

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد هیدرولیکی، فنی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ آبرسانی روستاهای استان ایلام

علیرضا حسینی^{۱*}، جعفر مامی‌زاده^۲، لیلی شفیعی^۳ و نبی یاسمی^۴

چکیده

دسترسی به آب کافی و بهداشتی، یکی از نیازهای اساسی جامعه روستایی است. بیشترین انرژی لازم برای تأمین، انتقال و توزیع آب شرب روستایی با ایستگاه‌های پمپاژ تأمین می‌شود. با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی، بررسی وضعیت راندمان سامانه‌های پمپاژ، اهمیت زیادی دارد. راندمان سامانه‌های پمپاژ از عوامل مختلفی، همچون عوامل هیدرولیکی، الکتریکی، مکانیکی، نگهداری و مدیریتی متأثر است. این پژوهش با هدف بررسی راندمان ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آبرسانی روستاهای استان ایلام انجام شد. برای انجام این پژوهش، متغیرهای هیدرولیکی (سرعت جریان، دبی و فشار)، متغیرهای الکتریکی (جریان، ولتاژ، ضریب توان و توان مصرفی)، مشخصات مکانیکی (نوع پمپ و الکتروموتور) و مشخصات هندسی (عمق چاه و قطر لوله رانش) در ۱۰ ایستگاه منتخب، اندازه‌گیری و با محاسبه توان تولیدی و توان مصرفی الکتروپمپ‌ها، راندمان هر ایستگاه، جداگانه تعیین و سپس با استفاده از میانگین‌گیری وزنی، راندمان متوسط الکتروپمپ‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد راندمان متوسط ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آبرسانی روستایی استان ایلام، ۶۱/۴ درصد بود. از کل دبی ایستگاه‌های منتخب، حدود ۷۵ درصد با راندمان ۶۵/۹ درصد و ۲۵ درصد دیگر با راندمان ۴۷/۷ درصد پمپاژ می‌شود. راندمان در ایستگاه‌های پمپاژ با دبی بیشتر و اهمیت زیادتر، بیشتر از ایستگاه‌های کوچک است. برای افزایش راندمان انرژی مصرفی، بازنگری در طراحی ایستگاه‌های پمپاژ، نصب تجهیزات پایش عملکرد در محل ایستگاه‌های پمپاژ، تعمیر به‌موقع، بهره‌برداری و نگهداری منظم و آموزش آبداران ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه‌های پمپاژ، آب شرب، آب و فاضلاب روستایی، راندمان.

ارجاع: حسینی ع. مامی‌زاده ج. شفیعی ل. و یاسمی ن. ۱۴۰۰. بررسی عملکرد هیدرولیکی، فنی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ آبرسانی روستاهای استان ایلام. مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۱۱-۱۹.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام.

۳- کارشناس تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب استان ایلام.

۴- کارشناس تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب استان ایلام.

* نویسنده مسئول: a.hosseini@ilam.ac.ir

مقدمه

برابر ۰/۳۷ واحد است. یکی از علت‌های این مسئله، کاهش کارایی بخش انرژی با متوسط ۰/۴۶ و نیروی انسانی با متوسط ۰/۱۳ واحد بود. برای بهبود این شاخص، در نظر گرفتن موضوع صرفه‌جویی انرژی در تجهیزات جدید، انتخاب تجهیزات بهینه و کم‌مصرف و مناسب به لحاظ فنی در طرح و پروژه‌های آبی، بهینه‌سازی وسایل و تجهیزات شرکت در مصرف انرژی برای کاهش هزینه‌ها باید مد نظر قرار گیرند.

پولیدو کالوو و گوتیرز استرادا (۲۰۱۱) روش‌های کاهش هزینه انرژی ایستگاه‌های پمپاژ در شبکه‌های توزیع آب را با رعایت معیارهای عملکرد سیستم بررسی کردند. در این بررسی، از بهترین ترکیب پمپ‌ها برای به حداقل رساندن انرژی مصرفی و در نظر گرفتن یک مخزن ذخیره آب برای پمپاژ در ساعت غیر اوج مصرف برق و مصرف آب در ساعات اوج استفاده شد.

مطالعه موردی روی ایستگاه پمپاژ پساب تصفیه‌خانه شهر میلفورد برای کاهش مصرف انرژی نشان می‌دهد جایگزینی پمپی با ظرفیت کمتر، سبب کاهش انرژی مصرفی ایستگاه پمپاژ به میزان ۱۵ درصد شده است (اداره انرژی‌های تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا، ۲۰۱۲).

رودرا و همکاران (۲۰۱۶)، مشکلات ایجاد شده برای تأمین آب شهرهای واقع در صحرای افریقا را بررسی کردند. به علت برداشت زیاد آب زیرزمینی و گرم شدن کره زمین، سطح آب زیرزمینی افت کرده و سبب اشکال در بهره‌برداری سامانه‌های پمپاژ شده است. در این پژوهش با جمع‌آوری داده‌های تجربی و استفاده از ابزارهای مختلف افزایش کارایی مصرف انرژی روی موتور پمپ‌ها، روش‌های آسان و مقرون به صرفه‌ای برای کاهش مصرف انرژی در شرایط کمبود آب و کمک به تصمیم‌گیری فراهم شد.

یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی، انرژی باد و حرارت زمین و جریان‌های آبی است. استفاده از این انرژی‌های به‌طور هم‌زمان را برق هیبریدی می‌نامند. تأسیسات برق هیبریدی، بیشتر برای شرایط اضطراری استفاده می‌شود که برق قطع می‌شود یا کیفیت آن کاهش می‌یابد (گلوواتسکی و همکاران، ۲۰۱۲).

پرجیو و آلدی (۲۰۱۸)، ارتقای ایستگاه‌های پمپاژ را برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و کاهش پرت آب شبکه‌های توزیع بررسی کردند. راهکارهای فنی و

دسترسی به آب شرب بهداشتی، یکی از مهم‌ترین نیازهای انسانی است؛ از این‌رو، تأمین، انتقال، تصفیه و توزیع آب شرب بهداشتی با هدف رفع نیازهای آب مشترکان شهری و روستایی با حداقل انرژی مصرفی، اهمیت زیادی دارد. تولید حجم زیادی از آب شرب روستاها با ایستگاه‌های پمپاژ انجام می‌شود. هزینه انرژی مصرفی در طول عمر مفید ایستگاه‌های پمپاژ، بخش زیادی از سرمایه‌گذاری انجام شده را تشکیل می‌دهد. هزینه برق مصرفی، رتبه سوم صنعت آب و فاضلاب را به خود اختصاص داده است. طراحی هیدرولیکی نامناسب ایستگاه‌های پمپاژ، سپری شدن عمر مفید پمپ و الکتروموتورها، انجام‌دادن به موقع تعمیرات لازم و نگهداری نامناسب، سبب کاهش راندمان عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود. در کشورهای مختلفی برای کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ، پژوهش‌های زیادی انجام شده است؛ به‌طور مثال، در آلمان، استفاده از موتورهای دور متغیر برای ۳۵ درصد الکتروپمپ‌های نصب شده در صنایع این کشور، موجب صرفه‌جویی ۱۶ میلیارد کیلووات ساعت انرژی در سال شد. در هندوستان با استاندارد کردن طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های پمپاژ با هدف بهبود راندمان و کاهش مصرف انرژی، راندمان بهره‌برداری از سیستم‌های پمپاژ را ۱۵-۲۰ درصد افزایش دادند (فتحی مقدم و همکاران، ۱۳۸۷)؛ بنابراین، پایش علمی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ برای افزایش راندمان عملکرد و جلوگیری از هدر رفتن سرمایه و کاهش هزینه‌های تولید آب، اهمیت زیادی دارد.

کیفیت و دقت عملکرد تجهیزات ابزار دقیق، از جمله فلومترها، فشارسنج‌ها، ارتفاع‌سنج، شیرآلات و ... در شرکت‌های آب و فاضلاب، ملاک اندازه‌گیری و ارائه‌دهنده اطلاعات از وضعیت تأسیسات و شبکه‌های توزیع آب و شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب بوده و در تصمیم‌گیری کارشناسان و مدیران، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به همین علت، اهمیت زیادی برای کلیه شرکت‌های آب و فاضلاب دارد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۸).

علی‌نژاد و دباغ (۱۳۹۷)، رتبه‌بندی و کارایی انواع هزینه‌های شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی استان آذربایجان غربی را با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد کارایی کل عوامل، نوسانی بوده است؛ به‌گونه‌ای که متوسط کارایی،

فاضلی (۱۳۸۸ الف/ب)، نصب پمپ‌های دور متغیر را برای شبکه توزیع آب شهر زنجان در ایستگاه پمپاژ امیرکبیر، ارزیابی اقتصادی کرد. نتایج تحلیل اقتصادی، پیش و پس از نصب پمپ‌های دور متغیر نشان داد هزینه‌های کلی شبکه توزیع آب به میزان زیادی کاهش یافته است. نتایج این ارزیابی نشان داد تعداد حوادث ثبت‌شده به میزان ۷۴/۷ درصد و مقدار آب به حساب نیامده به مقدار ۱۲ درصد کاهش یافت. نرخ بازده داخلی بعد از نصب درایوهای کنترل دور، برابر ۴۳ درصد بود که در پروژه‌های فنی، نرخ بازده زیادی است.

محبوبیان (۱۳۸۸)، مشکلات نصب الکتروپمپ‌ها را در ایستگاه‌های پمپاژ ارزیابی کرد. نتایج نشان داد توجه‌نکردن به اصول نصب صحیح الکتروپمپ‌ها سبب کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود.

موسوی و نظری (۱۳۸۷)، میزان تولید، راندمان کارکرد و ممیزی انرژی ایستگاه‌های پمپاژ شرکت آب و فاضلاب روستایی شهرستان لردگان را بررسی کردند. نتایج نشان داد ۸۲ درصد مجموع ایستگاه‌های پمپاژ، که ۷۱ درصد کل توان مصرفی و ۷۲ درصد کل جمعیت را تشکیل می‌دهد، کمتر از ۵۰ درصد است.

استان ایلام با مساحت ۲۰ هزار کیلومترمربع در غرب ایران در مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است. از شمال با استان کرمانشاه، از جنوب با خوزستان، از شرق با استان لرستان و از غرب به طول ۴۲۵ کیلومتر با کشور عراق همسایه است. اقلیمی نیمه‌خشک دارد. متوسط درجه حرارت سالیانه، ۲۱ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی، ۴۸۰ میلی‌متر است.

براساس آخرین تقسیمات کشوری، استان ایلام، ۱۰ شهرستان، ۲۶ بخش، ۲۵ شهر، ۴۹ دهستان و ۵۷۸ روستا دارد. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت آن حدود ۵۸۰ هزار نفر با بعد خانوار ۳/۶ نفر است که از این تعداد، نزدیک به ۱۷۵ هزار نفر با بعد خانوار ۳/۷ نفر در روستاها زندگی می‌کنند. نسبت جمعیت روستایی به شهری، ۳۰/۲ درصد است و از کل روستاهای استان، ۸۶/۳ درصد و از نظر جمعیت، ۹۹/۴ درصد تحت پوشش شبکه آب روستایی قرار دارد و کل آب شرب ضروری آنها از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. کل حجم آب تولیدی، ۱۳/۷ و کل حجم

اصلاحات سازه‌ای، سبب بهبود عملکرد هیدرولیکی، کاهش زیاد مقدار هزینه‌های انرژی مصرفی و کاهش پرت آب شبکه شد.

در سیستم‌های انتقال، ذخیره و توزیع آب بخش عمده مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ انجام می‌شود. افزایش هزینه‌های مصرف انرژی در سال‌های اخیر، توجه به مدل‌سازی دینامیکی و مانیتورینگ آنها با هدف کاهش مصرف انرژی، بیشتر شده است (ایکر و همکاران، ۲۰۰۳؛ پولیدو کالوو و همکاران، ۲۰۰۶؛ تانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ مامبرتی و اوریسی، ۲۰۱۶).

روشن‌روان و همکاران (۱۳۹۵)، عوامل مؤثر بر کاهش زیان آب بدون درآمد را در شرکت آب و فاضلاب روستایی خراسان شمالی بررسی کردند. در این پژوهش، نبود ممیزی انرژی و طراحی مجدد تأسیسات برقی، خرید درخواست (دیماندا) مازاد و رعایت‌نکردن شیوه‌نامه‌های بهره‌برداری و نبود ترموگرافی تابلوهای برق، از جمله عوامل افزایش انرژی مصرفی در تأسیسات آبرسانی روستایی ذکر شده است.

حسینی صفات و آیین (۱۳۹۱)، مدیریت مصرف انرژی و آب را در ایستگاه پمپاژ مرکزی آب شرب شهر کرمان بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از درایو کنترل دور الکتروموتور، سبب کاهش حداقل ۱۴ درصد مصرف انرژی در ایستگاه شده است. محمدی (۱۳۹۱)، روش‌های مختلف بهینه‌سازی مصرف انرژی را در ایستگاه‌های پمپاژ بررسی کرد. نتایج نشان داد بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ به سه عامل محیطی، طراحی و بهره‌برداری بستگی دارد و با رویکردی سیستمی می‌توان ایستگاه‌های جدید را طراحی و مصرف انرژی را در ایستگاه‌های موجود با مهندسی مجدد بهینه کرد.

ناییی شهبابی و همکاران (۱۳۹۰)، عملکرد ایستگاه پمپاژ کهنه‌خانه شهر پیرانشهر در استان آذربایجان غربی را از نظر راندمان با استفاده از ممیزی انرژی با اندازه‌گیری دبی، فشار و توان الکتروپمپ‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد در حالت‌های مختلف کارکرد پمپ‌ها، راندمان بین ۲۴ تا ۵۰ درصد متغیر است. آنها برای کاهش مصرف انرژی، طراحی هیدرولیکی درست تأسیسات، انتخاب درست الکتروپمپ‌ها، نگهداری صحیح و اعمال شیوه‌نامه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و استفاده از تجهیزات کنترل هوشمند را پیشنهاد کردند.

راندمان، اندازه‌گیری دبی پمپاژ، سرعت جریان، قطر لوله رانش، عمق چاه، فشار خروجی، جریان و ولتاژ برق ورودی و خروجی به تابلوهای برق، ضریب توان ($\cos\phi$) و فاصله کابل تا الکتروموتور ضروری است. برای اندازه‌گیری دبی و سرعت جریان از دستگاه دبی‌سنج آلتراسونیک^۱ استفاده شد. این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- دستگاه آلتراسونیک

برای اندازه‌گیری ولتاژ، جریان، توان و ضریب توان الکتریکی در تابلوهای ایستگاه‌های پمپاژ از دستگاه Hioki3286-20 استفاده شد. این دستگاه برای اندازه‌گیری لحظه‌ای ولتاژ و آمپر جریان‌های لحظه‌ای و سریع موتورهای الکتریکی و خطوط مختلف جریان در تابلوها استفاده می‌شود.

برای اندازه‌گیری فشار، فشارسنج دیجیتال LEO Recorder5 به کار رفت (شکل ۲). با استفاده از این فشارسنج، فشار روی خط رانش در سر چاه اندازه‌گیری شد. نوسانات فشار در الکتروپمپ‌ها سبب تغییرات جزئی فشار لحظه‌ای می‌شود؛ از این‌رو، فشار لحظه‌ای در یک بازه زمانی حداقل ۲۰ ثانیه‌ای ثبت می‌شود. فشار متوسط در این بازه به‌عنوان فشار متوسط جریان در سر چاه تعیین می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار کل استاتیک، فاصله نصب الکتروپمپ تا سر چاه به فشار اندازه‌گیری شده افزوده می‌شود.

با اندازه‌گیری مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، شامل دبی، سرعت و فشار، مشخصه جریان الکتریکی، شامل جریان، ولتاژ، توان و ضریب توان در تابلوهای برق و اندازه‌گیری پارامترهای هندسی، مانند عمق چاه و قطر لوله، راندمان را با استفاده از معادلات (۱) تا (۳) می‌توان محاسبه کرد.

$$P_p = \rho g Q H \quad (1)$$

$$P_c = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

آب مصرفی، ۹/۲ میلیون متر مکعب در سال است؛ بنابراین، در استان ایلام، سرانه مصرف آب روستایی، ۱۴۳ و سرانه آب تولیدی، ۲۱۵ لیتر در شبانه‌روز است. متوسط این مقادیر در کشور به ترتیب، ۱۴۰ و ۱۸۳ لیتر در شبانه‌روز است؛ از این‌رو، آب به حساب نیامده، ۳۳/۵ درصد (متوسط کشوری ۳۰/۷ درصد) است. تعداد چاه‌های آب شرب، ۷۵ حلقه و چشمه‌ها، ۱۱۰ دهنه است. تعداد ایستگاه‌های پمپاژ در مدار، ۱۰۱ ایستگاه با تولید روزانه آب، حدود ۳۸ هزار متر مکعب است. این مقدار، حدود ۸۱/۶ درصد ظرفیت تولیدی آب شرب روستاهای استان است (متوسط کشوری حدود ۵۰ درصد). در سال‌های اخیر، به‌علت خشکسالی‌های رخ داده، بسیاری از چشمه‌ها کم‌آب یا خشک شده‌اند. آب لازم ۵۵ روستا با جمعیت حدود ۱۳ هزار نفر به روش سیار تأمین می‌شود. شاخص بهره‌مندی از آب آشامیدنی سالم، ۷۲ درصد است.

ایستگاه‌های پمپاژ، انرژی ضروری بخش زیادی از شبکه آبرسانی روستاهای استان ایلام را بر عهده دارد. برای حفظ کارایی مناسب ایستگاه‌ها و افزایش طول عمر مفید تأسیسات، بررسی علمی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ ضروری است تا به این روش با تعیین نقاط ضعف و ارائه راهکارهای اصلاحی، راندمان افزایش یابد، در انرژی مصرفی صرفه‌جویی شود و استهلاك تجهیزات به حداقل ممکن برسد و از نتایج آن در طرح‌های آتی استفاده شود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی راندمان واقعی الکتروپمپ ایستگاه‌های پمپاژ است. با تعیین راندمان واقعی ایستگاه‌های پمپاژ و شناسایی مشکلات احتمالی، با ارائه راهکارهای کاربردی، میزان مصرف انرژی و هزینه نگهداری در ایستگاه‌های پمپاژ را می‌توان کاهش داد.

مواد و روش‌ها

راندمان انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ به عوامل مختلفی بستگی دارد؛ به همین علت، ارزیابی سامانه‌های پمپاژ باید به‌صورت سیستمی بررسی شود. به‌طور کلی، شرایط هیدرولیکی، الکتریکی، مکانیکی، بهره‌برداری، نگهداری، محیطی و مدیریتی بر عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ مؤثر است. انتخاب بهینه هر یک از موارد ذکر شده، در تحقق راندمان بهینه ایستگاه مؤثر است.

معمولاً ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آب روستایی به‌علت کمبودن دبی پمپاژ، یک الکتروپمپ دارد. برای تعیین

مقاومت) و مشخصات هیدرولیکی جریان (دبی، سرعت و ارتفاع پمپاژ) تعیین شد. در ادامه، روش محاسبه راندمان یکی از ایستگاه‌های پمپاژ منتخب (ایستگاه پمپاژ سراب کلان) به‌عنوان نمونه شرح داده می‌شود.

ایستگاه پمپاژ سراب کلان شهرستان سیروان در موقعیت $X=658925$ متر طول شرقی و $Y=3716097$ متر عرض شمالی در مختصات یوتی‌ام واقع شده است. این شهرستان، جمعیت ۱۴۴۰۴ نفر با بعد خانوار ۳/۶ دارد که ۷۶/۱ درصد آن در روستاها با بعد خانوار ۳/۶ نفر زندگی می‌کنند. آب شرب روستاهای اسلامی، لرینی بالایی و پایینی، برآفتاب، نثار مله‌ماران، گوراب بالا، هیوند، لالا، پانزده خرداد، عباس‌آباد، فاطمیه، نگل، چگینی، بوژان، سرکان، دوگر، کمان‌گران، آب‌زار، عمارت، شوراب‌خانعلی، باغله، ورگج، سیه‌سیه، ظهیری، چم‌جنگل، قاضی‌خان، چم‌شیر، داربلوط و چم‌روته (۲۹ روستا) از این ایستگاه تأمین می‌شود. جمعیت این روستاها براساس نتایج سرشماری سال ۱۳۹۵، حدود ۴۵۰۰ نفر است. این ایستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.

چاه شماره یک این ایستگاه، عمق ۱۳۰ متر، عمق نصب الکتروپمپ ۶۵ متر، آبدهی ۴۱/۱ لیتر در ثانیه و الکتروپمپ ۱۱۰ کیلووات از نوع شناور ۳۴۵/۱۰ دارد. قطر لوله رانش، ۶ اینچ است. نتایج اندازه‌گیری توان ورودی به تابلوی برق این ایستگاه نشان داد توان ورودی و خروجی به ایستگاه به ترتیب، ۱۲۵/۸ و ۱۲۵/۳ کیلووات است؛ بنابراین، حدود ۰/۵ کیلووات افت انرژی تابلوی برق است. طول کابل این ایستگاه تا سر چاه نزدیک به ۸ متر بوده و با در نظر گرفتن عمق نصب، طول کل کابل ۷۳ متر می‌شود. تلفات انرژی در طول کابل، ۰/۷ کیلووات محاسبه شد؛ از این‌رو، کل برق ورودی به الکتروپمپ، ۱۲۴/۶ کیلووات می‌شود.

نتایج فشار اندازه‌گیری شده در سر چاه در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس این نتایج، متوسط فشار در سر چاه، برابر ۱۲/۳ بار یا ۱۲۵/۴ متر ستون آب بود. اگر به این مقدار، عمق نصب الکتروپمپ را اضافه کنیم، ارتفاع استاتیکی ۱۹۰/۴ متر می‌شود. مقدار سرعت نیز برابر ۱/۱۸ متر در ثانیه بود؛ بنابراین، ارتفاع دینامیکی تولیدی از معادله ذیل تعیین می‌شود:

$$h_d = \frac{v^2}{2g} = \frac{1.18^2}{2 \times 9.81} = 0.071m \quad (4)$$

بارکل مفید تولیدی پمپ به‌صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{P_c}{P_p} \quad (3)$$



شکل ۲- فشارسنج دیجیتالی LEO Recorder5

در معادلات مذکور، P_p توان تولیدی، ρ جرم واحد حجم سیال، g شتاب ثقل، Q بده پمپ، H ارتفاع کل پمپاژ، P_c توان مصرفی، V ولتاژ، I شدت جریان برق برحسب آمپر، $\cos\phi$ ضریب توان و η راندمان است.

ضریب توان برابر نسبت توان اکتیو به توان راکتیو و مقدار آن، کمتر از واحد است. هرچه مقدار ضریب توان به یک نزدیک‌تر باشد، برای مصرف‌کننده بهتر است. برای محاسبه مقدار انرژی تلف‌شده، راندمان الکتروپمپ‌ها از کاتالوگ کارخانه‌های سازنده استخراج می‌شود. از مقایسه راندمان الکتروپمپ‌ها در حالت واقعی با راندمان در حالت طراحی بهینه، مقدار انرژی تلف‌شده نیز محاسبه می‌شود.

در این پژوهش، ارزیابی انرژی مصرفی برای ده ایستگاه پمپاژ آب انجام شده است. ابتدا، کل ایستگاه‌ها برحسب ظرفیت آبدهی به چهار دسته تا ۵ لیتر در ثانیه، ۵ - ۱۰، ۱۰ - ۲۰ و بیشتر از ۲۰ لیتر در ثانیه تقسیم شد. بین میزان ظرفیت ایستگاه و برق مصرفی، رابطه مستقیمی وجود دارد؛ از این‌رو، برای ارزیابی مقدار برق مصرفی، برای ایستگاه‌های با ظرفیت تا ۵ لیتر در ثانیه و برای ایستگاه‌های ۵ - ۱۰ لیتر در ثانیه هر کدام، یک ایستگاه انتخاب شد. برای ایستگاه‌های ۱۰ - ۲۰ لیتر در ثانیه، چهار ایستگاه و برای ایستگاه‌های با ظرفیت بیشتر از ۲۰ لیتر در ثانیه، دو ایستگاه در نظر گرفته شد. ایستگاه‌های منتخب با روش کاملاً تصادفی از بین ایستگاه‌های موجود در هر دسته انتخاب شد.

نتایج و بحث

راندمان ایستگاه‌های پمپاژ منتخب با اندازه‌گیری مشخصات جریان برق مصرفی (جریان، ولتاژ و ضریب

الکتروپمپ این ایستگاه در اسفندماه ۱۳۹۵ تعویض شد. یکی از علل زیادبودن راندمان این ایستگاه، زمان کارکرد کم الکتروپمپ است. ایستگاه‌های دیگر، که راندمان آنها بیشتر از ۶۰ درصد است، به‌ترتیب عبارت است از: ایستگاه‌های شباب، ذوالفقار، ایلام و سراب‌کلان (۱)؛ به عبارت دیگر، ۷۵/۲ درصد دبی پمپاژشده با راندمان ۶۵/۹ درصد انجام می‌شود که با توجه به راندمان الکتروموتورهای موجود، راندمان نسبتاً مطلوبی ارزیابی می‌شود. بررسی‌ها نشان داد جایگزینی الکتروپمپ این ایستگاه‌ها بیشتر در سال‌های اخیر انجام شده و یکی از علل زیادبودن راندمان، ساعات کارکرد کم آنهاست. همچنین، حدود ۲۵ درصد دبی پمپاژشده با متوسط راندمان ۴۷/۷ درصد انجام می‌شود که این مقدار، راندمان نسبتاً کمی ارزیابی می‌شود. کمترین راندمان، مربوط به ایستگاه قدیمی شهرک اسلامیه به مقدار ۲۵/۷ درصد با دبی ۵/۳ لیتر در ثانیه است. نتایج نشان داد راندمان در ایستگاه‌های با دبی بیشتر، زیاد و در ایستگاه‌های با دبی کمتر، کم است. این مسئله نشان می‌دهد با تعمیر، نگهداری و در صورت نیاز جایگزینی الکتروپمپ‌ها، می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.

$$\bar{\eta} = (61.6 \times 14.4 + 42.3 \times 14.4 + 67.9 \times 35.5 + 61.6 \times 41.1 + 68.4 \times 69.7 + 51.6 \times 12.1 + 25.7 \times 5.6 + 42.8 \times 9.1 + 65.2 \times 16.4 + 58.6 \times 17.6) / (14.4 + 14.4 + 35.5 + 41.1 + 69.7 + 12.1 + 5.6 + 9.1 + 16.4 + 17.6) = 61.4 \quad (9)$$



شکل ۳- ایستگاه پمپاژ سراب‌کلان و موقعیت چاه شماره یک و دو (چاه شماره یک نزدیک‌تر به ساختمان ایستگاه)

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش موسوی و نظری (۱۳۸۷) همخوانی دارد که راندمان کارکرد ایستگاه‌های پمپاژ شرکت آب و فاضلاب روستایی شهرستان لردگان را

$$H_t = h_s + h_d = 190.4 + 0.071 = 190.5 \text{ m} \quad (5)$$

که در این معادله H_t بار کل مفید تولیدشده توسط پمپ، h_s بار استاتیکی و h_d بار دینامیکی است؛ بنابراین، مقدار توان مفید تولیدی برابر است با:

$$P_p = \rho g Q H_t / 1000 = (1000 \times 9.81 \times 0.0411 \times 190.5) / 1000 = 76.8 \text{ kw} \quad (6)$$

راندمان الکتروپمپ از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\rho g Q H_t}{P_c} \times 100 = \frac{76.8}{124.6} \times 100 = 61.6 \quad (7)$$

راندمان ایستگاه شماره یک سراب‌کلان، ۶۱/۶ درصد است. با توجه به منحنی مشخص پمپ، بهترین راندمان پمپ برای دبی، حدود ۲۰ لیتر در ثانیه (۷۵ متر مکعب در ساعت) برابر ۷۶ درصد است که اگر همین پمپ با ۷ طبقه تعریف شود، هد کل لازم نیز تأمین می‌شود؛ اما از آنجا که از پمپ در نقطه کاری بهینه استفاده نمی‌شود، راندمان به‌شدت کاهش یافته است و مقدار افت انرژی، حدود ۱۵ درصد بیشتر از مقدار مدنظر است. با کنترل دبی، راندمان پمپ را در نقطه بهینه، می‌توان تثبیت کرد یا در صورت تعویض، پمپ مناسب برای شرایط هیدرولیکی مدنظر جایگزین کرد. برای دبی و بار کل هیدرولیکی این ایستگاه، الکتروپمپ نوع ۴۲۵/۸ با راندمان حدود ۷۵ درصد شرکت پمپ‌ایران مناسب است. برای دیگر ایستگاه‌ها به همین روش، راندمان ایستگاه تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

ایستگاه‌های پایش‌شده، جمعیتی بیشتر از ۱۹ هزار نفر را پوشش می‌دهد که این مقدار، حدود ۱۱ درصد جمعیت روستایی استان است. این ایستگاه‌ها در مجموع با توان اسمی ۷۴۱ کیلووات، دبی ۲۳۶ لیتر در ثانیه را پمپاژ می‌کند. راندمان در هر یک از ایستگاه‌ها به علل مختلف، متفاوت است؛ از این‌رو، برای تعیین راندمان متوسط، از میانگین وزنی استفاده شد. براساس داده‌های اندازه‌گیری شده، راندمان متوسط ایستگاه‌های پمپاژ از معادله ذیل محاسبه می‌شود:

$$\bar{\eta} = \frac{\sum \eta(Q)}{\sum(Q)} \quad (8)$$

نتایج نشان داد که راندمان متوسط عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آب روستایی استان ایلام، ۶۱/۴ درصد است. بیشترین راندمان، مربوط به ایستگاه سراب‌کلان شماره دو (چاه حفاری‌شده جدید) واقع در شهرستان سیروان، برابر ۶۸/۴ درصد با دبی ۶۹/۷ لیتر در ثانیه بود.

ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آبرسانی روستایی استان ایلام بیشتر از متوسط راندمان‌های گزارش‌شده در دیگر پژوهش‌های انجام‌شده بود. به تعمیر یا تعویض الکتروپمپ‌های با راندمان کم باید توجه شود که به‌طور عمده، مربوط به ایستگاه‌های پمپاژ کوچک است. با تمهیداتی، متوسط راندمان در کل تأسیسات را می‌توان به راندمان مطلوب نزدیک کرد.

کمتر از ۵۰ درصد گزارش کردند. همچنین، با نتایج پژوهش فتحی مقدم و همکاران (۱۳۸۷) و نایبی شهبابی و همکاران (۱۳۹۰) همسوست که در پژوهش نخست، راندمان بهره‌برداری سامانه‌های پمپاژ پنج ایستگاه بزرگ شرکت‌های بهره‌برداری سازمان آب و برق خوزستان، ۵۵/۶ درصد و در پژوهش دوم، راندمان ایستگاه پمپاژ کهنه‌خانه شهر پیرانشهر در حالت‌های مختلف کارکرد پمپ‌ها بین ۲۴ تا ۵۰ درصد گزارش شده است. راندمان متوسط

جدول ۱- فشار اندازه‌گیری شده در سر چاه شماره یک ایستگاه پمپاژ سراب کلان (متر)

ردیف	درجه حرارت	متوسط فشار تکرار ۱	متوسط فشار تکرار ۲	متوسط فشار تکرار ۳
۱	۳۱/۶	۱۲۵/۳۲	۱۲۵/۳۲	۱۲۵/۳۲
۲	۳۱/۶	۱۲۵/۳۸	۱۲۵/۳۸	۱۲۵/۳۸
۳	۳۱/۶	۱۲۵/۳۱	۱۲۵/۳۱	۱۲۵/۳۱
۴	۳۱/۶	۱۲۵/۳۴	۱۲۵/۳۴	۱۲۵/۳۴
۵	۳۱/۶	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵
۶	۳۱/۶	۱۲۵/۲۷	۱۲۵/۲۷	۱۲۵/۲۷
۷	۳۱/۵	۱۲۵/۳۶	۱۲۵/۳۶	۱۲۵/۳۶
۸	۳۱/۵	۱۲۵/۴۱	۱۲۵/۴۱	۱۲۵/۴۱
۹	۳۱/۵	۱۲۵/۴۷	۱۲۵/۴۷	۱۲۵/۴۷
۱۰	۳۱/۵	۱۲۵/۴۰	۱۲۵/۴۰	۱۲۵/۴۰
۱۱	۳۱/۵	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵
۱۲	۳۱/۵	۱۲۵/۴۰	۱۲۵/۴۰	۱۲۵/۴۰
۱۳	۳۱/۵	۱۲۵/۳۲	۱۲۵/۳۲	۱۲۵/۳۲
۱۴	۳۱/۵	۱۲۵/۳۸	۱۲۵/۳۸	۱۲۵/۳۸
۱۵	۳۱/۵	۱۲۵/۳۱	۱۲۵/۳۱	۱۲۵/۳۱
۱۶	۳۱/۵	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵	۱۲۵/۳۵
۱۷	۳۱/۴	۱۲۵/۴۱	۱۲۵/۴۱	۱۲۵/۴۱
۱۸	۳۱/۴	۱۲۵/۳۹	۱۲۵/۳۹	۱۲۵/۳۹
۱۹	۳۱/۴	۱۲۵/۳۹	۱۲۵/۳۹	۱۲۵/۳۹
۲۰	۳۱/۴	۱۲۵/۳۳	۱۲۵/۳۳	۱۲۵/۳۳
متوسط	۳۱/۴	۱۲۵/۳۶	۱۲۵/۳۶	۱۲۵/۳۶
متوسط فشار سه تکرار		۱۲۵/۳۶		

برخی از ایستگاه‌ها، پمپ منظور شده برای دبی و ارتفاع پمپاژ مناسب نیست و باید در زمان تعویض، الکتروپمپ موجود با الکتروپمپ مناسب جایگزین شود. به‌طور عمده، تعمیر به‌موقع ایستگاه‌های پمپاژ و نگهداری آنها متناسب با شرایط استاندارد انجام نمی‌شود. بی‌توجهی به این موارد می‌تواند سبب کاهش عمر مفید تجهیزات و افزایش هزینه‌ها شود. بیشتر آبداران ایستگاه‌های پمپاژ، فقط دوره آموزشی کلرزی را دیده‌اند و برگزاری دوره‌های آموزشی دیگر، مانند نگهداری و راه‌اندازی ایستگاه‌های پمپاژ و ایمنی ضروری است. میزان رضایتمندی بیشتر آبداران، کم است که این مسئله در درازمدت می‌تواند اثر منفی بر بهره‌برداری و نگهداری داشته باشد. بیشتر ایستگاه‌ها به

راندمان ایستگاه‌های پمپاژ، به‌جز راندمان ذاتی پمپ و الکتروموتورها، از عوامل متعدد دیگری نیز متأثر است. ازجمله این عوامل به روش‌های بهره‌برداری، نگهداری و مدیریتی می‌توان اشاره کرد. نتایج بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد با نصب شیرآلات و تجهیزات مناسب روی خط رانش، جانمایی مناسب خطوط انتقال، پرهیز از ایجاد خم‌های تند و درمجموع، بازنگری در طراحی شبکه‌های آبرسانی، هد لازم شبکه را به مقدار زیادی می‌توان کاهش داد. نصب سامانه‌های کنترل از دور، ترنس‌دیوسرهای فشار، فلومترهای آلتراسونیک و دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی، پایش عملکرد ایستگاه را راحت‌تر و پمپ را در نقطه بهینه راندمان و کارایی کنترل می‌کند. در

جعبه‌کمک‌های اولیه و اطفای حریق و ساختمان
استراحت مجهز نیست. محوطه‌سازی تعدادی از ایستگاه‌ها
انجام نشده است. توجه به تعمیر به‌موقع، نگهداری و
بهره‌برداری مناسب، ایمنی و آموزش آبداران می‌تواند
هزینه‌های آبرسانی را کاهش دهد.

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری راندمان ایستگاه‌های پمپاژ منتخب

ردیف	نام ایستگاه	قطر پمپ	عمق (م)	ارتفاع کل پمپاژ (m)	توان مصرف (kW)	توان تولیدی (kW)	راندمان	راندمان بهینه
۱	سراب کلان (۱)	سیرون	۴۵۰۰	۱۳۰	۱۹۰/۵	۱۲۴/۶	۶۱/۶	۷۶
۲	سراب کلان (۲)	چرداول	۴۱۱۵	۱۵۰	۱۹۹/۶	۱۸۵/۱	۶۸/۴	۷۶
۳	شباب	ایلام	۱۴۹۴	۱۹۰	۲۳۱/۴	۱۱۸/۷	۶۷/۹	۷۸
۴	مهدی‌آباد	ایوان	۱۵۱۲	۴۰	۱۴۰/۱	۳۲/۱	۶۱/۶	۷۲
۵	ترن	مهران	۳۳۴۹	۷۰	۲۳۷/۵	۷۹/۴	۴۲/۳	۷۸
۶	اسلامیه (۱)	دهلران	۱۴۷۰	۱۰۰	۱۰۷/۲	۲۱/۸	۲۵/۷	۷۸
۷	اسلامیه (۲)	دهلران	۱۵۰۰	۱۱۰	۱۲۲/۸	۲۸/۳	۵۱/۶	۷۸
۸	دال‌پری	دهلران	۱۴۷۰	۹/۱	۱۲۰/۳	۲۵	۴۲/۸	۷۰
۹	ذوالفقار	دهلران	۱۵۰۰	۱۰۰	۱۵۰/۲	۳۱/۷	۶۵/۲	۷۴
۱۰	نصر (۲)	دهلران	۱۴۲۹	۱۲۰	۱۹۰/۹	۵۶/۳	۵۸/۶	۷۷

نتیجه‌گیری

راندمان متوسط انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ تأسیسات آب روستایی استان ایلام، ۶۱/۴ درصد است. این مقدار در ایستگاه‌های مختلف برحسب اهمیت ایستگاه، متغیر است. میزان مصرف انرژی به عوامل هیدرولیکی، الکتریکی، مکانیکی، مدیریتی و نگهداری بستگی دارد. ارزیابی دوره‌ای عملکرد ایستگاه‌ها به‌صورت سیستمی در نگهداری آنها در شرایط بهینه راندمان عملکرد و کاهش مصرف انرژی مؤثر است.

سیاس‌گذاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت آب و فاضلاب استان ایلام، با شناسه ملی ۱۳۹۶/۴۳/م‌ت‌ن‌ی، انجام شده است. به این وسیله از کلیه کارکنان شرکت، که به هر نحو در انجام‌دادن این طرح پژوهشی همکاری و همراهی داشته‌اند، صمیمانه تشکر می‌شود.

منابع

- جعفری ه. حسینی‌بیدار س. نیک‌داد ح. ۱۳۹۸. مشکلات و مناسب‌ترین راهکارهای تهیه بهره‌برداری و نگهداری بهینه از تجهیزات ابزار دقیق در شرکت‌های آب و فاضلاب. نشریه علمی- ترویجی، علوم و مهندسی آب و فاضلاب. ۱(۴): ۵۲-۵۹.
- حسینی صفات س. و آیین م. ۱۳۹۱. مدیریت مصرف انرژی و آب در ایستگاه پمپاژ شرب، دومین کنفرانس سالانه انرژی پاک، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی علوم پیشرفته و علوم محیطی، کرمان. ۲۱ و ۲۲ تیر، ۶ ص.
- روشن‌روان ح. شکری م. و رازی ن. ۱۳۹۵. شناسایی عوامل مؤثر بر کاهش زیان آب بدون درآمد به‌عنوان راهبردی در تحقق اقتصاد مقاومتی، کنفرانس علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه تهران. ۲۶ و ۲۷ بهمن، ۹ ص.

- انرژی، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، تهران. ۳ خرداد، ۷ ص.
12. Eker I. Grimble M. J. and Kara T. 2003. Operation and Simulation of City of Gaziantep Water Supply System in Turkey. *Renewable Energy*. (28)6: 901-916.
 13. Glovatskii O. Ya. Ergashev R. R. Bekchanov F. A. and Sharipov SH. M. 2012. Hybrid Installations in Pumping Stations Based on the Use of Renewable Energy Sources. *Applied Solar Energy*. (48)4: 266-268.
 14. Mamberetti S. and Orsi E. 2016. Optimizing Pump Operations in Water Supply Networks Through Genetic Algorithms. *Journal AWWA*. 108.0025. 119-125.
 15. Perju I. S. and Aldea A. 2018. Energy and Cost Savings through Pumping Stations Rehabilitation. Case Study in Bucharest Presented at the 3rd EWaS International Conference on Insights on the Water-Energy-Food Nexus. Lefkada Island. Greece.
 16. Pulido-Calvo I. and Gutierrez-Estrada J. 2011. Selection and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environmental Research Journal*. (5)3: 1-20.
 17. Pulido-Calvo I. and Gutierrez-Estrada J. and Asensio-fernandez R. 2006. Optimal Design of Pumping Stations of Inland Intensive Fish Farms. *Aquaculture Engineering*. (35)9: 283-291.
 18. Rudra Narsimha Rao G. Sabreen A. Sailaja R. R. N. and Sharma K. V. 2016. A decision-making approach for energy efficiency improvement in municipal water pumps during water scarcity scenario. *Energy Efficiency*. 9:141-151.
 19. Tan Y. Zheng G. and Zhang S. 2013. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting. *Electrical Power and Energy Systems*. 55: 572-580.
 20. U.S. Department of Energy- Energy Efficiency and Renewable Energy Advanced Manufacturing Office. 2012. Case Study- The Challenge: Saving Energy at a Sewage Lift Station Through Pump System Modifications.
۴. علی‌نژاد خ. و دباغ ر. ۱۳۹۷. رتبه‌بندی کارایی انواع هزینه‌های شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی. نشریه علمی- ترویجی، علوم و مهندسی آب و فاضلاب. ۱(۳): ۳۵-۴۶.
 ۵. فاضلی م. سلطان‌زاده ا. عباس‌زاده سنگرودی ر. و خسروی م. ۱۳۸۸. نقش پمپ‌های دور متغیر در کاهش حوادث شبکه توزیع آب شهری. اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران. ۵ تا ۷ آبان، ۸ ص.
 ۶. فاضلی م. سلطان‌زاده ا. قربانی و. عباس‌زاده سنگرودی ر. و حسن‌پور بریجانی خ. ۱۳۸۸. ارزیابی اقتصادی نصب پمپ‌های دور متغیر در شبکه‌های توزیع آب. مطالعه موردی: زنجان. سومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد اصلاح الگوی مصرف، تهران. ۴ و ۵ اسفند، ۷ ص.
 ۷. فتحی‌مقدم م. آرمان ع. و بهنیا ع. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های پمپاژ بزرگ. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. تبریز. ۲۳ تا ۲۵ مهر، ۸ ص.
 ۸. محبوبیان م. ۱۳۸۸. ارزیابی مشکلات نصب الکتروپمپ‌ها در ایستگاه‌های پمپاژ و ارائه راهکارها. سومین کنفرانس ملی تجربه‌های ساخت تأسیسات آبی و شبکه‌های آبیاری و زهکش، دانشگاه تهران. ۲۹ مهر، ۹ ص.
 ۹. محمدی م. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ. چهارمین همایش ارتقای توان داخلی با رویکرد رفع موانع تولید در شرایط تحریم. دانشگاه صنعتی شریف، ۹ دی، ۱۵ ص.
 ۱۰. موسوی م. و نظری ا. ۱۳۸۷. بررسی میزان تولید، راندمان کارکرد و ممیزی انرژی ایستگاه‌های پمپاژ شرکت آب و فاضلاب روستایی شهرستان لردگان. دومین همایش ملی آب و فاضلاب (با رویکرد بهره‌برداری)، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، دانشگاه شهید عباسپور، ۱۶ مهر، ۷ ص.
 ۱۱. نایبی شهبانی م. دائی‌زاده ا. حیدری م. نایبی شهبان م. و نعیمی ح. ۱۳۹۰. مهندسی مجدد سیستم پمپاژ آب شرب شهری (مطالعه موردی). هشتمین همایش ملی

