نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال پنجم / شماره شانزدهم / بهار ۱۳۹۷

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
5th Year / No. 16 / June 2018

ارزیابی ظرفیت تولید برق از خطوط آب‌رسانی شهر ایلام

محمد محمدی[۱]
مهدی یاسی*[۲]
سعید جمالی[۳]
هومن حاجی کندی[۴]

چکیده

تولید برق از خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع آب از موضوعات جدید در مدیریت بهینه سامانه‌های آبی است. در شبکه‌های-تأمین آب، به‌منظور جلوگیری از فشار اضافی وارد بر تجهیزات پایین‌دست، اغلب از شیرهای فشارشکن استفاده می‌گردد. باوجود بار آبی اضافی (فشار مازاد آب) در شبکه می‌توان با استفاده از "توربین" و یا"پمپ به‌عنوان توربین (PAT)" انرژی برق‌آبی تولید نمود. در این تحقیق، ظرفیت‌های موجود بازیابی انرژی در سامانه آب‌رسانی شهر ایلام با استفاده از توربین و PAT موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت تولید برق در ده موقعیت بر روی سامانه آب‌رسانی شهر ایلام وجود دارد که در حد نیروگاه‌های برق‌آبی خیلی کوچک (Mini) تا پیکو (Pico) هستند. میزان بازیابی انرژی در صورت استفاده از توربین ۱۵۶۱۱۰۰۰ کیلووات- ساعت و با استفاده از PAT معادل ۱۱۷۶۸۹۵ کیلووات-ساعت درسال بود. نتایج تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که: هزینه واحد تولید انرژی برای توربین ۱۱۰۱ ریال و برای PAT معادل ۴۹۰ ریال؛ و نسبت فایده به هزینه برای توربین و PAT به ترتیب برابر ۱/۲۳ و ۳/۹۸ است. به‌طورکلی، گزینه استفاده از PAT در-سامانه‌های کوچک برق‌آبی بر روی شبکه موجود آب‌رسانی شهر ایلام ازنظر فنی امکان‌پذیر و ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است.

واژه‌های کلیدی

تولید برق، نیروگاه برق‌آبی، خطوط آب‌رسانی، توربین، PAT، تحلیل هزینه

۱. دانشجوی دکتری عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی
۲ *. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، m.yasi@ut.ac.ir
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی
۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکزی

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۱۸

مقدمه

محدودیت استفاده از منابع انرژی فسیلی به لحاظ فنی- اقتصادی- محیطزیستی، ازدیاد جمعیت و به دنبال آن افزایش مصرف انرژی، تلفات شبکه‌های برق و عدم‌کفایت راندمان نیروگاه های حرارتی، ضرورت یافتن راهکارهای مناسب در جهت معضلات تأمین انرژی و حفاظت از محیطزیست را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در این راستا، روش‌های اقتصادی برتر و معرفی الگوهای جدید و دسترسی به انواع منابع انرژی تجدید پذیر در تأمین نیازهای حال و آینده موردتوجه است.

تولید برق از خطوط انتقال و شبکه های توزیع آب از موضوعات جدید درزمینه مدیریت بهینه سامانه‌های آب‌رسانی می‌باشد. کنترل نشت آب از خطوط انتقال و شبکه‌های توزیع با تأکید بر بازیابی فشار اضافی برای تولید انرژی برق‌آبی تعریف می‌گردد (خالصی دوست و محمدیان[۱]، ۱۳۹۲).

در شبکه‌های انتقال و توزیع آب، به‌منظور جلوگیری از فشار اضافی وارد بر تجهیزات پایین‌دست، اغلب از شیرهای کنترل فشار استفاده می‌گردد. باوجود بار آبی اضافی (فشار مازاد آب) می‌توان از "توربین " یا "پمپ به‌عنوان توربین " (به‌اختصار PAT[۲]) در تولید برق استفاده نمود. شرکت‌های آب و فاضلاب و آب منطقه‌ای کشور به‌واسطه در اختیار داشتن خطوط و کانال های انتقال آب دارای منابع عظیم تولید انرژی برق‌آبی می‌باشند. ازاین‌رو، نه‌تنها امکان احداث نیروگاه های برق‌آبی کوچک به‌خوبی فراهم است؛ بلکه به‌دلایلی‌چند نظیر فناپذیر نبودن انرژی برق‌آبی، پایین بودن قیمت تمام‌شده، بهره‌برداری از حداقل ظرفیت آبی، کوتاهی زمان ساخت، مشکلات اجتماعی و محیطزیستی کمتر جهت کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، پراکندگی مناسب در سطح کشور، داشتن بستر مناسب جهت انتقال فنّاوری و قابلیت سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، آن را جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی جهت تولید برق می‌دانند (خالصی دوست و محمدیان، ۱۳۹۲)؛ بنابراین شناسایی نقاط مناسب جهت تولید برق و تعیین میزان برق قابل‌تولید و بهینه، با توجه به محدودیت حداقل فشار موردنیاز، ضروری به نظر می‌رسد.

نیروگاههای برق‌آبی بر اساس ظرفیت آن‌ها به انواع مختلف زیر تقسیم می‌گردند (درخشان و محمدی، ۱۳۹۲):

۱- نیروگاههای برق‌آبی بزرگ[۳] با ظرفیت بزرگ‌تر از ۵۰۰۰۰ کیلووات

۲- نیروگاه های برق‌آبی متوسط[۴] به ظرفیت ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ کیلووات

۳-نیروگاه های برق‌آبی کوچک[۵] با ظرفیت ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلووات

۴- نیروگاههای برق‌آبی خیلی کوچک[۶] با ظرفیت ۵۰ تا ۵۰۰ کیلووات

۵- نیروگاههای برق‌آبی ریز[۷] با ظرفیت ۵ تا ۵۰ کیلووات

۶- نیروگاه های برق‌آبی پیکو[۸] با ظرفیت ۳۰۰ وات تا ۵ کیلووات (امامی[۹] و همکاران، ۱۳۹۴).

بزرگ‌ترین مانع بر سر راه توسعه دستگاه‌های برق‌آبی کوچک، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه توربین‌های متداول است. هزینه‌ی تجهیزات الکتریکی و مکانیکی در طرح‌های برق‌آبی بزرگ حدوداً ۲۰ در صد کل هزینه‌ی پروژه است اما این نسبت در طرح‌های برق‌آبی کوچک حدوداً ۳۵ تا ۷۰ در صد هزینه‌ی کل پروژه است. یکی از مهم‌ترین موضوعات محققین جهان درزمینه نیروگاه‌های برق‌آبی کاهش هزینه‌ی لوازم الکترومکانیکی و استانداردسازی آن‌ها در دامنه‌ی ظرفیت‌های پایین می‌باشد (سانجی و راجش[۱۰]،۲۰۱۴).

بشیرزاده تبریزی[۱۱] و همکاران درسال ۱۳۸۸، مناطق مستعد به‌کارگیری نیروگاه‌های آبی کوچک را بر روی خطوط انتقال

---

۱ Khalesidoost & Mohammadian
۲ Pump As Turbine
۳ Large Hydropower
۴ Medium Hydropower
۵ Small Hydropower
۶ Mini Hydropower
۷ Micro Hydropower
۸ Pico Hydropower
۹ Emami
۱۰ Sanji & Rajesh
۱۱ Bashirzadeh Tabrizi

آب بجنورد، زاهدان و بیرجند بررسی نمودند. درسال ۱۳۹۲، خالصی دوست و همکاران نیروگاه برق‌آبی کوچکی بر روی خط انتقال چشمه روزیه[۱] سمنان را ارزیابی و با نیروگاه گازی مشابه مقایسه نموده و نتیجه‌گیری کردند که شاخص‌های اقتصادی و قیمت‌های تمام‌شده برق تولیدی نیروگاه آبی از مطلوبیت بیشتری نسبت به نیروگاه گازی برخوردار است. محمدی و وشتانی[۲] درسال ۱۳۹۴ امکان‌سنجی نصب نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بر روی خطوط شبکه آب‌رسانی شهر تهران را مورد ارزیابی قرار دادند. کوکوکالی[۳] درسال ۲۰۱۱ بامطالعه موردی بر روی خطوط انتقال و شبکه توزیع آب ادرمیت[۴] در ترکیه پتانسیل‌های موجود جهت تولید انرژی را به دست آورده و نتیجه گرفت که ۵۵۹ کیلووات برق با سود سالیانه ۵۶۰۱۱۸ یورو و دوره بازگشت سرمایه ۲ ساله از خطوط و شبکه توزیع آب ادرمیت قابل‌تولید است. کوگیاس[۵] و همکاران درسال ۲۰۱۴ به پتانسیل‌یابی تولید انرژی در شمال غرب یونان پرداخته و با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و اقتصادی، مکان بهینه نصب نیروگاه برق‌آبی را بر روی خطوط انتقال آب مشخص نمودند.

استفاده از PAT در کاهش قیمت تمام‌شده انرژی آبی اثر قطعی دارد و کاربرد آن برای قدرت‌های زیر ۵۰۰ کیلووات به‌شدت رو به توسعه بوده؛ و سرمایه‌گذاری اولیه آن در مدت کمتر از ۲ سال قابل بازگشت می‌باشد (درخشان و نوربخش[۶]، ۱۳۸۴). موتوانی[۷] و همکاران درسال ۲۰۱۳ به آنالیز اقتصادی PAT و توربین برای نیروگاه‌های پیکو (با ظرفیت ۳ کیلووات) پرداختند و ضریب واحد انرژی تولیدی را معادل ۰/۹۵ روپیه (برابر ۵۷۰ ریال) در هر کیلووات ساعت برای PAT و ۴/۸۲ روپیه (برابر ۲۸۹۲ ریال) برای توربین به دست آوردند. دی مارچی[۸] و همکاران در سال ۲۰۱۴ با ارائه یک مدل دینامیکی جهت تحلیل دینامیکی PAT و سپس به‌کارگیری مدل برای بخش‌هایی از شبکه توزیع پالرمو[۹] ایتالیا، نتیجه گرفت که زمان برگشت سرمایه در PAT برابر ۲/۵ سال بوده و بیشینه راندمان زمانی به دست می‌آید که PAT بر روی لوله‌های اصلی نصب گردد. کارپلوچی[۱۰] و همکاران در سال ۲۰۱۵ ارزیابی تکنیکی و اقتصادی نیروگاه برق‌آبی کوچک در ناحیه آبروزو[۱۱] ایتالیا را موردمطالعه قرار دادند و ضریب واحد انرژی تولیدی را بین ۸ تا ۱۵ یورو در هر کیلووات ساعت در نیروگاه‌های کوچک با توربین به دست آوردند. و سنتا کومار[۱۲] و همکاران در سال ۲۰۱۵ با مقایسه عملکرد PAT و توربین فرانسیس با ظرفیت ۱/۵ کیلووات، واحد انرژی تولیدی ۱/۷ روپیه در هر کیلووات ساعت (معادل ۱۰۲۰ ریال) برای PAT و ۳/۷ روپیه در کیلووات ساعت (معادل ۲۲۲۰ ریال) برای توربین، به دست آوردند. نتایج نشان داد که هزینه PAT ۶ تا ۷ مرتبه کمتر از توربین فرانسیس است. مطالعات مشابه توسط پدمارسان[۱۳] و همکاران درسال ۲۰۱۶ برای تولید انرژی در خطوط انتقال آب، با استفاده از فشار مازاد موجود در لوله‌ها، انجام گردید. پرز-سانچز[۱۴] و همکاران درسال ۲۰۱۷ با بررسی بازیابی انرژی توسط توربین و PAT در شبکه‌های آبیاری، ضمن تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی بر روی نیروگاه‌های بزرگ و کوچک، نتیجه گرفتند که مناسب‌ترین تجهیزات برای نیروگاه‌های پیکو، PAT می‌باشد.

پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که تاکنون تحلیل فنی-اقتصادی درزمینه استفاده از PAT در خطوط آب‌رسانی ایران گزارش نگرد یده است. ازاین‌رو، بررسی راه کار ارزان‌قیمت تولید انرژی در نیروگاه‌های کوچک (مینی، میکرو و پیکو) و مقایسه اقتصادی PAT و توربین در شرایط ایران اهمیت داشته؛ و سامانه آب‌رسانی شهر ایلام جهت این مطالعات در نظر گرفته‌شده است.

مواد و روش‌ها

سامانه آب‌رسانی شامل موارد ذیل است:

(۱) منبع تأمین آب: که ممکن است چشمه، رودخانه، دریاچه و ... باشد.

---

۱ Rozieh
۲ Mohammadi & Vashtani
۳ Kucukali
۴ Edrmit
۵ Kougias
۶ Derakhshan & Noorbakhsh
۷ Motwani
۸ De Marchis
۹ Palermo
۱۰ Carpellucci
۱۱ Abruzzo
۱۲ Vasanthakumar
۱۳ Padmarasan
۱۴ Prez-Sanchez

(۲) مخزن ذخیره آب: که برای متعادل‌سازی مصرف آب و فشار و نیز ذخیره اضطراری مورداستفاده قرار می‌گیرد.

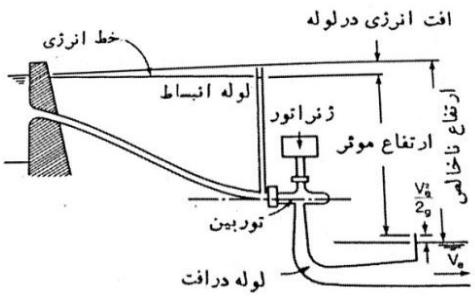
(۳) تصفیه‌خانه: که کاربرد آن در مواقعی است که از منابع آب سطحی و سدها استفاده می‌شود.

(۴) خطوط انتقال آب: که به دو صورت هست. خطوطی که آب را از منبع به تصفیه‌خانه یا مخزن ذخیره آب انتقال می‌دهند و خطوطی که آب را از مخزن ذخیره به شبکه توزیع آب منتقل می‌کنند.

(۵) شبکه توزیع آب: نمای کلی یک نیروگاه برق‌آبی در شکل (۱) نشان داده شده است (عباسپور[۱]، ۱۳۹۴). در سامانه‌های آب‌رسانی، خصوصاً جاهایی که منبع آب یا مخزن ذخیره آب در ارتفاع بالایی قرار دارند، در طول مسیر انتقال آب فشار در داخل لوله‌ها بالا می‌رود. لذا برای کاهش فشار اغلب از شیرهای کنترل فشار یا تانک ضربه‌گیر استفاده می‌گردد. با استفاده از توربین یا پمپ به‌جای توربین می‌توان ضمن کاهش فشار در خطوط انتقال آب، از انرژی مازاد جهت تولید برق استفاده نمود. مقدار انرژی قابل‌تولید در خطوط انتقال آب، با توجه به شکل (۲)، از رابطه زیر به دست می‌آید (کوگیاس[۲] و همکاران، ۲۰۱۴):

$$P = \rho * g * Q * h * \eta$$

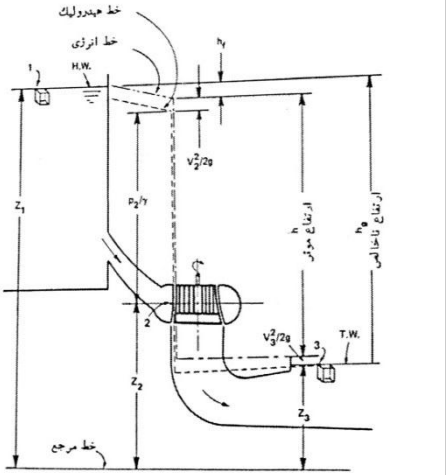
که در آن: P توان تولیدی برحسب kw؛ ρ چگالی آب برحسب $\frac{kg}{m^3}$؛ g تاب ثقل برحسب $\frac{m}{s^2}$؛ Q دبی جریان برحسب $\frac{m^3}{s}$؛ h ارتفاع معادل فشار خالص (بار آبی) برحسب متر، و η راندمان سامانه است. مقدار h با توجه به شکل (۲) و با استفاده از معادله انرژی برنولی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (عباسپور، ۱۳۹۴):



شکل (۱): نمای کلی یک نیروگاه برق‌آبی (عباسپور،۱۳۹۴)

$$h = z_1 - z_3 - h_f - \frac{v_3^2}{2g} \qquad (۲)$$

که در آن z_1 و z_3: انرژی پتانسیل در نقاط ۱ و ۳ برحسب متر، v_3 سرعت جریان در مقطع ۳ برحسب متر بر ثانیه و h_f اتلاف انرژی در مسیر جریان برحسب متر است. راندمان تئوری سامانه (η) برای هنگامی‌که از توربین استفاده می‌شود ۸۰ درصد و در صورت استفاده از PAT برابر ۶۰ درصد است (متوانی[۳] و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل (۲): دیاگرام برنولی جهت نیروگاه آبی (عباسپور, ۱۳۹۴)

انرژی تولیدی سالیانه یک نیروگاه برحسب کیلووات-ساعت درسال از رابطه زیر به دست می‌آید (کوکوکالی[۴]، ۲۰۱۱):

$$E=P*t \qquad (۳)$$

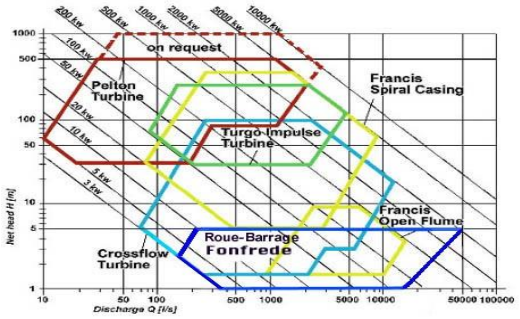
که در آن E میزان انرژی سالیانه تولیدی برحسب کیلووات-ساعت، P توان تولیدی برحسب کیلووات و t تعداد ساعت کارکرد نیروگاه درسال است. انواع توربین‌های مناسب جهت

۱ Abaspoor
۲ Kougias
۳ Motwani
۴ Kucukali

استفاده در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در شکل (۳) و انواع پمپ‌های مناسب جهت استفاده به‌عنوان توربین (PAT) در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در شکل (۴) نشان داده‌شده‌اند

ظرفیت‌های موجود در سامانه آب‌رسانی شهرستان ایلام

شـــهر ایلام به‌عنوان مرکز اســـتان ایلام با جمعیت ۱۹۴۰۰۰ نفر در غرب ک شور واقع شده ا ست. شرکت آب و فا ضلاب استان ایلام علاوه بر مسئولیت تأمین و توزیع آب شهر ایلام، متولی آب‌رســـانی به هشـــت روســـتا حومه به نام های هفت‌چ شمه[۱] با ۳۷۸۸ نفر، بانقلان[۲] با ۲۹۹۶ نفر، فاطمیه[۳] با ۱۵۰۵ نفر، مهدی‌آباد[۴] با ۱۴۳۲ نفر، چالســـرا[۵] با ۳۶۲۸ نفر، شهرک قدس[۶] با ۳۱۸ نفر، شهرک شهیدکشوری (سرطاف[۷]) با ۴۸۹۵ نفر و روســـتای چشـــمه کبود[۸] با جمعیت ۹۴۱ نفر ا ست. منابع تأمین آب شهر ایلام و رو ستاهای حومه از آب زیرزمینی، سد ایلام و چشمه گل‌گل[۹] می‌باشد.



شکل (۳): انواع توربین‌های مناسب جهت استفاده در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک (پرز-سانچز و همکاران، ۲۰۱۷)

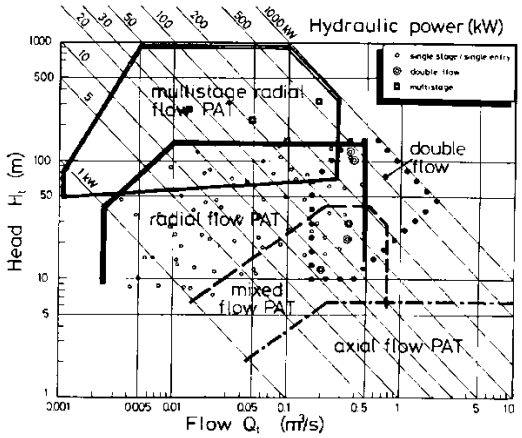


FIGURE D1 :
Range of Application of PATs

شکل (۴): انواع پمپ‌های مناسب جهت استفاده به‌عنوان توربین (PAT) در نیروگاه‌های برق‌آبی (پرز-سانچز و همکاران، ۲۰۱۷)

مشخصات منابع تأمین آب ایلام

چ شمه گل‌گل: چ شمه گل‌گل یک چ شمه آهکی با حداکثر دبی ۹۰۰ لیتر در ثانیه بوده که به‌طور میانگین ۳۲۰ لیتر در ثانیه از آن برداشـــت می‌شـــود. آب چشـــمه با جریان طبیعی (ثقلی) وارد مخزن مکش گردیده و از آنجا با دو مرحله پمپاژ به ارتفاع کل حدوداً ۵۰۰ متر به مخزن (مخزن شـــاخ شمیران[۱۰]) وارد می‌شود و پس‌ازآن آب ذخیره‌شده به‌صورت ثقلی به شهر ایلام منتقل می‌گردد. مخزن شاخ شمیران با مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی آزمایشـــگاه ۱۰۰ متر و با مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی، ۶۳ متر اختلاف ارتفاع دارد، با توجه به اینکه کد ارتفاعی مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی، ۳۷ متر پایین‌تر از مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی اســـت، دبی ورودی به مخزن توسط یک شیر سوزنی کنترل می‌گردد. وجود فشار مازاد در مخزن ۷۰۰۰ (مترمکعبی) م شکلاتی را ازنظر بهره‌برداری به وجود آورده است. کل طول خط انتقال حدوداً ۲۶ کیلومتر و با قطر ۶۰۰ میلی‌متر فولادی است که از مخزن شاخ شمیران تا سه‌راهی مخزن آزمای شگاه ۱۶٫۵ کیلومتر و از سه‌راهی تا مخزن ۷۰۰۰ برابر ۸۰۰ متر می‌با شد. چ شمه گل‌گل حدوداً " ۳۸٪ آب شـــهر ایلام را تأمین می‌نماید. موقعیت مخزن شـــاخ شـــمیران بر روی خط انتقال آب از چشـــمه گل‌گل به شهر ایلام در شکل (۵) نشان داده‌شده است.

---

۱ Haftcheshmeh
۲ Banghelan
۳ Fatemieh
۴ Mehdi Abad
۵ Chalesara
۶ Shahrake Ghods
۷ Sartaf
۸ Cheshmeh Kaboud
۹ Golgol
۱۰ Shakheshemiran

آب سد ایلام: آب از محل آبگیر سد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهر و در کد ارتفاعی ۹۲۵ (متر) به محل تصفیه‌خانه با ارتفاع حدود ۱۵۲۲ (متر) در چهار مرحله و با دبی ۵۵۰ تا ۷۰۰ بر ثانیه پمپاژ می‌گردد و پس از انتقال به تصفیه‌خانه و انجام عملیات فرآیند تصفیه و گندزدائی، وارد شبکه توزیع می‌گردد. آب سد حدود ۵۴ درصد از شهر ایلام را پوشش می‌دهد. قطر خط انتقال آب سد ۷۰۰ میلی‌متر و از جنس فولاد است. محل اجرای تصفیه‌خانه در شمال شرقی شهر ایلام و در بالاترین کد ارتفاعی نقاط شهری در دامنه کوه شلم[1] از سلسله جبال زاگرس احداث گردیده است. کلیه عملیات تصفیه آب از بدو ورود تا مصرف شهری به‌صورت ثقلی انجام می‌گیرد (شکل ۵).

اصول طراحی و اجرای شبکه توزیع مناطق فشاری

شهر ایلام به هشت منطقه فشاری مجزا تقسیم‌شده است. در این هشت منطقه فشاری تعداد ۷ حوضچه شیر فشارشکن در نقاط مختلف شبکه توزیع نصب گردیده است. منطقه بندی فشاری به‌گونه‌ای انجام‌شده که محدوده مجاز فشاری در آن در حداقل ۱۸ متر و حداکثر ۵۰ متر آب باشد. در مناطق محیطی شهر که بر روی ارتفاعات واقع‌شده است، به دلیل شیب تند باعث محدودیت در تنظیم فشار حداکثر بر روی ۵۰ متر آب می‌شود لذا حداکثر فشار مجاز ۷۰ متر آب یا ۷ اتمسفر در نظر گرفته‌شده است. در جاهایی که فشار بالاتر از ۷۰ متر رفته، در محل مناسب شیر فشارشکن نصب گردیده است. منطقه‌بندی فشاری بر اساس توپوگرافی و مخازن موجود تقسیم‌بندی شده است و محدوده مناطق فشاری به‌گونه‌ای تنظیم‌شده است که جمعیتی تقریباً مناسب با حجم مخزن مشرف‌به آن منطقه، تحت پوشش آن قرار گیرند. در منطقه بندی فشاری دو منبع تأمین آبی سد ایلام و چشمه گل‌گل به‌عنوان مطمئن‌ترین منابع آبی که به‌طور دائمی امکان برداشت آب از آن‌ها میسر است، در نظر گرفته‌شده است. پس‌ازآن، چاه‌های سطح شهر موردتوجه قرارگرفته است.

شکل ۵: پلان موقعیت شهر ایلام و خطوط تأمین آب از سد ایلام و چشمه گل‌گل

ظرفیت‌های موجود تولید برق

بر اساس بررسی‌های میدانی، تعداد ۱۰ موقعیت فشاری بر روی سامانه آب‌رسانی به شهر ایلام وجود دارد. از این میان، ۷ مورد شیرهای کنترل فشار واقع در نقاط مختلف شبکه و سه مورد بر روی خطوط انتقال، به شرح زیر واقع‌شده‌اند:

۱- ورودی ایستگاه یک سد ایلام: که آب را از دهانه آبگیر سد به ایستگاه شماره یک به‌صورت ثقلی انتقال می‌دهد. با توجه به اختلاف ارتفاع ۶۰ متری بین دهانه آبگیر و ایستگاه، در ورودی مخزن شیر کنترل فشار تعبیه‌شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، حداقل و حداکثر فشار در ورودی شیر فشارشکن در فصول مختلف سال از ۵۰ تا ۸۰ متر متغیر می‌باشد. شیر کنترل فشار به‌صورت ثابت، فشار خروجی را بر روی ۳ متر تنظیم می‌نماید. پس از ورود به مخزن، آب به سمت شهر ایلام پمپاژ می‌گردد. با توجه به وجود فشار مازاد و دبی مناسب از ۵۵۰ تا ۷۰۰ لیتر بر ثانیه، ورودی این ایستگاه به‌عنوان گزینه‌ای مناسب مورد ارزیابی قرارگرفته است.

۲- ورودی مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی آزمایشگاه: این مخزن بر روی تپه‌ای در داخل شهر و در کنار مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی

[1] Shelam

قرار دارد. آب چشمه گل‌گل پس از دو مرحله پمپاژ با یک لوله فولادی به قطر ۶۰۰ میلی‌متر و طول ۴۹۵۰ متر به مخزن شاخ شمیران انتقال می‌یابد. از مخزن شاخ شمیران با توجه به داشتن ارتفاع مناسب، جریان آب به‌صورت ثقلی به مخازن ۷۰۰۰ مترمکعبی آزمایشگاه و ۶۰۰۰ مترمکعبی انتقال می‌یابد (شکل ۵).

اختلاف ارتفاع مخزن شاخ شمیران با مخازن ۷۰۰۰ مترمکعبی و ۶۰۰۰ مترمکعبی به ترتیب برابر ۱۰۰ متر و ۶۶ متر است. طول خط انتقال از مخزن شاخ شمیران تا سه‌راهی ۱۶/۵ کیلومتر، از سه‌راهی تا مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی و مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی به ترتیب برابر ۸۰۰ و ۱۵۵۰ متر است. قرار گرفتن مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی در کد پایین‌تر نسبت به مخزن ۶۰۰۰ مترمکعبی باعث گردیده جهت کنترل دبی از شیر سوزنی قبل از ورود جریان به مخزن استفاده گردد. با توجه به داشتن فشار مناسب و مشکلات زیاد بهره‌برداری، می‌توان از ظرفیت موجود جهت تولید انرژی و کاهش فشار استفاده نمود. لذا این ایستگاه به‌عنوان یکی از ظرفیت‌های موجود مورد ارزیابی قرارگرفته است.

۳- خط انتقال آب شهید کشوری: آب موردنیاز شهرک شهیدکشوری از شهر ایلام تأمین می‌گردد. با توجه به کوچکی و فرسودگی مخزن قدیمی، مخزن جدیدی درسال ۱۳۹۳ به ظرفیت ۲۰۰۰ مترمکعب احداث گردید که در ارتفاع ۷۰ متر بالاتر از مخزن قدیمی واقع گردیده است. این اختلاف ارتفاع باعث ایجاد فشار مازاد بین ۵۵ تا ۶۰ متر گردیده است؛ بنابراین جهت کاهش فشار در مسیر خط انتقال و در ورودی شبکه توزیع شیر کنترل فشار تعبیه گردیده است که فشار را به ۲۰ متر کاهش دهد. درنتیجه می‌توان از ظرفیت موجود بر روی خط انتقال آب شهرک شهید کشوری جهت تولید برق استفاده نمود. سایر مشخصات این سه گزینه و نیز مشخصات دیگر گزینه‌های تولید در جدول (۱) ارائه گردیده است.

تحلیل اقتصادی سامانه تولید برق‌آبی

مهم‌ترین پارامترهای اقتصادی که در ارزیابی اقتصادی تحقیق حاضر مورداستفاده قرارگرفته، عبارتند از: نسبت فایده به هزینه، سود خالص، فاکتور برگشت سرمایه، هزینه متوسط سالیانه در دوره عمر مفید و هزینه واحد انرژی تولیدی.

در تحلیل اقتصادی، نرخ تنزیل ۱۲ درصد و طول عمر توربین ۲۰ سال و طول عمر PAT برابر ۱۰ سال در نظر گرفته‌شده است. همچنین هزینه‌های ساختمانی، انتقال انرژی و بهره‌برداری برای هر دو حالت توربین و پمپ یکسان است. هزینه تعمیرات و نگهداری سالیانه سامانه مطابق توصیه‌های انجام‌گرفته ۱۰ در صد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری ۵ درصد سرمایه‌گذاری اولیه است (وسانتاکومار[۱] و همکاران، ۲۰۱۵). در نیروگاه‌هایی که داخل مخازن نصب می‌گردند، با توجه به اینکه بهره‌برداری توسط کاربر مخازن صورت می‌گیرد، هزینه‌ای بابت بهره‌برداری در نظر گرفته نمی‌شود. در مقایسه هزینه‌ها بافایده حداقل انرژی تولیدی در نیروگاه‌ها مدنظر قرارگرفته است.

۱- نسبت فایده به هزینه سالیانه (B/C): نسبت فایده به هزینه سالیانه یکی از روش‌های مرسوم جهت ارزیابی پروژه‌های دولتی و ملی است. در این روش نسبت معادل زمان حاضر، یا معادل سالانه منافع به معادل زمان حاضر یا معادل سالانه هزینه‌ها محاسبه و ملاک ارزیابی، مطابق رابطه زیر قرار می‌گیرد (مسعودی[۲]، ۱۳۹۵)

$$\frac{B}{C}=\frac{AE}{AC}=\frac{Ba}{C_R+(O+M)} \qquad (۴)$$

که در این رابطه: AE= معادل سالانه منافع خالص استفاده‌کننده (منافع خالص منهای هزینه‌ها)؛ AC= معادل سالانه هزینه خالص مجری؛ Ba= منافع سالانه خالص استفاده‌کننده؛ C_R= هزینه برگشت سرمایه یا معادل سالانه هزینه سرمایه‌ای بامنظور نمودن ارزش اسقاط؛ و O+M= معادل سالانه هزینه خالص بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری است. همچنین از رابطه تعدیل‌شده زیر نیز استفاده می‌شود.

$$\frac{B}{C}=\frac{Ba-(O+M)}{C_R} \qquad (۵)$$

درصورتی‌که نسبت B/C بزرگ‌تر از یک باشد پروژه ازنظر اقتصادی قابل‌قبول؛ و درصورتی‌که کوچک‌تر از یک باشد

۱ Vasanthakumar

۲ Masoudi

غیرقابل‌قبول است. هرچند روش سنتی با رابطه تعدیل‌شده ازنظر مقدار متفاوت می‌باشد، اما در قبول یا رد یک پروژه نتیجه واحدی را می‌دهد.

۲- سود خالص (B-C): سود خالص تفاوت ارزش حال فایده‌ها و هزینه‌های طرح می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (خالصی دوست[۱] و همکاران، ۱۳۹۲):

$$B - C = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{B_i}{(1+i)^n} - \frac{C_i}{(1+i)^n}\right) \quad (۶)$$

۳- فاکتور برگشت سرمایه (CRF): فاکتور برگشت سرمایه، قادر به ارزش سالیانه تجهیزات به سرمایه اولیه است و به طول عمر تجهیزات (L) برحسب سال و نرخ تنزیل (d) بستگی دارد؛ و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (متوانی[۲] و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\mathrm{CRF} = \frac{\mathrm{d}(1+\mathrm{d})^{\mathrm{L}}}{(1+\mathrm{d})^{\mathrm{L}}-1} \quad (۷)$$

۴-هزینه دوره عمر سالیانه (ALCC): هزینه دوره عمر سالیانه به فاکتور برگشت سرمایه (CRF), هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (C_O) و هزینه‌های سالیانه (O+M) بستگی دارد؛ و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (متوانی و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\mathrm{ALCC} = \mathrm{C_O} \times \mathrm{CRF} + (\mathrm{O} + \mathrm{M}) \quad (۸)$$

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (C_O) شامل هزینه‌های ساختمانی، هزینه تجهیزات و سایر هزینه‌های متفرقه می‌باشد. هزینه‌های سالیانه (O+M) شامل هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری، سوخت، نیروی انسانی و هزینه‌های متفرقه در طول فعالیت سالیانه نیروگاه می‌باشد (وسنتاکومار[۳] و همکاران، ۲۰۱۵).

۵-میزان انرژی تولیدی (E): مقدار انرژی تولیدی از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در این تحقیق، تعداد روزهای کارکرد ۳۰۰ روز، تعداد ساعات کارکرد روزانه ۲۱ ساعت و راندمان برای توربین ۸۰ درصد و برای PAT برابر ۶۰ در صد است.

۶- هزینه واحد انرژی تولیدی (C): هزینه واحد انرژی تولیدی از تقسیم هزینه دوره عمر سالیانه (ALCC) بر میزان انرژی تولیدی به دست می‌آید. این روش برای تحلیل واحدهایی که دوره عمر متفاوت، ولی وظیفه یکسانی دارند، کاربرد دارد. هرچه مقدار آن کمتر باشد، مطلوب‌تر است (متوانی و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\mathrm{C} = \frac{\mathrm{ALCC}}{\mathrm{E}} \quad (۹)$$

که مقدار E انرژی تولیدی سالیانه می‌باشد. سود سالیانه از حاصل ضرب انرژی سالیانه تولیدی در نرخ انرژی (بر اساس نرخ تضمینی اعلام‌شده توسط وزارت نیرو درسال ۱۳۹۵ برای نیروگاه‌های برق‌آبی ۱۵۰۰ ریال در هر کیلووات) محاسبه می‌گردد.

نتایج و بحث

بر اساس بررسی‌های میدانی بر روی خطوط آب‌رسانی به شهر ایلام و روستاهای حومه، وجود شیرهای تنظیم فشار و نیز باتوجه به تحلیل های صورت گرفته با نرم‌افزار WaterGEMS، تعداد ۱۰ واحد ظرفیت نصب نیروگاه وجود دارد. این نیروگاه‌ها بر اساس محاسبات ظرفیت آن‌ها یک مورد از نوع پیکو (فشارشکن خیابان رسالت[۴])، هشت مورد از نوع میکرو (خط انتقال شهید کشوری[۵]، ورودی به مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی آزمایشگاه، جمهوری[۶]، هفت‌تیر[۷] و بلوار امام[۸]، معلم[۹]، هانیوان[۱۰] و خرمشهر[۱۱]) و یک مورد (ورودی به ایستگاه ۱ سد) از نوع مینی می‌باشند. از گزینه‌های موردمطالعه، سه مورد بر روی خطوط انتقال (ورودی ایستگاه ۱ سد، ورودی به مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی و خط انتقال از مخزن به شهید کشوری) و مابقی بر روی شبکه توزیع قرار دارند. هزینه ساخت نیروگاه در دو حالت توربین و PAT برای گزینه‌های مختلف محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های

۱ Khalesidoost
۲ Motwani
۳ Vasanthakumar
۴ Resalat
۵ Keshvari
۶ Jomhuri
۷ Haftetir
۸ Emam
۹ Moalem
۱۰ Hanivan
۱۱ Khoramshahr

اولیه (خرید تجهیزات از قبیل پمپ، توربین، ژنراتور، هزینه های ساختمانی و هزینه انتقال انرژی تولیدی) و هزینه های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری سالیانه می‌باشد. هزینه بهره‌برداری برای نیروگاه‌هایی که در محدوده مخازن ذخیره آب احداث می‌گردند، به دلیل بهره‌برداری هم‌زمان توسط بهره‌بردار مخازن، در نظر گرفته نمی‌شود. هزینه تعمیرات سالیانه به‌صورت درصدی از هزینه اولیه (۱۰ درصد) در نظر گرفته شده است. میزان کل انرژی قابل‌تولید (E) با در نظر گرفتن ۳۰۰ روز کارکرد در طول سال و نیز ۲۱ ساعت کارکرد نیروگاه در شبانه‌روز محاسبه گردیده است. لازم به توضیح است که استفاده از نیروگاه‌های برق‌آبی به‌صورت پیوسته بوده و در نظر گرفتن ۳۰۰ روز درسال و ۲۱ ساعت در شبانه‌روز به‌صورت محتاطانه‌ای جهت پیش‌بینی احتمال خرابی و از مدار خارج شدن سامانه صورت گرفته است. میزان کل انرژی قابل‌تولید در شهر ایلام ازنظر تئوریک حداقل حدود ۳۱۷ کیلووات، حداکثر ۵۷۸ کیلووات و به‌طور متوسط ۴۴۵ کیلووات برآورد شده است. این مقدار انرژی با در نظر گرفتن راندمان ۸۰ درصد برای حالت توربین و ۶۰ در صد برای حالت استفاده از پمپ و نیز متوسط کارکرد ۲۱ ساعت در شبانه‌روز و ۳۰۰ روز کارکرد، حداقل به ترتیب برابر ۱۵۹۷۶۸۰ کیلووات-ساعت درسال برای توربین و ۱۱۹۸۲۶۰ کیلووات-ساعت درسال برای پمپ، حداکثر ۲۹۱۳۱۲۰ کیلووات-ساعت درسال برای توربین و ۲۱۸۴۸۴۰ کیلووات-ساعت درسال برای پمپ و به‌طور متوسط ۲۲۴۲۸۰۰ کیلووات- ساعت در سال برای توربین و ۱۶۸۲۱۰۰ کیلووات-ساعت درسال برای پمپ می‌باشد. حداقل میزان کل انرژی قابل‌تولید (E) در صورت استفاده از توربین برابر ۱۵۶۱۱۰۰ کیلووات درسال و در صورت استفاده از PAT برابر ۱۱۷۶۸۹۵ کیلووات درسال است. میزان انرژی سالیانه تولیدی گزینه‌های مختلف و سود حاصل از تولید برق نیروگاه‌های آبی مختلف، به تفکیک در جدول (۲) آورده شده است. سود سالیانه حاصل از تولید برق بر اساس نرخ خرید تضمینی اعلام‌شده توسط وزارت نیرو برای نیروگاه‌های برق‌آبی (۱۵۰۰ ریال) محاسبه شده است. سود سالیانه با ضرب نمودن انرژی تولیدی سالیانه در مبلغ خرید تضمینی، برای حالت توربینی برابر ۲۳۴۱ میلیون ریال و برای حالت PAT برابر ۱۷۶۵ میلیون ریال به دست می‌آید.

تحلیل شاخص‌های اقتصادی جهت بررسی و مقایسه گزینه‌های مختلف از قبیل نسبت فایده به هزینه (B/C)، سود خالص (B-C) و واحد انرژی تولیدی (C) برحسب ریال در کیلووات-ساعت صورت گرفت؛ که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. نتایج بررسی‌های اقتصادی نشان داد که در کلیه موارد شاخص نسبت فایده به هزینه (B/C) برای PAT، باوجود راندمان پایین‌تر نسبت به توربین، مناسب‌تر است. همچنین هزینه احداث نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در صورت استفاده از توربین ۲ تا ۶ برابر PAT می‌باشد. از طرفی امکان ساخت پمپ در داخل کشور به تعداد زیاد و در دامنه گسترده فراهم بوده، ولی این امکان در مورد توربین خصوصاً ژنراتور تاکنون مهیا نشده است.

بر اساس محاسبات اقتصادی، در صورت استفاده از توربین در نیروگاه‌های با ظرفیت پیکو (کمتر از ۵ کیلووات) و میکرو نزدیک به پیکو؛ که شامل نیروگاه‌های هفت‌تیر[۱]، معلم[۲]، رسالت[۳]، خرمشهر[۴] و هانیوان[۵] است، نسبت فایده به هزینه (B/C) کمتر از یک بوده و ازنظر اقتصادی قابل‌قبول نیست استفاده از توربین تنها در نیروگاه‌های ورودی ایستگاه ۱ سد ایلام و مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی توجیه‌پذیر است. ازاین‌رو، استفاده از توربین در نیروگاه‌های با ظرفیت پیکو و یا میکرو نزدیک به پیکو توجیه اقتصادی ندارد. در صورت استفاده از PAT، کلیه نیروگاه‌های با ظرفیت میکرو و مینی با توجه به نتایج B/C ازنظر اقتصادی توجیه‌پذیر می باشند. احداث نیروگاه‌های خیابان خرمشهر و رسالت به دلیل ظرفیت پایین آن‌ها، باوجود استفاده از PAT نیز نسبت B/C در آن‌ها کمتر از یک بوده و توجیه اقتصادی ندارد. نتایج نشان می‌دهد که سود خالص نیروگاه‌ها در صورت استفاده از PAT بیشتر از توربین است. هزینه واحد انرژی تولیدی (C) برای توربین ۱۱۰۱ ریال و برای (PAT) ۴۹۰ ریال می‌باشد (جدول ۲). این برآورد از برآوردهای موتوانی[۶] (۵۷۰ ریال برای PAT و

۱ Haftetir
۲ Moalem
۳ Resalat
۴ Khoramshahr
۵ Hanivan
۶ Motwani

۲۸۹۲ ریال برای توربین) و سنتاکومار[1] (۱۰۲۰ ریال برای PAT و ۲۲۲۰ ریال برای توربین) ارزان‌تر است. بخشی از این تفاوت‌ها به دلیل قرارگیری نیروگاه‌های پیشنهادی در محدوده مخازن و نزدیکی به تأسیسات و متعاقب آن کاهش هزینه نگهداری و انتقال انرژی است.

محاسبات واحد انرژی تولیدی نیز نشان می‌دهد که در همه موارد نرخ تولید برق در PAT کمتر از توربین است. ازاین‌رو، گزینه PAT نسبت به استفاده از توربین ارجحیت دارد.

بررسی‌های صورت گرفته بر روی گزینه‌های مختلف نشان می‌دهد که در صورت استفاده از توربین، نرخ تولید در گزینه‌های ورودی ایستگاه ۱ سد ۸۶۸ ریال، مخزن ۷۰۰۰ مترمکعبی از گل‌گل ۱۱۵۲ ریال، جمهوری[2] ۱۴۷۷ ریال و بلوار امام[3] ۱۴۹۵ ریال است؛ که بهای واحد تولیدی از فروش تضمینی برق ۱۵۰۰ ریال کمتر بوده و می‌توان از توربین استفاده نمود. در سایر موارد، چون بهای واحد تولیدی بیش از فروش تضمینی است، استفاده از توربین توجیه اقتصادی ندارد. در صورت استفاده از PAT در کلیه گزینه‌ها (به‌جز خیابان رسالت و خرم‌شهر با ظرفیت پیکو) چون بهای واحد انرژی تولیدی بیش از فروش تضمینی است لذا احداث نیروگاه در آن‌ها اقتصادی نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که می‌توان از انرژی‌های مازاد موجود در خطوط انتقال آب شهرستان ایلام در تولید برق استفاده نمود. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

۱- کل میزان انرژی سالیانه قابل‌تولید بر روی خطوط آب‌رسانی شهرستان ایلام، در صورت استفاده از توربین، معادل ۱۵۶۱۱۰۰ کیلووات در سال است. استفاده از انرژی برق‌آبی به علت تجدید پذیر بودن و عدم نیاز به استفاده از سوخت‌های فسیلی، به‌عنوان یک گزینه برتر محیط‌زیستی موردتوجه است.

۲- کل میزان انرژی سالیانه قابل‌تولید بر روی خطوط آب‌رسانی شهرستان ایلام، در صورت استفاده از پمپ معکوس (PAT) حداقل معادل ۱۱۷۶۸۹۵ کیلووات درسال می‌باشد.

۳- کل هزینه احداث این نیروگاه‌ها، در صورت استفاده از توربین، حداقل ۷۱۷۴ میلیون ریال است.

۴- هزینه احداث این نیروگاه‌ها در صورت استفاده از (PAT)، حداقل ۲۰۵۸ میلیون ریال است.

۵- هزینه اولیه احداث نیروگاه‌های برق‌آبی پیکو و میکرو در صورت استفاده از توربین ۲ تا ۴ برابر گران‌تر از PAT است.

۶- نسبت هزینه تجهیزات به هزینه کل سرمایه‌گذاری در PAT، ۸ تا ۳۵ درصد می‌باشد این نسبت در صورت استفاده از توربین ۵۰ تا ۹۰ درصد سرمایه اولیه است.

۷- بهترین مکان برای احداث نیروگاه بر روی خطوط انتقال آب، محدوده زمین مخازن ذخیره آب و تصفیه‌خانه‌ها است. به دلیل آنکه نیازی به تملک زمین ندارند؛ و نیز نیاز به نیروی مازادی جهت بهره‌برداری ندارد.

۸- مقدار سود خالص (B-C) برای توربین ۶۲۱ میلیون ریال و برای پمپ به جای توربین (PAT)، ۱۱۸۵ میلیون ریال است.

۹- نسبت فایده به هزینه (B/C) برای توربین ۱,۲۳ و برای پمپ معکوس (PAT)، ۳/۹۸ است.

۱۰- هزینه واحد انرژی تولیدی (C) برای توربین ۱۱۰۱ ریال و برای پمپ معکوس (PAT) ۴۹۰ ریال می‌باشد.

۱۱- احداث نیروگاه‌های با ظرفیت کمتر از ۵ کیلووات تنها در صورت استفاده از PAT و با کاهش هزینه‌های ساختمانی، بهره‌برداری، تعمیرات و انتقال انرژی؛ و در نظر گرفتن فواید دیگر ازجمله تولید انرژی پاک می‌تواند توجیه‌پذیر باشد. در غیر این صورت توجیه اقتصادی ندارد.

۱۲- استفاده از توربین در نیروگاه‌های برق‌آبی با ظرفیت پیکو توجیه اقتصادی ندارد و توصیه نمی‌گردد.

۱۳- با در نظر گرفتن تعداد واحد بیشتر توربین یا PAT در یک نیروگاه، علاوه بر اینکه می‌توان از ظرفیت بیشتری به هنگام افزایش دبی استفاده نمود. در هنگام خرابی یک واحد، از توان سایر واحدها استفاده‌شده تا از تعطیلی نیروگاه اجتناب گردد. با توجه به موارد فوق‌الذکر جهت استفاده در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک در سامانه آب‌رسانی شهرستان ایلام، استفاده از پمپ به جای توربین (PAT) توصیه می‌گردد.

---

۱ Vasanthakumar

۲ Jomhouri

۳ Emam

جدول (۱): مشخصات نیروگاه‌های پیشنهادی و هزینه ساخت آن‌ها

ایستگاه	مشخصه	فشار (m)		دبی (l/s)		توان نامی قابل‌تولید (kw)		هزینه برحسب میلیون ریال					
		حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	تجهیزات		ساختمان	انتقال انرژی	کل هزینه اولیه (C_o)	
								توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT
۱ سد	P_1	۴۰	۶۰	۵۵۰	۷۰۰	۲۱۰	۴۱۲	۳۶۰۰	۲۳۷	۴۰۰	۴۰	۴۰۴۰	۶۷۷
کشوری	P_2	۵۵	۴۰	۱۴/۵	۳۹	۲۳	۲۳	۲۳۰	۱۲	۸۰	۴۵	۳۵۵	۱۳۷
مخزن ۷۰۰۰	P_3	۲۸	۳۴	۱۰۰	۱۴۰	۴۷	۴۷	۲۵۰	۵۳	۲۰۰	۳۰	۶۸۰	۲۸۳
جمهوری	P_4	۴۵	۵۹	۲۵	۳۲	۱۱	۱۰	۲۴۰	۲۱	۸۰	۳۰	۳۵۰	۱۳۱
هفت‌تیر	P_5	۴۰	۵۰	۲۰	۲۴	۱۱	۱۲	۱۸۰	۱۸	۸۰	۳۰	۲۹۰	۱۲۸
بلوار امام	P_6	۴۰	۵۵	۳۰	۴۰	۱۲	۲۲	۲۴۰	۲۴	۱۰۰	۴۰	۳۸۰	۱۶۴
رسالت	P_7	۳۵	۴۲	۱۲1	۲۰	۴	۸	۱۳۰	۱۲	۸۰	۲۸	۲۳۸	۱۲۰
خرمشهر	P_8	۳۵	۴۵	۱۵	۲۰	۳	۹	۱۵۰	۱۱	۸۰	۳۶	۲۵۶	۱۲۷
معلم	P_9	۳۲	۴۵	۲۸	۳۵	۱۰	۱۳	۲۲۰	۱۹	۱۰۰	۲۰	۳۴۰	۱۳۹
هانیوان	P_{10}	۴۰	۴۰	۳۰	۳۵	۹	۱۴	۲۰۰	۱۲	۹۰	۵۵	۳۴۵	۱۵۲
مجموع								۵۶۴۰	۴۱۹	۱۲۹۰	۳۵۴	۷۱۷۴	۲۰۵۸

جدول (۲): محاسبه انرژی تولیدی، سود سالیانه و پارامترهای اقتصادی در نیروگاه‌های پیشنهادی

ایستگاه	حداقل توان تولیدی (KW)		حداقل انرژی تولیدی سالیانه (E) (kwh/year)		حداقل سود سالیانه (Ba) میلیون ریال در سال		C_R*		O + M		B/C		B – C(میلیون ریال)		C (ریال برکیلووات-ساعت)	
	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT	توربین	PAT
P_1	۱۷۳	۱۳۰	۱۰۸۸۶۴۰	۸۱۶۶۸۰	۱۶۳۳	۱۲۲۲	۳۴۱	۱۲۰	۴۰۴	۶۸	۲/۳	۹/۶	۶۸۸	۱۰۳۴	۸۶۸	۱۰۷
P_2	۶	۵	۴۰۳۲۰	۳۶۲۸۸	۶۰	۵۴	۴۸	۲۴	۵۳	۲۱	۰/۱۵	۱/۶	-۴۱	۹	۲۵۰۵	۱۲۴۰
P_3	۲۲	۱۶	۱۳۸۰۹۶	۱۰۳۵۷۲	۲۰۷	۱۵۵	۹۱	۵۰	۶۸	۲۸	۱/۵	2/5	۴۸	۷۷	۱۱۵۲	۷۵۷
P_4	۹	۷	۵۵۴۴۰	۴۱۵۸۰	۸۳	۶۲	۴۷	۲۳	۳۵	۱۳	۱/۰۲	۲/۱	۱/۳	۲۶	۱۴۷۷	۸۷۳
P_5	۶	۵	۳۹۳۱۲	۲۹۴۸۴	۵۹	۳۴	۳۹	۲۳	۲۹	۱۳	۰/۸	۱/۴	-۹	۹	۱۷۲۷	۱۲۰۴
P_6	۹	۷	۵۹۴۷۲	۴۴۷۳۰	۸۹	۶۷	۵۱	۲۹	۳۸	۱۶	۱	۱/۷	۰/۳	۲۲	۱۴۹۵	۱۰۱۵
P_7	۳	۲	۲۰۷۹۰	۱۵۵۶۱	۳۱	۲۳	۳۲	۲۱	۲۴	۱۲	۰/۲۳	۰/۵	-۲۴/۵	-۱۰	۲۶۷۹	۲۱۳۳
P_8	۴	۳	۲۵۹۵۶	۱۹۵۳۰	۳۹	۲۹	۳۴	۲۲	۲۶	۱۳	۰/۴	۰/۷	-۲۱	-۶	۲۳۰۷	۱۸۰۲
P_9	۸	۶	۴۸۳۸۴	۳۶۲۸۰	۷۳	۵۴	۴۶	۲۵	۲۴	۱۴	۰/۹	۱/۶	-۷	۱۶	۱۶۴۵	۱۰۶۱
P_{10}	۷	۵	۴۴۷۳۰	۳۳۳۹۰	۶۷	۵۰	۴۶	۲۷	۳۵	۱۵	۰/۷	۱/۳	-۱۴	۸	۱۸۰۴	۱۲۶۰
مجموع	۲۴۷	۱۸۴	۱۵۶۱۱۰۰	۱۱۷۶۸۹۵	۲۳۴۱	۱۷۶۰	مجموع						۶۲۱	۱۱۸۵	۱۱۰۱	۴۹۰

$$* C_R = C_O * \frac{d(1+d)^L}{(1+d)^L - 1}$$

مراجع

۱- امامی، س. نظری پورکیایی، ع. ا؛ و سلیمان پور، ا. (۱۳۹۴). احداث نیروگاه‌های کوچک با ظرفیت بالا (بسته نیروگاه‌های هراز). دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در علوم، مهندسی و تکنولوژی. استانبول، ترکیه.

۲- بشیرزاده تبریزی، ا. گیفانی، ن؛ و فرهمند، ع. (۱۳۸۸). به‌کارگیری نیروگاه برق‌آبی کوچک بر روی خطوط انتقال آب بامطالعه موردی خطوط انتقال آب بجنورد، زاهدان و بیرجند، سومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد اصلاح الگوی معرفی) تهران اسفند ۱۳۸۸.

۲- خالصی دوست، ع. محمدیان، ع؛ و مرادی، ع. (۱۳۹۲). تحلیل اقتصادی نیروگاه برق‌آبی کوچک خط انتقال چشمه روزبه سمنان و مقایسه با نیروگاه گازی. کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی: دومین کنفرانس انجمن علمی انرژی ایران. تهران.

۳- درخشان، ش. محمدی، س. (۱۳۹۲). انرژی های تجدید پذیر. انتشارات آذر.

۴- درخشان، ش. و ریاسی، ع. (۱۳۹۳). توربین‌های آبی (ص. ۲۳۱). در تهران: جهاد دانشگاهی واحد تهران.

۵- رئیس میرزاقلی، م. و زمانیان، ع. (۱۳۹۳). نیروگاه برق‌آبی کوچک بر روی خطوط انتقال آب. ششمین همایش علمی تخصصی انرژی‌های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد.

۶- عباسپور، م. (۱۳۹۴). نیروگاه‌های برق‌آبی تئوری و کاربرد. نیروگاه‌های برق‌آبی تئوری و کاربرد، جلد اول. در تهران: موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

۷- مسعودی، ح. (۱۳۹۵). اقتصاد مهندسی (تجزیه‌وتحلیل اقتصادی پروژه‌ها). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۸- محمدی، ع؛ و وشنانی، م. (۱۳۹۴)، امکان‌سنجی نصب نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک بر روی خطوط شبکه آب‌رسانی شهر تهران، فصلنامه تحقیقات کاربردی، زمستان ۱۳۹۴.

۹- نوربخش، س. ا؛ و درخشان، ش. (۱۳۸۴). تحلیل رفتار پمپ و ارائه بهترین نقطه کارکرد آن در حالت چرخش به‌عنوان توربین. نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۶، اسفند ۱۳۸۴: ۷۷۱-۷۶۵.

10- Carapellucci, R.Giordano, L. Pierguidi, F. (2015). "Techno- Economic Evaluation of Small Hydro Power Plants: Modelling and Characterisation of the Abruzzo Region in Italy".Rwnewable Energy.75 (2015). 395-406.

11- De Marchis, M. Fontazza, C. M. Freni, G. Messineo, A. Milici, E. Napoli, V. Nataro, V. Puleo, V. and Scope, A. (2014)." Energy Recovery in Water Distribution Networks. Implementation of Pump as Turbine in a Dynamic Numerical Model". Procedia Engineering. 70 (2014). 430 – 338.

12- Kougias, T. Patsialis, A. Zafirakou and N. Theodossiou. (2014)." Exploring the potential of energy recovery using micro hydropower systems in water supply systems." Water Utility Journal, 7, 25-33.

13- Kucukali, S. (2011). "Water supply lines as a source of small hydropower in Turkey: A case study Edermit." World Renewable Energy Congress- Sweden, 1400-1407, Linkoping, Sweden.

14- Motwani, K. H. Jain, S. V. and Patel, R. N.(2013)." Cost analysis of pump as turbine for Pico hydropower plants- A case study." Procedia Engineering 51, 721 - 726.

15- Padmarasan, Cs. Ajinsekhar, R.M. Meenakshi, S. Ramkumar, S. Yatheswaran, A. and Deepan, V. (2016). "Power Generation from Water Pipelines". International Journal of Engineering Science and Computing (IJEC), 6(3), 3212 - 3216.

16- Perez-Sanchez, M. Sanchez-Romero, F. J. M. Ramos, H. and Lopez-Himenez, P. A. (2017). "Energy Recovery in Existing Water Networks: Towards Greater Sustainability. Water 2017,9,97; doi:10.3390/w9020097, 1-20.

17- Sanji, V. and Rajesh, N. (2014). "Investigations on pump running as turbine mode: Areview of the state -of - the-art." Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 841 - 868.

18- Vasanthakumar, P. Karthikayan, Dr. S. Kirshnaraj, J. Palanisami, M. and Vinoth, T. (2015). "Power Optimization of Rotodynamic Pump in Turbine Mode Operation for Pico Hydropower Plants ." Advances in Natural and AppliedSciences.9 (17). 291 - 295.

Exploring the potential of electrical energy recovery from Ilam water supply pipelines

Mohammad Mohammadi[1]
Mehdi Yasi[*2]
Saeed Jamali[3]
Hooman Hajikandi[4]

Abstract

Power generation from water supply and distribution networks is a new practice in the optimization of water systems management. In water supply networks, pressure relief valves are often used to avoid additional pressures on the downstream. With the presence of extra energy head (excess water pressure) in Water supply pipelines, hydropower generation is possible using either turbine or pump as turbine (PAT). In this study, the potential of energy recovery from the existing water supply system in the City of Ilam, Iran, was investigated using turbine and PAT hydropower plants. This survey indicated the feasibility of hydropower generation in almost ten stations along the Ilam's water supply system, with the capacities in orders of mini to Pico hydropower plants. The total amount of generated energy per year is about 15611000 kWh using turbines, and 1176895 kWh in the case of using PATs. The results from economic analysis indicate that the cost of unit energy is about 1101Rials using turbines, and 490 Rials with the use of PATs. The benefit-cost ratio is 1.23 and 3.98 for using turbines and PATs, respectively. In general, the use of PATs in small hydropower systems on the Ilam's water supply system is technically feasible, and economically affordable alternative.

Keywords

Electricity generation, Hydropower plant, Water supply pipelines, Turbine, PAT, Cost analysis

---

۱ Ph. D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran.
2* Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Iran, m.yasi@ut.ac.ir
۳ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran.
۴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University- Tehran Central Branch, Iran.
Received: 07/07/2017 Accepted: 09/08/2017