

امکان سنجی استفاده از پتانسیل انرژی جریان آب برای تولید برق در خطوط انتقال آب شهر کرمانشاه

ابوالفضل پوررجیبیان^{۱*}، اله بخش همه‌خانی^۲، امیر فتاحی^۳، مازیار دهقان^۱، سعید رهگذر^۱

۱. استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

۲. مدیر دفتر بهره‌برداری از تأسیسات آب شرکت آب و فاضلاب شهری استان کرمانشاه، کرمانشاه

۳. کارشناس ارشد پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۴/۳۰)

چکیده

مطالعه حاضر به تحلیل خطوط اصلی انتقال آب شهر کرمانشاه در غرب ایران به منظور پتانسیل‌سنجی قابلیت استحصال انرژی برای تولید برق می‌پردازد. همواره برای کاهش فشار آب در خطوط انتقال آب، از شیرها یا تانک‌های فشارشکن استفاده می‌شود، در حالی که می‌توان با استفاده از توربین‌های کوچک‌مقیاس از این انرژی بهره برد و بدون آثار جانبی به تولید برق تجدیدپذیر پرداخت. به این منظور، پنج خط آبرسانی اصلی شهر کرمانشاه بررسی شده است. با داشتن خصوصیات هیدرولیکی خطوط و مشخصات توپوگرافی آنها و بهره‌گیری از معادلات بقا و پس از تعیین افت‌های اصطکاکی طی مسیر، مقدار افت فشار محاسبه شده است. در ادامه، به محاسبه پتانسیل انرژی جریان آب در خطوط بررسی شده پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد از میان پنج خط آبرسانی مطالعه‌شده، خط انتقال آب گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری، به عنوان منبع اصلی تأمین آب شهر کرمانشاه، پتانسیل بسیار مناسبی برای تولید برق دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد این خط مناسب نصب و احداث میکروتوربین‌های آبی است و می‌توان حدود ۲/۴ مگاوات برق از آن تولید کرد.

کلیدواژگان: انرژی برق‌آبی، خط انتقال آب گاوشان، کرمانشاه، میکروتوربین.

مقدمه

در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی منابع اصلی تأمین انرژی جهان هستند. با توجه به ذخایر محدود و آثار نامطلوب این منابع بر محیط زیست، نیاز به منابع انرژی جایگزین بیش از پیش احساس می‌شود. به این منظور، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی، باد و آب در جهان افزایش درخور توجهی داشته است [۱]. برای نمونه، توسعه روش‌های جایگزین منابع انرژی، یکی از اهداف اصلی سیاست انرژی در اتحادیه اروپاست و در سال ۲۰۰۷، این اتحادیه با اتخاذ هدف تأمین ۲۰ درصد برق مصرفی از منابع تجدیدپذیر در سال ۲۰۲۰ میلادی، تأثیر زیادی بر توسعه و پیشرفت منابع تجدیدپذیر داشت [۲].

انرژی آبی از قدیمی‌ترین منابع تولید انرژی تجدیدپذیر است و در صورت بهره‌برداری مناسب، می‌تواند کمک درخور توجهی به سیستم پایدار انرژی کند [۳ و ۴]. توانایی پاسخ‌گویی نوسان‌های تقاضا از ویژگی‌های انرژی آبی است که آن را از دیگر منابع تجدیدپذیر متمایز می‌کند. همچنین، به کمک مخازن ذخیره‌سازی، امکان ذخیره و تأمین برق مورد نیاز طی سال و نیز طی ساعت‌های مختلف شبانه‌روز فراهم می‌شود [۵ و ۶]. این انرژی بیش از ۹۲ درصد سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را به خود اختصاص می‌دهد و همچنان به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در بعضی از کشورها استفاده می‌شود [۷]. برای نمونه، سهم این انرژی در سبد تولید انرژی

کشورهای نروژ، برزیل، سوئیس و سوئد، به ترتیب ۹۹، ۸۶، ۷۶ و ۵۰ درصد است [۸].

استفاده از انرژی آبی در مقیاس‌های کوچک، منبعی بسیار مهم برای تولید انرژی است و در بسیاری از کشورها، نیروگاه‌های برق آبی میکرو، سهم درخور توجهی از تولید برق را به عهده دارند. کانال‌های آبرسانی و خطوط انتقال آب گزینه‌های مناسبی برای به دست آوردن انرژی برق آبی در مقیاس کوچک هستند. این موضوع سبب شده است که نصب میکروتوربین‌های برق آبی در خطوط انتقال آب در مناطقی از جهان رواج پیدا کند [۹]. این در حالی است که در بسیاری از خطوط انتقال آب از سیستم‌های فشارشکن استفاده شده و انرژی قابل استحصال آب به صورت حرارت تلف می‌شود.

در حالی که نیروگاه‌های بزرگ برق آبی شبکه‌های ملی برق را تأمین می‌کنند، نیروگاه‌های برق آبی کوچک بیشتر در مناطق دورافتاده، روستایی و برای تأمین نیازهای محلی رایج هستند و معمولاً در محدوده توان ۵ تا ۱۰۰ کیلووات استفاده می‌شوند. تعداد مشاغل ایجاد شده توسط انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد سهم مشاغل تولیدی از نیروگاه‌های آبی با مقیاس کم در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر در بعضی کشورها درخور توجه است [۱۰]. جدول ۱ طبقه‌بندی نیروگاه‌های برق آبی را با توجه به ظرفیت نصب شده نشان می‌دهد، هر چند که هیچ توافق جهانی‌ای در مورد دسته‌بندی انواع انرژی‌های آبی وجود ندارد [۱۱].

جدول ۱. طبقه‌بندی نیروگاه‌های برق آبی بر حسب ظرفیت

اندازه نیروگاه	ظرفیت (ویلیامز و همکاران [۱۲])	ظرفیت (هایدار و همکاران [۱۳])
بزرگ	بیش از ۱۰۰ MW	بیش از ۱۰۰ MW
کوچک	۱ تا ۱۰ MW	تا ۲۵ MW
مینی	۱۰۰ kW تا ۱ MW	کمتر از ۱ MW
میکرو	۵ تا ۱۰۰ kW	۶ تا ۱۰۰ kW
پیکو	تا ۵ kW	تا ۵ kW

به بررسی و بهینه‌سازی عملکرد اجزای توربین پرداخته است [۱۵-۱۷]. از آن جمله می‌توان به اولادوسو و کویا [۱۵] (بهینه‌سازی طراحی توربین درون لوله)، جیون و همکارانش [۱۶] (تأثیر زاویه قوس ورودی بر عملکرد توربین جریان متقاطع)، الکساندر و همکارانش [۱۷] (بررسی توربین‌های شعاعی و جریان مخلوط بین هدهای ۶ تا ۹ متر) اشاره کرد.

به این منظور، تحقیقات گسترده‌ای در چند دهه اخیر در زمینه افزایش کارایی سیستم‌های میکرو نیروگاه برق آبی صورت گرفته است [۱۴-۱۷]. مطالعه جامعی توسط ساری و همکارانش [۱۴] در مورد فناوری‌های اخیر و روند تولید برق از کانال‌های آب انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد توربین‌های جدید با کاهش هزینه اولیه و افزایش بهره‌وری همراه هستند. مطالعات متعددی

بسیار ناچیز است، در حالی که در مناطق مختلفی از کشور و به دلیل جغرافیای محل، می‌توان از پتانسیل هیدرولیکی موجود در رودخانه‌ها، آبخازها و خطوط انتقال آب استفاده کرد و به کمک میکروتوربین‌های آبی به تولید برق به صورت پراکنده برای مصرف در محل و یا تزریق به شبکه پرداخت. مطالعات اولیه استفاده از نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک برای تعداد کمی از شهرستان‌های کشور انجام شده و نیاز برای بررسی دیگر مناطق ضروری است. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد نصب بیش از ۲۰۰ ایستگاه کوچک برق‌آبی در ایران امکان‌پذیر است [۲۶].

به منظور بهره‌گیری هر چه بیشتر از انرژی آبی موجود در خطوط انتقال آب، پژوهش حاضر به بررسی و تحلیل خطوط انتقال آب در شهر کرمانشاه می‌پردازد. به این منظور، به کمک مشخصات هیدرولیکی خطوط و همچنین اطلاعات توپوگرافی منطقه، خطوط یادشده بررسی شده و به تعیین نقاط مستعد برای احداث نیروگاه‌های برق‌آبی میکرو پرداخته شده است.

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته، مشکل اصلی استفاده از توربین‌های کوچک، قیمت آنها در مقایسه با بودجه کل پروژه است [۱۸]. یک راه حل برای کاهش هزینه، استفاده از پمپ به جای توربین است [۱۹-۲۱]. امروزه پمپ به عنوان توربین (*PAT: Pump As Turbine*) جایگزینی جذاب و درخور توجه است، زیرا سبب صرفه‌جویی در هزینه (در مقایسه با انواع توربین‌ها) می‌شود [۱۰ و ۲۲]. از مزایای استفاده پمپ به جای توربین می‌توان به در دسترس بودن حجم درخور توجهی از اطلاعات استاندارد برای دبی و هدای مختلف [۱۳ و ۲۱]، زمان تحویل کوتاه‌مدت [۲۱، ۲۳ و ۲۴]، طول عمر زیاد [۲۱ و ۲۵] و نصب آسان و در دسترس بودن قطعات یدکی [۱۳ و ۲۳] اشاره کرد.

پتانسیل آبی شناسایی شده در ایران حدود ۵۰ میلیارد کیلووات ساعت برآورد شده است، اما ظرفیت نیروگاه‌های آبی در حال بهره‌برداری کشور تا پایان سال ۱۳۹۳، ۱۰۷۷۸/۹ مگاوات است. جدول ۲ سهم انواع نیروگاه‌های برق‌آبی ایران را بر حسب ظرفیت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سهم نیروگاه‌های با مقیاس میکرو و مینی

جدول ۲. سهم انواع نیروگاه‌های برق‌آبی در ایران [۲۷]

اندازه نیروگاه	ظرفیت	% از مجموع ظرفیت نیروگاه‌های آبی
بزرگ	بیش از ۱۰۰ MW	۹۱/۷
متوسط	۱۰ تا ۱۰۰ MW	۷/۶۷
کوچک	۱ تا ۱۰ MW	۰/۶
مینی/میکرو	۱۰ تا ۱۰۰۰ kW	۰/۰۴

معادلات حاکم

به طور کلی، در تحلیل مسائل سیالاتی، از سه راه‌کار مطالعه تجربی، روش تحلیلی و همچنین روش عددی می‌توان بهره برد. روش عددی قابل استفاده برای تمامی مسائل با در نظر گرفتن زمان و هزینه محاسباتی است. این در حالی است که نتایج به دست آمده از مطالعه تجربی در مقایسه با روش‌های عددی با وجود هزینه‌های مربوطه بسیار قابل اعتمادترند. راه‌کار دیگر، استفاده از حل تحلیلی است. بر مبنای این راه‌کار و در مسائل و شرایط خاص، امکان ساده‌سازی معادلات غیر خطی ناویر استوکس (معادلات حاکم بر میدان سیال) به وجود آمده و می‌توان با حل معادلاتی ساده‌تر به حل مسئله با دقت مهندسی دست یافت. حل تحلیلی به کمک فرض جریان تک‌بعدی،

بدون اصطکاک، غیر لزج و در نتیجه حاکم بودن معادلات برنولی، تقریباً تنها راه موجود برای آنالیز خطوط طولانی انتقال سیال است [۲۸ و ۲۹]. در مطالعه حاضر نیز با توجه به ابعاد زیاد خطوط آب‌رسانی، میدان جریان به کمک حل تحلیلی معادله برنولی بررسی شده است.

انرژی مکانیکی کل سیال (E) را می‌توان به صورت حاصل جمع انرژی جنبشی، پتانسیل و انرژی داخلی تعریف کرد. در واحد وزن سیال، مجموع انرژی مکانیکی را می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت [۲۸]:

$$E = \frac{V^2}{2g} + H + \frac{p}{\gamma} \quad (1)$$

که در آن V سرعت سیال، p فشار، γ وزن مخصوص، g

که ε زبری است و بستگی به قطر لوله استفاده شده و جنس آن دارد [۲۸]. مقدار ε برای طیف وسیعی از جنس‌های متداول لوله‌ها در مرجع ۲۸ آورده شده که در پژوهش حاضر با توجه به جنس لوله (فولادی، چدنی و GRP یا الیاف شیشه تقویت شده) استفاده شده است. تحلیل جریان درون خطوط آب‌رسانی شهر کرمانشاه نشان می‌دهد رژیم جریان در آن کاملاً مغشوش است و به منظور محاسبه ضریب اصطکاک، باید از رابطه ۵ بهره برد. از آنجا که معادله ۵ غیر خطی است، به فرایند حدس و خطا برای حل آن نیاز داریم، هر چند که می‌توان از نمودار مودی^۱ که در مراجع استاندارد [۲۸ و ۲۹] موجود است نیز استفاده کرد. در پژوهش حاضر از حل عددی برای تعیین ضریب اصطکاک برای کاهش کمترین خطا بهره گرفته شد و مقایسه نتایج با داده‌های نمودار مودی که مبتنی بر آزمایش‌های تجربی هستند، تطابق مناسبی را نشان داد.

با داشتن دبی (Q) در خطوط آب‌رسانی، مقدار سرعت در خطوط قابل محاسبه است و به کمک قانون بقای جرم (معادله پیوستگی) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سرعت آب درون خطوط با قطر یکسان تغییری نمی‌کند. در نتیجه، با داشتن تغییرات ارتفاع و محاسبه افت اصطکاک داخلی خطوط، مقدار تغییرات فشار طی خطوط آب‌رسانی به کمک رابطه ۲ محاسبه می‌شود. همچنین، برای تعیین پتانسیل توان (P) آب و تولید برق می‌توان از رابطه ۶ استفاده کرد [۲۹]:

$$P = \rho g H Q \quad (6)$$

در بخش‌های آبی و پس از معرفی مشخصات خطوط انتقال آب در شهر کرمانشاه، تغییرات افت فشار در آنها تعیین و پتانسیل بهره‌گیری از انرژی آبی موجود در خطوط آب‌رسانی به منظور تولید برق ارزیابی شده است. یادآوری می‌شود که تحلیل فشار در نرم‌افزار *Pipe Expert Flow* [۳۰] انجام شده و در تعیین ضریب اصطکاک درون خطوط (معادله ۵)، از روش عددی، با در نظر گرفتن مقیاس واقعی نقشه‌ها، بهره گرفته شده است. همان‌طور که اشاره شد، راه‌کار دیگر حل کامل معادلات ناویر-استوکس داخل خطوط آب‌رسانی است که با توجه به ابعاد مسئله (چندین کیلومتر) بسیار زمان‌بر و تقریباً غیرممکن است.

شتاب جاذبه و H ارتفاع است. معادله مشهور برنولی نشان می‌دهد در صورتی که سیال تراکم‌ناپذیر باشد و با فرض نبود اصطکاک، این مجموع انرژی مقاداری ثابت است و طی یک خط جریان، بخش‌های آن (انرژی جنبشی، پتانسیل و انرژی داخلی) در صورت نبود انتقال حرارت و کار به یکدیگر تبدیل می‌شود. در نتیجه، بین دو نقطه دلخواه در امتداد یک خط جریان می‌توان از رابطه ۱ استفاده کرد و به تعیین مجهول مد نظر پرداخت.

درون خطوط آب‌رسانی و برای تحلیل جریان بین دو نقطه دلخواه، نیاز به در نظر گرفتن اصطکاک جریان با جداره داخلی لوله است. در این حالت فرم معادله برنولی به صورت رابطه ۲ است:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_1 - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + H_2 \quad (2)$$

که h_L افت هد ناشی از اصطکاک بین سیال و جداره داخلی لوله است. درخور یادآوری است که در صورت استفاده از پمپ یا توربین در مسیر خط لوله، باید ارتفاع متناظر را به سمت چپ رابطه ۲ اضافه کرد، با توجه به این نکته که مقدار ارتفاع آب‌دهی پمپ مثبت بوده در حالی که ارتفاع نظیر انرژی توربین منفی است. برای محاسبه افت فشار طولی (h_L) از معادله داریسی ویسباخ استفاده می‌شود (رابطه ۳) [۲۸]:

$$h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3)$$

که در آن f ضریب اصطکاک، L طول لوله و D قطر لوله است. برای جریان‌های آرام مقدار f با داشتن عدد بی‌بعد رینولدز (Re) قابل محاسبه است (رابطه ۴) [۲۸]:

$$f = 64/Re, Re = VD/\nu \quad (4)$$

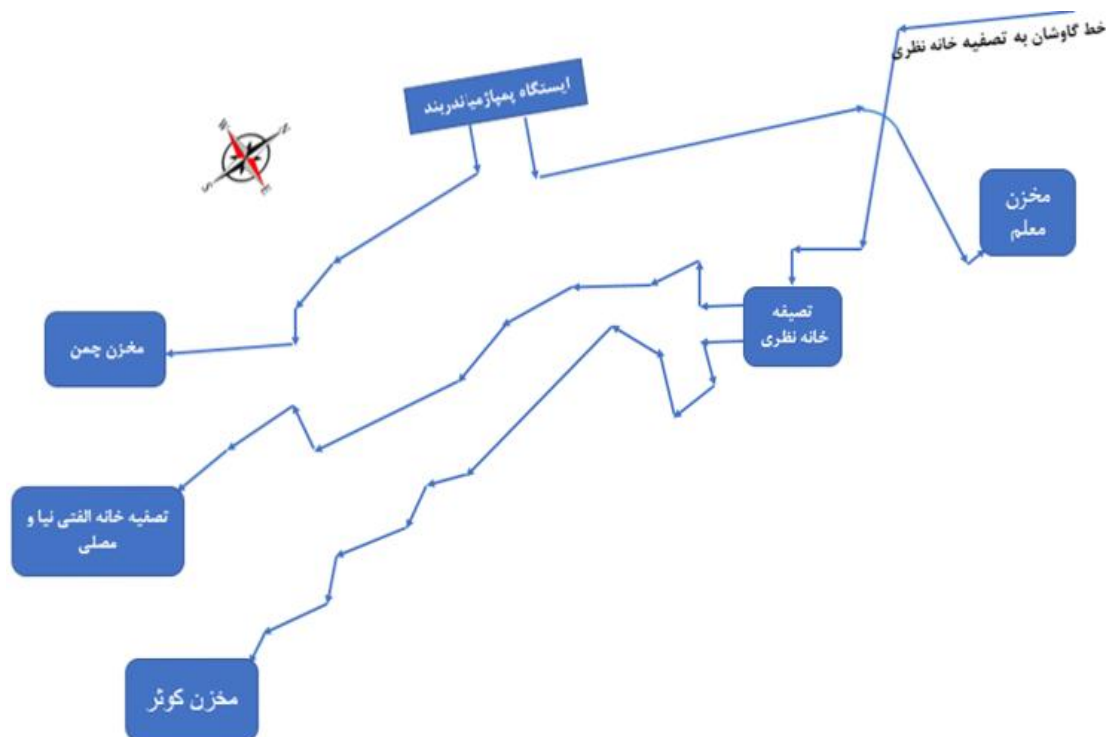
که ν لزجت سینماتیکی بوده و مقدار آن برای آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، $1 \times 10^{-6} m^2/s$ است [۲۸]. در جریان‌های مغشوش ($Re > 2300$) می‌توان از معادله کلبرک به منظور محاسبه f استفاده کرد (رابطه ۵) [۲۸]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (5)$$

معرفی خطوط انتقال آب

شکل ۱ شماتیک خطوط اصلی آبرسانی شهر کرمانشاه را نشان می‌دهد. مشخصات این خطوط که شامل طول، سرعت آب و ارتفاع از سطح دریا به همراه موقعیت آنها می‌شود، در جدول ۳ آورده شده است. همچنین، مقدار ضریب اصطکاک (f) که به کمک رابطه ۵ محاسبه شده در جدول ۳ آورده شده است. درخور یادآوری است که طول خطوط به کمک نقشه‌های در دسترس و توپوگرافی منطقه (شکل ۲) و همچنین داده‌های موجود از نقشه‌های ماهواره‌ای محاسبه شده است. شکل ۳ شماتیک خط انتقال آب گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری را با توجه به نقشه آن نشان می‌دهد. به منظور

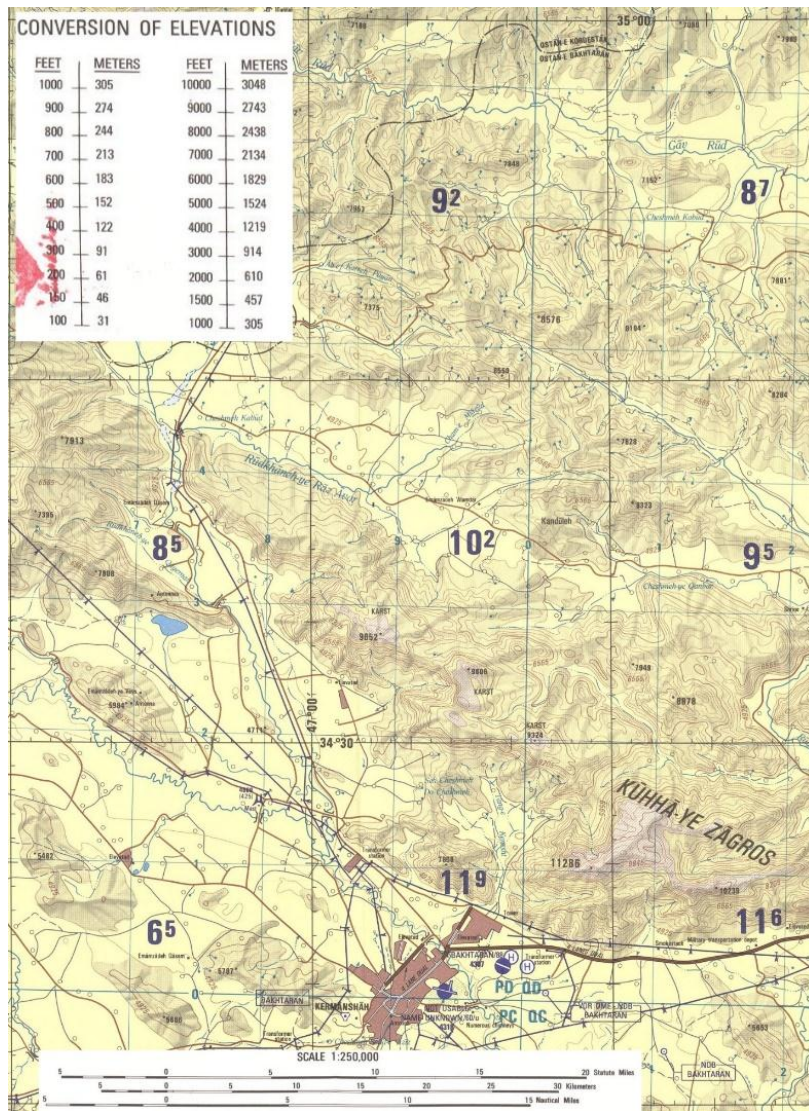
ارزیابی خطوط از نظر پتانسیل انرژی، هر یک از آنها به تعداد مختلفی تقسیم شده و چگونگی تقسیم‌بندی به شکلی صورت گرفته است که میزان تحمل تنش فشاری با توجه به جنس لوله‌ها رعایت شود. با توجه به امکان پوسیدگی لوله‌ها طی عمر پروژه در نقاط ضعیف شبکه، حداکثر فشار در شبکه ۶ اتمسفر در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی، پیشنهاد می‌شود فشار در لوله‌های آبرسانی از ۴ تا ۵ اتمسفر و در مناطق مسکونی از ۲/۵ تا ۳ اتمسفر بیشتر نشود. در بخش نتایج پتانسیل انرژی در تمامی بخش‌های خطوط (در صورت وجود) محاسبه شده است.



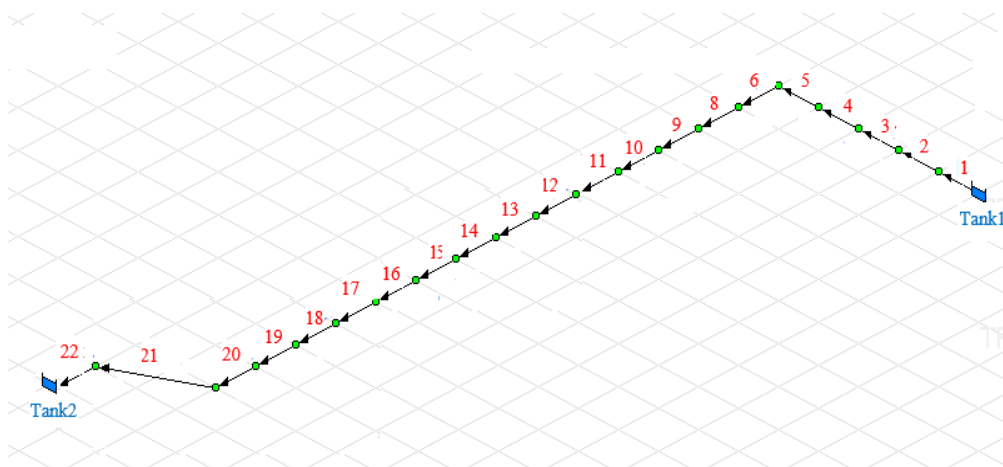
شکل ۱. شماتیک خطوط انتقال آب بین مخازن و موقعیت آنها در شهر کرمانشاه

جدول ۳. مشخصات خطوط آبرسانی در شهر کرمانشاه

موقعیت در شهر	ارتفاع از سطح دریا (m)	f	V (m/s)	طول خط انتقال (km)	مسیر انتقال
شمال - جنوب شرق کرمانشاه	۱۳۰۰-۱۴۲۰	۰/۰۱۱	۱/۱	۷/۱	تصفیه‌خانه شهید نظری - کوثر
شمال - جنوب	۱۳۰۰-۱۳۹۷	۰/۰۱۶	۱/۴	۶	تصفیه‌خانه شهید نظری - الفتی نیا و مصلی
غرب - جنوب غرب	۱۳۱۱-۱۳۶۰	۰/۰۱	۱/۹	۲۱/۳	ایستگاه پمپاژ میان‌در بند - مخزن چمن
غرب - شمال	۱۳۱۱-۱۳۳۶	۰/۰۱۲	۱/۱	۲۷/۶	ایستگاه پمپاژ میان‌در بند - مخزن معلم
شمال - شمال	۱۴۸۸-۱۳۰۰	۰/۰۱	۱	۷۶/۵	خط انتقال گاوشان - تصفیه‌خانه شهید نظری



شکل ۲. نقشه خطوط آبرسانی در شهر کرمانشاه و اطراف آن [۳۱]

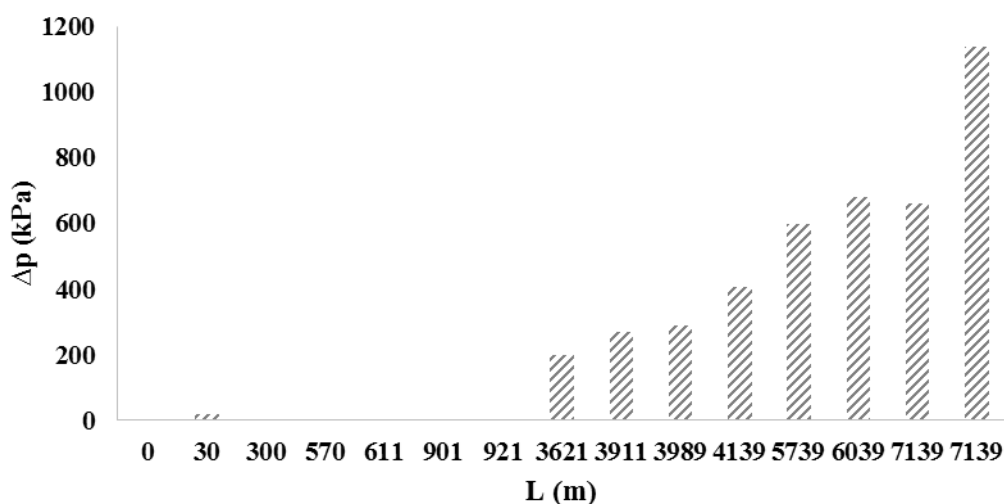


شکل ۳. شماتیک خط انتقال آب گاوشان به تصفیه خانه شهید نظری در محیط نرم افزار Pipe Flow Expert [۳۰]

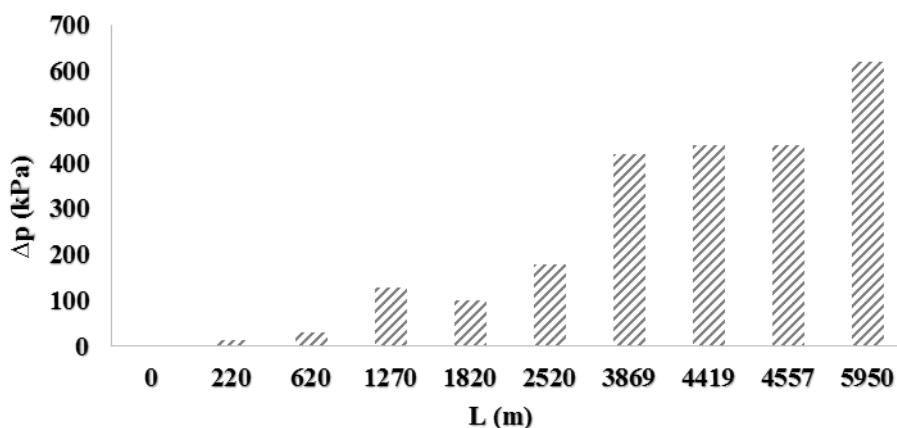
نتایج

افزایش ارتفاع است. به طور دقیق‌تر، مقدار افزایش ارتفاع در خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر ۱۲۰ متر است، حال آنکه مقدار متناظر برای خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی ۹۷ متر است. ضمن اینکه طول خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر ۷/۱ کیلومتر بوده که بیشتر از خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی (۶ کیلومتر) است. این افزایش طول با افزایش اصطکاک و افت فشار همراه است. از آنجا که افت فشار طی خطوط یادشده به طور کلی روند افزایشی داشته و کاهش آن در برخی نقاط بین خطوط ناچیز است (شکل‌های ۴ و ۵)، می‌توان نتیجه گرفت که این دو خط، پتانسیلی برای استحصال انرژی ندارند و انتقال آب باید توسط پمپ صورت گیرد.

شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات افت فشار (Δp) را به ترتیب در خطوط انتقال تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر و همچنین تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی نشان می‌دهند. در مسیر آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر، مقدار افت فشار در ۳/۶ کیلومتر ابتدای خط تقریباً ناچیز است. در ادامه، روند افت فشار تا انتهای خط و رسیدن به مخزن کوثر به طور کلی افزایشی است (شکل ۴). روند مشابهی را می‌توان در خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی نیز مشاهده کرد (شکل ۵). مقدار بیشتر افت فشار در خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر (شکل ۴) در مقایسه با خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی (شکل ۵) ناشی از



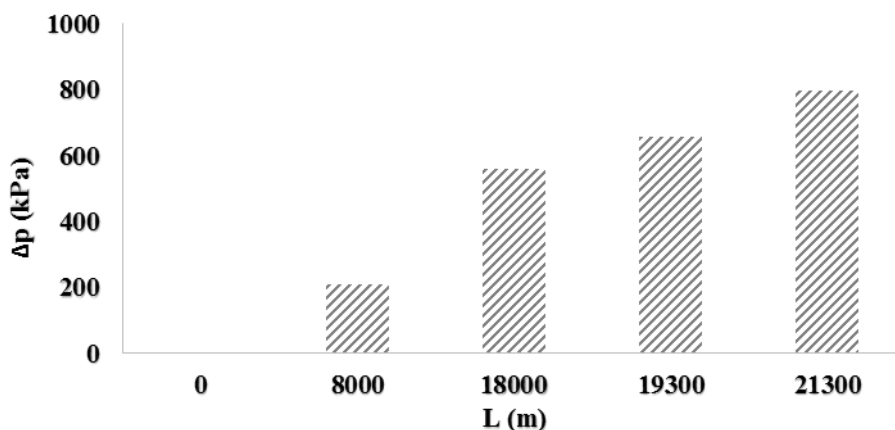
شکل ۴. تغییرات افت فشار طی خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر



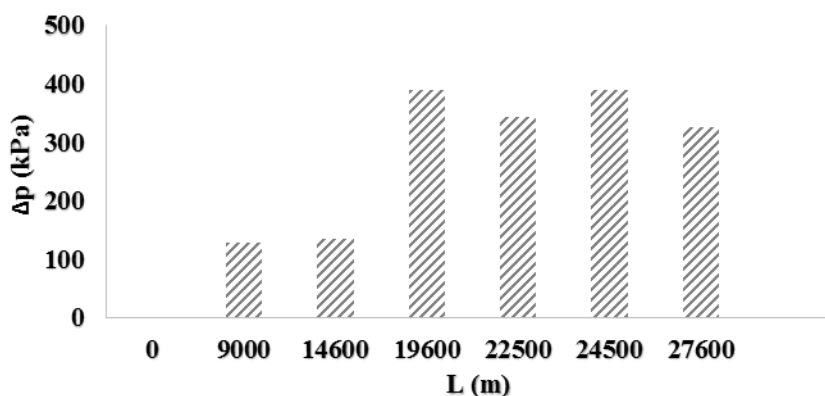
شکل ۵. تغییرات افت فشار طی خط آبرسانی تصفیه‌خانه شهید نظری به تصفیه‌خانه الفتی‌نیا و مصلی

معلم (شکل ۷) است. این موضوع ناشی از افزایش بیشتر ارتفاع در خط میان‌دربند به مخزن چمن (۴۹ متر) در مقایسه با خط میان‌دربند به مخزن معلم (۲۵ متر) است. با توجه به کم بودن ارتفاع ایستگاه میان‌دربند نسبت به مخازن چمن و مخزن معلم، از پمپاژ آب برای انتقال به این دو مخزن استفاده می‌شود. در واقع، روند افزایشی افت فشار (خط انتقال ایستگاه پمپاژ میان‌دربند به مخزن چمن) نیز به همین دلیل است (شکل ۶). همان‌طور که بر مبنای توپوگرافی منطقه نیز انتظار می‌رفت، این دو خط پتانسیل لازم برای دریافت و استحصال انرژی را ندارند.

شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات افت فشار را طی خطوط آبرسانی ایستگاه پمپاژ میان‌دربند به مخزن چمن و همچنین ایستگاه پمپاژ میان‌دربند به مخزن معلم را نشان می‌دهند. با توجه به محاسبات انجام‌شده، روند افزایشی افت فشار در خط آبرسانی ایستگاه پمپاژ میان‌دربند به مخزن چمن (شکل ۶) بسیار محسوس‌تر از خط آبرسانی ایستگاه پمپاژ میان‌دربند به مخزن معلم (شکل ۷) است. اگرچه طول خط میان‌دربند به مخزن معلم (۲۷ کیلومتر) بیشتر از خط میان‌دربند به مخزن چمن (۲۱ کیلومتر) است، اما مقدار افزایش افت فشار در خط میان‌دربند به مخزن چمن (شکل ۶) بیشتر از خط میان‌دربند به مخزن



شکل ۶. تغییرات افت فشار طی خط آبرسانی میان‌دربند به مخزن چمن



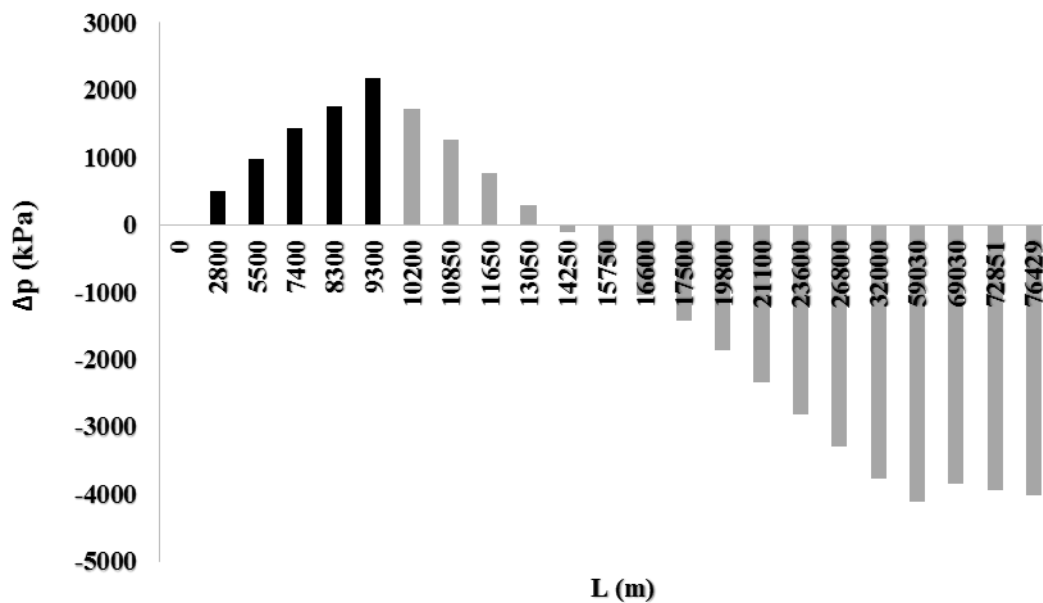
شکل ۷. تغییرات افت فشار طی خط آبرسانی میان‌دربند به مخزن معلم

صورت‌گرفته (که در شکل ۳ نشان داده شد) از نقطه ۱ تا ۵ افزایش ارتفاع، از نقطه ۵ تا ۲۰ کاهش ارتفاع، نقاط ۲۰ تا ۲۱ افزایش ارتفاع و در نهایت، در انتهای خط کاهش ارتفاع رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در ابتدای خط و در طولی حدود $9/3 \text{ km}$ افزایش

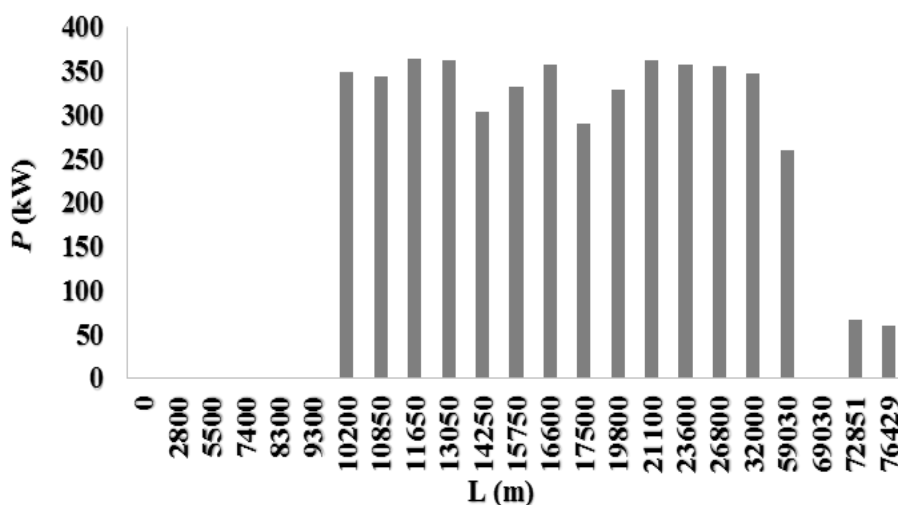
شکل ۸ تغییرات افت فشار خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری را نشان می‌دهد. این خط به عنوان منبع اصلی تأمین آب شهر کرمانشاه با طولی برابر ۷۶ کیلومتر از سد گاوشان در استان کردستان آب را به شهر کرمانشاه انتقال می‌دهد. بر مبنای تقسیم‌بندی

پتانسیل توان وجود دارد که در مجموع پتانسیل این خط حدود ۴/۸ مگاوات است. برای به دست آوردن این انرژی می‌توان از میکروتوربین‌های آبی و یا پمپ به عنوان توربین (پمپ معکوس) بهره برد. با فرض محافظه‌کارانه ۵۰ درصد برای بازده، تخمین زده می‌شود که حدود ۲/۴ مگاوات انرژی الکتریکی از این خط انتقال آب می‌توان به دست آورد که توان الکتریکی مورد نیاز بیش از یک هزار منزل مسکونی را به تنهایی می‌تواند تأمین کند.

ارتفاع رخ می‌دهد و واضح است که در این فاصله پتانسیلی به منظور استحصال انرژی وجود ندارد. اما از این نقطه به بعد کاهش ارتفاعی حدود ۶۶۰ متر رخ می‌دهد که نشان‌دهنده منبع بسیار مناسبی برای جذب انرژی است. شکل ۹ تغییرات توان (P) در طول خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از طول ۹/۳ km به بعد به طور متوسط در هر فاصله بین دو نقطه در نظر گرفته شده، ۳۳۱ kW



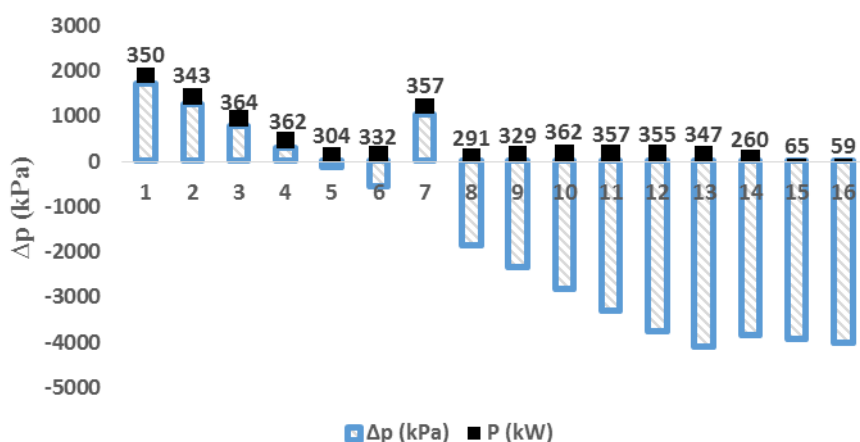
شکل ۸. تغییرات افت فشار طی خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری



شکل ۹. تغییرات پتانسیل توان (P) طی خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری

استفاده از این دو ایستگاه نزدیکی به شبکه انتقال برق و دسترسی آسان به آن است. همچنین، از این دو ایستگاه می‌توان برای تأمین بخشی از برق مورد نیاز تصفیه‌خانه شهید نظری بهره برد که از منظر پدافند غیرعامل و در شرایط بحرانی و اضطرار بسیار بااهمیت است. درخور یادآوری است که سرمایه‌گذاری به منظور استفاده از ۱۴ نقطه دیگر نشان داده‌شده در این خط آبرسانی (شکل‌های ۹ و ۱۰) باید با در نظر گرفتن مکان این نقاط و فاصله آنها از شبکه انتقال برق بررسی شود.

تغییرات پتانسیل توان و افت فشار در ۱۶ نقطه نشان داده‌شده در شکل ۹ (مسیر خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری)، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پتانسیل توان برای ۱۴ نقطه نشان داده‌شده از سمت سد گاوشان بین ۲۶۰ kW تا ۳۶۲ kW بوده که درخور توجه است. دو ایستگاه انتهایی خط که در نزدیکی تصفیه‌خانه شهید نظری قرار دارند پتانسیل به نسبت کمتری داشته و پتانسیل در دسترس آنها ۶۵ kW و ۵۹ kW است (شکل ۱۰). با این وجود، مزیت



شکل ۱۰. تغییرات پتانسیل توان (P) و افت فشار (Δp) در ۱۶ نقطه شکل ۹ در مسیر خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری

آبرسانی، که منبع اصلی تأمین آب شهر کرمانشاه است، طی مسیر ۷۶ کیلومتری آن حدود ۴/۸ مگاوات است. با در نظر گرفتن مقدار محافظه‌کارانه ۵۰ درصد برای بازده میکروتوربین و یا پمپ به عنوان توربین (پمپ معکوس)، می‌توان به توان ۲/۴ مگاوات برق تجدیدپذیر دست یافت. در نتیجه، این امکان وجود دارد که به صورت میانگین، روزانه و طی مدت ۲۴ ساعت، مقدار ۵۷/۶ مگاوات انرژی پاک تولید شود. با توجه به اینکه دبی این خط در تمامی سال تقریباً ثابت است، امکان برنامه‌ریزی برای استفاده و بهره‌برداری از این انرژی وجود دارد. درخور یادآوری است که بر خلاف انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی که متکی به تابش و وزش باد هستند و در بخش‌هایی از روز قابل استفاده نیستند، امکان بهره‌گیری از پتانسیل انرژی خط اصلی انتقال آب به شهر کرمانشاه (خط انتقال آب گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری) در ۲۴ ساعت شبانه‌روز وجود دارد. مطالعه حاضر در مرحله

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به تحلیل خطوط اصلی انتقال آب شهر کرمانشاه از نظر تعیین نقاط مستعد به منظور به دست آوردن انرژی آبی برای تولید برق پرداخته شد. به این منظور، خطوط تصفیه‌خانه شهید نظری به مخزن کوثر، تصفیه‌خانه شهید نظری به الفتی‌نیا و مصلی، ایستگاه پمپاژ میان‌در بند به مخزن چمن، ایستگاه پمپاژ میان‌در بند به مخزن معلم و خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری بررسی و مطالعه شد. به کمک مشخصات هیدرولیکی خطوط انتقال و همچنین توپوگرافی منطقه و با بهره‌گیری از معادلات بقا، افت اصطکاکی طی خطوط تعیین شده و سپس تغییرات افت فشار در آنها محاسبه شد. نتایج نشان داد از میان پنج خط مطالعه‌شده، خط انتقال گاوشان به تصفیه‌خانه شهید نظری از پتانسیل بسیار مطلوبی برای استحصال انرژی و تولید برق برخوردار است. به طور دقیق‌تر، پتانسیل توان این خط

Energy Agency, Canadian Hydropower Association. Hydropower and the world's energy future; 2000.

- [8]. Saxena P. Overview of small hydro power development in India. Himalayan small Hydro Power Summit, Dehradun; 2006.
- [9]. Loots I, Van Dijk M, Barta B, Van Vuuren SJ, Bhagwan JN. A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Oct 1; 50:1254-68.
- [10]. Bozorgi A, Javidpour E, Riasi A, Nourbakhsh A. Numerical and experimental study of using axial pump as turbine in pico hydropower plants. *Renewable Energy*. 2013 May 1; 53:258-64.
- [11]. Penche C. Guide on how to develop a small hydropower plant. European Small Hydropower Association; 2004.
- [12]. Williams AA. Pumps as turbines for low cost micro hydro power. *Renewable Energy*. 1996 Sep 1; 9(1-4):1227-34.
- [13]. Haidar AM, Senan MF, Noman A, Radman T. Utilization of pico hydro generation in domestic and commercial loads. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012 Jan 1; 16(1):518-24.
- [14]. Sari MA, Badruzzaman M, Cherchi C, Swindle M, Ajami N, Jacangelo JG. Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems. *Journal of environmental management*. 2018 Dec 15; 228:416-28.
- [15]. Oladosu TL, Koya OA. Numerical analysis of lift-based in-pipe turbine for predicting hydropower harnessing potential in selected water distribution networks for waterlines optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018 Jun 5.
- [16]. Jiyun D, Zhicheng S, Hongxing Y. Numerical study on the impact of runner inlet arc angle on the performance of inline cross-flow turbine used in urban water mains. *Energy*. 2018 Jun 8.
- [17]. Alexander KV, Giddens EP, Fuller AM. Radial-and mixed-flow turbines for low head microhydro systems. *Renewable Energy*. 2009 Jul 1; 34(7):1885-94.
- [18]. Jain SV, Patel RN. Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Feb 1; 30:841-68.
- [19]. Williams A. Pumps as turbines: a user's guide. ITDG Pub.; 2003.

امکان‌سنجی و به عنوان یک قدم زیربنایی برای اجرایی کردن این طرح انجام پذیرفت. پیشنهاد می‌شود به منظور تعیین نقاط مناسب برای نصب میکروتوربین‌های آبی، خط آبرسانی یادشده با توجه به موقعیت نسبت به شبکه انتقال برق و محدودیت‌های مکانی طی مسیر طولانی آن، مطالعه و بررسی بیشتری شود.

تقدیر و تشکر

مطالعه حاضر در راستای قرارداد پژوهشی به شماره ۱۴۰۶۱/۹۶/۱۲۹ فی مابین پژوهشگاه مواد و انرژی و شرکت آب و فاضلاب شهری استان کرمانشاه به انجام رسیده و بدین وسیله نویسندگان از حمایت‌های صورت گرفته توسط آن شرکت کمال قدردانی و سپاس را دارند.

منابع

- [1]. Bhandari B, Lee KT, Lee GY, Cho YM, Ahn SH. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*. 2015 Jan 1; 2(1):99-112.
- [2]. European Commission. Climate Action – The EU climate and energy package. European Commission; 2007.
- [3]. IHA/IEA/CHA. Hydropower and the World's Energy Future. International Hydropower Association, International Energy Agency, Canadian Hydro- power Association; 2000.
- [4]. Bilgen S, Keleş S, Kaygusuz A, Sarı A, Kaygusuz K. Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2008 Feb 1; 12(2):372-96.
- [5]. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, et al. IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2011 May.
- [6]. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Kadner S, Zwickel T, et al. Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press; 2011.
- [7]. International Hydropower Association ICoLD. Implementing Agreement on Hydropower Technologies and Programmes/International

- [20]. Williams AA. Pumps as turbines for low cost micro hydro power. *Renewable Energy*. 1996 Sep 1; 9(1-4):1227-34.
- [21]. Kusakana K. A survey of innovative technologies increasing the viability of micro-hydropower as a cost effective rural electrification option in South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Sep 1; 37:370-9.
- [22]. Agarwal T. Review of pump as turbine (PAT) for micro-hydropower. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012 Nov; 2(11):163-9.
- [23]. Motwani KH, Jain SV, Patel RN. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants—a case study. *Procedia Engineering*. 2013 Jan 1; 51:721-6.
- [24]. Singh RI, Gupta R, Singh A, Subbarao PM. Guided pump-as-turbine: design and development for pico-level energy generation. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*. 2013; 3:71-6.
- [25]. Ranjitkar G, Huang J, Tung T. Application of micro-hydropower technology for remote regions. In: *IEIC Climate Change Technology, 2006 IEEE* 2006 May 10 (pp. 1-10). IEEE.
- [26]. Nourbakhsh A, Jahangiri G. Inexpensive small hydropower stations for small areas of developing countries, in: *Conference on Advanced in Planning-Design and Management of Irrigation Systems as Related to Sustainable Land use*, Louvain, Belgium, 1992; pp. 313– 19.
- [27]. Mohammadnejad M, Ghazvini M, Mahlia TM, Andriyana A. A review on energy scenario and sustainable energy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011 Dec 1; 15(9):4652-8.
- [28]. Fox, Robert W., and Alan T. McDonald. "Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons." Inc., New York (1994).
- [29]. White FM. *Fluid mechanics*, WCB. Ed McGraw-Hill Boston. 1999.
- [30]. <https://www.pipeflow.com/>, [accessed Sep 01, 2018].
- [31]. Library of the University of Texas, <https://www.lib.utexas.edu/>, [accessed Oct 08, 2018].