‌های در دسترس با هزینه پایین و قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس شهری است. پمپ‌های تجاری با قیمت مناسب و راندمان قابل‌قبول، می‌توانند در قالب نیروگاه‌های کوچک برق‌آبی در خطوط انتقال آب شهری یا حتی در مناطق روستایی و کم‌آب به‌کار گرفته شوند. در شرایط خشکسالی و کاهش آبدی منابع زیرزمینی، چنین رویکردی می‌تواند علاوه بر مدیریت فشار و کاهش نشت، به درآمدزایی برای شرکت‌های بهره‌بردار نیز منجر شود [۶].

از سوی دیگر، این پروژه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر شهرهای کشور، در مسیر توسعه پایدار شهری و مدیریت بهینه انرژی در زیرساخت‌های آب به‌کار گرفته شود. نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به‌عنوان منابع پاک و تجدیدپذیر تولید انرژی، در شرایط فعلی که وابستگی به سوخت‌های فسیلی پیامدهای زیست‌محیطی فزاینده‌ای دارد، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌های

توسعه انرژی کشور پیدا کرده‌اند [۷]. بهره برداری از فشارهای مستهلک شونده به عنوان منبع انرژی، نه تنها به بهینه‌سازی منابع کمک می‌کند بلکه گامی موثر در راستای تحقق اهداف کلان کشور در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر نیز خواهد بود.

۱- مفاهیم

۱-۱- نیروگاه های برق آبی

نیروگاه‌های برق آبی از منابع تجدیدپذیر انرژی برای تولید برق استفاده می‌کنند. این نوع نیروگاه‌ها با بهره‌برداری از انرژی پتانسیل و سینتیک آب در حال جریان، توان تولید برق را به صورت مکانیکی به الکتریکی تبدیل می‌کنند. به طور کلی، نیروگاه‌های برق آبی در دسته‌های مختلفی از جمله نیروگاه‌های جریانی، مخزنی، و تلمبه-ذخیره‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب نوع نیروگاه برق آبی بستگی به شرایط خاص جغرافیایی، میزان تقاضا برای برق و ویژگی‌های هیدرولوژیکی منابع آبی دارد.

۱-۲- انرژی برق آبی

انرژی برق آبی یک منبع تجدیدپذیر انرژی است که از حرکت یا سقوط آب به وسیله نیروی گرانش نشأت می‌گیرد [۸]. وقتی آب از ارتفاعی رها شود، انرژی پتانسیل آن به انرژی سینتیک تبدیل می‌شود و این انرژی سینتیک با برخورد به پره‌ها و تیغه‌های توربین هیدرولیکی، به انرژی مکانیکی منتقل می‌گردد [۹]. توربین متصل به ژنراتور، انرژی مکانیکی چرخشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و سامانه تولید برق حاصل را «نیروگاه برق آبی» می‌نامند.

توان تولیدی در یک نیروگاه برق آبی به دو پارامتر اصلی، یعنی هد (ارتفاع سقوط آب) و دبی (حجم جریان آب) بستگی دارد [۱۰]. عملاً در هر سیستمی که آب به صورت پایدار یا ناپایدار از نقطه‌ای با اختلاف فشار عبور کند، می‌توان از انرژی پتانسیل موجود برای تولید برق استفاده نمود [۱۱]. این شرایط در شبکه‌های آب آشامیدنی، آب کشاورزی، فاضلاب خام و تصفیه‌شده و روان‌آب‌ها نیز وجود دارد.

انرژی برق آبی در مقیاس‌های مختلف، از نیروگاه‌های بزرگ مخزنی تا نیروگاه‌های کوچک جریانی و حتی سیستم‌های میکرومقیاس، قابل پیاده‌سازی است [۱۲]. یکی از پرکاربردترین انواع این سامانه‌ها، نیروگاه‌های با ذخیره‌سازی پمپاژی (Pumped-Storage) است؛ در این روش آب در زمان کمبود تقاضا به مخزنی با ارتفاع بالاتر پمپاژ می‌شود و در زمان اوج مصرف با رهاسازی آن، انرژی بازیافت‌شده تولید برق می‌کند [۱۳]. این ویژگی، امکان تنظیم بار و ذخیره‌سازی انرژی را در شبکه‌های برق فراهم می‌آورد.

انرژی برق آبی علاوه بر تولید پایدار برق، مزایایی همچون انتشار کم گازهای گلخانه‌ای، عمر طولانی تجهیزات و قابلیت پاسخ سریع به تغییرات بار را داراست [۱۴]. با این حال، احداث سدها و تغییر مسیر رودخانه‌ها می‌تواند اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی قابل توجهی بر جای گذارد که نیازمند ارزیابی‌های دقیق و مدیریت جامع است.. [15]

۲- انواع نیروگاه های برق آبی

۲-۱- انواع نیروگاه های برق آبی از نظر شیوه کار

نیروگاه ها نه تنها نقش مهمی در تامین انرژی ایفا می کنند، بلکه امکان ذخیره سازی انرژی را نیز فراهم می کنند که می تواند در زمان های مختلف برای پاسخ گویی به تغییرات تقاضا در شبکه برق استفاده شود و عمده ترین تقسیم بندی آن ها از نظر شیوه کار، به شرح زیر است. انواع دیگری از نیروگاه ها مانند نیروگاه های آبی شناور نیز وجود دارد که به جای ساخت سد یا توربین های ثابت، ژنراتورها روی پلتفرم های شناور قرار می گیرند که در موضوع مورد بررسی این پژوهش قرار نمی گیرد..

۲-۱-۱- نیروگاه های جریانی

این نیروگاه ها از انرژی موجود در جریان آب رودخانه ها یا سایر منابع آبی مانند شبکه های لوله کشی آب آشامیدنی و فاضلاب بهره می برند. در این نوع نیروگاه ها، آب از یک مسیر مشخص عبور کرده و انرژی سینتیک آن باعث چرخش تیغه های توربین می شود که این انرژی مکانیکی سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می گردد..

۲-۱-۲- نیروگاه های مخزنی

این نیروگاه ها از انرژی پتانسیل آب ذخیره شده در پشت یک سد برای تولید برق استفاده می کنند. در این حالت، انرژی تولیدی به حجم آب پشت سد و اختلاف ارتفاع بین منبع آب و محل خروج آن بستگی دارد. آب معمولاً از طریق یک لوله بزرگ (Penstock) به سمت توربین هدایت می شود تا انرژی پتانسیل آن به انرژی مکانیکی تبدیل گردد و سپس این انرژی به الکتریکی تبدیل می شود. [16]

۲-۱-۳- نیروگاه های تلمبه-ذخیره ای

وظیفه اصلی این نیروگاه ها پشتیبانی از شبکه برق در ساعات اوج مصرف است. در زمان هایی که تقاضا برای انرژی پایین است، آب به یک مخزن بالاتر پمپاژ می شود و انرژی الکتریکی تبدیل به انرژی پتانسیل گرانشی ذخیره می شود. در زمان اوج مصرف، آب از این مخزن به پایین جاری می شود و با چرخاندن توربین ها، برق تولید می شود. این نوع نیروگاه ها به بهبود ضریب بار شبکه و کاهش هزینه های تولید برق کمک می کنند. [16]

۲-۱-۴- انواع نیروگاه های برق آبی از نظر توان

نیروگاه های برق آبی در نقاط مختلف دنیا بر اساس ظرفیت تولیدی به دسته های گوناگون تقسیم می شوند. در ایران نیز این طبقه بندی با توجه به توان، به دسته های میکرو، مینی، کوچک و بزرگ صورت می گیرد. هرچند در این زمینه توافق کلی جهانی وجود ندارد، اما محدوده های تعریف شده برای هر دسته در منابع مختلف، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند [۱۷]. جدول ۱-۱ دسته بندی نیروگاه های برق آبی کوچک را نمایش می دهد.

جدول ۱-۱ دسته‌بندی نیروگاه‌های برق‌آبی بر اساس اندازه

نوع نیروگاه		توان تولیدی
Micro HydroPower	میکرو هیدروپاور	کمتر از ۱۰۰ کیلووات
Mini HydroPower	مینی هیدروپاور	۱۰۰ کیلووات تا ۱۰۰۰ کیلووات
Small HydroPower	هیدروپاور کوچک	۱۰۰۰ کیلووات تا ۱۰۰۰۰ کیلووات

۳- روش‌های تبدیل انرژی آب به انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های برق‌آبی

۳-۱- توربین

توربین یکی از اجزای کلیدی در تبدیل انرژی آب به انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های برق‌آبی است. این تجهیز، انرژی پتانسیل یا جنبشی جریان آب را دریافت کرده و آن را به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌کند. محور توربین به ژنراتور متصل است و با چرخش آن، انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. ساختار توربین شامل پره‌ها یا تیغه‌هایی است که انرژی جریان آب را جذب و به شفت مرکزی منتقل می‌کنند. طراحی تیغه‌ها، زاویه‌ی برخورد جریان و شرایط هیدرولیکی آب تأثیر بسزایی در عملکرد توربین دارد. به‌طور معمول، عملکرد توربین تحت تأثیر هد (ارتفاع سقوط آب)، دبی (حجم جریان) و شرایط فیزیکی آب از جمله دما و ذرات معلق قرار می‌گیرد. [18]

یکی از نکات مهم در طراحی و بهره‌برداری از توربین‌ها، مقاومت در برابر پدیده کاویتاسیون است. کاویتاسیون هنگامی رخ می‌دهد که فشار موضعی در توربین به زیر فشار بخار آب برسد و باعث تشکیل حباب‌های بخار شود. این پدیده منجر به فرسایش پره‌ها، ایجاد لرزش، و در نهایت کاهش عمر مفید تجهیزات می‌گردد. [19]

در برخی طراحی‌ها، به‌منظور افزایش بازدهی، از تنظیم‌کننده‌های جریان و پره‌های قابل‌تنظیم (Adjustable Blades) استفاده می‌شود که می‌توانند خود را با تغییرات فشار و دبی جریان آب تطبیق دهند. این قابلیت به افزایش کارایی و کاهش افت انرژی کمک می‌کند، به‌ویژه در نیروگاه‌هایی که دچار نوسانات شدید جریان هستند. [20]

۳-۱-۱- انواع توربین‌های آبی

توربین‌های آبی به‌طور کلی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: توربین‌های ضربه‌ای و توربین‌های واکنشی. در هر دو نوع، انرژی پتانسیل آب به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود؛ اما سازوکار این تبدیل متفاوت است.

۳-۱-۱-۱- توربین‌های ضربه‌ای

در این نوع توربین‌ها، فشار آب قبل از ورود به توربین به انرژی جنبشی (سینتیکی) تبدیل شده و به شکل یک یا چند جت پرسرعت به پره‌هایی برخورد می‌کند که در اطراف چرخ یا قسمت گردنده نصب شده‌اند. این توربین‌ها بیشتر در شرایط هد بالا و دبی پایین کاربرد دارند.

۳-۱-۱-۲-توربین پلتون

رایج‌ترین توربین ضربه‌ای، توربین پلتون است که در آن جت‌های پرسرعت آب به پره‌های قاشقی‌شکل برخورد می‌کنند. این توربین‌ها از یک یا چند نازل برای هدایت جت آب استفاده می‌کنند. هنگام توقف اضطراری، صفحه‌ای منحرف‌کننده، مسیر جت را تغییر می‌دهد تا از برخورد آن با پره‌ها جلوگیری شود. توربین‌های پلتون برای هدهای بالا (۶۰ تا ۱۰۰۰ متر) مناسب هستند و می‌توانند محور افقی یا عمودی داشته باشند. بازده این توربین‌ها بسیار خوب است، به‌طوری که در شرایط طراحی، بازدهی از ۳۰٪ تا ۱۰۰٪ با یک جت و از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ با چند جت ممکن است. [21]

۳-۱-۱-۳-توربین‌های واکنشی

در این نوع، آب در حین عبور از توربین هم فشار و هم سرعتش تغییر می‌کند. پره‌های گردنده درون آب مستغرق هستند و فشار عملیاتی روی آن‌ها اثرگذار است. این توربین‌ها معمولاً در هدهای پایین تا متوسط و دبی‌های بالا به کار می‌روند.

۳-۱-۱-۴-توربین فرانسسیس

توربین فرانسسیس نوعی توربین واکنشی است که با ورود شعاعی و خروج محوری طراحی شده است. این توربین‌ها دارای پره‌های هدایت‌کننده‌ی قابل تنظیم و محفظه‌ی حلزونی شکل هستند و برای هدهای بین ۲۵ تا ۳۵۰ متر استفاده می‌شوند. طراحی آن می‌تواند با محور افقی یا عمودی انجام شود و به همین دلیل در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک رایج است [۲۱]. این نوع از توربین در بازه‌های وسیع دبی عملکرد مناسبی دارد [22]

۳-۱-۱-۵-توربین کاپلان

این توربین واکنشی با جریان محوری برای هدهای پایین (۲ تا ۴۰ متر) مناسب است. ویژگی بارز آن داشتن پره‌های گردنده‌ی قابل تنظیم است. همچنین ممکن است پره‌های هدایت‌گر ثابت یا قابل تنظیم داشته باشد. تنوع طراحی در این توربین باعث می‌شود بتواند در بازه‌ی دبی از ۱۵٪ تا ۱۰۰٪ ظرفیت طراحی به‌خوبی عمل کند (Penche)، (2004 به‌دلیل راندمان بالا در دبی‌های متغیر، کاپلان انتخاب مناسبی برای نیروگاه‌های کوچک در مناطق کم‌شیب است. [23])

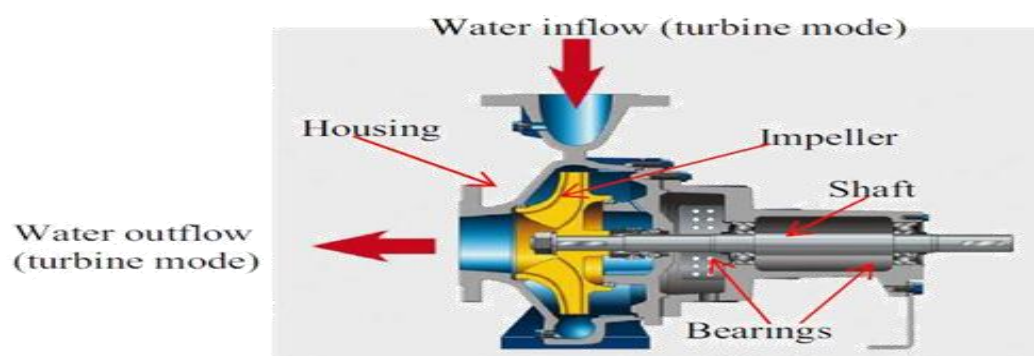
۳-۱-۱-۶-پمپ به عنوان توربین

توربوماشین‌ها دسته‌ای از ماشین‌های مکانیکی دوار هستند که در آن‌ها انتقال انرژی بین سیال و ماشین، ناشی از حرکت دینامیکی اجزا صورت می‌پذیرد. این انتقال انرژی می‌تواند در دو جهت انجام شود: یا انرژی از سیال گرفته می‌شود، مانند آنچه در توربین‌ها رخ می‌دهد، یا انرژی به سیال داده می‌شود، همانند عملکرد پمپ‌ها. بنابراین، در شرایطی خاص می‌توان از پمپ‌ها به صورت معکوس به‌عنوان توربین بهره‌برداری کرد، که به این حالت «پمپ به‌عنوان توربین» یا به اختصار PAT (Pump as Turbine) گفته می‌شود. [24]

با این حال، استفاده از پمپ به عنوان توربین نیازمند بررسی و دقت ویژه‌ای است، زیرا اصول طراحی پمپ‌ها و توربین‌ها با یکدیگر متفاوت است. پمپ‌ها ذاتاً برای مصرف انرژی و ایجاد هد یا دبی مشخص طراحی شده‌اند، در حالی که توربین‌ها

به منظور استخراج توان مکانیکی از جریان سیال طراحی می‌شوند. درک صحیح از این تفاوت‌های بنیادی در فلسفه طراحی، نقش مهمی در ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد PAT ایفا می‌کند. [24]

اجزای اصلی پمپ در کاربرد به عنوان توربین شامل ورودی جریان، پروانه، شافت، بلبرینگ‌ها، بدنه و خروجی جریان می‌باشد. شکل زیر نمای شماتیکی از این اجزا را نمایش می‌دهد.



از دیدگاه انرژی، شیرهای کاهش فشار (PRV) با وجود کاهش فشار جریان، موجب افت قابل توجه انرژی سیال شده و در نتیجه اتلاف انرژی را به همراه دارند. در سال‌های اخیر، استفاده از توربین‌ها به عنوان جایگزینی برای PRV ها با هدف تولید برق و کنترل فشار، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. با وجود راندمان بالای توربین‌ها، به منظور کاهش هزینه‌ها، استفاده از پمپ‌های سانتریفیوژ در حالت معکوس، که به آن‌ها پمپ‌های توربینی (PAT) نیز گفته می‌شود، پیشنهاد شده است.

پمپ‌های معکوس، علاوه بر مزیت اقتصادی، در مقایسه با توربین‌ها در حجم بیشتری تولید می‌شوند و قادر به عملکرد در محدوده وسیعی از ارتفاع (هد) و دبی هستند. این پمپ‌ها همچنین هزینه نگهداری پایینی داشته و می‌توانند در مدت زمان کوتاهی برق تولید کنند. لازم به ذکر است که محل نصب PAT نقش مهمی در بهره‌وری شبکه‌های آبرسانی ایفا می‌کند و باید به دقت انتخاب شود. افزون بر آن، در مناطق نزدیک به رودخانه‌ها، استفاده از فناوری‌های کم‌هزینه برای تولید برق اهمیت دارد. در نتیجه، برای تولید برق با ظرفیت کمتر از ۵۰۰ کیلووات، PAT ها می‌توانند گزینه‌ای مناسب باشند [۲۵ و ۲۶].

با وجود مزایای فوق، انتخاب و جایگزینی PAT به جای PRV همواره آسان نیست، چرا که این پمپ‌ها در بازه گسترده‌ای از فشار و سرعت عملکرد دارند. از سوی دیگر، تغییر در عملکرد پمپ به حالت معکوس، منحنی عملکرد آن را تغییر داده و تعیین نقطه بهره‌برداری بهینه (BEP) را با چالش مواجه می‌سازد. مطالعات اخیر روابط تجربی مختلفی برای تعیین نقطه عملکرد PAT ارائه داده‌اند که اغلب مختص یک نوع پمپ با ویژگی‌های خاص هندسی و هیدرولیکی هستند؛ لذا تاکنون رابطه‌ای

جامع برای همه پمپ‌ها معرفی نشده و این موضوع یکی از چالش‌های مهم تحقیقاتی در این حوزه به شمار می‌رود. علاوه بر این، PAT ها به اندازه PRV ها در کاهش فشار تا سطح استاندارد مؤثر نیستند. همچنین از منظر بهره‌برداری، تولید انرژی آن‌ها با فرکانس و ولتاژ متغیر همراه است که برای تجهیزات حساس به تغییر فرکانس مناسب نیست. بنابراین، انتخاب گزینه بهینه باید بر اساس شرایط هیدرولیکی سیستم، هزینه‌های واقعی و مزایای هر یک از گزینه‌ها انجام شود [26].

۴- ارزیابی پژوهش های پیشین در تولید انرژی از آب در داخل و خارج ایران

در این قسمت، به بررسی جامع پژوهش های مرتبط با موضوع این طرح و همچنین مطالعات تحقیقاتی در حوزه بازیابی و بهینه سازی انرژی در شبکه های توزیع آب خواهیم پرداخت در عصر کنونی که بحران انرژی و دغدغه های زیست محیطی به چالش های جدی جهانی تبدیل شده اند، بهره گیری بهینه از منابع انرژی موجود، به ویژه منابع تجدیدپذیر، بیش از پیش اهمیت یافته است. یکی از منابع پنهان و کمتر بهره برداری شده، انرژی هیدرولیکی نهفته در شبکه های توزیع آب شهری و صنعتی است که در فرآیندهای کنترلی و انتقال، اغلب به صورت هدررفت از بین می رود. در سال های اخیر، پژوهشگران با رویکردی نوآورانه به دنبال استخراج این انرژی پنهان با استفاده از تجهیزات ساده تر و کم هزینه تر مانند پمپ هایی با عملکرد معکوس (پمپ به عنوان توربین PAT) بوده اند. پژوهش های پیش رو، مجموعه ای از تلاش های علمی و مهندسی را به تصویر می کشند که با بهره گیری از روش های تحلیلی، تجربی و شبیه سازی های پیشرفته، به بررسی امکان سنجی، طراحی بهینه و ارزیابی عملکرد سیستم های بازیافت انرژی در شبکه های آبرسانی پرداخته اند. این مجموعه مطالعات، چشم انداز جدیدی را در جهت ارتقای بهره وری انرژی و توسعه پایدار در حوزه زیرساخت های آبی ترسیم می کند.

۴-۱- تحقیقات انجام شده در ایران

۱- در تحقیقی با هدف بهینه سازی فشار و بازیابی انرژی در شبکه های توزیع آب، مکان یابی شیرهای فشارشکن و پمپ های معکوس مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) و نرم افزار EPANET برای دستیابی به دو هدف اصلی استفاده شد. ابتدا، مکان و فشار بهینه شیرهای فشارشکن و پمپ های معکوس برای کنترل فشار و کاهش نشت آب تعیین گردید. سپس، با بهینه سازی سرعت چرخش پمپ های معکوس، امکان تولید انرژی از شبکه بررسی شد. نتایج نشان داد که با مدیریت صحیح فشار در طول شبانه روز، می توان روزانه حدود ۱۶۰ کیلووات ساعت انرژی از شبکه استخراج و به شبکه برق شهری منتقل کرد. این مطالعه همچنین معایب شیرهای فشارشکن، از جمله هزینه بالای نصب اولیه و عدم تولید انرژی، را شناسایی کرده و در مقابل، استفاده از پمپ به عنوان توربین (PAT) به دلیل توانایی در تولید انرژی و جبران بخشی از هزینه های شبکه، به عنوان یک گزینه مقرون به صرفه تر و مؤثرتر معرفی شده است.

۲- در تحقیقی به بررسی استفاده از فشار مازاد در خطوط انتقال آب برای تولید برق از طریق پمپ های معکوس به عنوان توربین (PAT) در شهر تربت جام پرداخته است. با توجه به بحران های جهانی انرژی و نیاز به منابع تجدیدپذیر، استفاده بهینه از پتانسیل ارتفاعی خطوط انتقال آب به عنوان یک روش مؤثر در مدیریت انرژی معرفی شده است. در این مطالعه، از پمپ های سانتریفیوژ به صورت معکوس استفاده شده تا نقش توربین را با راندمان مطلوبی ایفا کنند. نتایج مدلسازی نشان داد که توان تولیدی پمپ ها در سه گزینه مختلف به ترتیب ۱.۴۲، ۲.۵۵ و ۲.۷۱ کیلووات است و میزان انرژی تولیدی سالانه در این سه گزینه به ترتیب ۲۹۶، ۳۳۲، ۳۸۸ و ۵۰۰، ۸۹۲ و ۱۱،۰۰۰ کیلووات ساعت خواهد بود. از نظر اقتصادی، هزینه های اولیه برای احداث این نیروگاه ها در سه گزینه به ترتیب ۹،۵۰۰، ۱۰،۰۰۰ و ۱۱،۰۰۰ میلیون ریال برآورد شده است که نشان دهنده صرفه جویی قابل توجه در مقایسه با نیروگاه های برق آبی معمولی است. همچنین، نسبت فایده به هزینه (B/C) در این پروژه ها به ترتیب ۳۴.۱، ۸.۱ و ۲۱.۲ محاسبه شده که این نسبت بزرگتر از یک، به معنی توجیه اقتصادی بالای این روش است. با توجه به این که سیستم های پمپ/توربین می توانند در برابر تغییرات دبی آب و خرابی های احتمالی پمپ ها مقاومت داشته باشند، این روش

به عنوان یک گزینه عملی و اقتصادی برای تولید برق در مناطق شهری و روستایی با دبی متغیر پیشنهاد می‌شود. در نتیجه، استفاده از پمپ/توربین در خطوط انتقال آب تربت‌جام به‌عنوان یک راه‌حل پایدار و مقرون به‌صرفه در جهت تولید برق تجدیدپذیر، می‌تواند به‌طور گسترده‌ای در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد. [17]

۳- در تحقیقی که به بررسی استفاده از پمپ معکوس به عنوان توربین در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک پرداخته شده است، تولید انرژی یکی از عوامل کلیدی در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورهای در حال توسعه به شمار می‌رود. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، نظیر تولید برق از خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب، به عنوان یک راهکار نوین در مدیریت بهینه سامانه‌های آبی مطرح گردیده است. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای انتخاب نوع توربین برای احداث نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، برآورد هزینه‌های اولیه طرح به‌منظور بازگشت سریع سرمایه است. در این تحقیق، هشت نقطه از شبکه آبرسانی شامل هلاجان، مخازن صیدون، شیر فشارشکن PRV6 و سایر نقاط به عنوان نقاط با پتانسیل استفاده از پمپ معکوس جهت تولید انرژی انتخاب شد. محاسبات نشان می‌دهد که توان تولیدی این پمپ‌ها معادل ۲۰۷ مگاوات برق است که در طول ۲۵ سال، معادل ۳۰۲،۴۰۰ مگاوات ساعت انرژی تولید خواهد شد. برای تولید این مقدار انرژی، مصرف حدود ۲۷،۵۹۱،۲۴۱ لیتر گازوئیل ضروری است که علاوه بر هزینه بالا (تقریباً ۱۳۸ میلیون دلار)، تولید حدود ۷۴ هزار تن گاز CO₂ را به دنبال دارد که اثرات زیست‌محیطی شدیدی به همراه دارد. استفاده از پمپ معکوس به عنوان توربین در کشورهای توسعه‌یافته، به‌ویژه در انگلستان، آلمان، اتریش، سوئیس و اسپانیا، تجربه‌های موفقی داشته و از نظر اقتصادی، مقایسه با سایر روش‌ها به‌صرفه‌تر بوده است [27].

۴- در این مطالعه، بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با استفاده از پمپ به‌عنوان توربین (PAT) با تمرکز بر مدیریت همزمان فشار، تولید انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، یک شبکه ۲۵-گره‌ای با استفاده از نرم‌افزار EPANET شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تعداد و مکان پمپ‌ها به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که با جانمایی بهینه پمپ‌ها، فشار اضافی در شبکه کاهش یافته و نشت آب به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انرژی تولید شده از این سیستم به شبکه برق باز می‌گردد که منجر به کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌شود. در این تحقیق مشخص شد که نصب سه PAT در لوله‌های انتخابی باعث کاهش نشت آب از ۲۹.۷۱ لیتر بر ثانیه به ۹.۴۵۷ لیتر بر ثانیه و تولید روزانه حدود ۲۱۰ کیلووات ساعت انرژی می‌شود. همچنین، با در نظر گرفتن هزینه‌های اجتماعی ناشی از کاهش گازهای گلخانه‌ای، دوره بازگشت سرمایه به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و بین ۴.۷ ماه تا ۳۲.۷ ماه قرار می‌گیرد. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از PAT ها در شبکه‌های آبرسانی علاوه بر بهبود مدیریت فشار و کاهش نشت، به‌عنوان یک روش مؤثر برای تولید انرژی تجدیدپذیر و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی عمل می‌کند. [3]

۵- در پژوهشی که به تحلیل بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی پرداخته شده است، یکی از عوامل کلیدی در کاهش نشت آب، مدیریت فشار در سیستم‌های آبرسانی است. بهترین راهکار برای دستیابی به این هدف، نصب شیرهای فشارشکن می‌باشد. با این حال، از آنجا که شیرهای فشارشکن اضافی فشار موجود در شبکه را به هدر می‌دهند، جایگزینی آن‌ها با تجهیزاتی همچون پمپ‌های معکوس که به‌عنوان توربین (PAT) عمل می‌کنند، می‌تواند علاوه بر کاهش نشت، فشار اضافی موجود در شبکه را به انرژی برق-آبی تبدیل کند. این انرژی نه تنها تجدیدپذیر است، بلکه اثرات زیست‌محیطی آن نیز بسیار کمتر از سایر منابع انرژی می‌باشد. در این تحقیق، پس از وارد کردن اطلاعات شبکه آبرسانی ۲۵-گره‌ای معتبر به نرم‌افزار منبع باز ایپانت و ادغام آن با نرم‌افزار متلب، فرآیند بهینه‌سازی مکان نصب توربین‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک انجام شد. به‌منظور رسیدن به اهداف هم‌زمان، یک تابع هدف جدید معرفی گردید که شامل سه هدف اصلی است: (۱) مدیریت فشار در شبکه آبرسانی با

تمرکز بر کاهش نشت آب، ۲) تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر با استفاده از پمپ‌هایی که به‌عنوان توربین عمل می‌کنند، و ۳) کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای با جایگزینی انرژی تجدیدپذیر به جای انرژی تولیدی از نیروگاه‌های فسیلی. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که بهترین مکان برای نصب سه توربین در لوله‌های شماره ۲۰، ۱۸ و ۱ در شبکه آبرسانی ۲۵گرهی است. با نصب این توربین‌ها، نشت آب به میزان قابل توجهی از ۷۰۱.۲۹ لیتر بر ثانیه در حالت بدون توربین به ۴۵۷.۹ لیتر بر ثانیه در حالت نصب سه توربین کاهش یافت و میزان تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر نیز افزایش یافت. در نهایت، با توجه به اهمیت دوره بازگشت سرمایه در پروژه‌های عمرانی، تأثیر هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، بر دوره بازگشت سرمایه مورد تحلیل قرار گرفت که نشان داد دوره بازگشت سرمایه برای توربین‌های شماره ۱ تا ۳ به ترتیب ۴.۷، ۷.۸ و ۳۲.۷ ماه کاهش می‌یابد. <https://elmnet.ir/doc/2734350-31052>.

۶- در تحقیق به بررسی و امکان‌سنجی اقتصادی روش‌های تولید انرژی پایدار در شرکت آب و فاضلاب پرداخته است. چهار روش اصلی شامل بهره‌برداری از بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، نصب پنل‌های خورشیدی، استفاده از سیستم هیدروپاور (برقابی) و به‌کارگیری دستگاه CHP برای تولید همزمان برق و حرارت در مکان‌هایی که امکان استفاده از هر دو وجود دارد، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سیستم هیدروپاور، که به‌ویژه در مناطقی با منابع آبی مناسب و دبی و ارتفاع خاص کاربرد دارد، با تبدیل انرژی پتانسیل آب به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی، یکی از روش‌های مقرون‌به‌صرفه و پاک برای تولید برق در مقیاس کوچک است. این سیستم در این تحقیق، با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر هد (ارتفاع آب) و دبی (جریان آب) مورد ارزیابی قرار گرفته و به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تولید انرژی در محل‌های خاص، مانند درون شبکه‌های آبرسانی، بررسی شده است. برای هر یک از این روش‌ها، یک مدل اقتصادی تطبیق‌پذیر طراحی شده که به کمک آن کاربر می‌تواند با وارد کردن داده‌ها و پارامترهای خاص، مانند هد و دبی آب در روش هیدروپاور، میزان تولید برق و همچنین شاخص‌های اقتصادی مانند نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه را محاسبه کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط کنونی، روش استفاده از دستگاه CHP به‌عنوان روش اقتصادی‌تر نسبت به سایر روش‌ها شناخته شده است. سایر روش‌ها نظیر بیوگاز، هیدروپاور و سلول‌های خورشیدی در شرایط فعلی به دلیل نرخ‌های خرید برق تجدیدپذیر و هزینه‌های ثابت و متغیر، توجیه اقتصادی ندارند. همچنین، ابزار اکسل تهیه‌شده امکان تغییر شرایط مختلف و تطبیق با موقعیت‌های مکانی و زمانی مختلف را فراهم می‌آورد که این قابلیت را به سرمایه‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان می‌دهد تا در هر زمان با توجه به تغییرات نرخ‌ها، تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند.

۷- در مطالعه ای به تحلیل پتانسیل تولید برق از انرژی آبی در خطوط اصلی انتقال آب شهر کرمانشاه، واقع در غرب ایران، پرداخته است. در این تحقیق، پنج خط آبرسانی اصلی شامل خط گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری، تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر، ایستگاه‌های پمپاژ میاندربند به مخازن چمن و معلم، و خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری مورد بررسی قرار گرفتند. برای محاسبه پتانسیل انرژی این خطوط، از داده‌های هیدرولیکی و توپولوژیکی منطقه، همراه با معادلات بقای انرژی و افت فشار در طول مسیر استفاده شد. نتایج نشان داد که خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری، به دلیل ویژگی‌های خاص توپوگرافی و هیدرولیکی، از بالاترین پتانسیل برای استحصال انرژی برخوردار است. پتانسیل تولید برق در این خط به میزان ۲/۴ مگاوات محاسبه شده است و این در حالی است که با توجه به دبی ثابت این خط در طول سال، امکان بهره‌برداری مستمر و ۲۴ ساعته از انرژی آن وجود دارد. در نهایت، با نصب میکروتوربین‌های آبی در این خط، می‌توان به تولید

انرژی پاک و تجدیدپذیر در سطحی پایدار و قابل برنامه‌ریزی دست یافت. این امر به ویژه در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی که به عوامل محیطی وابسته‌اند، مزیت‌های قابل توجهی دارد. منبع ۳

۸- در تحقیقی که به بررسی روش‌های مختلف کنترل فشار و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری پرداخته شده است، استفاده از پمپ به عنوان توربین (PAT) به عنوان یک راهکار نوآورانه و اقتصادی برای بهبود عملکرد شبکه‌های آبرسانی معرفی گردید. این روش، که به‌ویژه در نواحی با توپوگرافی پیچیده و فشار زیاد در گرہ‌ها کاربرد دارد، علاوه بر کاهش فشار اضافی در شبکه، موجب کاهش نشت آب و تولید انرژی برقی تجدیدپذیر می‌شود. در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی شده برای ناحیه ۱-۱۷ شهرک بهاران در سندج با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند ArcGIS، Water-GEMS، AutoCAD Civil 3D و Google Earth پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که فشار در بسیاری از گرہ‌ها به دلیل ویژگی‌های توپوگرافی منطقه به‌طور قابل توجهی بالا است، که این امر لزوم کنترل فشار در شبکه را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. پس از ناحیه‌بندی شبکه و جانمایی بهینه PAT ها در ورودی هر ناحیه، مشاهده گردید که فشار به‌طور متوسط حدود ۵۸ درصد کاهش یافته و نشت به میزان ۳۱ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، استفاده از این سیستم موجب تولید انرژی برقی قابل توجهی شد. این تحقیق نشان‌دهنده اهمیت استفاده از PAT به عنوان یک روش مقرون به‌صرفه، با راندمان قابل قبول، جهت کنترل فشار و بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع آب شهری است که ضمن کاهش هدررفت آب، به تولید انرژی پاک نیز کمک می‌کند.

۹- در مطالعه ای، عملکرد پمپ‌های سانتریفیوژ به عنوان توربین (PAT) در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی پژوهش، ارزیابی ویژگی‌های عملکردی این پمپ‌ها در حالت توربین و توسعه روش‌هایی برای پیش‌بینی نقطه بهینه بازده (BEP) آن‌ها بود. در این تحقیق، چندین پمپ سانتریفیوژ با سرعت‌های ویژه مختلف به عنوان توربین آزمایش شدند و داده‌های حاصل از آن‌ها به‌طور دقیق تحلیل گردید. نتایج نشان داد که پمپ‌ها در حالت توربین با بازده مناسبی عمل کرده و قادر به تولید میزان جریان و هد بیشتری نسبت به حالت پمپ هستند. همچنین، دو معادله ریاضی برای پیش‌بینی منحنی‌های مشخصه کامل پمپ‌ها در حالت توربین، بر اساس نقطه بهینه بازده، معرفی شد. علاوه بر این، یک روش جدید برای انتخاب پمپ مناسب جهت استفاده به عنوان توربین در سایت‌های نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک توسعه داده شد. نتایج تحقیق حاکی از آن است که پمپ‌های سانتریفیوژ با سرعت‌های ویژه پایین‌تر می‌توانند به عنوان جایگزینی اقتصادی و مؤثر در پروژه‌های برق‌آبی کوچک به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که دسترسی به تجهیزات خاص توربین دشوار است، مورد استفاده قرار گیرند. این پژوهش همچنین روابط و فرمول‌هایی برای پیش‌بینی ظرفیت تولید برق توسط پمپ‌های سانتریفیوژ در حالت توربین ارائه نموده که می‌تواند برای تخمین عملکرد PAT ها در شرایط مختلف و برآورد BEP در پروژه‌های عملی کاربردی باشد [5].

۱۰- در تحقیقی، با توجه به بحران انرژی جهانی و اهمیت مدیریت بهینه منابع انرژی در کشور و اهداف برنامه ششم توسعه، بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر، به ویژه تولید پراکنده انرژی الکتریکی، به عنوان یک اولویت مطرح شده است. در استان گیلان، به دلیل توپوگرافی خاص و فشار بالای داخل لوله‌های انتقال آب، شیرهای فشارشکن برای کاهش فشار اضافی و جلوگیری از ترکیدگی شبکه‌ها به کار می‌روند. اما امروزه امکان استفاده از توربین‌های آبی ویژه برای بهره‌برداری از انرژی الکتریکی موجود در خطوط انتقال آب شرب فراهم شده است. این فناوری به‌ویژه با وجود فشارشکن‌ها که پتانسیل تأمین برق از طریق میکروتوربین‌های آبی را دارند، امکان تولید انرژی پاک بدون سوخت را فراهم می‌آورد. این مطالعه به بررسی فنی و اقتصادی استفاده از یک نیروگاه آبی کوچک در مسیر پمپاژ آب شرب در یکی از روستاهای شهرستان لاهیجان می‌پردازد و به

تحلیل مزایای تولید انرژی پاک بدون مصرف سوخت در یک منطقه پایلوت می‌پردازد. تولید انرژی برق از طریق نیروگاه‌های آبی به‌عنوان یک روش مقرون به صرفه و زیست‌محیطی نسبت به سایر روش‌ها، به‌ویژه در روستاهای گیلان که به شبکه‌های آبرسانی متصل هستند، مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق همچنین بر اساس پارامترهای طبیعی اندازه‌گیری شده در محل، طراحی یک میکرو نیروگاه آبی برای یک مصرف‌کننده حقیقی و محوطه تأسیسات آبرسانی را پیشنهاد می‌کند و استفاده از میکروتوربین پلتونی را با توجه به ظرفیت‌های آبی با دبی پایین و ارتفاع نسبتاً بالا توصیه می‌نماید. [4]

۱۱- در پژوهشی که به تحلیل شرایط اضطراری بار در نیروگاه‌های برق‌آبی پرداخته است، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطقی با دبی آب کافی و اختلاف ارتفاع مناسب به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، خط انتقال آب سد شیرین‌دره به‌عنوان منبع بالقوه برای احداث نیروگاه برق‌آبی انتخاب شد. پس از انتخاب توربین مناسب با توجه به ویژگی‌های توپوگرافی و دبی آب موجود، جریان گذرا ناشی از برداشت اضطراری بار نیروگاه شبیه‌سازی و تحلیل عددی گردید. در شرایط اضطراری بار، که در هنگام جدا شدن نیروگاه از مدار رخ می‌دهد، فشار در پشت توربین به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و سرعت توربین ابتدا افزایش و سپس با بسته شدن دریچه کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که حداکثر افزایش فشار در این شرایط حدود ۲۹٪ و افزایش سرعت توربین تا ۵۶٪ است. علاوه بر این، مقایسه بین شرایط برداشت اضطراری بار و بسته شدن تدریجی شیر نشان داد که در هر دو حالت، فشار در نقاط مختلف خط لوله مشابه افزایش می‌یابد، اما زمان وقوع آن متفاوت است. این پژوهش بر اهمیت شبیه‌سازی دقیق شرایط اضطراری قبل از احداث نیروگاه‌های برق‌آبی تأکید دارد تا از بروز آسیب‌های احتمالی به تأسیسات جلوگیری شود و عملکرد سیستم بهینه گردد.

این مطالعه به بررسی امکان‌سنجی نصب میکروتوربین‌های آبی بر روی خطوط انتقال آب در شهر تهران پرداخته است. مناطق شیب‌دار تهران که دارای خطوط انتقال آب قوی هستند، به‌ویژه در مناطقی با اختلاف ارتفاع قابل توجه، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی هیدروالکتریک دارند. با توجه به شرایط خاص توپوگرافی و فشارهای موجود در این خطوط، میکروتوربین‌های پلتون به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تولید انرژی در این نقاط انتخاب شده‌اند. در این تحقیق، ۱۲ نقطه از مخازن و شیرهای فشارشکن به‌عنوان نمونه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که نصب میکروتوربین‌های پلتون در تمامی این نقاط توان تولید برق بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلووات را فراهم می‌آورد که نشان‌دهنده قابلیت اقتصادی و بهینه بودن این نصب‌ها است. در ۵ نقطه از این ۱۲ نقطه، توان تولیدی برق بیش از ۵۰۰ کیلووات است، که در این موارد نصب توربین‌ها کاملاً اقتصادی و به‌عنوان یک منبع پایدار برای تأمین انرژی قابل توجه است. این مطالعات نشان‌دهنده این است که این مناطق دارای ظرفیت بالایی برای تولید برق از طریق میکروتوربین‌های آبی هستند و استفاده از این تکنولوژی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مقرون به صرفه و کارآمد برای تأمین انرژی در مناطق مختلف شهر تهران به شمار آید. منبع ۷۰

۴-۲- تحقیقات انجام شده در جهان

۱- در یک پژوهش، امکان بهینه‌سازی بهره‌برداری از انرژی هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع آب از طریق به‌کارگیری پمپ‌ها در نقش توربین (PAT) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این مطالعه، جایگزینی شیرهای کاهش فشار (PRV) با پمپ‌های سانتریفیوژ معکوس به‌منظور کنترل فشار شبکه و بازیابی انرژی هدررفته بوده است. در این راستا، یک روش نوآورانه برای تعیین نقطه عملکرد بهینه یا بازده بیشینه (BEP) پمپ در حالت توربین ارائه شده است. این روش مبتنی بر انجام

آزمایش‌های عملی بر روی یک پمپ تجاری در دو وضعیت پمپ و توربین بوده و به استخراج ویژگی‌های عملکردی آن در هر حالت پرداخته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از PAT می‌توان تا حدود ۶۰ درصد انرژی هیدرولیکی را بازیافت کرد و سالانه از انتشار تقریبی ۳۳۴ تن دی‌اکسید کربن (CO_2) جلوگیری نمود. [5]

۲- در پژوهشی، اتکا به منابع جدید و جایگزین تأمین آب به‌عنوان یک گزینه مطلوب برای ارتقاء زیرساخت‌های سیستم‌های آب شهری قدیمی که دیگر قادر به تأمین نیازهای روزافزون آب نیستند، مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق یک چارچوب مدل‌سازی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی را معرفی می‌کند که هدف آن تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های تأمین آب شهری است. این مدل شامل سه ماژول اصلی است: (۱) ارزیابی چرخه عمر انرژی (LCEA)، (۲) مدل دینامیک سیستم‌ها و (۳) بهینه‌سازی که به‌طور همزمان مصرف انرژی سیستم‌های مختلف تأمین آب را شبیه‌سازی و بهینه می‌کند. مدل پیشنهادی از یک رویکرد دینامیک سیستم‌ها برای شبیه‌سازی رفتار انرژی در سیستم‌های تأمین آب مختلف به‌صورت موجودی‌ها و جریان‌ها استفاده کرده و از تکنیک الگوریتم ژنتیک (GA) برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در حالی که تمام تقاضاهای آب برآورده می‌شود، بهره می‌برد. این مدل به‌ویژه انعطاف‌پذیر است و می‌تواند مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف را پشتیبانی کند. چارچوب مدل‌سازی بر روی یک سایت توسعه سبز جدید در استرالیا به نام آروآورا اعمال شده است تا عملکرد سیستم در ماه‌های خشک و مرطوب معمولی تحلیل شود. این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط مختلف، از جمله ماه‌های مرطوب و خشک، مصرف انرژی و شدت آن متفاوت است و این مدل می‌تواند به مدیران آب کمک کند تا گزینه‌های مختلف تأمین آب را بر اساس مصرف انرژی، قابلیت اطمینان تأمین و پتانسیل گازهای گلخانه‌ای ارزیابی کنند. در نهایت، این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن مصرف انرژی عملیاتی و نهفته را در طراحی استراتژی تأمین آب مبتنی بر معیار مناسب برای هدف نشان می‌دهد. [16]

۳- در مطالعه ای، تغییرات ماهیت پیوند آب و انرژی در سیستم‌های تأمین آب شهری (UWSSs) تحت تأثیر عواملی بلندمدت نظیر تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و پیشرفت‌های فناوری مورد تحلیل قرار گرفته است. این مقاله به شناسایی تغییرات فیزیکی در سیستم‌های تأمین آب و همچنین تغییرات در ویژگی‌های سیستم پرداخته است که هر دو این تغییرات به تغییر ماهیت پیوند آب و انرژی کمک می‌کنند. این تحقیق به بررسی واکنش‌های مختلف در پاسخ به این تغییرات در چهار حوزه کاربردی اصلی شامل برنامه‌ریزی بلندمدت، طراحی سیستم، عملیات سیستم و بازسازی سیستم می‌پردازد. در این حوزه‌ها، سه واکنش عمده شناسایی شده است: کاهش مصرف انرژی یا گازهای گلخانه‌ای، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی یکپارچه برای مدیریت بهتر منابع و بهبود مزایای اجتماعی. این مقاله همچنین به بررسی شکاف‌های موجود در پاسخ‌ها نسبت به تغییرات ماهیت پیوند آب و انرژی در سیستم‌های تأمین آب شهری پرداخته و به شناسایی زمینه‌هایی برای تحقیق بیشتر در زمینه بهبود کارایی UWSSs با در نظر گرفتن عوامل بلندمدت مانند تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت می‌پردازد. از این رو، این تحقیق بر لزوم توسعه چارچوبی یکپارچه و جامع مبتنی بر نظریه یکپارچه (Integral Theory) تأکید دارد که به‌عنوان پلتفرمی برای تحلیل دقیق‌تر و مدیریت بهینه پیوند آب و انرژی عمل کند. این چارچوب باید بتواند با ارزیابی دقیق‌تر این پیوندها، به بهبود کارایی سیستم‌های تأمین آب شهری کمک کرده و چالش‌های بلندمدت را به‌طور مؤثر مدیریت کند. [17].

۴- در یک مطالعه دیگر که به بررسی برداشت انرژی از طریق توربین‌های برق‌آبی کوچک در شبکه‌های تأمین آب شهری پرداخته است، توربین جریان متقاطع عمودی درون خطی طراحی و توسعه یافته است. هدف اصلی این تحقیق، تولید برق برای تأمین انرژی سیستم‌های نظارت بر نشتی آب بوده است، به‌ویژه برای جایگزینی باتری‌های شیمیایی با عمر محدود که در این

سیستم‌ها معمولاً استفاده می‌شود. برای ارزیابی تأثیرات مختلف طراحی توربین، از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است که در آن به بررسی شکل بلوک‌های داخلی لوله و فاصله نوک پره‌های توربین پرداخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این توربین قادر است روزانه حدود ۶۰۰ وات ساعت برق تولید کند، بدون آنکه تأثیر منفی بر فشار آب شهری بگذارد. علاوه بر این، اتلاف هد آب در تمامی جریان‌ها کمتر از ۵ متر بوده و با نیازهای تأمین آب شهری هم‌خوانی دارد. شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان داد که کاهش فاصله نوک پره‌ها باعث بهبود عملکرد توربین و کاهش گشتاور معکوس می‌شود. این تحقیق نشان می‌دهد که توربین‌های جریان متقاطع عمودی درون‌خطی می‌توانند گزینه‌ای مؤثر و مناسب برای برداشت انرژی هیدرولیکی از شبکه‌های آبرسانی شهری باشند، به‌ویژه برای کاربردهایی که به انرژی پایدار و قابل اطمینان برای سیستم‌های نظارتی نیاز دارند. [6]

۵- در یک پژوهش دیگر که با هدف بررسی امکان استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین (PAT) برای تولید انرژی از انرژی هیدرولیکی باقی‌مانده در شبکه‌های توزیع آب انجام شده است، عملکرد این تجهیزات به دقت مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، چهار پمپ با ویژگی‌های متفاوت در چهار شبکه توزیع آب با دبی و فشارهای مختلف بررسی شدند تا میزان انرژی الکتریکی تولیدی آن‌ها در طول یک سال تخمین زده شود. این پمپ‌ها به‌صورت معکوس و در نقش توربین به‌کار گرفته شده و منحنی‌های عملکردی آن‌ها که شامل ارتباط فشار، توان و بازده با دبی می‌باشد، از داده‌های تجربی استخراج شد. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، عدم ارائه داده‌های عملکردی پمپ‌ها در حالت توربین توسط تولیدکنندگان بود. برای حل این مشکل، از روابط تئوریک و تجربی موجود استفاده شد تا ویژگی‌های عملکردی این پمپ‌ها به‌عنوان توربین تخمین زده شود. نتایج تحقیق نشان داد که انتخاب صحیح پمپ‌ها باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که با ویژگی‌های خاص شبکه تطابق داشته باشد تا از هدررفت انرژی ناشی از فشار و دبی غیرضروری جلوگیری شود. [7]

۶- در یک پژوهش مروری که به بررسی جنبه‌های فنی استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین (PAT) در سیستم‌های میکروهیدروپاور (برق‌آبی کوچک) پرداخته است، عملکرد این تجهیزات به‌عنوان جایگزینی اقتصادی برای توربین‌های سنتی تحلیل شده است. استفاده از PAT در پروژه‌های کوچک آبی به‌ویژه در مناطق دورافتاده که دسترسی به شبکه برق محدود است، به دلیل هزینه‌های کمتر و طراحی و نصب ساده‌تر، توجه ویژه‌ای را جلب کرده است. این تحقیق به بررسی روش‌های مختلف تئوری، عددی و تجربی برای پیش‌بینی عملکرد PAT پرداخته و نشان داده است که بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و بهبود طراحی هندسی پمپ‌ها می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها و کارایی این سیستم‌ها را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. [8]

۷- در یک پژوهش دیگر، یک روش نوآورانه برای انتخاب پمپ‌ها به‌عنوان توربین (PAT) در سیستم‌های توزیع آب معرفی شده است. هدف این روش، جایگزینی شیرهای کاهش فشار (PRV) با PAT به منظور بهره‌برداری از انرژی هدررفته در فرآیند کاهش فشار و تبدیل آن به برق بوده است. در این تحقیق، از تکنیک بهینه‌سازی "ازدحام ذرات" (PSO) برای انتخاب بهترین PAT استفاده شده و عملکرد آن با شیرهای کاهش فشار (PRV) مقایسه گردیده است. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از PAT در ساعات پیک مصرف بسیار مؤثر است، اما در زمان‌های مصرف کم، کاهش فشار کافی برای عملکرد بهینه انجام نمی‌شود. برای رفع این مشکل، پیشنهاد شده که در دوره‌های مصرف پایین، از PAT اضافی استفاده شود تا عملکرد سیستم بهبود یابد. [9]

۸- در تحقیقی به بررسی تولید انرژی از طریق پمپ‌هایی که به‌عنوان توربین (PATs) عمل می‌کنند، پرداخته است تا انرژی هیدرولیکی باقی‌مانده در شبکه‌های توزیع آب را بهره‌برداری کند. برای این منظور، چهار پمپ با ویژگی‌های متفاوت از نظر عملکرد به‌عنوان پمپ و توربین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و انرژی الکتریکی تولیدی سالانه آن‌ها تخمین زده شده است. منحنی‌های عملکرد PATs که ارتباط بین هد، توان و بازده را با دبی حجمی در طول محدوده عملکرد شبیه‌سازی می‌کنند، از داده‌های تجربی منتشر شده استخراج شده است. همچنین، با در نظر گرفتن تغییرات واقعی دبی و هد در طول یک سال، چهار تطبیق بهینه پمپ/شبکه توزیع آب شناسایی و انرژی الکتریکی قابل تولید آن‌ها برآورد گردید. نتایج تحقیق نشان داد که پتانسیل انرژی موجود در شبکه‌های توزیع آب به‌طور کامل بهره‌برداری نمی‌شود و بازده تبدیل معمولاً تا ۳۹٪ در برخی شبکه‌ها بوده است. این مقاله بر لزوم انتخاب دقیق پمپ مناسب برای استفاده به‌عنوان PAT بر اساس ویژگی‌های خاص هر شبکه تأکید می‌کند و پیشنهاد می‌کند که در تحقیقات آینده به بررسی عملکرد انواع مختلف PAT و طرح‌های مختلف نصب و تنظیم برای بهینه‌سازی تولید انرژی الکتریکی توجه بیشتری شود. [17]

۹- یک پژوهش به تحلیل سیستم‌های تولید برق درون‌لوله‌ای پرداخته است که از فشار اضافی موجود در شبکه‌های آب‌رسانی شهری و صنعتی برای تولید انرژی استفاده می‌کند. این فناوری به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای تأمین انرژی پایدار در شهرهای هوشمند معرفی شده است. از مزایای این سیستم می‌توان به کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش عمر تجهیزات و عدم نیاز به تغییرات معماری یا وابستگی به شرایط جوی اشاره کرد. همچنین، این فناوری قادر است انرژی تجدیدپذیر مقرون‌به‌صرفه‌ای را فراهم کند که می‌تواند به‌ویژه در تأمین انرژی شهرهای هوشمند بسیار مفید باشد. [10]

۱۰- در یک مطالعه با هدف بازیابی انرژی در شبکه‌های توزیع آب، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی عملکرد پمپ به‌عنوان توربین (PAT) طراحی و پیاده‌سازی شده است. این مدل در شبکه توزیع آب شهر پالرمو، ایتالیا، مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که نصب PAT در نزدیکی منابع آب نه تنها به تولید انرژی کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش فشار و توزیع عادلانه‌تر آب میان مصرف‌کنندگان نیز می‌شود. طبق ارزیابی‌ها، دوره بازگشت سرمایه در شرایط بهینه حدود ۲.۵ سال تخمین زده شده است. [11]

مطالعات انجام‌شده در زمینه سیستم‌های پمپاژ آب با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RESWPS) نشان داده‌اند که این فناوری‌ها، شامل انرژی خورشیدی فتوولتائیک، حرارتی خورشیدی، بادی، زیست‌توده و سیستم‌های هیبریدی، به‌عنوان راهکارهای پایدار برای تأمین آب در مناطق دورافتاده به‌ویژه در شرایط خاص، عمل می‌کنند. این پژوهش همچنین به شناسایی چالش‌ها و نیازهای تحقیقاتی در آینده پرداخته و تأکید کرده است که استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری مصرف انرژی‌های متداول را کاهش داده و اثرات منفی زیست‌محیطی را به حداقل برساند. [12]

۱۱- در یک پژوهش به منظور ارزیابی اقتصادی استفاده از پمپ به‌عنوان توربین (PAT) در مقابل توربین فرانسویس در نیروگاه‌های برق آبی کوچک (پیکو)، مشخص گردید که با وجود بازدهی پایین‌تر PAT، به دلیل هزینه اولیه به مراتب کمتر آن، استفاده از این فناوری در مقیاس‌های کوچک مقرون به صرفه است. تحلیل هزینه چرخه عمر سالانه نیز حاکی از آن است که PAT گزینه اقتصادی مناسبی برای مناطق روستایی و دورافتاده به شمار می‌رود. [13]

۱۲- مطالعه‌ای به منظور ارزیابی کاربرد پمپ‌ها به‌عنوان توربین (PAT) در سیستم‌های توزیع آب انجام شده است. یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که استفاده از PAT ها، در مقایسه با توربین‌های مرسوم، با صرف هزینه کمتری امکان تولید

انرژی را فراهم می‌آورد و همزمان، به کاهش فشار در شبکه نیز کمک می‌کند. بر اساس یک ارزیابی اقتصادی مقدماتی، تخمین زده می‌شود که دوره بازگشت سرمایه برای پیاده‌سازی این فناوری تقریباً بین ۲.۵ تا ۳ سال باشد. [14]

۱۳- در یک تحقیق، به‌کارگیری پمپ‌ها به‌عنوان توربین (PAT) به‌منظور کاهش هزینه‌های تجهیزات در نیروگاه‌های کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به ارائه یک روش طراحی اختصاصی برای استفاده از PAT در شبکه‌های توزیع آب پرداخته و نشان داده است که بهره‌برداری از اختلاف فشار موجود در سیستم می‌تواند منجر به تولید انرژی به‌صورت اقتصادی و پایدار گردد. [۵].

۱۴- در پژوهشی، پمپ‌هایی که به‌عنوان توربین (PAT) عمل می‌کنند، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش هزینه تجهیزات در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک معرفی شده‌اند. با این حال، تولیدکنندگان اطلاعات کافی در مورد عملکرد PAT ارائه نمی‌دهند و شرایط عملیاتی متغیر در شبکه‌های توزیع آب (WDNs) مشکلاتی را برای اجرای گسترده‌تر آن ایجاد می‌کند. در این تحقیق، یک روش طراحی پیشنهاد شده است که با ترکیب مدار هیدرولیکی موازی و معیار بهره‌وری کلی سیستم، انتخاب پمپ مناسب برای استفاده در شبکه توزیع آب را بهینه می‌کند. علاوه بر این، استراتژی عملیاتی متغیر (VOS) به‌عنوان یک رویکرد مؤثر، به تنظیم فشار پیوسته و بهبود کارایی نیروگاه کمک می‌کند. این روش، امکان انتخاب هندسه مناسب PAT برای الگوهای جریان و فشار خاص را فراهم کرده و عملکرد آن را تحت شرایط مختلف جریان و فشار بهبود می‌بخشد. همچنین، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌عنوان یک ابزار معتبر برای ارزیابی منحنی‌های عملکرد و شبیه‌سازی هندسه پمپ‌ها در شرایط معکوس کاری استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها به شناسایی و بهبود پیکربندی‌های مختلف پمپ و تأثیر آن‌ها در سیستم‌های PAT کمک می‌کند و می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های تجربی محدود باشد. [8].

۱۵- در تحقیقی، راندمان پمپ‌های گریز از مرکز در حالت توربین معکوس (PAT) مورد تحلیل قرار گرفت. هدف اصلی این تحقیق، افزایش کارایی پمپ‌ها در نقاط عملکرد مشخص بود. برای دستیابی به این هدف، طراحی پره‌های پروانه بهینه‌سازی شد و لبه‌های پیشرو و ورودی‌های محفظه داخلی به‌منظور کاهش تلفات و بهبود جریان اصلاح گردید. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم گرادیان و حل‌کننده سه‌بعدی جریان ناویر-استوکس انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بهینه‌سازی شکل پره‌ها موجب افزایش ۴.۲۵ درصدی گشتاور، ۱.۹۷ درصدی هد و ۲.۲ درصدی راندمان هیدرولیکی شد. همچنین، گرد کردن لبه‌های پره‌ها و ورودی‌های محفظه داخلی موجب کاهش تلفات جریان و بهبود راندمان تا ۵.۵ درصد گردید. آزمایش‌ها همچنین نشان داد که این تغییرات نه‌تنها راندمان پمپ‌ها را در حالت توربین افزایش می‌دهند، بلکه کارایی آن‌ها را در دامنه وسیع‌تری از شرایط کاری بهبود می‌بخشند. این تحقیق به‌طور مؤثر نشان داد که با انجام اصلاحات ساده در طراحی پره‌ها و پروانه پمپ‌ها، می‌توان بهره‌وری این سیستم‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. این یافته‌ها کاربردهای وسیعی در استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین در سیستم‌های هیدرولیکی کوچک‌مقیاس و اقتصادی دارند. [16]

۱۶- در تحقیقی جامع، عملکرد پمپ‌های گریز از مرکز در حالت توربین معکوس (PAT) با استفاده از روش‌های نظری، عددی و تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه، تعیین نقطه بهترین راندمان (BEP) پمپ‌ها در حالت توربین بر اساس ویژگی‌های هیدرولیکی آن‌ها در وضعیت پمپ بود. در این تحقیق، رفتار هیدرولیکی پمپ‌ها در حالت توربین تحت شرایط مختلف جریان و فشار با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌سازی شد و نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی مقایسه گردید تا صحت مدل شبیه‌سازی تأیید شود. نتایج نشان داد که پمپ‌ها می‌توانند به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و کارآمد برای تولید انرژی در نیروگاه‌های کوچک به‌کار روند. با این حال، برای دستیابی به راندمان بهینه، نیاز به محاسبات هیدرولیکی دقیق و اصلاحات

طراحی در اجزای داخلی پمپ‌ها است. این اصلاحات شامل تغییرات در طراحی پره‌های پروانه و محفظه داخلی پمپ‌ها می‌شود که عملکرد آن‌ها را در حالت توربین بهبود می‌بخشد. نتایج تحقیق حاکی از آن است که انتخاب مناسب پمپ و اعمال اصلاحات طراحی می‌تواند راندمان سیستم را افزایش دهد و هزینه‌های اولیه را کاهش دهد. این یافته‌ها می‌تواند در توسعه فناوری‌های تولید انرژی کوچک‌مقیاس، به‌ویژه در مناطق دورافتاده و بدون زیرساخت‌های پیشرفته، نقشی اساسی ایفا کند [17].

۱۷- در پژوهشی که به تحلیل استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین در سیستم‌های آبی پرداخته است، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطقی با دبی آب کافی و اختلاف ارتفاع مناسب به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر و پایدار برای تولید انرژی الکتریکی معرفی شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایطی که دبی آب موجود برای نصب توربین‌های سنتی به‌طور اقتصادی کافی نیست، پمپ‌ها می‌توانند به‌عنوان توربین عمل کرده و انرژی اضافی جریان آب که معمولاً هدر می‌رود را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین، در مقایسه با توربین‌های سنتی، مزایای متعددی از جمله هزینه‌های پایین‌تر، پیاده‌سازی آسان‌تر و کاهش نیاز به زیرساخت‌های پیچیده دارد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به کارایی بالا، حدود ۸۰٪ در شرایط عملیاتی، و عملکرد پایدار در شبکه‌های غیرمتمرکز اشاره کرد که این امر باعث می‌شود که استفاده از پمپ‌های معکوس به‌عنوان توربین برای تولید انرژی در مناطقی که با محدودیت‌های اقتصادی مواجه هستند، بسیار کارآمد باشد. به‌ویژه در جوامع روستایی یا مناطقی که به دلیل توپوگرافی خاص امکان نصب توربین‌های معمولی وجود ندارد، این فناوری می‌تواند یک راه‌حل مناسب و اقتصادی برای تأمین انرژی پایدار و تجدیدپذیر فراهم آورد. این تحقیق به‌طور مؤثری بر اهمیت استفاده از پمپ‌های معکوس به‌عنوان توربین تأکید دارد و به‌عنوان یک گزینه مناسب برای بهره‌برداری از انرژی هدر رفته در شبکه‌های آبی معرفی می‌شود. [18]

۱۸- در پژوهشی که به تحلیل استفاده از پمپ‌ها به‌عنوان توربین در سیستم‌های آبی پرداخته است، استفاده از این روش به‌عنوان یک راه‌حل اقتصادی و مؤثر برای تولید انرژی در مناطقی با دبی آب کافی و اختلاف ارتفاع مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. پمپ‌ها به‌ویژه در شرایطی که دبی آب برای نصب توربین‌های سنتی اقتصادی نباشد، قادرند به‌عنوان توربین عمل کرده و انرژی اضافی جریان آب را که معمولاً هدر می‌رود، به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. این فناوری به‌ویژه در جوامع روستایی یا مناطق ایزوله که نیاز به تأمین انرژی پایدار دارند، به‌عنوان یک راه‌حل کارآمد با هزینه پایین‌تر و پیاده‌سازی ساده‌تر مطرح می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان داده است که این سیستم‌ها می‌توانند کارایی نسبی تا ۸۰٪ را ارائه دهند و در مقایسه با توربین‌های سنتی نیاز به تجهیزات کمتری دارند. همچنین، در شرایط اضطراری که تغییرات فشار در شبکه ضروری باشد، پمپ‌ها به‌عنوان توربین قادرند به‌طور مؤثری عمل کرده و پایداری سیستم را در هر شرایط عملیاتی حفظ کنند. این تحقیق نشان می‌دهد که پمپ‌ها به‌عنوان توربین می‌توانند در سیستم‌های انتقال طولانی یا در مناطقی که نصب توربین‌های واقعی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست، به‌عنوان یک راه‌حل مناسب و مؤثر برای تولید انرژی پایدار و تجدیدپذیر استفاده شوند.

نتیجه گیری

محدودیت استفاده از منابع انرژی فسیلی، افزایش نگرانی های زیست محیطی به واسطه ی مصرف بی رویه ی منابع انرژی فسیلی، افزایش جمعیت و مصرف انرژی، تلفات شبکه های برق، راندمان پایین نیروگاه های حرارتی، همگی مباحثی اند که اهمیت بهبود بازدهی انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر را نشان می دهند. خطوط انتقال آب به واسطه ی در اختیار داشتن امکانات و تسهیلاتی مانند مخازن زیرزمینی، پتانسیل بالقوه ی انرژی تجدیدپذیر را دارد. نتایج نشان می دهد برای کاهش فشار آب در خطوط لوله ی انتقال آب، معمولا از شیرها و تانکرهای فشار شکن استفاده می شود در حالی که می توان با استفاده از توربین های کوچک مقیاس بهره برد و بدون آثار جانبی به تولید برق تجدید پذیر پرداخت. تحقیقات نشان می دهد استفاده از پمپ بجای توربین نیز جایگزینی در خور توجه است؛ زیرا سبب صرفه جویی در هزینه، نصب آسان، زمان تحویل کوتاه مدت، عمر کوتاه و در دسترس بودن قطعات یدکی را نام برد. از اینرو تحقیقات بیانگر این است که نصب حدود ۲۰۰ دستگاه کوچک برق آبی در ایران امکان پذیر است با بررسی های انجام گرفته و با توجه به وجود فشارشکن ها، بطور بالقوه توانایی تامین برق از طریق میکروتوربین های آبی وجود دارد. این بررسی ها نشان می دهد در صورت استفاده امکان تامین میزان قابل توجه انرژی الکتریکی پاک بدون سوخت برای منازل مسکونی و محوطه تاسیسات آبرسانی بوجود می آید. با توجه به مشکل کمبود آب که در سال های اخیر به طور گسترده و سراسری در کل کشور، رفتن به سمت انرژی های پاک اجتناب ناپذیر می نماید. امیدواریم که مسئولین امر هر چه زودتر برنامه های لازم این زمینه را به طور مستمر و کارآمد در دستور کار قرار دهند.

منابع

- [۱] J. Thornton ,A. Lambert ,and R. Liemberger ,Water Loss Control ,2nd ed. ,New York: McGraw-Hill ,2008.
- [۲] E. Corcoran ,C. Nellemann ,E. Baker ,R. Bos ,D. Osborn ,and H. Savelli ,Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development ,United Nations Environment Programme (UNEP) ,2016.
- [۳] A. Lima ,R. M. D. S. Matos ,and M. Covas ,“Pressure Management and Leakage Control.” *Procedia Engineering* ,vol. 186 ,pp. 416–423 ,2018.
- [۴] P. Derakhshan and A. Nourbakhsh ,“Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds.” *Experimental Thermal and Fluid Science* ,vol. 32 ,no. 3 ,pp. 800–807 ,2008.
- [۵] A. Williams ,“Pumps as Turbines: A Users Guide.” Intermediate Technology Publications , 1995.
- [۶] A. Carravetta ,G. Del Giudice ,O. Fecarotta ,and H. Ramos ,“Pumps as Turbines: Fundamentals and Applications.” Springer ,2017.
- [۷] REN21 ,Renewables 2023 Global Status Report ,Paris: REN21 Secretariat ,2023.
- [۸] B. A. Nasir ,“Design considerations of micro-hydro-electric power plant.” *Energy Procedia* ,vol. 50 ,pp. 19–29 ,2014.
- [۹] European Small Hydropower Association (ESHA) ,“Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants.” Sixth Framework Programme ,Mhylab , Switzerland ,2010.
- [۱۰] International Energy Agency (IEA) ,“Hydropower.” IEA ,<https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity> accessed Apr. 2025.
- [۱۱] International Hydropower Association (IHA) ,“Renewable hydropower is a reliable , versatile and low-cost source of clean electricity.” IHA ,<https://www.hydropower.org/> , accessed Apr. 2025.
- [۱۲] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Center on Small Hydro Power (ICSHP) ,“World Small Hydropower Development Report.” UNIDO & ICSHP ,Vienna ,2013.
- [۱۳] U.S. Energy Information Administration ,“Types of hydropower: Conventional and pumped-storage.” EIA ,<https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/types-and-usage.php> accessed Apr. 2025.

[۱۴] U.S. Energy Information Administration, "Hydropower and the environment," EIA, <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/hydropower-and-the-environment.php>, accessed Apr. 2025.

[۱۵] U.S. Department of Energy, "Hydropower Basics," DOE, <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics>, accessed Apr. 2025.

[۱۶] خواجه پور، م.، عارف پور، م.، & غیاثی، م. (۱۳۹۰). نیروگاههای برق آبی: مزایا، معایب و مقایسه آن با دیگر روشهای تولید انرژی. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برق آبی. تهران.

[۱۷] ع. عنایتی، ر. مرادی، ح. افضلی و م. کاظم نژاد، "ارزیابی فنی و اقتصادی احداث نیروگاه برق آبی کوچک در غرب مازندران"، پنجمین کنفرانس ملی نیروگاه برق، اهواز، ایران، ۱۳۹۱.

[۱۸] M. A. Nasiri, A. M. Eltamaly, and A. Alolah, "Design and performance analysis of hydraulic turbines in micro-hydropower plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 1361–1376, 2019.

[۱۹] G. C. Ciocan, T. Leroy, and E. Avellan, "Cavitation monitoring for hydraulic turbines," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 38, no. 2, pp. 276–289, 2013.

[۲۰] A. Kumar et al., "Hydropower," in *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2012, pp. 437–496.

[۲۱] C. Penche, *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, Brussels: European Small Hydropower Association, 2004.

[۲۲] S. D. S. Kumar and N. B. Kumar, "Analysis of Francis turbine performance under different conditions," *Journal of Renewable Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 23–32, 2010.

[۲۳] M. H. H. Samad, "Performance evaluation of Kaplan turbine for small-scale hydropower plants," *Renewable Energy Research and Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 123–130, 2012.

[۲۴] Chiyembekezo S. Kaunda and Cuthbert Z. Kimambo b, Torbjorn K. Nielsen a (2014) A technical discussion on microhydropower technology and its turbines *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol 35 p 445–459

[۲۵] Lima G.M. Junior E.L. ,Brentan B.M, "selection and location of PAT substituting PRVs" *Renewable Energy*, 2017, 109, pp. 392–405

[۲۶] Jafari M. ,Khanjani M.J ,Smaeilian H.R, "Pressure Management and Electric Power Production Using Pumps as Turbines" *American Water Works Association* 2015 ;107(7) , pp 351–363.