نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۳۵-۵۲۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 521-535

مقاله علمی-پژوهشی

کاربرد روش‌های مدل‌سازی هوش مصنوعی و تحلیل‌های اقتصادی انرژی برای ارزیابی و بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ آب شرب

عبدالرزاق قولی[۱]، عبدالرضا ظهیری[۲*]، جمشید پیری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

چکیده

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیز تشدید پدیده تغییر اقلیم و افزایش خشک‌سالی‌ها در مناطق خشک دنیا، تلاش برای افزایش راندمان سامانه‌های آبی می‌تواند راهکاری مناسب برای کاهش مصرف آب و انرژی باشد. در این تحقیق، ابتدا به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، رفتار (دور پمپ) سامانه پمپاژ آب شرب بندر ترکمن واقع در استان گلستان در طی یک دوره زمانی ۴ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۸) و بر اساس مشخصات ساده این سامانه (شامل تراز سطح ایستابی در چاه، دبی ماهانه پمپاژ و عمق نصب پمپ) مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که مقادیر محاسباتی دور پمپ در تمامی محدوده تغییرات این متغیر دارای دقت مناسبی است، اگرچه با افزایش دور پمپ، کارایی و دقت مدل‌سازی شبکه عصبی تا حدودی کاهش می‌یابد. تحلیل اقتصادی سامانه‌های پمپاژ مورد مطالعه نشان داد که میانگین راندمان کلی پمپ‌ها حدود ۱۰ درصد می‌باشد که بسیار پایین‌تر از استانداردهای صنعتی (۷۰ درصد) بوده و نشان‌دهنده وجود مشکلات جدی در عملکرد سامانه‌های پمپاژ مورد مطالعه در این تحقیق است. همچنین مشخص شد که مصرف انرژی این سامانه‌ها را می‌توان تا حدود زیادی کاهش داد. میانگین صرفه‌جویی مصرف ماهانه انرژی در این سامانه معادل ۴۴ درصد هزینه مصرف سالانه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی اقتصادی، بهینه‌سازی، سامانه پمپاژ، مدل‌های یادگیری ماشین، مصرف انرژی

مقدمه

امروزه با رشد جمعیت به ویژه در مناطق خشک و کم‌آب دنیا، مردم بیشتری با تنش آبی مواجه شده‌اند. این موضوع با تشدید پدیده تغییر اقلیم و افزایش خشک‌سالی‌ها، در حال تبدیل به یک بحران اجتماعی است. این معضلات باعث شده است که سامانه‌های منابع آب تحت فشار شدیدی قرار گیرند. هم‌زمان تلاش‌ها برای ارائه راه‌کارهای جدید برای حصول حجم بیشتری از منابع آب شیرین نیز افزایش یافته است. استحصال آب باران (Hofman-Caris et al., 2019; Tran et al., 2021; Bui et al., 2021) و استفاده از سایر منابع آب‌های نامتعارف[۴] مثل مه، پساب، بازچرخانی آب و ... (Zolfaghary et al., 2019; Karimidastenaei et al., 2020; Quon and and Jiang, 2023)، مدیریت بهینه سیلاب‌ها (Tonkin et al., 2018) و کاهش حجم تبخیر از سامانه‌های آبی (Mazaheri and Abdei Koupai, 2017; Assouline and Narkis, 2021) از جمله این راه‌کارها می‌باشند که اتفاقاً دارای مزایایی نیز می‌باشند. شیرین‌سازی آب دریاها[۵] هم در بسیاری از نقاط دنیا مورد توجه قرار گرفته است که مسائل محیط‌زیستی مرتبط با آن به شدت مورد توجه قرار گرفته است (Dhakal et al., 2022). در این میان، تلاش‌های مدیران و محققین برای مدیریت کمبود آب شرب به دلیل حساسیت‌های اجتماعی نسبت به سایر مصارف (محیط زیست، کشاورزی و صنعت)، با تاکید بیشتری در حال انجام است. هم‌زمان با اجرای ایده‌های مثبت استحصال آب، باید بهینه‌سازی سامانه‌های آبی نیز مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر آب، مصرف انرژی نیز در سراسر دنیا با نرخ هشداردهنده‌ای در حال افزایش است. این افزایش مصرف، تاثیر خود را به‌وضوح بر کاهش منابع انرژی و نیز تشدید چالش‌های محیط-

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب- سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۲ -دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۳ -استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران
(*- ایمیل نویسنده مسئول: Email: zahiri.areza@gmail.com)

4- Unconventional or non-traditional water resources

5- Desalination of seawater

زیستی (مثل گرمایش جهانی و نیز تضعیف لایه اوزون) نشان داده است (Kalaiselvan et al., 2016).

در موضوع آب شرب، ایستگاه‌های پمپاژ چاه‌ها به عنوان یکی از اجزاء کلیدی در تأمین آب شرب شهرها و روستاها، نقش مهمی در توزیع آب به نقاط مصرف دارند. امروزه این ایستگاه‌ها دارای مشکلاتی از قبیل افت کارکرد پمپ‌ها و در نتیجه افزایش مصرف انرژی آنها و رشد هزینه‌های عملیاتی هستند (Piri et al., 2021). در مطالعه‌ای که توسط موسسه تحقیقات امریکا انجام شد، نشان داده شد که بیش از ۲۰ درصد از انرژی تولید شده در کشورهای توسعه‌یافته توسط سامانه‌های پمپاژ و به ویژه پمپ‌های سانتریفیوژ مصرف می‌شود (Kaya, 2003; Sarbu and Valea, 2015). از طرف دیگر، طی تحقیقاتی که برای صرفه‌جویی انرژی انجام شده است، سامانه‌های پمپاژ به عنوان یکی از کانون‌های مهم با ظرفیت و پتانسیل بالای صرفه‌جویی انرژی شناخته شده است به‌طوریکه ۳۰ تا ۵۰ درصد از این مصارف را می‌توان به کمک طراحی مناسب یا هوشمند، انتخاب پمپ مناسب، مقاوم‌سازی و بهبود راهکارهای مدیریتی و عملیاتی کاهش داد (Saraç et al., 1995; Yigit et al., 2001; Ertöz, 2003; Kaya et al., 2008; Hieninger, 2021). این در حالی است که رویکردهای دقیقی برای تحلیل و ارزیابی کارایی این سامانه‌ها وجود نداشته و این عامل، باعث افزایش احتمال خرابی تجهیزات و هدررفت انرژی شده است (Blischke and Murthy, 2011). این نقص به‌ویژه در شرایط فعلی که نیاز به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های انرژی بیشتر از همیشه احساس می‌شود، اهمیت بیشتری دارد. هم‌اکنون بسیاری از ایستگاه‌های پمپاژ آب شرب به‌صورت سنتی و بدون لحاظ متغیرهای مؤثر بر کارایی و پایداری عملکرد پمپ‌ها در حال بهره‌برداری هستند. به عنوان مثال، برنامه پمپاژ آب از چاه‌ها در فصول گرم و سرد سال تقریباً به یک صورت است، در حالی‌که تغییرات فصلی (دما و رطوبت هوا، نیاز به آب شرب، و ...)، کارایی این سامانه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که ارزیابی کارایی سامانه‌های پمپاژ می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های عملیاتی آنها کمک شایانی نماید (Salimi et al., 2018).

به طور کلی به دلیل حساسیت‌های بالای آب شرب، تحقیقات مرتبط با چالش‌های مدیریت منابع آب در این بخش از قبیل میزان بهره‌وری و پایداری ایستگاه‌های پمپاژ محدود است. این موضوع به ویژه در ایران به دلیل مسائل اجتماعی و نیز عدم دسترسی کامل به داده‌های هیدرولیکی ایستگاه‌های پمپاژ آب شرب و نیز وضعیت عملکرد این سامانه‌ها، با محدودیت‌های بیشتری مواجه است. بررسی مطالعات مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در سامانه‌های پمپاژ نشان می‌دهد که محققین مختلف از روش‌های متنوعی برای بهینه‌سازی عملکرد این سامانه‌ها استفاده کرده‌اند. مطالعات پیشین در زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داده‌اند که استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه می‌توانند راندمان پمپ را با دقت مناسبی پیش‌بینی کنند، شبکه‌های عصبی RBF برای بهینه‌سازی دور پمپ، قابلیت حصول صرفه‌جویی انرژی قابل توجهی را دارند، و ترکیب الگوریتم‌های LSTM و CNN نیز نتایج مطلوبی در پیش‌بینی عملکرد پمپ ارائه می‌دهند. در حوزه یادگیری ماشین، الگوریتم‌های جنگل تصادفی[1] برای تشخیص نقاط بهینه عملکرد، مدل ماشین بردار پشتیبان[2] برای طبقه‌بندی وضعیت عملکرد پمپ‌ها، و ترکیب الگوریتم ژنتیک با شبکه‌های عصبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه پمپاژ مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Piri et al., 2021)، در زمینه تحلیل اقتصادی انرژی، روش‌های مختلف محاسبه مصرف انرژی ویژه (SEC) و تحلیل هزینه‌های چرخه حیات (LCC) برای ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی استفاده شده‌اند. مطالعات کاربردی نشان داده‌اند که بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی شود (Kalaiselvan et al., 2016; Sarbu and Valea, 2015)، با این حال، بررسی دقیق مطالعات فوق نشان می‌دهد که محدودیت‌های عمده‌ای نظیر عدم ترکیب همزمان مدل‌سازی هوش مصنوعی با تحلیل اقتصادی جامع، استفاده از متغیرهای ورودی محدود، عدم در نظرگرفتن شرایط محیطی خاص مناطق خشک، و محدودیت داده‌های واقعی عملیاتی وجود دارد که این خلاءها ضرورت انجام تحقیق حاضر را برجسته می‌کند.

در این تحقیق، چارچوب نوآورانه‌ای برای ارزیابی جامع و بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ آب شرب ارائه می‌شود که بر اساس تلفیق روش‌های مدل‌سازی هوش مصنوعی با تحلیل‌های اقتصادی انرژی استوار است. نوآوری اصلی این مطالعه در استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی رابطه پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای عملیاتی چاه‌های آب شرب بندر ترکمن در استان گلستان شامل تراز سطح ایستابی، آبدهی و عمق نصب پمپ با دور پمپ نهفته است که امکان پیش‌بینی دقیق عملکرد سامانه در شرایط مختلف را فراهم می‌آورد. همچنین، این تحقیق مدل یکپارچه‌ای ارائه می‌دهد که شاخص‌های فنی نظیر راندمان پمپ، شاخص‌های انرژی مانند مصرف انرژی ویژه و معیارهای اقتصادی از قبیل پتانسیل صرفه‌جویی را به‌طور همزمان در نظر گرفته و امکان ارزیابی چندبعدی و جامع عملکرد سامانه‌های پمپاژ را فراهم می‌کند. علاوه بر این، تحقیق حاضر روشی کمی برای اندازه‌گیری و کمی‌سازی پتانسیل صرفه‌جویی انرژی بر اساس مقایسه شرایط عملیاتی واقعی با حالت بهینه توسعه داده است که امکان اولویت‌بندی علمی اقدامات بهبود و تخصیص بهینه منابع را فراهم می‌آورد. این مطالعه همچنین چارچوب تحلیلی

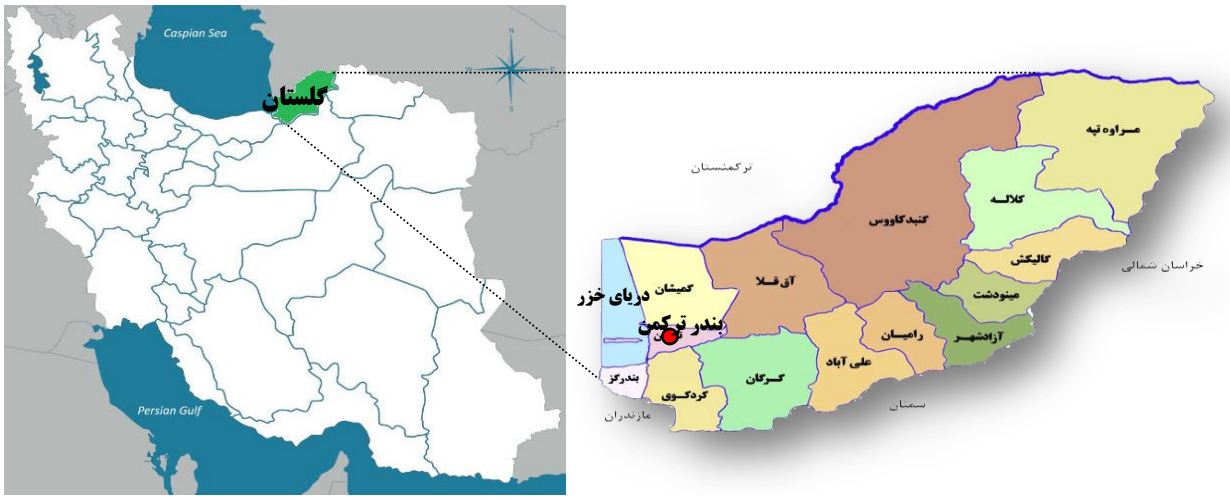
1- Random Forest (RF)
2- Support Vector Machines (SVM)

جامعی برای شناسایی نقاط قوت و ضعف عملیاتی در سطح هر چاه و هر نقطه کاری ارائه می‌دهد که امکان طراحی راهبردهای بهینه‌سازی هدفمند و مبتنی بر شواهد علمی را فراهم می‌کند. جنبه کاربردی و مهم موضوع تحقیق حاضر این است که در استان گلستان بیش از ۴۰ هزار چاه عمیق و نیمه‌عمیق وجود دارد که این وضعیت، بهینه‌سازی و مدیریت مصرف انرژی این چاه‌ها را بسیار حائز اهمیت می‌کند. نوآوری دیگر این تحقیق در تلفیق تحلیل‌های آماری پیشرفته با مدل‌سازی هوش مصنوعی برای استخراج الگوهای پنهان در داده‌های عملیاتی و تبدیل آن‌ها به راهکارهای عملی برای بهبود کارایی انرژی در مقیاس واقعی و قابل پیاده‌سازی است.

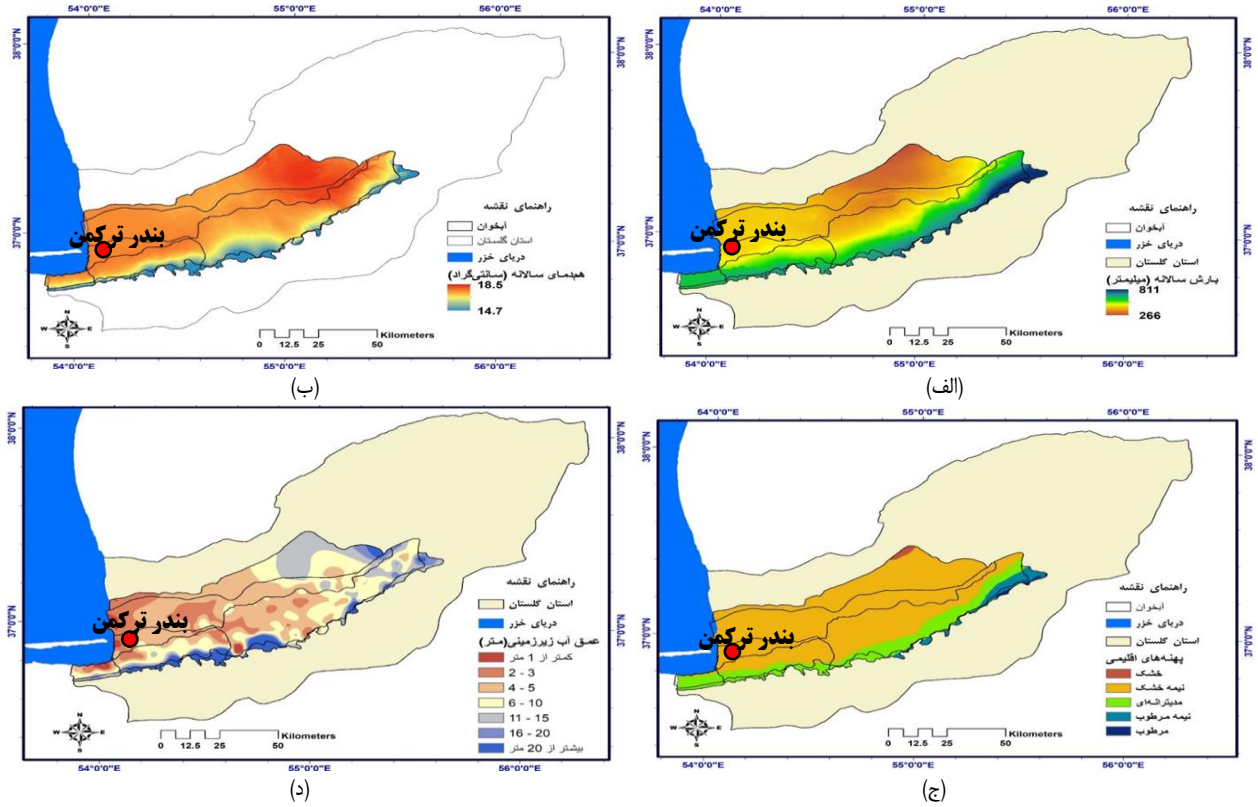
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

استان گلستان در بخشی از حوضه دریای خزر واقع شده است. این استان با ۲۰۴۳۸ کیلومترمربع وسعت (حدود ۱/۳ درصد از کل کشور) دارای جمعیتی بیش از ۲ میلیون نفر (حدود ۲/۳۳ درصد از جمعیت کل کشور) است. این استان از دیرباز، اقتصادی بر پایه کشاورزی داشته و همواره به عنوان یکی از تولیدکنندگان اصلی محصولات کشاورزی کشور به شمار می‌رود. محوریت اقتصاد این استان در حالی بر پایه کشاورزی است که بعد از استان‌های جنوبی کشور (سیستان و بلوچستان، هرمزگان و بوشهر) به عنوان چهارمین استان دارای بحران آب شناخته می‌شود (وزارت نیرو، ۱۴۰۱). چندین شهر این استان در نواحی شمال (مراوه‌تپه) و غرب (بندرترکمن) با مشکل کم‌آبی حتی برای شرب مواجه هستند. اگرچه این استان جزء استان‌های شمالی کشور است اما میانگین بارندگی استان کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در سال است. وضعیت ارتفاعی (توپوگرافی) استان گلستان به‌صورتی است که به دلیل نداشتن ارتفاعات بسیار بلند، فاقد رواناب و ذخیره کافی برف است. این استان از یک سمت به کویر لوت و از سمت شمال به صحرای قره‌قوم متصل است. ارتفاعات کوتاه این استان مانع از ورود گرمای استان‌های کویری همسایه و ترکمنستان نشده و هوای گرم مناطق اطراف سریع‌تر به استان نفوذ می‌یابد. شاخص سرانه منابع آب قابل برنامه‌ریزی در این استان برای هر نفر حدود ۹۰۹ مترمکعب است که بر اساس شاخص فالن‌مارک و ویدستراند، نشان‌دهنده وضعیت کم‌آبی شدید یا مزمن است. این در حالی است که برای جمعیت ۸۴ میلیونی کل کشور، حجم منابع آب قابل برنامه‌ریزی حدود ۱۰۰ میلیارد مترمکعب اعلام شده که شاخص کم‌آبی حدود ۱۱۷۶ مترمکعب (بیانگر کم‌آبی یا تنش عادی) به‌دست می‌آید که تا حدودی از وضعیت استان گلستان بهتر است. یکی از شهرهایی که دارای تنش آب شرب است، بندر ترکمن است. این در حالی است که این شهر، سومین شهر پرجمعیت استان گلستان بوده و بالاترین نرخ رشد جمعیت را نیز دارا می‌باشد. بندر ترکمن با ارتفاع ۲۰- متر از سطح دریا، در نزدیکی دریای خزر قرار داشته و دارای زمین‌های مسطح و کم‌ارتفاع است (شکل ۱). پهنه‌بندی ارتفاع بارندگی، دما، اقلیم و عمق آب زیرزمینی بخشی از استان گلستان و شهر بندرترکمن در شکل ۲ نشان داده شده است. تابستان‌های این منطقه بسیار گرم و شرجی بوده و زمستان‌ها نیز معتدل و مرطوب هستند. اغلب بارندگی‌ها در این شهر در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهند. این منطقه دارای آبخوان‌های ساحلی بوده که توسط آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌شوند. این آبخوان‌ها به‌دلیل نزدیکی به دریا و تالاب‌ها، دارای کیفیت آب متفاوتی می‌باشند. ضخامت این آبخوان‌ها متغیر بوده و حدود ۱۰ تا ۳۰ متر تخمین زده می‌شود (شکل ۲). فاصله این شهر تا مهمترین منبع آب سطحی استان (رودخانه گرگانرود) زیاد بوده و به همین دلیل، آب شرب این شهر به کمک چاه و پمپاژ از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود.



شکل ۱- موقعیت استان گلستان در کشور و بندر ترکمن در استان گلستان



شکل ۲- پهنه‌بندی الف) ارتفاع بارندگی، ب) دما، ج) اقلیم و د) عمق آب زیرزمینی در بخشی از استان گلستان و شهر بندرترکمن

مراحل انجام تحقیق

مرحله اول: مدل‌سازی دور پمپ بر اساس متغیرهای ورودی

تحقیق حاضر در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول که روندنمای آن در شکل ۳ ارائه شده است، با استفاده از مدل‌سازی هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی مصنوعی)، مدلی مناسب و با دقت زیاد برای برآورد دور پمپ بر اساس متغیرهای ورودی موثر سامانه پمپاژ استخراج خواهد شد. در این صورت، الگوهای پنهان در داده‌های عملیاتی استخراج شده و سپس از نتایج آن، راهکارهای عملی برای بهبود کارایی انرژی در مقیاس واقعی ارائه خواهد شد. بعد از مدل-سازی با شبکه عصبی، برای افزایش دقت و نیز اطمینان از کارایی مدل‌سازی با شرایط داده‌های کم (۲۰۴ داده)، توزیع آماری بهینه برای هر متغیر ورودی مشخص شده و بر اساس این توزیع‌ها، مجدداً مدل-سازی انجام خواهد شد. قبل از انجام مرحله اول، ابتدا پیش‌پردازش داده‌ها از قبیل تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، شناسایی و حذف داده-های پرت، تعیین ترکیب بهینه داده‌های ورودی (داده‌های با تاثیر بیشتر در مدل‌سازی متغیر خروجی) و ... مدنظر قرار خواهد گرفت. برای سهولت ارتباط بین متغیرهای ورودی مورداستفاده در این تحقیق، شماتیکی از سامانه پمپاژ در شکل ۴ نمایش داده شده است.

مرحله دوم: تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ

بعد از انجام مرحله اول، فاز دوم تحقیق انجام خواهد شد که شامل محاسبات هیدرولیکی سامانه پمپاژ بوده و بر اساس این محاسبات، شاخص‌های مهم این سامانه به‌دست آمده و در بهینه‌سازی اقتصادی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

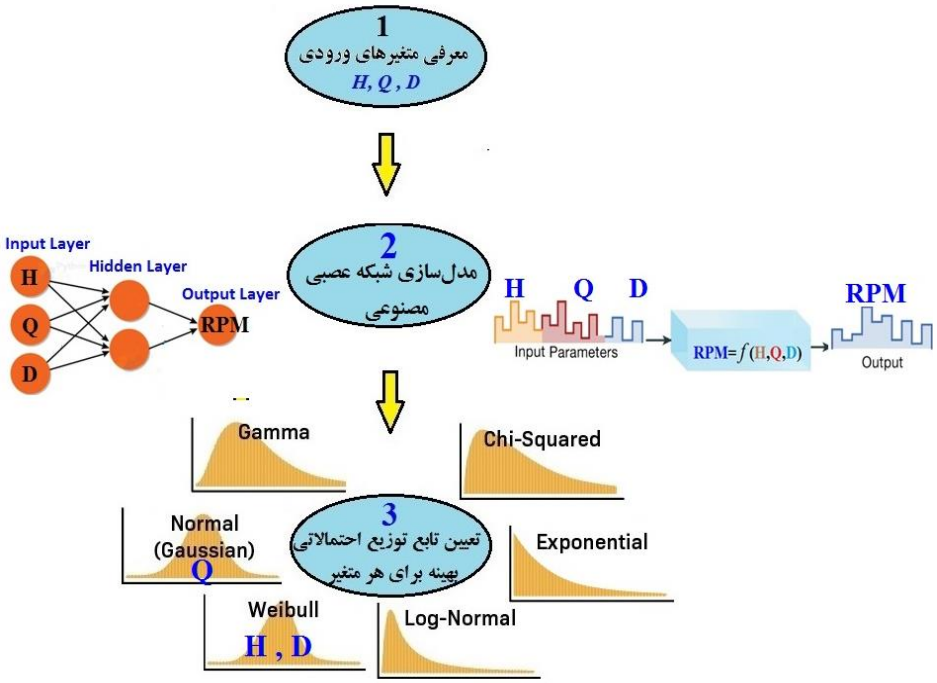
برای تحلیل اقتصادی پمپ‌ها و سامانه‌های پمپاژ، از روابط و شاخص‌های متفاوتی استفاده می‌شود. مهم‌ترین معیار و شاخص، راندمان پمپ[1] است که برای ارزیابی بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم پمپاژ دارای کاربرد زیادی است. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{(\rho g Q H)}{(381.6 \times P)} \times 100\% \qquad (۱)$$

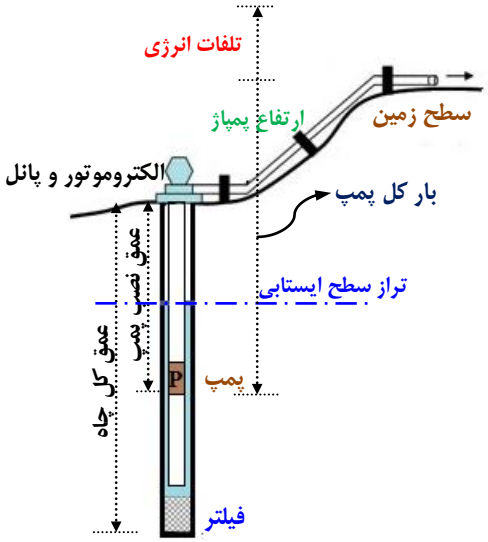
که η راندمان پمپ (درصد)، ρ چگالی آب (kg/m^3)، g شتاب گرانش ($9.81\ m/s^2$)، Q آبدهی پمپ (m^3/h) ، H بار آبی یا هد پمپ (m) و P توان مصرفی پمپ (KW) است. در این فرمول برای برآورد توان مصرفی پمپ، ابتدا نسبت دور واقعی پمپ به دور اسمی آن محاسبه شده و سپس بر اساس قانون سوم تشابه پمپ مبنی بر تناسب نسبت توان پمپ با مکعب نسبت سرعت دورانی آن، این

1 Pump Efficiency

نسبت به توان ۳ رسانده می‌شود. مقدار به‌دست آمده در توان اسمی پمپ ضرب می‌شود تا توان مصرفی در شرایط عملیاتی به‌دست آید. این روش محاسبه در اصول مهندسی پمپ‌ها به طور گسترده پذیرفته شده و برای پمپ‌های دور متغیر مناسب است. این روش به‌ویژه در محدوده عملکرد نرمال پمپ، در تخمین توان مصرفی دارای دقت قابل قبولی بوده و در مقایسه با اندازه‌گیری مستقیم که نیاز به تجهیزات گران‌قیمت دارد، روشی کارآمد است (Karassik et al., 2001).



شکل ۳ – روندنمای انجام مراحل محاسباتی در فاز اول این تحقیق



شکل ٤ – شماتیک سامانه پمپاژ و متغیرهای موردنظر در مدل‌سازی این تحقیق

دومین معیار مهم، مصرف انرژی ویژه پمپ (SEC)[1] است که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$SEC = \frac{P}{Q}(KWh/m^3) \quad (۲)$$

این نسبت در یک دوره زمانی مشخص (معمولاً ماهانه) محاسبه می‌شود. این بازه زمانی به دلایلی از قبیل امکان مقایسه تغییرات فصلی در بهره‌وری سیستم پمپاژ، همخوانی با دوره‌های صورتحساب انرژی، اثرپذیری قابل توجه عملکرد پمپاژ از شرایط آب و هوایی و فصلی، و اهمیت ارزیابی دوره‌ای بلندمدت برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی مدیریت منابع آب انتخاب شده است (زارع‌زاده و خوارزمی، ۱۳۹۲).

معیار سوم، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی (ES)[2] است که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$ES = (SEC_{actual} - SEC_{Optimal}) \times Q \times t \quad (۳)$$

که SEC_{actual} مصرف انرژی ویژه واقعی پمپ (در شرایط عملکرد واقعی سامانه پمپاژ)، $SEC_{optimal}$ مصرف انرژی ویژه بهینه پمپ و t زمان عملیاتی است. مصرف انرژی ویژه بهینه، مقدار ایده‌آلی است که سیستم می‌تواند در بهترین شرایط عملکردی به آن دست یابد و برابر با کمترین مقدار مصرف انرژی ویژه است که در طول دوره مطالعه (معمولاً یک سال) ثبت شده است. این مقدار در شرایط بهینه عملکرد پمپ حاصل می‌شود (معمولاً در ترکیب مناسبی از دور پمپ، دبی و بارکل).

شاخص فوق امکان محاسبه پتانسیل صرفه‌جویی انرژی را برای هر نقطه عملیاتی و همچنین برای دوره‌های زمانی مختلف (ماهانه و فصلی) فراهم نموده و به مدیران سامانه‌های پمپاژ آب کمک می‌کند تا برنامه‌های عملیاتی بهینه‌سازی را با تمرکز بر دوره‌های با بیشترین پتانسیل صرفه‌جویی پیاده‌سازی کنند. تابع هدف اصلی در این مطالعه، حداقل‌سازی مصرف کل انرژی سامانه‌های پمپاژ آب شرب است که به صورت ریاضی با رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$MinE_{total} = \sum (P_i \times t_i \times C_{energy}) \quad (۴)$$

که در آن P_i توان مصرفی پمپ i، t_i زمان عملکرد و C_{energy} قیمت انرژی می‌باشد. بهینه‌سازی انرژی باید با توجه به اصول پایداری منابع آب و ملاحظات فنی-اقتصادی و در چارچوب محدودیت‌های زیر انجام پذیرد:

الف- محدودیت‌های هیدرولیکی

- حفظ حداقل فشار مورد نیاز مشترکین $P_{min} \le P_{system}$
- تأمین حداقل دبی مطلوب $Q_{system} \ge Q_{demand}$

ب- محدودیت‌های عملیاتی پمپ

- نگهداری دور پمپ در حد مجاز $RPM_{min} \le RPM \le RPM_{max}$
- عملکرد در محدوده راندمان قابل قبول $\eta \ge \eta_{min}$

ج- محدودیت‌های کیفی آب

- حفظ استانداردهای بهداشتی در کل شبکه توزیع

د- محدودیت‌های اقتصادی

- رعایت بودجه عملیاتی ماهانه و سالانه

ه- محدودیت‌های زیست‌محیطی

- حفظ تراز آب زیرزمینی در حد مجاز
- جلوگیری از استخراج بیش از حد مجاز از آبخوان

نتایج و بحث

پیش‌پردازش داده‌های سامانه پمپاژ

ابتدا از بین متغیرهای ورودی شامل بارکل، دبی پمپاژ، بار آبی پمپ، عمق نصب پمپاژ و قطر لوله مکش قبل از انجام فاز اول تحقیق، ابتدا بر اساس تحلیل‌های آماری، از بین ۵ متغیر ورودی اولیه مشخصات پمپاژ شامل عمق چاه، عمق نصب پمپ، آبدهی پمپ (چاه)، قطر لوله مکش پمپ و بارکل، ترکیب بهینه متغیرهای ورودی با بیشترین تاثیر بر دور پمپ مشخص شدند که این انتخاب با اصول هیدرولیک پمپ‌ها همخوانی دارد. شناسایی این متغیرهای موثر به کمک تحلیل رگرسیون خطی بین تک‌تک متغیرهای ورودی با متغیر خروجی (دور پمپ) و بر اساس بیشترین ضریب همبستگی پیرسون انجام شد و ۳ متغیر ورودی بارکل، آبدهی پمپ و عمق نصب پمپ به‌ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۵۳، ۰/۴۱ و ۰/۳ به عنوان ترکیب بهینه ورودی‌ها انتخاب شدند. مقادیر پایین ضرایب همبستگی به وضوح نشان داد که برای مدل‌سازی دور پمپ، روش‌های معمول مثل رگرسیون خطی و غیرخطی دارای دقت کافی نیستند.

نتایج فاز اول تحقیق

در این مرحله، برای ایجاد یک مدل ریاضی بین مشخصات چاه پمپاژ و دور پمپ، از مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. ابتدا داده‌های ورودی شامل بارکل، آبدهی پمپ و عمق نصب پمپ و نیز متغیر خروجی دور پمپ، نرمال‌سازی شدند. این داده‌ها سپس به دو دسته آموزش و آزمون (با نسبت ۸۰ به ۲۰ درصد) تقسیم شدند. این تقسیم‌بندی باید به گونه‌ای باشد که مقادیر حداکثر و حداقل‌ها داده‌ها در بخش آموزش قرار گرفته و در بخش آزمون، داده-هایی درنظر گرفته شوند که حاوی مقادیر نزدیک به حداکثرها و حداقل‌ها باشند. این مراحل به صورت تصادفی انجام شده است.

1- Specific Energy Consumption (SEC)
2- Energy Savings (ES)

برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چندلایه[1] (MLP) از الگوریتم بهینه‌سازی Adam با تابع خطای میانگین مربعات (MSE) استفاده شد که نسبت به الگوریتم‌های قدیمی‌تر مثل گرادیان کاهشی، همگرایی سریع‌تری داشته و کمتر در بهینه‌های محلی گیر می‌افتد. با انجام مدل‌سازی به دفعات زیاد، ساختار بهینه شبکه عصبی موردنظر به صورت یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی به‌دست آمد. تعداد بهینه نورون‌ها هم ۳ نورون در لایه ورودی، ۱۰ و ۵ نورون به‌ترتیب در لایه‌های پنهان اول و دوم، و ۱ نورون در لایه خروجی مشخص شد. تابع سیگموید برای لایه‌های پنهان و تابع خطی برای لایه خروجی به عنوان توابع فعال‌سازی بهینه، شناسایی و انتخاب شدند.

در شکل ۵ نتایج شبکه عصبی برای تمامی ۱۷ چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این نتایج در هر دو مرحله آموزش و آزمون دارای دقت مناسبی بوده و مقادیر دور پمپ به‌دست آمده از این شبکه در تمامی محدوده تغییرات این متغیر قابل قبول است. با این‌حال، قابل مشاهده است که با افزایش دور پمپ، کارایی و دقت مدل‌سازی شبکه عصبی در هر دو مرحله آموزش و آزمون تا حدودی کاهش می‌یابد. همچنین کارایی مدل شبکه عصبی در برآورد دور پمپ به صورت مجزا برای تمامی ۱۷ چاه مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در چاه‌های ۱ تا ۱۲ نتایج مدل‌سازی در هر دو مرحله آموزش و آزمون و برای کل محدوده مقادیر دور پمپ، دارای دقت مناسبی است، اما در چاه‌های ۱۳ تا ۱۷، خطای مدل‌سازی (میانگین قدرمطلق خطاها[2]) به صورت کاملاً محسوسی افزایش یافته است (جدول ۱). در نمودارهای شکل ۶، این وضعیت برای چند چاه مختلف نشان داده شده است. افزایش خطا در چاه‌های ۱۳ تا ۱۷ احتمالاً دلایل متعددی دارد که مقادیر تراز سطح آب چاه، نزدیکی به دریا و ... می‌توانند تاثیرگذار باشند. بررسی موقعیت چاه‌های مختلف نشان می‌دهد که ۵ چاه موردنظر (۱۳ تا ۱۷) فاصله بسیار کمتری نسبت به سایر چاه‌ها دارند. فاصله این ۵ چاه تا ساحل دریا ۱/۵–۰/۵ کیلومتر است در حالی‌که حداقل فاصله سایر چاه‌ها با دریا، بیش از ۴ کیلومتر است.

نتایج تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ

پس از تکمیل فاز اول تحقیق و مدل‌سازی شبکه عصبی برای برآورد دور پمپ، فاز دوم شامل محاسبات هیدرولیکی و تحلیل اقتصادی سامانه‌های پمپاژ آب شرب بندر ترکمن انجام شد. به منظور نمایش روند تحلیل، نتایج مربوط به ماه بهمن (بر اساس داده‌های سال‌های ۱۴۰۱–۱۳۹۸) به عنوان نمونه ارائه می‌شود. در این مرحله، بر اساس داده‌های ۵۸ نقطه عملیاتی از ۱۷ چاه آب شرب، شاخص‌های اقتصادی کلیدی محاسبه و تحلیل شده‌اند.

نتایج محاسبه راندمان پمپ‌ها (ماه بهمن)

بر اساس رابطه (۱) و با استفاده از داده‌های مربوط به ماه بهمن، راندمان پمپ‌ها در تمامی ۵۸ نقطه عملیاتی محاسبه شد. نتایج نشان داد که میانگین راندمان کلی پمپ‌ها، ۱۰/۳۶ درصد، حداکثر راندمان، ۱۷/۴۳ درصد، حداقل راندمان، ۴/۱۵ درصد و انحراف معیار راندمان ۳/۶۴ درصد می‌باشد. این مقادیر بسیار پایین‌تر از استانداردهای صنعتی (۸۵–۷۰ درصد) بوده و نشان‌دهنده وجود مشکلات جدی در عملکرد سامانه‌های پمپاژ مورد مطالعه در این تحقیق است. تحلیل توزیع راندمان پمپ‌ها در این ماه در جدول ۲ نشان داده شده است.

تحلیل مصرف انرژی ویژه (SEC)

محاسبه مصرف انرژی ویژه پمپ‌ها بر اساس رابطه (۲) نشان داد که میانگین مصرف ویژه، ۱/۲۹۵۶ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب، حداکثر آن ۲/۳۲۹۳ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب و حداقل آن ۰/۶۵۷۳ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب است.

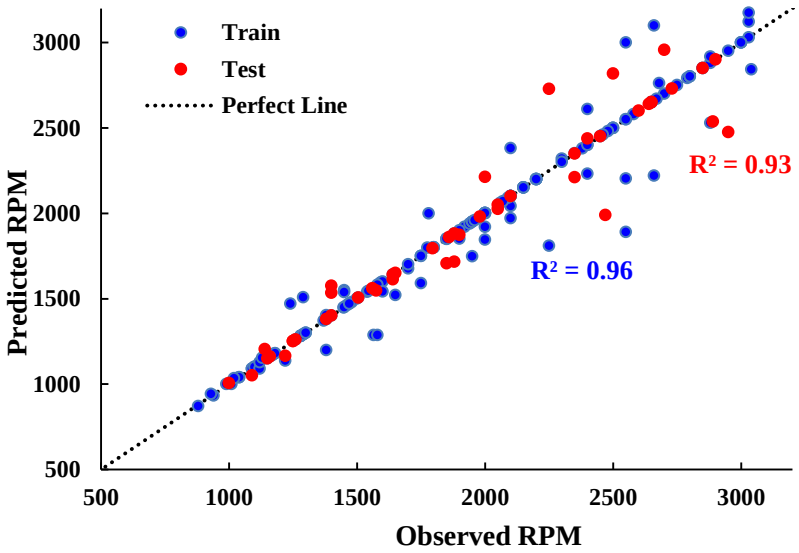
پتانسیل صرفه‌جویی انرژی

با استفاده از رابطه (۳) و با درنظرگرفتن مقدار بهینه SEC به عنوان مرجع، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی محاسبه شد. نتایج نشان داد که کل پتانسیل صرفه‌جویی حدود ۲۹۸/۰۴ کیلووات‌ساعت، میانگین صرفه‌جویی در هر نقطه حدود ۵/۱۴ کیلووات‌ساعت و درصد کاهش ممکن در مصرف انرژی حدود ۴۹/۳ درصد می‌باشد.

تحلیل عملکرد بر اساس دور پمپ (RPM)

نتایج تحلیل عملکرد سامانه‌های پمپاژ در مقادیر مختلف دور پمپ در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. شکل ۷ این نتایج را در چهار بخش مختلف ارائه می‌کند. در جدول ۳ به وضوح مشخص است که در دورهای پایین پمپ (مثلاً در محدوده ۹۹۰–۸۸۰ دور در دقیقه)، راندمان بالا بوده و حدود دو برابر راندمان پمپ‌ها با دورهای بالا (بیشتر از ۱۰۰۰ دور در دقیقه) می‌باشد. همچنین در دورهای پایین پمپ، دبی پمپاژ نسبتاً بالاتر بوده و پتانسیل صرفه‌جویی انرژی نیز دارای وضعیت بهتری است. به‌طور کلی راندمان پمپ‌های مورد مطالعه در مقایسه با استاندارد صنعتی (با راندمان ۸۵–۷۰ درصد) بسیار پایین است.

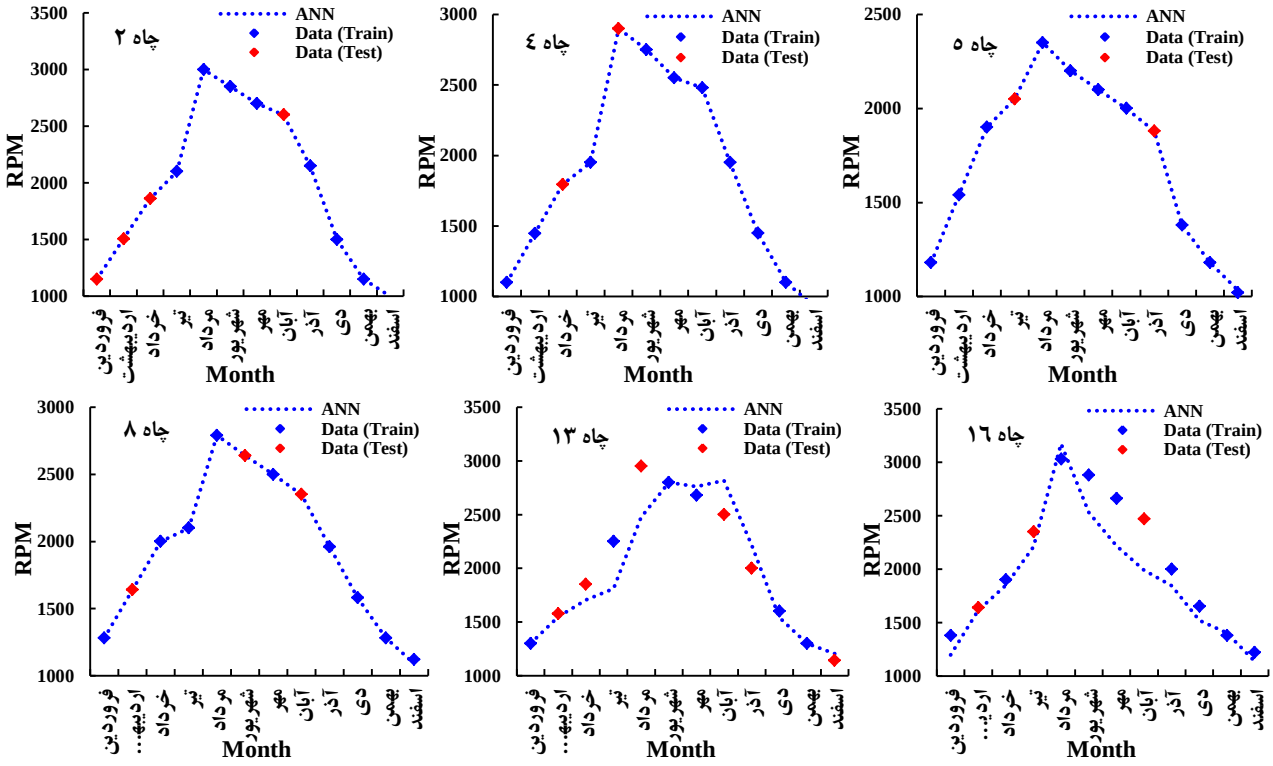
1- Multi-Layer Perceptron (MLP)
2- Mean Absolute Error (MAE)



شکل ۵ – نتایج مدل‌سازی دور پمپ در تمامی چاه‌های شرب برای مراحل آموزش و آزمون شبکه عصبی

جدول ۱- نتایج شاخص‌های آماری عملکرد شبکه عصبی در براورد دور پمپ در چاه‌های مختلف

چاه	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱٤	۱٥	۱٦	۱۷
R^2	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۶۹	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۸۶
MAE	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۶	۱/۴۹	۷/۰	۱۱/۵	۶/۵۵	۹/۴۹	۸/۳۸



شکل ٦ –ارزیابی کارایی شبکه عصبی در تخمین تغییرات زمانی دور پمپ چاه‌های مختلف در مراحل آموزش و آزمون

جدول ۲- توزیع طبقه‌بندی راندمان پمپ‌ها در ماه بهمن

طبقه راندمان	تعداد نقاط	درصد فراوانی
بسیار پایین (% ۵>)	۱	۱/۷
پایین (% ۸-۵)	۱۸	۳۱
متوسط (% ۱۲-۸)	۱۸	۳۱
خوب (% ۱۵-۱۲)	۱۳	۲۲/۴
بهترین در مطالعه (% ۱۵>)	۸	۱۳/۸

این وضعیت ناشی از ترکیب عوامل متعددی است که عمدتاً شامل عدم تطبیق نقطه کار با نقطه بهینه عملکرد[1] پمپ‌ها، فرسودگی تجهیزات پس از سال‌ها بهره‌برداری که منجر به افزایش تولرانس‌های داخلی و نشتی‌های درونی شده، وقوع کاویتاسیون در اثر تراز پایین آب زیرزمینی که باعث تشکیل حباب‌های بخار در طول مسیر لوله مکش و نیز ورودی پمپ می‌شود، انباشت رسوبات معدنی روی پره‌ها و انسداد جزئی مسیرهای جریان، عملکرد در دورهای نامناسب (بالاتر از RPM=۱۲۰۰) که خارج از محدوده طراحی پمپ است، عدم اجرای برنامه منظم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و تنظیمات دوره‌ای، و نیز تأثیر شرایط محیطی نامساعد نظیر کیفیت آب (شوری و سختی بالا)، دمای محیط و ارتعاشات می‌باشد که این عوامل مجموعاً سبب انحراف شدید عملکرد از شرایط بهینه طراحی شده و کاهش راندمان به حدود کمتر از یک‌هفتم مقدار استاندارد گردیده‌اند. شکل ۷-الف رابطه راندمان پمپ با تراز سطح ایستابی را نشان می‌دهد که بیانگر بیشترین راندمان در ترازهای آب ۴۵-۴۰ متر و کمترین راندمان در ترازهای ۳۵-۳۰ متر است. رابطه بین راندمان و آبدهی پمپ در شکل ۷-ب نمایش داده شده است که بیانگر پراکندگی قابل توجه راندمان پمپ‌ها در محدوده آبدهی ۷ تا ۹/۵ مترمکعب بر ساعت است. نمودار ۷-ج پتانسیل صرفه‌جویی انرژی را برای هر نقطه عملیاتی نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل در نقاط ۵۸-۵۰ (مربوط به RPMهای بالا) مشاهده می‌شود. نمودار ۷-د هم توزیع مصرف انرژی ویژه را نمایش می‌دهد که نشان‌دهنده تمرکز ۶۵٪ داده‌ها در محدوده ۲-۱ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب است.

شناسایی بهترین و بدترین نقاط عملیاتی

بهترین ۴ نقطه از نظر عملکرد در بین ۵۸ نقطه عملیاتی به‌ترتیب عبارتند از: نقطه ۳۸ با مشخصات (RPM=880، آبدهی= ۸/۸ m^3/h، راندمان= ۱۷/۴۳٪، SEC=0.6722 KWh/m^3)، نقطه ۳۹ با مشخصات (RPM=880، آبدهی= ۸/۵ m^3/h، راندمان= ۱۷/۲۳٪، SEC=0.6959 KWh/m^3)، نقطه ۳۷ با مشخصات (RPM=880، آبدهی= ۹/۰ m^3/h، راندمان= ۱۷/۰٪، SEC=0.6573 KWh/m^3) و نقطه ۴۰ با مشخصات (RPM=880، آبدهی= ۸/۰ m^3/h، راندمان= ۱۶/۵۸٪، SEC=0.7394 KWh/m^3) می‌باشند.

همچنین ضعیف‌ترین عملکرد از میان ۵۸ نقطه عملیاتی را به‌ترتیب ۴ نقطه ۵۷ با مشخصات (RPM=1220، آبدهی= ۸/۰ m^3/h، راندمان= ۴/۱۵٪، SEC=1.9703 KWh/m^3)، نقطه ۵۰ با مشخصات (RPM=1140، آبدهی= ۸/۲ m^3/h، راندمان= ۵/۲۱٪، SEC=1.5684 KWh/m^3)، نقطه ۴۵ با مشخصات (RPM=1130، آبدهی= ۸/۰ m^3/h، راندمان= ۵/۲۲٪، SEC=1.5656 KWh/m^3) و نقطه ۴۹ با مشخصات (RPM=1140، آبدهی= ۸/۵ m^3/h، راندمان= ۵/۲۲٪، SEC=1.5130 KWh/m^3) می‌باشند.

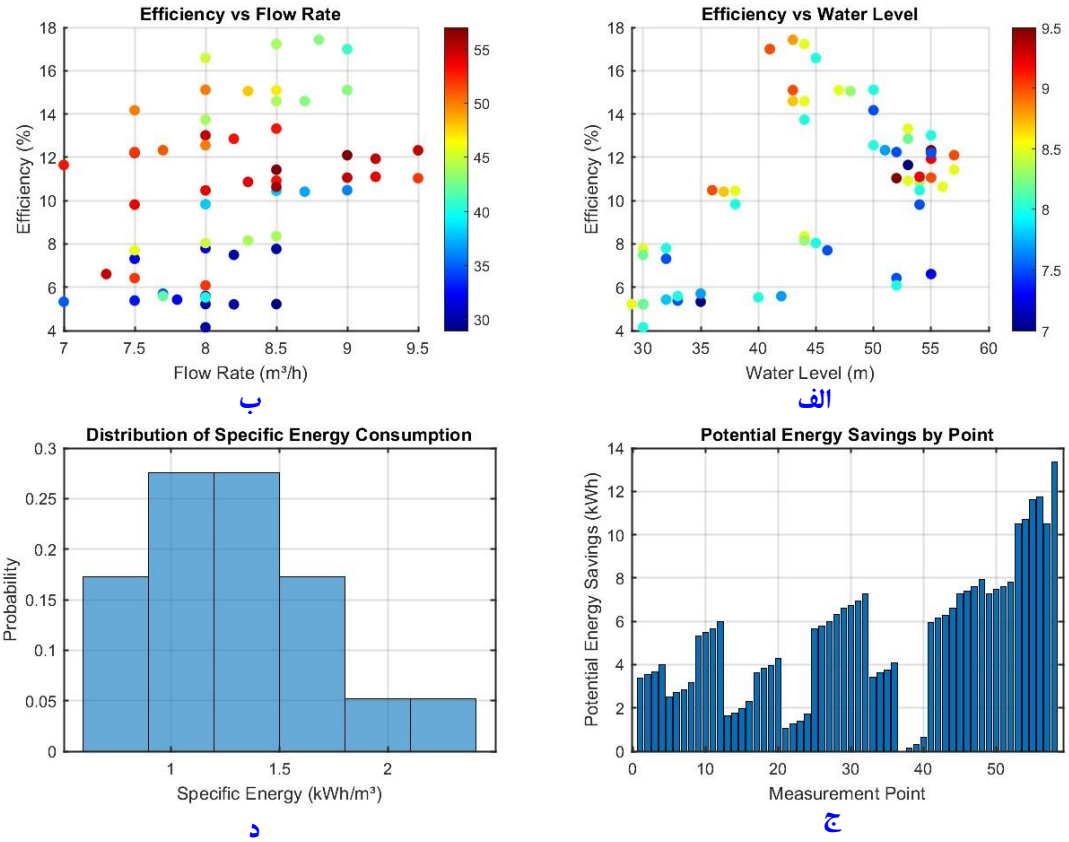
تحلیل منحنی‌های عملکرد پمپ

شکل ۸ و جدول ۴ منحنی‌های عملکرد فردی پمپ‌ها و خلاصه عملکرد چاه‌های نمونه را نشان می‌دهند. این منحنی‌ها که رابطه بین بار کل و آبدهی پمپ‌ها را برای شش چاه مختلف با شرایط عملیاتی متفاوت نمایش می‌دهند، اطلاعات کلیدی برای بهینه‌سازی انرژی سامانه‌های پمپاژ ارائه می‌دهند. مشاهده می‌شود که چاه ۱۰ با RPM پایین (۸۸۰ دور در دقیقه) بالاترین راندمان (۱۷/۱ درصد) و کمترین توان مصرفی (۵/۹ کیلووات) را در محدوده آبدهی ۹-۸ مترمکعب بر ساعت و بار کل ۲۵-۲۱ متر ارائه می‌دهد، در حالی‌که چاه‌های ۱۴ و ۱۵ با RPM بالا (۱۲۲۰ و ۱۲۴۰ دور در دقیقه) راندمان پایین‌تر (۶/۸ و ۷/۲ درصد) و مصرف توان بالاتری (۱۵/۸ و ۱۶/۴ کیلووات) دارند. جدول ۴ نیز این یافته‌ها را تأیید نموده و نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌های پایین‌تر در شرایط مناسب، می‌تواند راندمان را تا سه برابر افزایش دهد. این نتایج، اهمیت انتخاب پارامترهای عملیاتی بهینه بر اساس شرایط خاص هر چاه (عمق، تراز آب، دبی) را برجسته نموده و راهکار عملی برای کاهش مصرف انرژی تا ۵۰ درصد در سامانه‌های پمپاژ آب شرب فراهم می‌آورد. همچنین، شیب منفی منحنی‌ها در هر چاه نشان‌دهنده رفتار طبیعی و صحیح پمپ‌های گریز از مرکز بوده و صحت محاسبات هیدرولیکی انجام شده را تأیید می‌کند.

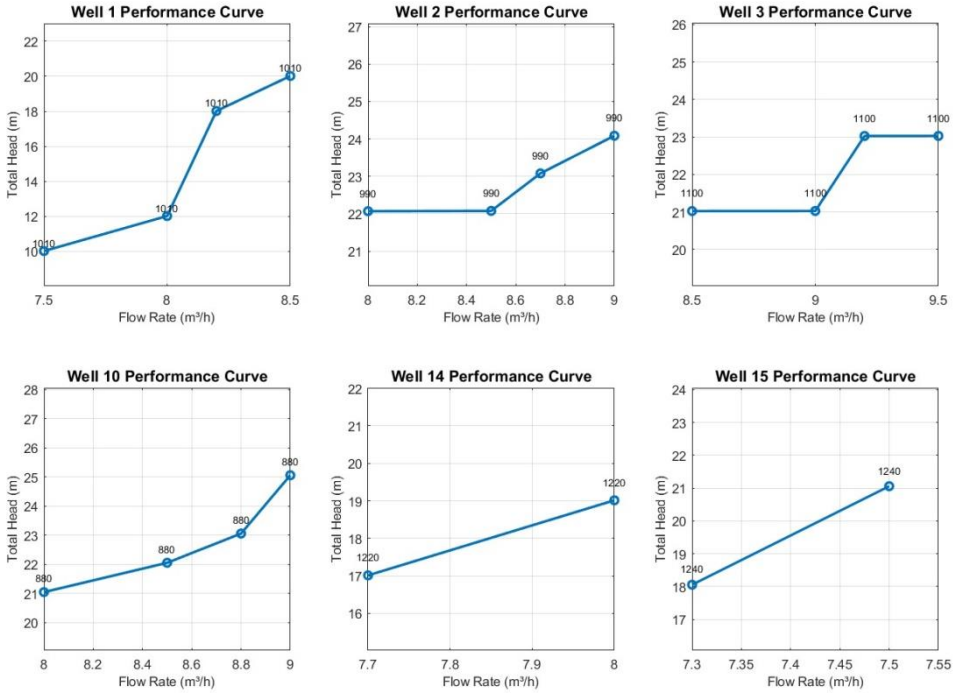
1 Best Efficiency Point (BEP)

جدول ۳- تحلیل عملکرد بر اساس دور پمپ

محدوده RPM	تعداد نقاط	راندمان متوسط (%)	SEC متوسط (KWh/m³)	آبدهی متوسط (m³/h)
۸۸۰	۴	۱۷/۰۶	۰/۶۹۱۲	۸/۵۸
۹۳۰	۴	۱۴/۵۱	۰/۸۱۸۱	۸/۵۵
۹۴۰	۴	۱۴/۸۶	۰/۸۹۴۹	۸/۰۸
۹۹۰	۴	۱۰/۳۰	۰/۹۸۶۹	۸/۵۵
۱۰۱۰	۴	۷/۵۹	۱/۱۱۵۸	۸/۰۸
۱۰۲۰	۴	۷/۵۹	۱/۱۱۵۸	۸/۰۸
۱۰۹۰	۴	۷/۷۷	۱/۲۰۱۷	۸/۰۸
۱۱۰۰	۴	۸/۸۶	۱/۱۰۶۱	۸/۷۵
۱۱۲۰	۴	۸/۲۶	۱/۳۲۶۶	۸/۱۴
۱۱۳۰	۴	۶/۸۷	۱/۵۶۵۶	۷/۸۸
۱۱۴۰	۴	۶/۲۲	۱/۵۰۶۷	۸/۱۵
۱۲۲۰	۴	۵/۸۹	۱/۸۸۵۱	۷/۸۳
۱۲۴۰	۴	۷/۳۱	۱/۶۹۳۴	۷/۵۸
۱۲۹۰	۴	۸/۰۰	۱/۹۷۰۳	۸/۰



شکل ۷- تحلیل کارایی انرژی و عملکرد سامانه‌های پمپاژ بر اساس (الف) تراز آب و (ب) آبدهی پمپ، (ج) توزیع احتمالاتی مصرف انرژی ویژه و (د) میزان صرفه‌جویی قابل دستیابی در هر نقطه عملیاتی



شکل ۸- منحنی‌های عملکرد پمپ (بار کل در مقابل دبی) برای نمونه‌ای از چاه‌های مورد مطالعه

جدول ٤- خلاصه منحنی‌های عملکرد پمپ‌ها در سرعت‌های مختلف

RPM	محدوده آبدهی (m³/h)	محدوده تراز آب (m)	راندمان متوسط (%)	توان متوسط (KW)
۸۸۰	۸–۹	۴۱–۴۵	۱۷/۰۶	۵/۹۲
۹۳۰	۸–۹	۴۳–۴۴	۱۴/۵۱	۶/۹۸
۹۴۰	۷/۵–۸/۵	۴۷–۵۰	۱۴/۸۶	۷/۲۱
۹۹۰	۸–۹	۳۶–۳۸	۱۰/۳۰	۸/۴۲
۱۰۱۰	۷/۵–۸/۵	۳۰–۳۲	۷/۵۹	۸/۹۴
۱۲۲۰	۷/۷–۸/۰	۳۰–۴۲	۵/۸۹	۱۵/۷۵
۱۲۹۰	۸	۵۲	۸/۰	۱۸/۶۲

تحلیل اقتصادی هزینه‌ها

با فرض متوسط قیمت ۱۲۰۰ ریال به ازای هر کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی، هزینه فعلی انرژی ماهانه سامانه پمپاژ مورد مطالعه حدود ۳۵۷,۶۴۸ ریال و هزینه بهینه انرژی ماهانه این سامانه حدود ۱۸۱,۳۴۴ ریال بدست می‌آید که بیانگر صرفه‌جویی ماهانه معادل ۱۷۶,۳۰۴ ریال (حدود ۴۹/۳ درصد کاهش هزینه) است. به منظور شناسایی الگوهای فصلی عملکرد و تغییرات زمانی مصرف انرژی، این تحلیل‌ها و محاسبات برای تمامی ماه‌های سال تکرار شد. بر این اساس، صرفه‌جویی سامانه پمپاژ بندرترکمن در ماه‌های مختلف سال بدست آمد که در جدول ۵ ارائه شده است. بیشترین صرفه‌جویی ماهانه بر حسب ریال و درصد به‌ترتیب در ماه آذر (معادل ۲/۹۴ میلیون ریال) و مرداد (حدود ۵۰ درصد) اتفاق افتاده است. مجموع کل مبالغ صرفه‌جویی این سامانه حدود ۱۰/۱ میلیون ریال بدست آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که سامانه‌های پمپاژ آب شرب بندر ترکمن دارای پتانسیل بهبود قابل توجهی هستند. این نتیجه با نتایج تحقیقات بسیاری از محققین در نقاط مختلف دنیا همخوانی دارد. نکته مهم مرتبط با صرفه‌جویی انرژی، پایین بودن مبلغ ریالی متناسب با این صرفه‌جویی است که به دلیل پایین بودن قیمت انرژی در ایران است. پیشنهاد مشخص در این زمینه، تعدیل قیمت‌ها بر اساس یک سیاست مناسب و هم‌زمان با آن، اجرای مشوق‌های مالی، ارائه راهکارهای فنی و نظارتی (از قبیل استانداردسازی و اعمال رتبه‌بندی انرژی پمپ‌ها)، و ارائه راهکارهای آموزشی و مدیریتی به بهره‌برداران شامل آموزش اپراتورها در زمینه مباحث مهمی از قبیل اصول هیدرولیک پمپ‌ها، تنظیم بهینه دور پمپ، تشخیص عیوب و نگهداری، و محاسبه شاخص‌های انرژی است.

جدول ۵- خلاصه تحلیل اقتصادی هزینه‌های مصرف انرژی ماهانه سامانه پمپاژ (برحسب میلیون ریال)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
هزینه فعلی انرژی	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۷۴	۱/۰۹	۳/۰۹	۴/۳۰	۵/۶۷	۶/۲۰	۱/۵۱	۱/۲۱	۰/۷۸
هزینه بهینه انرژی	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۷	۰/۵۰	۰/۸۳	۱/۸۵	۲/۳۳	۲/۸۴	۳/۲۵	۱/۰۸	۰/۸۲	۰/۴۸
صرفه‌جویی ماهانه	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۶	۱/۲۴	۱/۹۷	۲/۸۳	۲/۹۵	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۳۰

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با بررسی و تحلیل اقتصادی سامانه‌های پمپاژ آب شرب در ۱۷ چاه واقع در بندر ترکمن در یک دوره زمانی چهار ساله مشخص شد که مصرف انرژی این سامانه‌ها را می‌توان تا حدود زیادی کاهش داد. میانگین درصد صرفه‌جویی مصرف ماهانه انرژی در این سامانه بیش از ۴۰ درصد و مبلغ حاصل صرفه‌جویی بیش از ۱۰/۱ میلیون ریال در سال به‌دست آمد که معادل ۴۴ درصد هزینه مصرف سالانه انرژی این سامانه می‌باشد. این یافته با نتایج مطالعات متعدد محققین مختلف مبنی بر اینکه سامانه‌های پمپاژ جزء حوزه‌های با پتانسیل بالای صرفه‌جویی انرژی محسوب شده و بهینه‌سازی سرعت پمپ‌ها می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه مصرف انرژی شود، همخوانی کامل دارد. با این حال، علی‌رغم پتانسیل فنی بالای صرفه‌جویی انرژی که در این مطالعه (۴۴ درصد هزینه‌های سالانه انرژی) برآورد شده است، به دلیل قیمت بسیار پایین انرژی الکتریکی در کشور، انگیزه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در استفاده از تجهیزات پیشرفته، محدود بوده و این عامل می‌تواند مانع جدی برای پیاده‌سازی کامل اقدامات بهینه‌سازی در سازمان‌ها و صنایع بزرگ دولتی و خصوصی باشد. راهکارهای عملی دستیابی به پتانسیل صرفه‌جویی انرژی محاسبه شده در این مطالعه شامل طیف گسترده‌ای از اقدامات مدیریتی و فنی است که بر اساس میزان سرمایه‌گذاری و مدت زمان اجرا طبقه‌بندی می‌شوند. در مرحله اول که قابلیت اجرای فوری داشته و نیازی به سرمایه‌گذاری عمده ندارد، تنظیم مجدد سرعت پمپ‌ها از سرعت‌های فعلی بالا (۱۲۰۰+ دور در دقیقه) به سرعت‌های بهینه شناسایی شده (۸۸۰-۹۴۰ دور در دقیقه) می‌تواند تا ۴۰-۳۰ درصد کاهش مصرف انرژی را محقق سازد، زیرا بر اساس قانون مکعبی پمپ‌ها، کاهش ۱۰ درصدی سرعت منجر به ۲۷ درصد کاهش مصرف انرژی می‌شود. در مرحله دوم که نیازمند سرمایه‌گذاری متوسط و مدت زمان اجرای ۶ تا ۱۲ ماه است، با نصب سامانه‌های کنترل دور متغیر، امکان تنظیم خودکار سرعت پمپ بر اساس تقاضای لحظه‌ای و شرایط فصلی را فراهم آورده و ۲۰-۱۰ درصد صرفه‌جویی اضافی ایجاد می‌کند. در مرحله سوم که مربوط به سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت است، تعویض پمپ‌های با راندمان بسیار پایین (کمتر از ۵ درصد) با پمپ‌های مدرن با راندمان استاندارد، باقیمانده پتانسیل صرفه‌جویی را تحقق می‌بخشد. همچنین، تحلیل فصلی عملکرد که در مطالعات آینده باید تکمیل شود، نشان خواهد داد که در کدام ماه‌ها بیشترین و کمترین راندمان مشاهده می‌شود تا برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای بهینه‌سازی انرژی صورت گیرد. روش ترکیبی ارائه شده در این مطالعه که تلفیق مدل‌سازی هوش مصنوعی با تحلیل اقتصادی انرژی را شامل می‌شود، چارچوب جامعی برای ارزیابی و بهینه‌سازی سایر سیستم‌های پمپاژ در نقاط مختلف کشور فراهم می‌کند و امکان تعمیم نتایج را برای سامانه‌های مشابه فراهم می‌آورد.

فهرست منابع

زارع‌زاده، م.، و خوارزمی، س. ۱۳۹۲. تأثیر اجباری‌شدن استانداردهای تعیین معیار مصرف انرژی در کاهش مصرف سوخت و انرژی در صنایع و کارخانجات استان هرمزگان. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، دوره ۰، شماره ۲، ص. ۴۵-۵۸.

ذولفقاری، پ.، ذاکری‌نیا، م.، و کاظمی، ح. ۱۳۹۸. امکان‌سنجی استفاده از آب‌های نامتعارف (پساب شهری) در کشاورزی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP). نشریه آبیاری و زهکشی، دوره ۱۳، شماره ۶ - شماره پیاپی ۷۸، ص. ۱۸۵۷-۱۸۴۴.

مظاهری، ا.، و عابدی کوپایی، ج. ۱۳۹۶. کاهش تبخیر از مخازن ذخیره آب با استفاده از پوشش های شناور در اصفهان. نشریه تحقیقات آب و خاک، دوره ۴۹، شماره ۳، ص. ۶۰۵-۵۹۷.

وزارت نیرو، ۱۴۰۱. گزارش نهایی تدوین برنامه عملیاتی سازگاری با کم‌آبی استان گلستان، شرکت آب منطقه‌ای گلستان.

Assouline, S. and Narkis, K. 2021. Reducing evaporation from water reservoirs using floating lattice structures. Water Resources Research. 57(6): https://doi.org/10.1029/2021WR029670.

Blischke, W.R. and Murthy, D.P. 2011. Reliability: modeling, prediction, and

44(11), 1817-1829, https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00187-5.

Kaya, D.E., Yagmur, A., Yigit, K.S., Kilic, F.C., Eren, A.S. and Celik, C. 2008. Energy efficiency in pumps. Energy Conversion and Management. 49(6): 1662-1673, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.010.

Mazaheri, E. and Abdei Koupai, J. 2017. Reduction of Evaporation from Water Reservoirs Using Floating Covers in Isfahan. Iranian Journal of Water and Soil Research. 49(3): 597-605. 10.22059/IJSWR.2017.233481.667681.

Ministry of Energy. 2022. Final report on the development of an operational plan for adapting to water scarcity in Golestan Province. Golestan Water Regional Company.

Piri, J., Pirzadeh, B., Keshtegar, B. and Givehchi, M. 2021. Reliability analysis of pumping station for sewage network using hybrid neural networks-genetic algorithm and method of moment. Process Safety and Environmental Protection. 145: 39-51.

Quon, H. and Jiang, S. 2023. Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. Npj Clean Water 6: 56. https://doi.org/10.1038/s41545-023-00273-7.

Salimi, S., Mawlana, M. and Hammad, A. 2018. Performance analysis of simulation-based optimization of construction projects using high performance computing. Automation in Construction. 87: 158-172.

Saraç, H.İ., Güven, R., Sözbir, N. and Yiğit, K.S. 1995. New method for simulation of centrifugal pump plants. Modeling, Measurement and Control. 47(3): 1-8.

Sarbu, L. and Valea, E.S. 2015. Energy savings potential for pumping water in district heating stations. Sustainability, 7(5), 5705-5719; https://doi.org/10.3390/su7055705.

Shalaby, M.M., Nassar, I, N., and Abdallah, A.M. 2021. Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. Journal of Hydrology. 598: 126482. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126482.

Tran, S.H., Dang, H.T., Dao, D.A., Nguyen, V.A., Nguyen, L.T., V.A. Nguyen. and Han, M. 2021. On-site rainwater harvesting and treatment for drinking water supply: assessment of cost and technical issues. Environmental Science and optimization. John Wiley & Sons.

Bui, T.T., Nguyen, D.C., Han, M., Kim, M., and Park, H. 2021. Rainwater as a source of drinking water: A resource recovery case study from Vietnam. The Journal of Water Process Engineerin. 39: https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101740.

Dhakal, N., Salinas-Rodriguez, S.G., Hamdani, J., Abushaban, A., Sawalha, H., Schippers, J.C. and Kennedy, M.D. 2022. Is Desalination a Solution to Freshwater Scarcity in Developing Countries? Membranes. 12(4): 381, DOI:10.3390/membranes12040381.

Ertöz, A.Ö. 2003. Energy efficiency in pumps. 6th National Installations Engineering and Congress, Istanbul, Turkey.

Ghahramani Jajin, R., Feizi, A. and Ghorbanpour, M. 2021. Reduction of water evaporation from dam reservoirs using hydrophobic silver-doped titanium dioxide nanoparticles coating. Water Resources Research. 57(5): https://doi.org/10.1029/2020WR029231.

Hieninger, T., Goppelt, F., Schmidt-Vollus, R. and Schlücker, E. 2021. Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. Energy Efficiency. 14(23): https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5.

Hofman-Caris, R., Bertelkamp, C., de Waal, L., van den Brand, T., Hofman, J., van der Aa, R. and van der Hoek, J.P. 2019. Rainwater Harvesting for Drinking Water Production: A Sustainable and Cost-Effective Solution in the Netherlands? Water. 11(3): 511. https://doi.org/10.3390/w11030511.

Kalaiselvan, A.S.V., Subramaniam, U., Shanmugam, P. and Hanigovszki, N. 2016. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. Applied Energy. 181: 495-513, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070.

Karassik, I.J., Messina, J.P., Cooper, P. and Heald, C.C. 2001. Pump Handbook. Third Edition, McGraw-Hill, USA.

Karimidastenaei, Z., Avellán, T., Sadegh, M., Kløve, B. and Torabi Haghighi, A. 2022. Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. Science of the Total Environment. 827: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154429.

Kaya, D. 2003. Experimental study on regaining the tangential velocity energy of axial flow pump. Energy Conversion and Management.

factories. Energy Policy and Planning Research. (2): 45-58.

Zolfaghary, P., Zakerinia, M. and Kazemi, H. 2019. Feasibility of unconventional water (municipal wastewater) consumption in agriculture using Analytical Hierarchy Process (AHP). Iranian Jourbal of Irrigation and Drainage. 13(6): Serial Number. 78: 1844-1857. 20.1001.1.20087942.1398.13.6.26.2.

Pollution Research. 28: 11928–11941. https://doi.org/10.1007/s11356-020-07977-0.

Yigit, K.S., Arik, M. and Bar-Cohen, A. 2001. New CHF Enhancement Techniques: Passive Impeller Micropump and Gravity Driven Fluid Flow. Edizioni ETS. 1: 259-264.

Zarzadeh, M. and Kharazmi, S. 2013. Influence of compulsion specific energy consumption standards in decreasing the rate of consumption fuel and energy in Hormozgan industries and

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 521-535

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۳۵-۵۲۱

Application of Artificial Intelligence Modeling and Energy Economic Analyses to Evaluate and Optimize Drinking Water Pumping Systems

Abdul-Razzag Ghoolee[1], Abdolreza Zahiri [2]*, Jamshid Piri[3]
Recived: Jun.07, 2025 Accepted: Jun.18, 2025

Abstract

Given the increasing population growth, as well as the intensification of the effects of climate change, and the increase in droughts in arid regions of the world, finding efficiency enhancement initiatives for water systems are considered to be the key solution in reducing the water and energy utilization. In this study, first, with the help of artificial neural networks, the behavior (pump spped) of the drinking water pumping system of Bandar Turkman located in Golestan Province was modeled over a 4-year period (1401-1398) and based on simple characteristics of this system (including the water level in the well, monthly pumping flow rate, and pump installation depth). The results showed that the calculated values of the pump speed have appropriate accuracy over the entire range of changes of this variable, although with increasing pump speed, the efficiency and accuracy of modeling decreases somewhat. Economic analysis of the pumping systems under consideration showed that the mean overall efficiency of the pumps was about 10 percent, which is much lower than industry standards (70 percent) and indicates the existence of serious challenges in the performance of the pumping systems studied in this research. It was also found that the energy consumption of these systems can be reduced to a large extent. The average monthly potential energy consumption savings in this system is equivalent to 44% of the annual consumption cost.

Keywords: Economic analysis, Optimization, Pumping systems, Machine learning models, Energy consumption

1- MSc graduate in Water Science and Engineering-Water Structures, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2- Associate Professor in Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3- Assistant Professor in Water Engineering, Zabol University, Zabol, Iran
(*- Corresponding Author Email: zahiri.areza@gmail.com; azahiri@gau.ac.ir)