Archive of SID.ir

Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 2, PP. 97-115, Summer 2025

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.458343.1704

Optimization of Energy Consumption in Pumping Station with the Combined Model of Gray Wolf Algorithm and Support Vector Regression

Mohsen Nouri[1], Bahareh Pirzadeh[2], Jamshid Piri[3*]

1- Master's degree, water resources management and engineering, University of Sistan and Baluchestan.

2- Associate Professor of Civil Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan.

3- Assistant Professor of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Zabul University.

[*] **j.piri@uoz.ac.ir**

Received: 19 May 2024
Accepted: 2 September 2024
Discussion: 23 September 2025

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: While wastewater treatment plants (WWTPs) are vital for protecting public health and the environment, their significant energy consumption presents a major operational and environmental challenge. Globally, these plants can account for up to 1% of a nation's total energy usage. A key contributor to this energy burden is the operation of pumping stations, which utilize large, often continuously running pumps to lift wastewater through the various treatment stages.

Fixed-speed pumps, traditionally used in pumping stations, offer simplicity but are inefficient in handling the variable wastewater inflow common in WWTPs. During low inflow, they waste energy by operating at full capacity. Conversely, high inflow can overwhelm them, risking overflows and environmental damage. Recent advancements in artificial intelligence (AI) offer a solution by enabling dynamic pump control. AI, through machine learning and optimization algorithms, can analyze real-time inflow data and predict trends, allowing for speed adjustments that minimize energy use. Studies have shown significant energy reductions with AI-driven pump control. This research investigates a novel AI-based approach for optimizing pump speed in WWTPs, specifically using a hybrid Grey Wolf Algorithm (GWO) and Support Vector Regression (SVR) model. GWO, inspired by grey wolf hunting, optimizes pump parameters to minimize energy. SVR predicts future pump speed requirements based on real-time data and GWO-optimized parameters. Real-world data from the Zahedan Refinery's pumping station validates the proposed method's potential for energy savings in WWTPs.

Materials and Methods: This section details the development of an optimization model for a wastewater pump located in a reservoir. The model uses randomly generated inflow patterns based on real-world data from the Zahedan Wastewater Treatment Plant. This plant, designed to serve a future population of approximately 900,000, occupies 24 hectares in eastern Zahedan and includes 17 kilometers of transmission lines, a reservoir, and a pumping station. Hourly inflow data, collected in 2021, was recorded for a reservoir with a constant cross-sectional area of 12 square meters and height limits of 1 and 9 meters. Analysis of the 2021 data revealed a peak average wastewater flow rate of 6.99 liters per second in June and a maximum standard deviation of 68.27 in February. The optimization

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

problem is then formulated to minimize daily pumping energy consumption.

$$\begin{cases} \underset{N_i, I_i, Q_{out\,i}, H_{w\,i}}{minimize} & E_T = \sum_T P_i \Delta t \\ & (H_d - H_{wi}) \times I_i + KQ_{out\,i}^2 = c_h^2 Q_{out\,i}^2 + c_h^1 Q_{out\,i} N_i + c_h^0 N_{out\,i}^2 \times I_i \\ & H_{wi} = H_{wi-1} + \frac{Q_{in\,i} + Q_{in\,i-1} - Q_{out\,i} - Q_{out\,i-1}}{2A} \times \Delta t \\ \textbf{subject to} & 0 \le Q_{out\,i} \le Q_{max}^{ad} . I_i \\ & 1500 \le N(t) \le 3000 \\ & 0 \le I(t) \le 1 \\ & H_w^{min} \le H_w(t) \le H_w^{max} \\ & I_i \in Z,\ \ N_i \in R,\ \ Q_{out\,i} \in R \\ & \forall i = 1 \dots n_T \end{cases}$$

The research contrasts a traditional fixed-speed pump control (Classic Model) with an AI-driven approach (Optimization Model). This latter model utilizes Grey Wolf Algorithm (GWO) for variable speed control to optimize energy usage. Support Vector Regression (SVR) is then incorporated to predict pump speed based on the optimized output from the GWO model.

Discussion and Results: The GWO algorithm is implemented to identify optimal pump operation parameters. The Support Vector Regression (SVR) model predicts pump speed using optimized parameters, and comparative analysis with a fixed-speed system reveals substantial energy savings. A detailed analysis and discussion of the results are provided.

Conclusions: This study explored a novel AI-driven approach for optimizing pump speed control in wastewater treatment plant (WWTP) pumping stations, utilizing a hybrid Grey Wolf Optimization (GWO) and Support Vector Regression (SVR) model. Significant Energy Savings: The GWO-SVR model demonstrably reduces energy consumption in variable-flow pumping stations compared to fixed-speed systems, highlighting the potential of AI-based optimization for enhancing energy efficiency in WWTPs. Precise and Dynamic Pump Control: The SVR model accurately predicts optimal pump speeds based on real-time data and GWO-optimized parameters, enabling efficient pump operation through dynamic speed adjustments to meet fluctuating flow demands and minimize energy waste. Practical Implementation for WWTPs: The combined GWO-SVR model offers a readily implementable solution for WWTP operators to optimize pump control and achieve significant energy savings, contributing to more sustainable and cost-effective wastewater treatment.

Keywords: Energy efficiency - simulation - pumping station - gray wolf algorithm - support vector regression.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۲، صفحات ۹۷-۱۱۵، تابستان ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.458343.1704

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه پمپاژ با مدل ترکیبی الگوریتم گرگ خاکستری و رگرسیون بردار پشتیبان

محسن نوری[۱]، بهاره پیرزاده[۲]، جمشید پیری[۳*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مدیریت و مهندسی منابع آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۲- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۳- استادیار مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

* **j.piri@uoz.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: ایستگاه‌های پمپاژ از جمله مهم‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در صنعت آب و فاضلاب هستند که انرژی الکتریکی در آن‌ها نقشی اساسی دارد. مهم‌ترین عامل مصرف انرژی در سامانه‌های پمپاژ چگونگی عملکرد پمپ است. مصرف انرژی در واحد حجم سیال پمپاژ شده در هر پمپ به ازای دبی‌های مختلف پمپاژ، متفاوت است بدین جهت عملکرد پمپ با دبی آن تغییر خواهد کرد. در این پژوهش، محققان یک روش بهینه‌سازی با مدل ترکیبی الگوریتم گرگ خاکستری و رگرسیون بردار پشتیبان را جهت تنظیم یک پمپ در سامانه پمپاژ فاضلاب تحت جریان ورودی متغیر ارائه کرده‌اند. داده‌های دبی استفاده شده در این مدل، مربوط به ایستگاه پمپاژ ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب زاهدان است. داده‌های ساعتی دریافتی توسط روش مونت‌کارلو با توزیع نرمال به دقیقه‌ای تبدیل شده است. با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم گرگ خاکستری و رابطه‌های هیدرولیکی مربوط به پمپاژ، میزان‌های متغیرهای دبی، بار، توان و عملکرد طرح بهینه و این میزان‌ها برای مدل رگرسیون بردار پشتیبان جهت شبیه‌سازی سرعت دوران پمپ توسعه داده شد. مدل ترکیبی میزان انرژی بهینه شده و عملکرد پمپ را محاسبه کرد و عملکرد پمپ با دور متغیر (دور بهینه) به میزان تقریبی 0.1 از پمپ با دور ثابت در دوره‌های زمانی مختلف بیشتر شد که این عملکرد بهتر پمپ را با دور متغیر می‌رساند، همچنین در شبیه‌سازی سرعت دوران پمپ با رگرسیون بردار پشتیبان و مقایسه آن با گرگ خاکستری، میزان‌های ضریب همبستگی (R^2) بزرگ‌تر از 0.996 شد که نشان‌دهنده دقت بالای رگرسیون بردار پشتیبان در شبیه‌سازی است.

کلید واژگان: ایستگاه پمپاژ، بهینه‌سازی، دور پمپ، الگوریتم گرگ خاکستری، رگرسیون بردار پشتیبان

۱- مقدمه

مدیریت کارآمد فاضلاب و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایران، یک ضرورت پرهیز ناپذیر است. با اجرای راهکارهای مناسب، می‌توان به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها، کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود کیفیت زندگی دست یافت. تورگروسا و همکاران (۲۰۱۷) در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند که به طور کلی کارایی انرژی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب رضایت‌بخش نیست(Torregrossa et al., 2017). در این زمینه، مدیریت کارآمد انرژی پمپ‌ها می‌تواند سودمندی و برتری‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند. اگرچه هم‌اکنون حسگرهای آنلاین می‌توانند اطلاعات با بسامد بالا در مورد سامانه‌های پمپاژ ارائه دهند، اما در بهترین حالت، ارزیابی انرژی تنها چند بار در سال با استفاده از داده‌های تجمعی انجام می‌شود. برای حل این مسئله، روش‌های مبتنی بر داده‌ها برای تحلیل عملکرد پمپ و بهینه‌سازی کارایی انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسعه یافته‌اند. Torregrossa et al. (2017) یک روش مبتنی بر منطق فازی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری روزانه انرژی ارائه کرده‌اند. این

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

رویکرد نوآورانه به مدیران تصفیه‌خانه اطلاعات دقیقی در مورد عملکرد پمپ ارائه می‌دهد و پیشنهادهایی مبتنی بر مورد برای کاهش مصرف انرژی سامانه پمپاژ و افزایش طول عمر پمپ‌ها ارائه می‌کند. مطالعه موردی آنها در یک تصفیه‌خانه فاضلاب در آلمان نشان داد که با استفاده از این روش می‌توان ناکارآمدی‌های انرژی را شناسایی کرد و راه‌حل‌های مبتنی بر مورد برای کاهش مصرف انرژی پمپ تا ۱۸.۵٪ ارائه داد. در زمینه مهندسی آب و فاضلاب، روش و فن‌های محاسبه‌های نرم در کاربردهای مختلف نیز بررسی نیز شده‌اند. برای مثال، یاگی و شیبا (۱۹۹۹) از این روش و فن‌ها برای تعیین سرعت پمپاژ در ایستگاه پمپاژ فاضلاب استفاده کرده‌اند (Yagi & Shiba, 1999). چن و همکاران (۱۹۹۲) از شبکه‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی وضعیت یک ایستگاه پمپاژ و ترکیب نظام استنتاج فازی برای کنترل حلقه بسته پمپاژ فاضلاب استفاده کرده‌اند(Chen et al., 1992). برخی از روش و فن‌های هوش مصنوعی برای کنترل پمپ در سامانه پمپاژ استفاده شده‌اند، مانند جلوگیری از سیل و کاهش تخلیه بارهای آلاینده بر آب‌های دریافتی و دستیابی به کنترل نقطه تنظیم آبگاه. استفاده از روش و فن‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در حال افزایش است. فیتر و همکاران (۲۰۰۵) کنترل‌کننده‌های منطق فازی را برای تنظیم هوادهی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسعه داده‌اند (Fiter et al., 2005). هدف اصلی این فرآیند کنترل، صرفه‌جویی در انرژی بدون کاهش کیفیت پساب خروجی است. نتایج شبیه‌سازی آنان نشان داد که منطق فازی ابزار مناسبی برای کنترل هوادهی تصفیه‌خانه فاضلاب است و می‌تواند صرفه‌جویی انرژی بیش از ۱۰٪ را با حفظ سطح‌های خوب حذف آلاینده‌ها به همراه داشته باشد. یادگیری تقویتی نیز به عنوان یک رویکرد مؤثر برای کنترل فرآیندهای پیشرفته اکسایش در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توجه شده است. سیافی و همکاران (۲۰۱۱) یک روش کنترل بدون مدل مبتنی بر یادگیری تقویتی را برای کنترل فرآیند اکسایش پیشرفته در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب ارائه کرده‌اند(Syafiie et al., 2011). این روش به ویژه برای آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر تصفیه‌های زیست شناختی یا زیستی متداول سودمند است. افزون بر این، به استفاده از روش و فن‌های داده‌کاوی برای بهینه‌سازی فرآیند هوادهی در تصفیه فاضلاب نیز توجه شده است. اسدی و همکاران (۲۰۱۶) یک رویکرد مبتنی بر داده‌ها را برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند هوادهی در یک تصفیه‌خانه بزرگ فاضلاب ارائه کرده‌اند(Asadi et al., 2017). این رویکرد با هدف کمینه کردن مصرف انرژی بدون به خطر انداختن کیفیت آب انجام می‌شود. هان و همکاران (۲۰۱۸) راهبردهای کنترل بهینه چند هدفه را برای بهبود کارایی عملیاتی، رعایت کیفیت پساب و کاهش مصرف انرژی در فرآیند تصفیه فاضلاب توسعه داده‌اند(Han et al., 2018). این راهبردها از مدل‌های تابع کرنل تطبیقی برای توصیف پویایی پیچیده کیفیت پساب و مصرف انرژی استفاده می‌کنند و از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای کمینه کردن هدف‌های تعیین شده بهره می‌برند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در شبکه‌های هوشمند آب و فناوری اینترنت اشیاء، شرایط برای اعمال روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر داده‌ها بر مبنای روش و فن‌های هوش مصنوعی فراهم شده است. هان و همکاران (۲۰۱۷) روش‌های کنترل پیش‌بینی‌کننده برای پمپ‌های فاضلاب با سرعت متغیر که مصرف انرژی الکتریکی را با در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های نامطمئن برای نرخ ورودی فاضلاب و اطلاعات گردآوری شده توسط حسگرهای قابل دسترس از طریق نظام SCADA به کمینه می‌رسانند، توسعه داده‌اند(Han et al., 2017). در سامانه‌های پمپاژ، مهم‌ترین عامل چگونگی عملکرد پمپ است. انرژی مصرف شده در پمپ به سرعت چرخش آن بستگی دارد و پمپ‌ها در سرعت اسمی که دبی اسمی و بار پمپ در آن به دست آمده، بیشترین انرژی را مصرف می‌کنند. پمپ‌ها به طور معمول برای بیشینه دبی انتخاب می‌شوند، در صورتی که همیشه به بیشینه دبی نیازی نیست و می‌توان سرعت پمپ را با توجه به نیاز مصرفی تغییر داد. سامانه‌های پمپاژ فاضلاب به طور معمول برای کار در شرایط هیدرولیک و سرعت چرخش ثابت طراحی شده‌اند که نزدیک به بهترین نقطه عملکرد پمپ است. این کار باعث افزایش مصرف انرژی و دراز مدت باعث عملکرد پایین سیستم پمپاژ می‌شود. در این راستا، تحقیقات چندی برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های پمپاژ انجام شده

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

است. اورمسبی و لنسی در سال ۱۹۹۴ چندین روش برای توسعه الگوریتم‌های کنترل بهینه برای سامانه‌های پمپاژ آب را بررسی کردند (Ormsbee & Lansey, 1994). آنان روشی را برای تولید برنامه‌های پمپ برای سامانه‌های کوچک یا متوسط ارائه کردند که کمترین هزینه انرژی را تولید و در عین حال شمار سوئیچ پمپ را محدود می‌کرد. این رویکرد نشان داد که با برنامه‌ریزی دقیق عملکرد پمپ‌ها می‌توان به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی دست یافت. پولیدو سالو و همکاران در سال ۲۰۰۶ از یک مدل ریاضی توسعه داده شده بر مبنای یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی برای بهینه‌سازی یک ایستگاه پمپاژ برای مزارع ماهی در جنوب اسپانیا استفاده کردند(Pulido-Calvo et al., 2006). نتایج این برنامه بهینه‌سازی نشان داد که هزینه سالانه برای پمپ‌های با دور ثابت (بیشینه دبی مورد نیاز) ۵۰ درصد و برای پمپ‌های با دور متغیر (دبی بر مبنا تقاضا) ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. این بررسی اهمیت استفاده از پمپ‌های با دور متغیر را در کاهش مصرف انرژی به خوبی نشان داد. ژینپینگ و محمود و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی روش‌های صرفه‌جویی انرژی در ایستگاه پمپاژ بر مبنا الگوریتم ژنتیک پرداختند(Mahmoud et al., 2020). آن‌ها تجهیزات کنترل سرعت الکتروپمپ‌ها را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تجهیز ایستگاه‌های پمپاژ به سامانه‌های کنترل سرعت متغیر، علاوه بر کاهش مصرف انرژی، می‌تواند منجر به کاهش استهلاک تجهیزات مکانیکی از جمله شیرها شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ نه تنها از نظر مصرف انرژی، بلکه از نظر طول عمر تجهیزات نیز سودمند است. کیسر و همکاران در سال ۲۰۱۴ مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ در دو شهر در هلند و اسپانیا را با استفاده از مدل‌سازی پویا بررسی کردند(De Keyser et al., 2014). در این مدل‌سازی روش‌های بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ بررسی و منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی شد. این بررسی نشان داد که مدل‌سازی پویا می‌تواند ابزار مفیدی برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های پمپاژ در شرایط واقعی باشد. فکورتا و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی اعداد صحیح مختلط برای کنترل توالی روشن و خاموش شدن پمپ و همچنین دور آن در یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب، منجر به کاهش مصرف انرژی در آن ایستگاه شدند. این رویکرد نشان داد که با کنترل دقیق زمان‌بندی عملکرد پمپ‌ها و تنظیم سرعت آن‌ها می‌توان به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی دست یافت(Fecarotta et al., 2018). پیری و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب را تحت جریان متغیر با مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بهینه کردند(Piri et al., 2021). تحقیق آنان بر روی دور پمپ و الگوی مکرر جریان ورودی متمرکز بود و نشان دادند که جریان متغیر دبی پمپاژ کارایی بالاتری نسبت به جریان ثابت دارد. این بررسی اهمیت استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ را نشان داد. با توجه به برتری‌های الگوریتم گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimization – GWO) از جمله سادگی مفهومی و فراسنجه‌های قابل تنظیم کمتر، این الگوریتم در زمینه‌های مختلفی از جمله طراحی مهندسی، اقتصاد، مسیریابی اینترنت و غیره کاربرد فراوانی داشته است. تطبیق‌پذیری بالای GWO در حل مسئله‌های بهینه‌سازی پیچیده، آن را به گزینه‌ای جذاب برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ تبدیل کرده است. هدف این پژوهش استفاده از الگوریتم‌های توسعه یافته برای کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب و فاضلاب است. با توجه به اینکه در سامانه‌های پمپاژ مهم‌ترین عامل چگونگی عملکرد پمپ‌هاست و از آنجایی که عملکرد هر پمپ در دبی‌های مختلف متفاوت است، لذا با مدل‌سازی و شبیه‌سازی ایستگاه پمپاژ با پمپ‌های سرعت ثابت و سرعت متغیر با استفاده از ابزار هوش مصنوعی به مقایسه مصرف انرژی در این دو حالت پرداخته شده است. در این پژوهش در نظر است با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، یک مدل بهینه‌سازی برای کنترل عملکرد پمپ‌ها در یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب ارائه دهیم. این مدل با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند دبی ورودی، سطح مخزن، و مصرف انرژی، به دنبال یافتن بهترین راهبرد برای کنترل پمپ‌هاست. هدف نهایی، کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد کلی سامانه پمپاژ است. نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود قابل توجه در مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب منجر شود و راهکارهای عملی برای کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی ارائه دهد. افزون بر این، نتایج این

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پژوهش می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آینده در زمینه استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی سامانه‌های پیچیده محیط زیستی فراهم کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، یک مدل بهینه‌ساز برای پمپاژ فاضلاب ورودی به یک تصفیه‌خانه فاضلاب ارائه شده است. پمپ سانتریفیوژ شناوری در آبگاهی با جریان ورودی متغیر قرار گرفته که در آن الگوی جریان ورودی به صورت تصادفی بر اساس مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی تولید شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تصفیه‌خانه فاضلاب زاهدان در زمینی به مساحت ۲۴ هکتار در شرق این شهر قرار دارد که ظرفیت این تصفیه‌خانه ۴۹ هزار متر مکعب در هر شبانه روز است. این تصفیه‌خانه در افق طرح، جمعیت حدود ۹۰۰ هزار نفر را تحت پوشش قرار داده است. این ایستگاه پمپاژ فاضلاب تنها مجهز به یک پمپ سانتریفیوژ شناور است. پمپ‌های سانتریفیوژ شناور به دلیل توانایی پمپاژ فاضلاب با مواد معلق بالا و ابعاد مناسب برای نصب در ایستگاه‌های پمپاژ، به طور گسترده در این کاربرد استفاده می‌شوند. این پمپ مجهز به یک موتور الکتریکی با قدرت است که گشتاور مورد نیاز را برای فرآیند پمپاژ فراهم می‌کند. همچنین این پروژه شامل ۱۷ کیلومتر خط انتقال، مخزن و ایستگاه پمپاژ می‌باشد. داده‌های آماری دبی ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب زاهدان در ۱۲ ماه سال ۱۴۰۰ به صورت ساعتی با روش پارشال فلوم توسط شرکت آب و فاضلاب استان سیستان و بلوچستان اندازه‌گیری شده و این اطلاعات به صورت توصیفی در جدول ۱ آورده شده است. بیشینه میانگین دبی فاضلاب در خرداد ماه 99.6 لیتر در ثانیه و بیشترین انحراف استاندارد در بهمن ماه 27.68 بوده است.

۲-۲- شبیه‌سازی داده‌ها

داده‌های دبی دریافتی با توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال دو پارامتره و لجستیک برازش شده و با بررسی نیکویی برازش آن‌ها توسط سه روش کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون-دارلینگ و کای مربع، بهترین توزیع خطای مدل این داده‌ها در آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ، توزیع نرمال و در آزمون کای مربع ، در آغاز لوگ نرمال و پس از آن داده‌ها نرمال شد (جدول ۲). با توجه به نتایج به دست آمده تابع توزیع نرمال به عنوان بهترین تابع برای تحلیل داده‌های دبی ورودی فاضلاب به ایستگاه پمپاژ فاضلاب انتخاب شد.

داده‌های دبی دریافتی از سازمان به صورت ساعتی بوده ولی با توجه به مدل بهینه‌ساز مورد استفاده در این تحقیق نیاز به داده‌های دقیقه‌ای است. از این جهت برای شبیه‌سازی داده‌های دبی دریافتی برای ۲۴ ساعت در بازه ۱ دقیقه‌ای از شبیه‌ساز مونت‌کارلو با توزیع نرمال داده‌ها استفاده شده است. مرحله‌ها تولید این داده ها توسط این شبیه‌ساز به ترتیب زیر می‌باشد (Piri et al, 2021).

جدول ۱ ویژگی‌های آماری ایستگاه پمپاژ زاهدان برای ۱۲ ماه از سال ۱۴۰۰

Table 1 Statistical Characteristics of Zahedan Pumping Station for 12 Months of 2021

Month	Average Flow Rate (Liters per Second)	Standard Deviation	Maximum Flow Rate (Liters per Second)	Minimum Flow Rate (Liters per Second)
April	90.11	17.18	130.2	57.13
May	97.72	19.12	140.26	61.73
June	99.16	21.52	143.41	53.64
July	94.2	21.99	141.29	54.1
August	79.5	12.4	107.22	52
September	86.74	15.89	120.23	52.53
October	88.18	21.6	120.16	45.87
November	89.84	22.55	128.85	46.32
December	93.85	24.96	140.08	42.81
January	92.77	26.73	152.25	49.19
February	95.89	27.68	145.13	46.95
March	86.6	24.23	130.25	49.25

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۲ مقدارهای مربوط به آماره آزمون نیکویی برازش

Table 2 values related to goodness of fit test statistics

Distribution	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling	Chi-Squared
	statistic	statistic	statistic
Logistic	0.15097	0.52745	1.2679
Lognormal	0.14375	0.65113	1.167
Normal	0.12908	0.37532	1.2405

- فاصله زمانی داده‌های دریافتی ۱ ساعت است.
- تقسیم داده‌ها بر میانگین کل تعریف شده $(\overline{Q}_{\Delta t,i})$
- محاسبه $Q_{N,i}$ برای هر فاصله زمانی : $Q_{N,i} = \frac{Q_i}{\overline{Q}_{\Delta t,i}}$
- برای هر یک دقیقه، یک شماره تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌شود.
- حل معادله ۱ برای به دست آوردن $Q_{N,i}$

$$\left(\mu - \sigma\sqrt{2} \times erf\, ln(2 \times RN - 1)\right) - Q_{N,i} = 0 \quad (1)$$

- در نهایت مقدار دبی در فاصله زمانی یک دقیقه با توجه به معادله ۲ محاسبه خواهد شد.

$$Q_i = Q_{N.i} \times \overline{Q}_{\Delta t,i} \quad (2)$$

شکل ۱ نتایج شبیه‌سازی داده‌های ساعتی به دقیقه‌ای را که با روش مونت‌کارلو برای دبی‌های ورودی به ایستگاه پمپاژ تصفیه‌خانه فاضلاب زاهدان به دست آمده نشان می‌دهد.

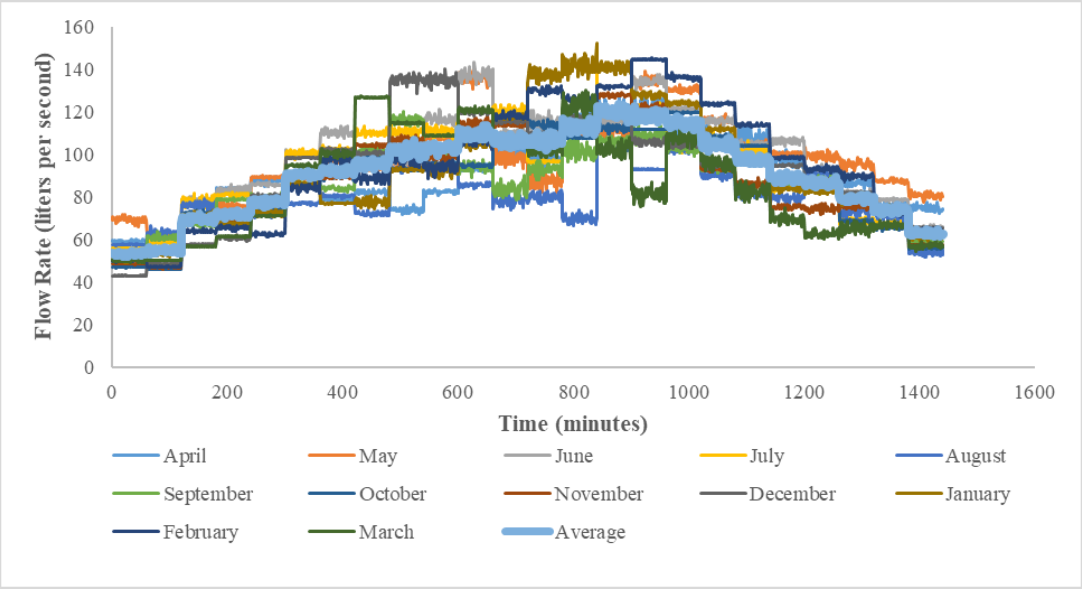

Fig. 1 Estimation of simulated discharge data based on normal distribution function for Zahedan station 2021

شکل ۱ برآورد داده‌های شبیه‌سازی شده دبی بر مبنای تابع توزیع نرمال برای ایستگاه زاهدان ۱۴۰۰

۲-۳- پمپ و طراحی آبگاه

تک پمپ استفاده شده در این تحقیق یک پمپ سانتریفیوژ با سرعت دوران ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ بوده، که این پمپ فاضلاب ۱۵۰ کیلوواتی مجهز به یک موتور القایی دو قطبی با درایور سرعت متغیر است. زمانی که فرکانس شبکه ۵۰ هرتز باشد، سرعت دوران موتور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه است.

ویژگی‌های هندسی پمپ:

- قطر ورودی پمپ: ۳۵۰ میلی‌متر
- قطر خروجی پمپ: ۲۵۰ میلی‌متر
- وزن پمپ: ۸۵۰ کیلوگرم
- دبی بهینه عملکرد پمپ (Qbep): 0.224 مترمکعب بر ثانیه
- محدوده دبی کارکرد پمپ: 0.15 تا 0.35 مترمکعب بر ثانیه

سرعت دورانی پمپ (N) با توجه به فرکانس با فرمول زیر

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

قابل محاسبه است :

$$\mathbf{N = \frac{60f}{p_p}} \quad (3)$$

در این رابطه p_p شمار زوج قطب‌های موتور است.

بازده پمپ (η) از روی نسبت توان هیدرولیکی به توان الکتریکی قابل محاسبه است :

$$\boldsymbol{\eta = \frac{\gamma HQ}{P}} \quad (4)$$

γ وزن مخصوص آب برابر با (N/m^3) ۹۸۰۶ است. برای هر بسامد منحنی بار یا هد (H) و منحنی توان (P) با استفاده از یک رگرسیون چند جمله‌ای به دست می‌آید (معادله‌ها ۵ و ۶) که در نتیجه آن بازده پمپ با استفاده از معادله ۴ قابل محاسبه است.

$$H_N = \left[c_h^2\left(\frac{Q}{N}\right)^2 + c_h^1\left(\frac{Q}{N}\right)^2 + c_h^0\right].N^2 \quad (5)$$

$$P_N = c_p^3\left(\frac{Q}{N}\right)^3 + c_p^2\left(\frac{Q}{N}\right)^2 + c_p^1\left(\frac{Q}{N}\right) + c_p^0 \quad (6)$$

$c_p^3, c_p^2, c_p^1, c_p^0$ ضریب‌های رگرسیون منحنی هد و c_h^2, c_h^1, c_h^0 ضریب‌های رگرسیون منحنی توان پمپ است که به صورت تجربی برای پمپ مورد نظر در آزمایشگاه به دست آمده است.

همچنین برای هر سرعت دورانی (N)، بهترین بازده (η_{BEP}^N) به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\eta_N^{BEP} = c_\eta^2 N^2 + c_\eta^1 N + c_\eta^0 \quad (7)$$

$c_\eta^2, c_\eta^1, c_\eta^0$ ضریب‌های رگرسیون منحنی بازده پمپ مورد استفاده است. منحنی‌های پمپ مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

حجم حاصل از آبگاه مستقل از دبی جریان ورودی است. در صورت استفاده نکردن از محرک سرعت متغیر پمپ با بیشینه سرعت خود می‌چرخد و توسط سطح آب بیشینه و کمینه در آبگاه فعال می‌شود (مدل کلاسیک). با توجه به تفاوت زمانی بین مقدار بیشینه و کمینه، در این تحقیق سطح پایه آبگاه برابر ۱۲ متر مربع و کمینه و بیشینه سطح آب به ترتیب ۱ و ۹ متر در نظر گرفته شده است.

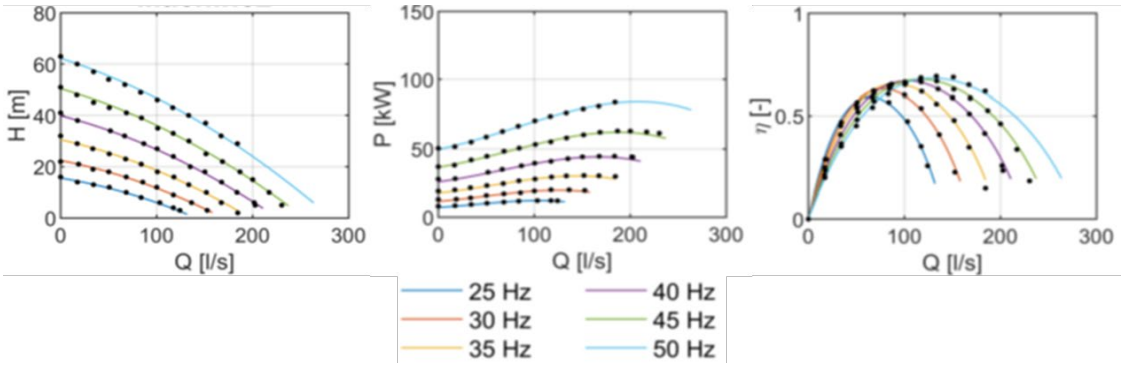

Fig. 2 Pump performance curves

شکل ۲ منحنی‌های عملکرد پمپ

۲-۴- ترکیب‌بندی مسئله

در این پژوهش، امکان کاهش انرژی روزانه درخواستی برای پمپاژ آب از آبگاه (E^{day})، یعنی انتگرال روزانه توان پمپ ($P(t)$) در طول زمان بررسی شده که توالی روشن-خاموش شدن پمپ به طور مستقل از سطح آب ($H_w(t)$) با هدف کاهش انرژی تنظیم شده است. البته مسئله بهینه‌سازی حاصل، محدود به کمینه و بیشینه سطح آب در آبگاه و کمینه و بیشینه دور پمپ (به ترتیب ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه) است. بنابراین می‌توان مدل بهینه‌سازی را توسط مجموعه معادله‌های ۸ بیان کرد (Fecarotta and Cimorelli, 2021).

$$\begin{cases} \underset{N(t),I(t)}{\text{minimize}} & E^{day} = \int_{day} P(t)dt \\ \text{subject to} & 1500 \le N(t) \le 3000 \\ & 0 \le I(t) \le 1 \\ & H_w^{min} \le H_w(t) \le H_w^{max} \\ & I(t) \in Z,\ \ N(t) \in R \end{cases} \quad (8)$$

اگر پمپ روشن $I(t) = 1$ و اگر خاموش $I(t) = 0$ است. هنگامی که دبی تخلیه خروجی $Q_{out}(t)$ و سطح آب در آبگاه $H_w(t)$ در زمان t با معادله هیدرولیکی سیستم محاسبه

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شود و عملکرد دستگاه معلوم باشد مقدار $P(t)$ به دست می‌آید.

۲-۴-۱- مدل کلاسیک (پمپ با دور ثابت)

یک ایستگاه پمپاژ برای گردآوری و انتقال آب به نقطه‌ای بالاتر طراحی می‌شود. جریان آب ورودی در آبگاه که پمپ شناور در آن قرار گرفته، ذخیره می‌شود. در عملکرد کلاسیک پمپ با بیشینه دور خود می‌چرخد و پمپ توسط سطح آب در آبگاه فعال می‌شود. هنگامی که پمپ خاموش است، سطح آب در آبگاه افزایش یافته تا هنگامی که به مقدار بیشینه (H_w^{max}) خود برسد. هنگامی که سطح آب به مقدار بیشینه رسید، پمپ آغاز به کار کرده و آبگاه را تخلیه می‌کند. هنگامی که سطح آب به کمینه مقدار خود (H_w^{min}) کاهش یافت، پمپ متوقف شده و این چرخه دوباره تکرار خواهد شد. انرژی روزانه مورد نیاز برای این عملیات به صورت زیر محاسبه شده است :

$$E_{cs} = \int_{day} \frac{\Upsilon Q_{out}(t) H_{N_{max}}(Q_{out}(t))}{\eta_{N_{max}}(Q_{out}(t))} dt \qquad (9)$$

در این رابطه Υ وزن مخصوص آب و $H_{N_{max}}$ و $\eta_{N_{max}}$ به ترتیب هد پمپ و بازده پمپ در بیشینه دور پمپ هستند. $Q_{out}(t)$ دبی تخلیه خروجی در زمان t است. هد پمپاژ مورد نیاز ($H_{N_{max}}$) از دبی تخلیه پمپاژ با استفاده از رابطه افت هد مرتبه دوم محاسبه می‌شود :

$$H_{N_{max}} = H_d - H_w(t) + KQ_{out}(t)^2 \qquad (10)$$

در این رابطه H_d بار ایستایی در هنگام خالی بودن آبگاه، H_w سطح آب در آبگاه و K یک ضریب است که به هندسه خط لوله بستگی دارد.

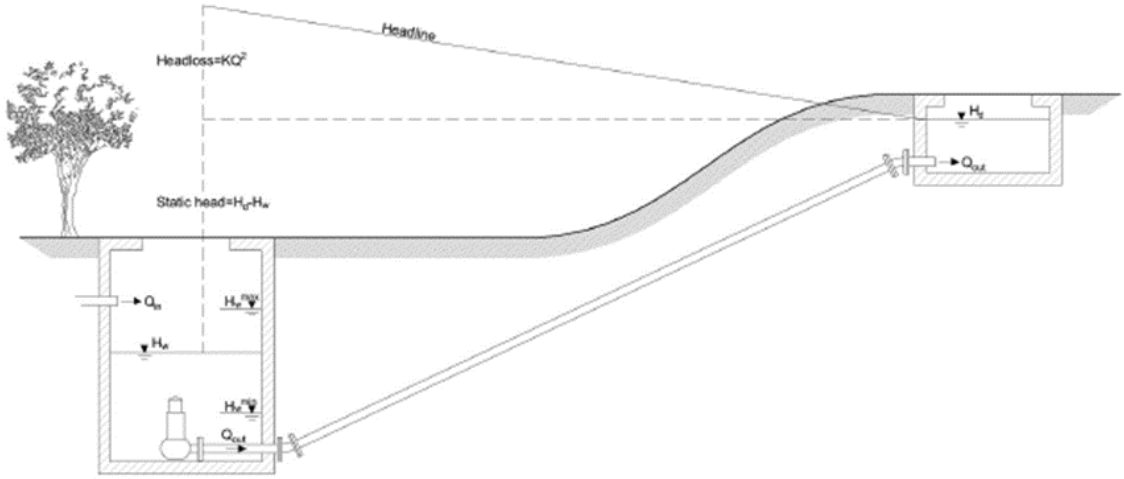

Fig. 3 System diagram including reservoir, pumping pipeline and downstream sewer

شکل ۳ نمودار سامانه شامل آبگاه، خط لوله پمپاژ و فاضلاب پایین‌دست

پمپ بزرگ به طور معمول نیاز به طراحی مناسبی دارد، به این صورت که تخلیه پمپ شده به طور کلی بسیار بزرگتر از تخلیه ورودی است تا بتواند با رویدادهای تخلیه ورودی رو به رو شود. بنابراین اختلاف هد به طور قابل توجهی انرژی مورد نیاز روزانه برای پمپاژ آب از آبگاه را افزایش می‌دهد. کنترل مناسب پمپ می‌تواند کاهش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ را به دنبال داشته باشد. اگر یک محرک بسامد به موتور القایی پمپ متصل باشد می‌توان دور پمپ را تنظیم کرد تا جریان خروجی را کاهش داد. در این پژوهش سه حالت برای β که فراسنجه کنترلی برای دور پمپ است در نظر گرفته شده است. مقدار K با توجه به β بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$K = \frac{H_{N_{max}}^{BEP} - \beta H_{N_{max}}^{BEP}}{Q_{N_{max}}^{BEP^2}} \qquad (11)$$

در اینجا BEP نشان از کار کردن پمپ در بهترین نقطه عملکردی خود است.

۲-۴-۲- مدل بهینه‌سازی

مدل بهینه‌سازی به منظور کاهش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

آب به خارج از آبگاه با تابع هدفی به صورت زیر است:

$$E_T = \int_T P(t)dt \quad (12)$$

مدل قادر به رویارویی با کل مسئله در یک زمان معقول نیست، بنابراین کل روز به پنجره‌های بهینه‌سازی با طول‌های زمانی T تقسیم شده که انرژی مورد نیاز در هر پنجره بهینه‌سازی را به کمینه می‌رساند. انرژی نهایی مجموع چندین مقدار بهینه بدست آمده است. البته مسئله با یک گام زمانی تعیین‌شده (Δt =1 دقیقه) حل می‌شود و برای هر گام زمانی، معادله پیوستگی با یک طرح اختلاف محدود مرکزی تقریب زده می‌شود. توان (Pi) یک تابع از دور پمپ (Ni) و دبی تخلیه‌ی پمپاژ (Qi) است که طبق رابطه زیر بیان می‌شود :

$$\mathbf{P_N(Q) = p_{N_{Max}} \times N^3 \times e \times \eta_N^{BEP}} \quad (13)$$

$$\mathbf{e = \frac{\eta_N(Q)}{\eta_N^{BEP}}} \quad (14)$$

$$\mathbf{e = c_e^3 \left(\frac{Q}{N}\right)^3 + c_e^2 \left(\frac{Q}{N}\right)^2 + c_e^1 \left(\frac{Q}{N}\right) + c_e^0} \quad (15)$$

$$\mathbf{p_{N_{Max}} = \frac{P_{N_{Max}}}{N_{max}^3}} \quad (16)$$

e بازده نسبی و $c_e^3, c_e^2, c_e^1, c_e^0$ ضریب‌های ثابتی هستند که از برازش رگرسیونی بین Q/N و e حاصل می‌شوند.

I_i سوئیچ پمپ است که در صورت روشن بودن پمپ در بازه زمانی i برابر با 1 و در غیر این صورت 0 است. بنابراین، توان مورد نیاز برای هر بازه زمانی با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\mathbf{P_i = P(Q_i, N_i, S_i) = \left(p_{N_{max\,i}} \times N_i^3 \times e_i \times \eta_{BEP}^N\right) \times I_i} \quad (17)$$

مفهوم‌های یاد شده را می‌توان در مدل به صورت زیر خلاصه کرد که برای پنجره زمان T و i امین گام زمانی تا n_T نوشته شده‌است (Fecarotta et al., 2018).

$$\begin{cases} \underset{N_i, I_i, Q_{out\,i}, H_{w\,i}}{\text{minimize}} & E_T = \sum_T P_i \Delta t \\ & (H_d - H_{wi}) \times I_i + K Q_{out\,i}^2 = c_h^2 Q_{out\,i}^2 + c_h^1 Q_{out\,i} N_i + c_h^0 N_{out\,i}^2 \times I_i \\ & H_{wi} = H_{wi-1} + \frac{Q_{in\,i} + Q_{in\,i-1} - Q_{out\,i} - Q_{out\,i-1}}{2A} \times \Delta t \\ \text{subject to} & 0 \le Q_{out\,i} \le Q_{max}^{ad} . I_i \\ & 1500 \le N(t) \le 3000 \\ & 0 \le I(t) \le 1 \\ & H_w^{min} \le H_w(t) \le H_w^{max} \\ & I_i \in Z, \quad N_i \in R, \quad Q_{out\,i} \in R \\ & \forall i = 1 \dots n_T \end{cases} \quad (18)$$

برای شبیه‌سازی، جریان ورودی با تنظیم بیشینه سرعت جریان ورودی (Q_{max}^{in}) محاسبه شد، که به عنوان کسری از بهترین تخلیه $(Q_{N_{max}}^{BEP})$ به صورت زیر است :

$$Q_{max}^{in} = \frac{Q_{N_{max}}^{BEP}}{\alpha} \quad (19)$$

α یک ضریب است که به دو صورت طراحی ایستگاه پمپاژ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نخست، برای یک مدل معین میزان‌های کوچک‌تر α منجر به ایستگاه پمپاژ بزرگ‌تر با پمپ بزرگ‌تر و در نتیجه آبگاه بزرگ‌تر می‌شود و در صورت دوم برعکس است.

شکل ۴ الگوی ورودی جریان و اثر α به روی آن را در مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

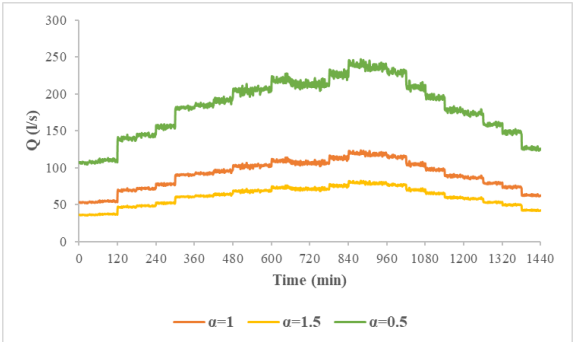

Fig. 4 The pattern of incoming flow and the effect of α on it

شکل ۴ الگوی جریان ورودی و اثر α روی آن

۲-۵- الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)

چالش اصلی در مسئله‌های بهینه‌سازی، یافتن بهترین

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مجموعه از فراسنجه‌هایی است که یک تابع هدف معین را بهینه می‌کند. با افزایش ابعاد و غیرخطی بودن تابع هدف، این مسئله به طور فزاینده‌ای پیچیده می‌شود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی ممکن است از همگرایی آهسته، همگرایی زودرس یا گیر افتادن در بهینه‌سازی محلی رنج ببرند. بنابراین نیاز به روش و فن‌های بهینه‌سازی نوآورانه وجود دارد که بتوانند بر این محدودیت ها غلبه کنند. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری یک رویکرد جدید با الهام از رفتار شکار گرگ‌های خاکستری را ارائه می‌دهد و یک راه‌حل قوی و کارآمد را برای کارهای بهینه‌سازی فراهم می‌کند. در الگوریتم گرگ خاکستری بهینه‌سازی با استفاده از گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا انجام می‌شود. یک گرگ به عنوان آلفا هدایت کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شود و یک گرگ بتا و دلتا نیز مشارکت دارند و دیگر گرگ‌ها به عنوان دنبال‌کننده آن‌ها به شمار می‌آیند. در بهینه‌ساز گرگ خاکستری مناسب‌ترین راه‌حل به عنوان آلفا در نظر گرفته می‌شود و راه‌حل‌های دوم و سوم مناسب به ترتیب بتا و دلتا نامگذاری می‌شوند. اگر X_i موقعیت i امین گرگ خاکستری در فضای جستجو باشد و X_{alpha} ، X_{beta} و X_{delta} به ترتیب موقعیت گرگ‌های آلفا ، بتا و دلتا را نشان می‌دهند، معادله‌ی به روزرسانی موقعیت در GWO به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\begin{aligned} \mathbf{X_i(t+1)} = \mathbf{X_{alpha}} &- \mathbf{A} \times \mathbf{D_{alpha}} \\ &- \mathbf{X_i(t)} \times (\mathbf{2} \times \mathbf{r_1} - \mathbf{1}) \\ &+ \mathbf{X_{beta}} - \mathbf{A} * \mathbf{D_{beta}} \\ &- \mathbf{X_i(t)} \times (\mathbf{2} \times \mathbf{r_2} - \mathbf{1}) \\ &+ \mathbf{X_{delta}} - \mathbf{A} \times \mathbf{D_{delta}} \\ &- \mathbf{X_i(t)} \times (\mathbf{2} \times \mathbf{r_3} - \mathbf{1}) \end{aligned} \qquad (20)$$

$X_i(t+1)$ نشان دهنده موقعیت به روز شده i امین گرگ در زمان $t+1$ است.

A یک ضریب است که اندازه گام را مهار می‌کند ، اگر $|A| < 1$ باشد، گرگ آلفا به شکار (و دیگر گرگ‌ها) نزدیک می شود و اگر $|A| > 1$ گرگ از شکار (و دیگر گرگ‌ها) دور خواهد شد.

D_{alpha} ، D_{beta} و D_{delta} به ترتیب فاصله بین گرگ‌ها و گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا هستند و r_1 ، r_2 و r_3 اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.

GWO شامل تنظیم فراسنجه‌های خاصی مانند شمار گرگ‌ها در گروه، بیشینه شمار تکرارها و ضریب A است. مقدار بهینه برای این فراسنجه‌ها خاص همان مسئله است و باید از طریق آزمایش و تنظیم ، دقیق تعیین شود.

خلاصه مرحله‌های الگوریتم گرگ خاکستری به صورت زیر است:

۱- موقعیت گرگ‌ها به طور تصادفی در فضای جستجو مقداردهی شود.

۲- تابع هدف برای هر گرگ ارزیابی شود.

۳- به روزرسانی موقعیت‌های گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا بر اساس ارزش‌های تناسب آنها

۴- به روزرسانی موقعیت گرگ‌های باقی، مانده با استفاده از معادله به روزرسانی موقعیت

۵- مرحله‌های ۲ تا ۴ تکرار شود تا هنگامی که معیار پایان برآورده شود.

۲-۶- رگرسیون بردار پشتیبان

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) یک الگوریتم یادگیری نظارت شده است، هدف رگرسیون بردار پشتیبان به کمینه رساندن خطا بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و میزان‌های واقعی است در حالی که به طور همزمان حاشیه را در اپسیلون-لوله به بیشینه می‌رساند و این به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیب شده است.

فرمول اساسی مسئله SVR به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\mathbf{Minimize}: \mathbf{0.5} \times \|\mathbf{w}\|^2 + \mathbf{C} \times \sum \boldsymbol{\xi} \qquad (21)$$

قید های این رابطه به صورت زیر است :

$$|\mathbf{y_i} - (\mathbf{wx_i} + \mathbf{b})| < \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\xi_i} \quad \text{و} \quad \boldsymbol{\xi_i} \geq \mathbf{0} \qquad (22)$$

اینجا، $\|w\|$ نشان‌دهنده هنجار اقلیدسی بردار وزن w است، C یک فراسنجه منظم‌سازی است که مبادله بین به بیشینه رساندن حاشیه و به کمینه رساندن خطاها را کنترل می‌کند، ξ_i نشان‌دهنده متغیر سستی برای i امین نمونه تمرین است، y مقدار هدف از i امین نمونه آموزشی، x_i نشان دهنده بردار ویژگی i امین نمونه آموزشی است، b عبارت بایاس است و ε عرض اپسیلون-لوله را تعیین می‌کند.

در این تحقیق ε محدوده سرعت دوران را تعیین می‌کند و C

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ثابت گنجایش است که خطای مربوط به انحراف بیشتر از ε را کنترل می‌کند.

هنگامی کـه مـدل SVR آمـوزش داده شـده و بهینـه شـود، می‌توان از آن برای پیش بینی داده های دیده نشـده اسـتفاده کرد. مقدار پیش بینی شده $\bar{y}$ برای یک نمونه ورودی جدیـد x به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{y} = wx + b \quad (23)$$

در اینجا w و b فراسنجه‌های آموخته شده از مرحلـه آمـوزش هستند.

۲-۷- شبیه‌سازی ایستگاه پمپاژ

شکل ۵ قابلیت‌هـای مـدل ارائـه شـده بـرای ایسـتگاه پمپـاژ زاهدان را که در محیط متلب کدنویسـی و شبیه‌سـازی شـده است را نشان می‌دهد. ورودی‌هـای مـدل عبارتانـد از : دبـی ورودی فاضلاب به ایسـتگاه، ویژگی‌هـای هندسـی ایسـتگاه و تعداد پمپ‌هایی که در مدار قـرار گرفتـه اسـت. خروجی‌هـای مدل شامل دبی پمپاژ، ارتفاع سطح پمپاژ، دور پمـپ و میـزان مصرف انرژی در هر لحظه کارکرد ایستگاه پمپاژ می‌باشد

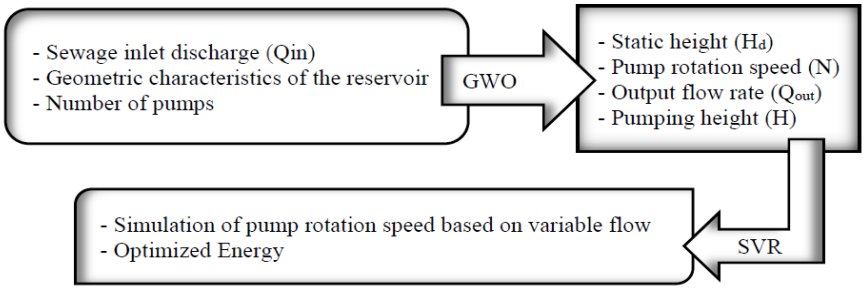

Fig. 5 A view of the studied system in MATLAB software

شکل۵ نمایی از نظام بررسی شده در نرم افزار متلب

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل بهینه‌سازی به کمک الگـوریتم گرگ خاکستری و سامانه با دور ثابت

مدل بهینه‌ساز با پنجره‌های زمـانی ۳۰ ، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقـه‌ای و همچنین سامانه با دور ثابت (کلاسیک) نیز که سرعت پمپ در آن ۳۰۰۰ دور در دقیقه است با پـیش فرض‌هـای مختلـف αها 0.5، 1 و 1.5 و βها 0.25، 0.5 و 0.75 برای داده‌های دبـی ورودی اعمال شده و مقدار انرژی‌ها با توجه به میانگین دبی‌ها در سال ۱۴۰۰ هم برای مدل بهینه‌ساز و هم سامانه ثابـت بـه دست آمده است. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نشـان داده شده که در این جدول E_{ref} انرژی مرجع روزانـه، E_{cs} انـرژی پمپاژ بـا دور ثابـت ، E_{opt} انـرژی پمپـاژ بـا دور بهینـه، η_{opt} عملکرد برنامه‌ریزی بهینه ، η_{cs} عملکرد پمپاژ با دور ثابـت و ε برتری‌های عملکرد بهینـه در مقایسـه بـا حالـت دور ثابـت را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳ هر پیش فرض با پنجره زمـانی ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه‌ای مقـداردهی شـده و نتـایج انرژی‌هـا و عملکـرد پمپاژ با دور ثابت و متغیر در آن قـرار گرفتـه اسـت. شـکل ۶ میزان انرژی مورد نیاز برای پمپاژ که توسط مدل بهینه‌ساز بـه دست آمده با انرژی پمپاژ با دور ثابت و انرژی مرجع روزانه در پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای را بر مبنای α و β متفـاوت مقایسـه می‌کند. همان طور که در جدول ۳ و شـکل ۶ دیـده می‌شـود هنگامی که جریان ورودی کاهش پیدا می‌کند (α=1.5) مقدار انرژی و عملکرد در پمپ دور ثابت به دور بهینه نزدیـک شـده ولی هنگامی که دبی بیشتر می‌شود (α=0.5) انرژی و عملکرد پمپ دور متغیر در فاصله بیشتری از دور ثابت قـرار می‌گیـرد، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش دبی عملکرد پمپاژ بـا پمـپ دور متغیر بهتر از پمپ با دور ثابت اسـت و بـرعکس. در ایـن پژوهش برای هر یـک از پنجره‌هـای زمـانی دور پمـپ، دبـی خروجی، ارتفاع ایستایی و ارتفاع پمپ محاسبه شده تا در گـام بعد در مدل SVR استفاده شود.

شـکل‌های ۷ تـا ۹ تغییـر پـذیری‌های بـین عملکـرد بـا دور ثابت(ηcs) و عملکرد با دور متغیـر (ηopt) را بـر مبنـای α و β برای پنجره‌های زمانی مختلف ایستگاه زاهدان در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهند. در این نمودارها دیـده می‌شـود کـه بـا تغییـر دبی‌هـای ورودی بـه کمـک فراسـنجه α (بـا افـزایش α دبـی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی با پنجره‌های زمانی ۳۰ ، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه‌ای

Table 3 Optimization results with time windows of 30, 60 and 120 minutes

T	α	β	E_{ref}	E_{cs}	E_{opt}	η_{opt}	η_{cs}	ε
30	0.5	0.25	298.2418	1019.724	732.8461	0.4069	0.2925	1.391
30	0.5	0.5	530.2577	1053.107	893.3155	0.5936	0.5035	1.179
30	0.5	0.75	762.2737	1256.22	1085.403	0.7023	0.6068	1.157
30	1	0.25	202.0439	835.7968	661.8611	0.3053	0.2417	1.263
30	1	0.5	395.8096	931.4493	842.8721	0.4696	0.4225	1.105
30	1	0.75	589.5753	1121.331	1047.087	0.5631	0.5258	1.071
30	1.5	0.25	141.2296	756.5095	688.4483	0.2051	0.1867	1.099
30	1.5	0.5	280.0065	824.3013	772.4832	0.3625	0.3397	1.067
30	1.5	0.75	418.7833	930.8066	882.1074	0.4748	0.4499	1.055
60	0.5	0.25	298.2418	1019.724	712.8461	0.4184	0.2925	1.430
60	0.5	0.5	530.2577	1053.107	875.3155	0.6058	0.5035	1.203
60	0.5	0.75	762.2737	1256.22	1074.403	0.7095	0.6068	1.169
60	1	0.25	202.0439	835.7968	657.8611	0.3071	0.2417	1.270
60	1	0.5	395.8096	931.4493	825.8721	0.4793	0.4225	1.128
60	1	0.75	589.5753	1121.331	1027.087	0.5740	0.5258	1.092
60	1.5	0.25	141.2296	756.5095	653.4483	0.2161	0.1867	1.158
60	1.5	0.5	280.0065	824.3013	755.4832	0.3706	0.3397	1.091
60	1.5	0.75	418.7833	930.8066	868.1074	0.4824	0.4499	1.072
120	0.5	0.25	298.2418	1019.724	702.8461	0.4243	0.2925	1.377
120	0.5	0.5	530.2577	1053.107	862.3155	0.6149	0.5035	1.221
120	0.5	0.75	762.2737	1256.22	1065.403	0.7155	0.6068	1.130
120	1	0.25	202.0439	835.7968	639.8611	0.3158	0.2417	1.306
120	1	0.5	395.8096	931.4493	810.8721	0.4881	0.4225	1.149
120	1	0.75	589.5753	1121.331	1009.087	0.5843	0.5258	1.111
120	1.5	0.25	141.2296	756.5095	648.4483	0.2178	0.1867	1.167
120	1.5	0.5	280.0065	824.3013	749.4832	0.3736	0.3397	1.099
120	1.5	0.75	418.7833	930.8066	860.1074	0.4869	0.4499	1.082

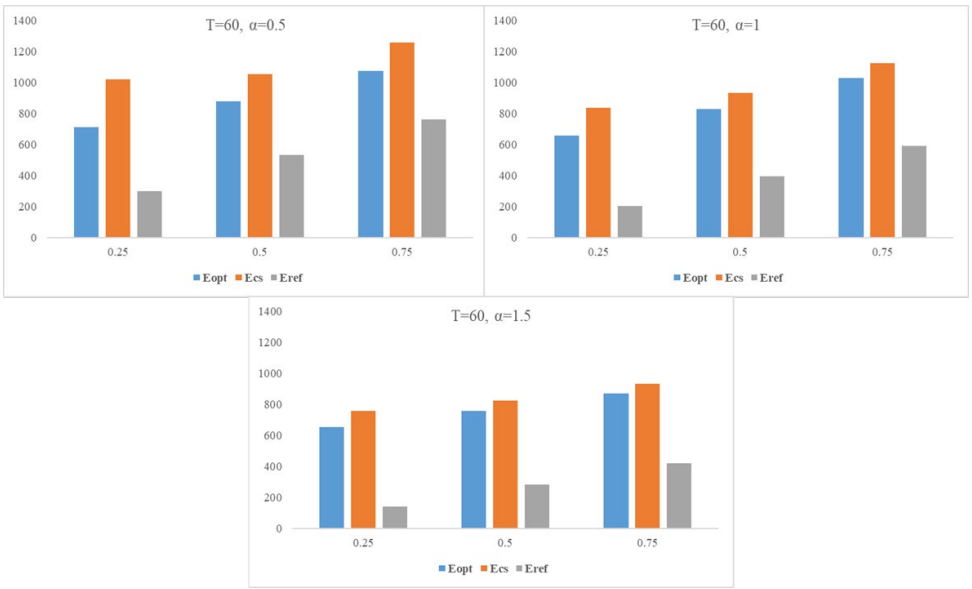

Fig. 6 Comparison of daily reference energy, constant and optimal pumping energy in a 60-minute time window

شکل۶ مقایسه انرژی مرجع روزانه، انرژی پمپاژ با سرعت ثابت و بهینه در پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

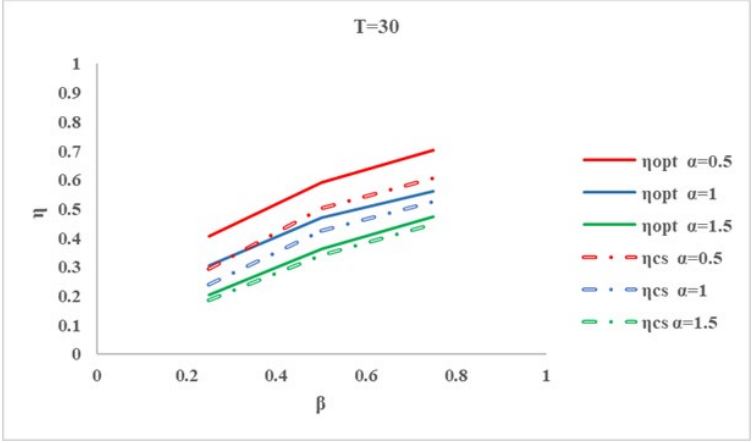

Fig. 7 Comparison of energy performance in pumping station with constant(ηcs) and variable speed(ηopt) for 30 minutes time window

شکل ۷ مقایسه عملکرد انرژی در ایستگاه پمپاژ با سرعت ثابت(ηcs) و متغیر(ηopt) برای پنجره زمانی ۳۰ دقیقه‌ای

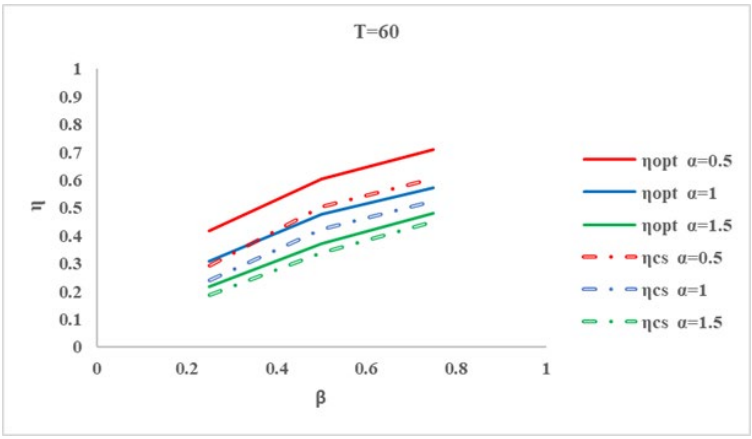

Fig. 8 Comparison of energy performance in pumping station with constant(ηcs) and variable speed(ηopt) for 60 minutes time window

شکل ۸ مقایسه عملکرد انرژی در ایستگاه پمپاژ با سرعت ثابت(ηcs) و متغیر(ηopt) برای پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای

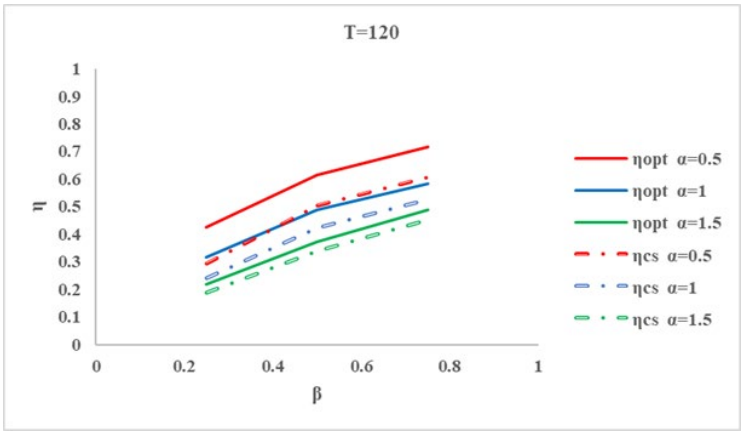

Fig. 9 Comparison of energy performance in pumping station with constant(ηcs) and variable speed(ηopt) for 120 minutes time window

شکل ۹ مقایسه عملکرد انرژی در ایستگاه پمپاژ با سرعت ثابت(ηcs) و متغیر(ηopt) برای پنجره زمانی ۱۲۰ دقیقه‌ای

کاهش و برعکس)، در صورت افزایش دبی‌های ورودی، عملکرد پمپ سرعت متغیر نسبت به پیش بهتر شده و برعکس، بدین صورت که فاصله‌ی دو نمودار عملکرد پمپ با سرعت متغیر و ثابت نسبت به هنگامی که دبی تغییری نکرده (α=1) با افزایش دبی (α=0.5) از یکدیگر بیشتر شده یعنی اختلاف عملکردهای سرعت متغیر و ثابت بیشتر شده و با

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کاهش دبی (α=1.5) این اختلاف کمتر شده است. همچنین فراسنجه β که تنظیم‌کننده دور پمپ است و افزایش مقدار آن موجب می‌شود که پمپ سرعت‌های بالاتری را اختیار کند، افزایش آن باعث افزایش عملکرد در هر دو نوع پمپ شده است. این بهینه‌سازی‌ها در سه پنجره‌ی زمانی ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه‌ای برای سال ۱۴۰۰ انجام شد که در همه‌ی آن‌ها عملکرد بهتر پمپ با سرعت متغیر نسبت به پمپ با سرعت ثابت دیده شده است. . این نتیجه در کار محققان دیگر نیز دیده شده که در ادامه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتایج تحقیقات آنان را در مورد پمپ‌های سرعت ثابت و متغیر دید.

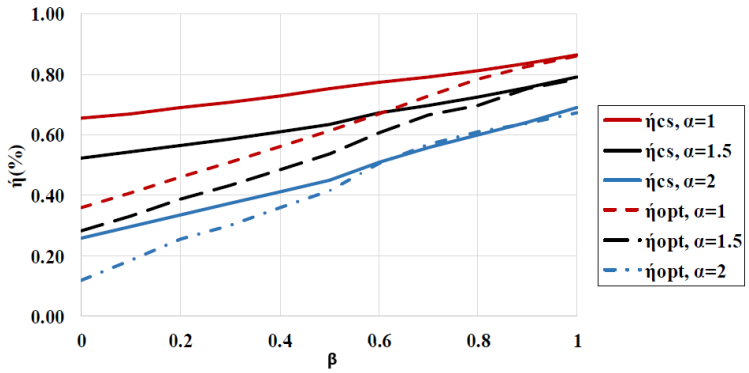

Fig. 10 Comparison of energy performance in pumping station with fixed and variable speed (Piri et al., 2021)

شکل۱۰ مقایسه عملکرد انرژی در ایستگاه پمپاژ با سرعت ثابت و متغیر (Piri et al., 2021)

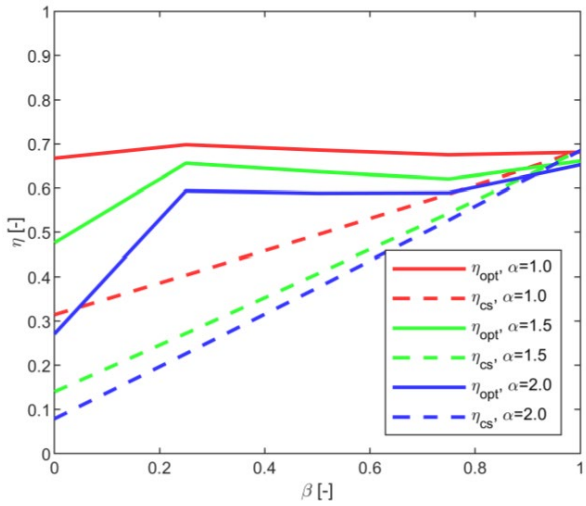

Fig. 11 Comparison of energy performance in pumping station with constant and variable speed (Fecarotta et al, 2018)

شکل۱۱ مقایسه عملکرد انرژی در ایستگاه پمپاژ با سرعت ثابت و متغیر (Fecarotta et al, 2018)

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ برتری‌های عملکرد پمپاژ بهینه در مقایسه با حالت سرعت ثابت را که از تقسیم انرژی کنترل ثابت (Ecs) بر انرژی بهینه (Eopt) به دست می‌آید (فراسنجه ε) را بر مبنای α و β برای ایستگاه زاهدان در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهند. همان طور که در هر سه پنجره زمانی ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه‌ای دیده می‌شود افزایش دبی (α کوچکتر)، ε بزرگ‌تری را سبب شده است. این افزایش ε بدین معنی است که انرژی مصرفی پمپ سرعت متغیر از سرعت ثابت کمتر و در نتیجه سودهی آن بیشتر است. با افزایش β که موجب استفاده پمپ از سرعت‌های بالاتر می‌شود در دبی‌های یکسان (α برابر)، دیده شد که مقدار ε روند کاهشی دارد بدین علت که پمپ سرعت متغیر در βهای بالاتر عملکردی مانند پمپ سرعت ثابت پیدا کرده است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

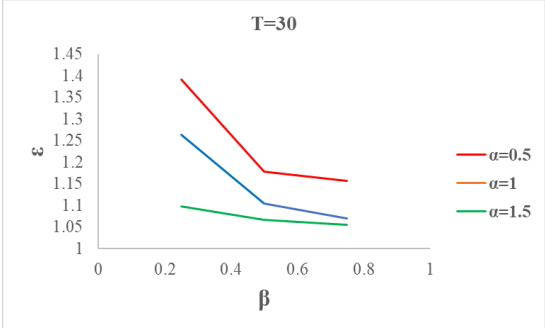

Fig. 12 Comparison of ε with different β and α in 30 minutes time window

شکل ۱۲ مقایسه ε با β و α مختلف در پنجره زمانی ۳۰ دقیقه‌ای

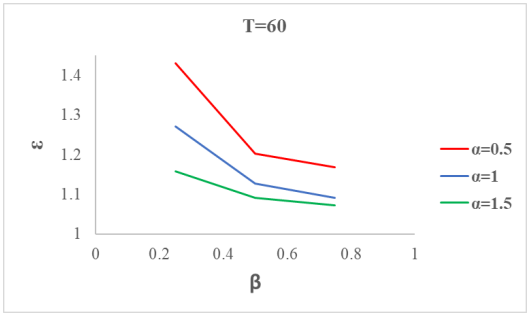

Fig. 13 Comparison of ε with different β and α in 60 minutes time window

شکل ۱۳ مقایسه ε با β و α مختلف در پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای

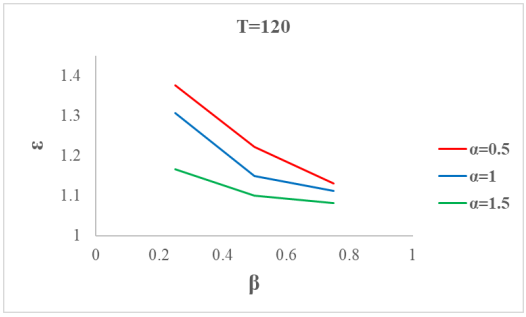

Fig. 14 Comparison of ε with different β and α in 120 minutes time window

شکل ۱۴ مقایسه ε با β و α مختلف در پنجره زمانی ۱۲۰دقیقه‌ای

۳-۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی دور و انرژی پمپ

شبیه‌سازی دور پمپ بهینه شده و انرژی آن برای ایستگاه پمپاژ زاهدان در سال ۱۴۰۰ با ورودی‌های ارتفاع ایستایی، ارتفاع پمپاژ ، دبی ورودی و خروجی با مدل بردار پشتیبان انجام و نتایج شبیه‌سازی با نتایج الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری مقایسه شده است. ضریب همبستگی برای مقایسه این نتایج در سال ۱۴۰۰ برای دور پمپ 0.9996 تا 0.9999 و برای انرژی 0.9976 تا 0.9999 را نشان می‌دهد. این نتایج نشان دهنده قدرت بالای رگرسیون بردار پشتیبان در شبیه‌سازی و همچنین الگوریتم گرگ خاکستری در بهینه‌سازی است. در شکل ۱۵ نمودارهای مقایسه‌ای بین نتایج بهینه شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری و شبیه‌سازی شده توسط رگرسیون بردار پشتیبان برای دور پمپ و شکل ۱۶ برای انرژی پمپ را در پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای نشان می‌دهند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مسئله بهینه‌سازی با توجه به برنامه‌ریزی پمپ در ایستگاه پمپاژ زاهدان برای سال ۱۴۰۰ انجام شد. متغیر اصلی دور پمپ بود که توانایی تغییر در محدوده ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه را داشت. در آغاز با توجه به اینکه داده‌های دبی ورودی به ایستگاه به صورت ساعتی اندازه‌گیری شده و نیاز به تولید داده به صورت یک دقیقه‌ای بود، تولید داده‌ها به صورت تصادفی با توزیع نرمال و روش مونت کارلو انجام شد. در مرحله بهینه‌سازی انرژی این داده‌ها به مدل بهینه‌ساز الگوریتم گرگ خاکستری داده و ارتفاع پمپاژ، ارتفاع ایستایی، دبی پمپاژ، دور پمپ و زمان روشن و خاموش شدن پمپ تولید شد پس از آن عملکرد پمپ حاصل شد. همچنین این متغیرها برای پمپ با دور ثابت (ایستگاه پمپاژی که پمپ تنها در سرعت بیشینه‌ای خود، کار می‌کند و آغاز و توقف‌هایش تنها با استفاده از سطح آب کنترل می‌شود) نیز محاسبه شد. نتایج عملکرد عملکرد بهتر پمپاژ با سرعت متغیر را نشان داد به طوری که عملکرد پمپاژ با سرعت متغیر در حدود 0.1 از سرعت ثابت بیشتر بود. با افزایش دبی ورودی دیده شد که عملکرد پمپاژ با سرعت متغیر حتی نسبت به پیش از آن نیز بهتر شده و از عملکرد با سرعت ثابت فاصله می‌گیرد که این نشان دهنده مصرف انرژی کمتر پمپاژ با سرعت متغیر نسبت به سرعت ثابت است. در گام بعد شبیه‌سازی دور و انرژی پمپ توسط رگرسیون بردار پشتیبان صورت گرفت. مقایسه نتایج رگرسیون بردار پشتیبان و گرگ خاکستری توسط ضریب همبستگی اعدادی بزرگ‌تر از

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

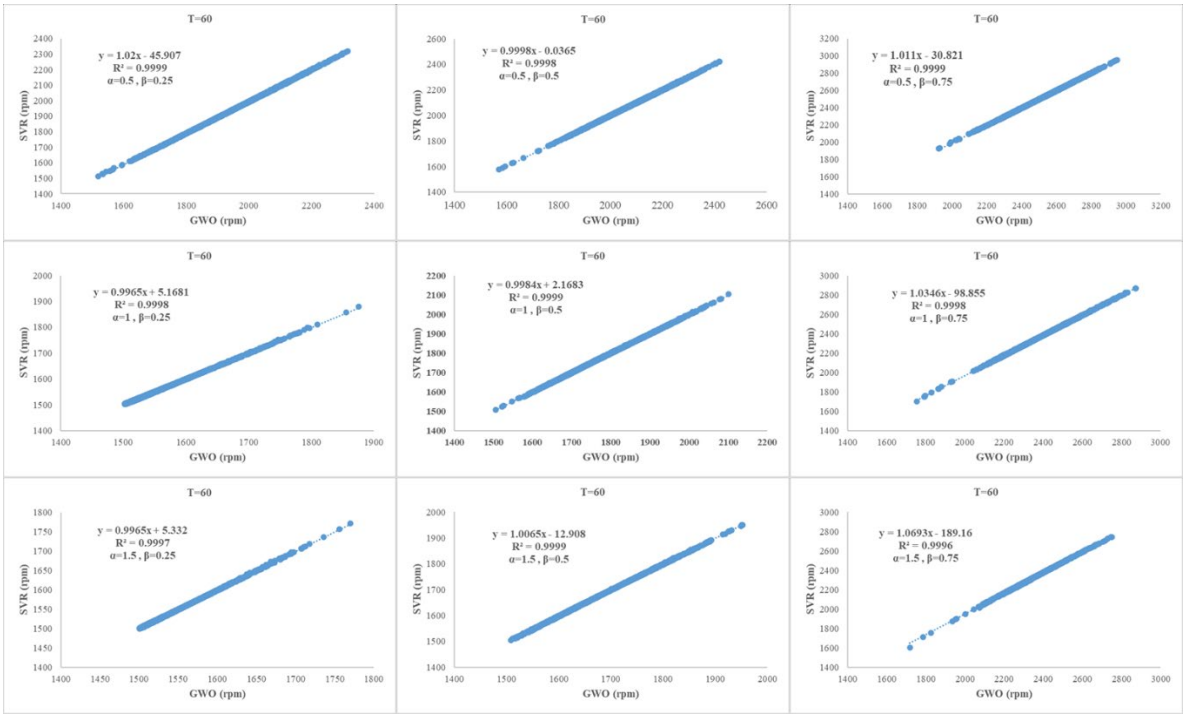

Fig. 15 Comparison graphs of SVR and GWO Pump rotation speed with a 60 minute time window at different α and β

شکل۱۵ نمودارهای مقایسه دور پمپ SVR و GWO با پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای در α و βهای مختلف

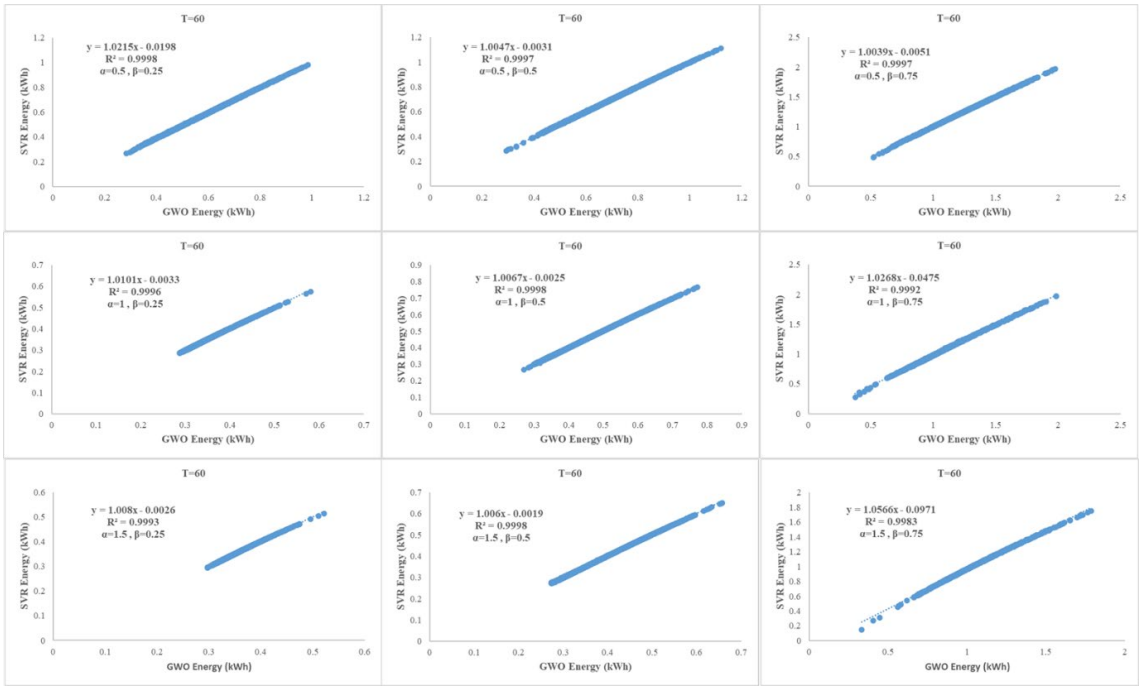

Fig. 16 Comparison graphs of SVR and GWO energy with 60-minute time window at different α and β

شکل۱۶ نمودارهای مقایسه انرژی SVR و GWO با پنجره زمانی ۶۰ دقیقه‌ای در α و βهای مختلف

0.996 را نشان داد که خود نشان از عملکرد خوب، هم رگرسیون بردار پشتیبان در شبیه‌سازی و هم الگوریتم گرگ خاکستری در بهینه‌سازی است. در کل با توجه به این پژوهش استفاده پمپ‌های دور متغیر به جای دور ثابت به جهت کاهش مصرف انرژی تاکید و توصیه می‌شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

BEP نقطه بهترین عملکرد

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$c_e^3, c_e^2, c_e^1, c_e^0$	ضریب‌های رگرسیون منحنی عملکرد نسبی
c_h^2, c_h^1, c_h^0	ضریب‌های رگرسیون منحنی هد
e	عملکرد نسبی
E	انرژی مورد نیاز پمپاژ (kwh)
E_{CS}	انرژی مورد نیاز پمپاژ با دور ثابت
E_{opt}	انرژی پمپاژ مورد نیاز ناشی از بهینه‌سازی
E_{ref}	انرژی مرجع روزانه
H	بار پمپ شده (m)
H_d	بار ایستایی
H_N	بار پمپ شده در دور پمپ N
$H_{N_{max}}^{BEP}$	بار پمپ شده در دور پمپ N_{max} و BEP پمپ
H_w	سطح آب درون آبگاه (m)
H_w^{max}	سطح بیشینه مجاز آب درون آبگاه
H_w^{min}	سطح کمینه مجاز آب درون آبگاه
i	پایین نویس نشان دهنده‌ی مرحله زمانی i ام
I	سوییچ پمپ
K	ضریب هدر رفت بار
N	دور پمپ (rpm)
N_{max}	بیشینه دور پمپ
P	توان پمپ شده (kw)
$P_{N_{max}}$	توان پمپ شده در دور N_{max}
$p_{N_{max}}$	نسبت بین $P_{N_{max}}$ و N_{max} (kw/rpm)
Q	تخلیه پمپ شده (m^3/s)
$Q_{N_{max}}^{BEP}$	تخلیه پمپ در BEP خود برای سرعت چرخش بیشینه
Q_{in}	تخلیه دبی ورودی
Q_{max}^{in}	بیشینه تخلیه دبی ورودی
Q_{out}	تخلیه دبی خروجی
A	سطح مقطع آبگاه (m^2)
T	پنجره‌ی زمانی (min)

نشانه‌های یونانی:

α	نسبت بین $Q_{N_{max}}^{BEP}$ و Q_{max}^{in}
β	نسبت بین بار ایستایی و $H_{N_{max}}^{BEP}$
Δt	طول هر مرحله زمانی (min)
ε	برتری‌های عملکرد بهینه در مقایسه با حالت دور ثابت
η^{BEP}	بازده پمپ در BEP خود
η_{CS}	بازده با سرعت چرخش ثابت
η_N^{BEP}	بازده پمپ در BEP خود در دور N
$\eta_{N_{max}}^{BEP}$	عملکرد پمپ در BEP خود در بالاترین دور
η_{opt}	عملکرد با دور متغیر(بهینه)

۶- منبع‌ها

Asadi, A., Verma, A., Yang, K. & Mejabi, B. (2017). Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach. *Journal of environmental management, 203*, 630-639.

Chen, H., Mizumoto, M. & Ling, Y. (1992). Automatic control of sewerage pump station by using fuzzy controls and neural networks. Paper presented at the Proc. of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks.

De Keyser, W., Amerlinck, Y., Urchegui, G., Harding, T., Maere, T. & Nopens, I. (2014). Detailed dynamic pumping energy models for optimization and control of wastewater applications. *Journal of Water and Climate Change, 5*(3), 299-314.

Fecarotta, O., Carravetta, A., Morani, M.C. & Padulano, R. (2018). Optimal pump scheduling for urban drainage under variable flow conditions. *Resources, 7*(4), 73, https://doi.org/10.3390/resources7040073.

Fiter, M., Güell, D., Comas, J., Colprim, J., Poch, M. & Rodríguez-Roda, I. (2005). Energy saving in a wastewater treatment process: an application of fuzzy logic control. *Environmental technology, 26*(11), 1263-1270.

Han, H.-G., Zhang, L., Liu, H.-X. & Qiao, J.-F. (2018). Multiobjective design of fuzzy neural network controller for wastewater treatment process. *Applied Soft Computing, 67*, 467-478.

Han, H.-g., Zhang, L. & Qiao, J.-f. (2017). Data-based predictive control for wastewater treatment process. *Ieee Access, 6*, 1498-1512.

Mahmoud, M., Ramadan, M., Naher, S., Pullen, K., Baroutaji, A. & Olabi, A.-G. (2020). Recent advances in district energy systems: A review. *Thermal Science and Engineering Progress, 20*, 100678, https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100678.

Ormsbee, L.E. & Lansey, K. E. (1994). Optimal control of water supply pumping systems. *Journal of Water Resources Planning and Management, 120*(2), 237-252.

Piri, J., Pirzadeh, B., Keshtegar, B. & Givehchi, M. (2021). Reliability analysis of pumping station for

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Torregrossa, D., Hansen, J., Hernández-Sancho, F., Cornelissen, A., Schutz, G. & Leopold, U. (2017). A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants. *Applied energy, 208*, 1430-1440.

Yagi, S. & Shiba, S. (1999). Application of genetic algorithms and fuzzy control to a combined sewer pumping station. *Water Science and Technology, 39*(9), 217-224.

sewage network using hybrid neural networks-genetic algorithm and method of moment. *Process Safety and Environmental Protection, 145*, 39-51.

Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C. & Asensio-Fernández, R. (2006). Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms. *Aquacultural Engineering, 35*(3), 283-291.

Syafiie, S., Tadeo, F., Martinez, E. & Alvarez, T. (2011). Model-free control based on reinforcement learning for a wastewater treatment problem. *Applied Soft Computing, 11*(1), 73-82.

© 2025 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Archive of SID.ir