

Optimization of wastewater pumping system in variable flow conditions with genetic algorithm model and neural network

Jamshid Piri^{1*}, Bahareh Pirzadeh², Behrooz Keshtegar³, Mohammad Givchchi²

¹ Assistant Professor, Department of Water, Faculty of Water and Soil, Zabol University, Zabol, Iran

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Nighbakht Faculty of Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Zabol University, Zabol, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Nighbakht Faculty of Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Corresponding author Email: j.piri@pgs.usb.ac.ir

Received: 1 Jan. 2022
Accepted: 7 June 2022



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This research focuses on the rotational speed of the pump and the frequent pattern of inlet flow rate. For this purpose, an optimization method for setting up a pump in a sewage pumping station under variable inlet flow was presented and a random model was calibrated on real data to generate inlet flow patterns and several system conditions. Also, an optimization model based on genetic algorithm and neural network was used to minimize the energy required for pumping. Based on the optimal method taken from the genetic algorithm, the energy required for pumping was optimized. Optimal design data including pumping flow, inlet flow, static height and pumping height were developed as the input of the neural network model to simulate the pump cycle speed. Using data from genetic algorithm and neural network models, the amount of optimized energy and pump efficiency were calculated.

Keywords: Sewage pumping plant, Variable flow, Energy optimization, Genetic algorithm, ANN.

Introduction: Sewage pumping stations (SPS) are one of the essential components of the wastewater transfer, therefore, modeling of urban sewage stations is a critical step for improving the overall efficiency of the operation of the municipal sewage disposal system. There are often ambiguities in the design of pumping station engineering, and reliability analysis is definitely used to ensure its performance. The use of variable-speed pumps with higher flexibility in operating conditions can greatly reduce energy loss. So it is possible to combine variable and constant-speed pumps to meet the real needs of the system, this approach works well in pipelines with high friction losses, and if the pump is running at low speeds and discharges, it will have better overall efficiency than fixed-speed operation (Castro-Gama et al. 2017, Kusiak and Zhang, 2011). In recent years some authors (Kusiak et al. 2011, Benedetti et al. 2013, Dotto et al. 2014, Skworcow et al. 2014) have proposed various algorithms for optimization planning, these optimization algorithms have been different for variables and objective functions. Definition of the problem, the most findings from the latest published sources, the need for new optimization study to meet the real needs of SPS.

Methodology: The study adopts the data from the sewage pumping station of Zabol located in southeastern Iran Fig. 2. Hourly data were collected for nine months from the beginning of 2017. MATLAB Version 2014 was used for simulation and optimization the SPS Usually, the pump operates at a constant rotational speed and a relatively constant discharge rate while the inlet discharge is time-dependent, thus, the network frequency may not be optimal.

Therefore, an optimization problem was run on Zabol sewage pumping station. The main variable is the speed of the pump, which could take a desirable range. Minutely data was precluded by log-normal distribution and Monte-Carlo method. In the optimization stage, the variables of pumping flow, static height, speed of pump rotation and time of on and off of the pump are created. The next step is to simulate the speed of the pump rotation with an artificial neural network, which has been done with great precision. In the final stage, for two pumping stations, according to different scenarios, the amount of energy in both variable and constant modes is calculated. A comparison was conducted to show the capability of genetic hybrid algorithm for optimizing the energy.

Results and Discussion: The optimization model has been applied for different conditions. The volume of the wet well was 112m^3 and the minimum and maximum height of the wet well were 1 and 8 m, respectively, and the fixed level of the wet well was 16m^2 . These conditions have been considered for 9 months of the year. The values of β were simulated at 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1, resulting in different H head loss values. The values of Q_{out} (pumping discharge rate), H (static head), N_s (pump rotational speed), and H_{man} (pumping head) are calculated for each scenario. Table 1 to 9 has presented the statistical indicators such as maximum, mean and standard deviation of each parameter for each β value for each month. The values of energy required for the optimal solution, which is optimized by a hybrid model of a genetic algorithm and compared with a fixed control, indicate a fixed control (ie, a pumping station in which the pumps operate only at their maximum speed and start and stop only with Water level control can also be calculated. The results show the high accuracy of the combined genetic algorithm with the neural network in minimizing the energy consumed by the pump for the station. The overall efficiency results indicate a higher accuracy of the combined genetic algorithm compared to the fixed control (CS) shown in Table 2. This accuracy, even when the value was 2, indicates the superiority of the genetic combination algorithm in optimizing energy. In examining the station to optimize energy in terms of different scenarios, the accuracy of the genetic hybrid algorithm is still clearly visible (Table 2). Fig. 6 shows the relationship between constant and variable speeds to α and β for the Zabol station.

Conclusion: The amount of energy in both states of variable and constant pumping rate was calculated using the genetic hybrid algorithm. Optimization results showed that with an optimal rotational speed of pumps the desired energy savings can be pursued. In most scenarios, energy can be saved up to 50%. Moreover, the efficiency of the optimal system can be increased by the difference between the maximum pump flow and the reduction of the inlet flow.

© 2022 University of Zabol, Zabol, 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/>)

بهینه‌سازی سیستم پمپاژ فاضلاب در شرایط جریان متغیر با مدل الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی

جمشید پیری^{۱*}، بهاره پیرزاده^۲، بهروز کشته‌گر^۳، محمد گیوه‌چی^۴

^۱ استادیار گروه آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲ دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۳ دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۴ استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: i.piri@uoz.ac.ir

وب‌گاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۱۷

چکیده: مقاله حاضر به برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه پمپاژ فاضلاب در شرایط جریان متغیر با مدل الگوریتم ژنتیک پرداخته است. این تحقیق بر سرعت دورانی پمپ و الگوی مکرر دبی جریان ورودی تمرکز دارد. بدین منظور یک روش بهینه‌سازی را برای تنظیم یک پمپ در یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب تحت جریان ورودی متغیر ارائه گردید و مدل تصادفی بر روی داده‌های واقعی برای ایجاد الگوهای جریان ورودی کالیبره و چندین شرایط سیستم شبیه‌سازی شد. همچنین یک مدل بهینه‌ساز مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، برای به حداقل رساندن انرژی مورد نیاز پمپاژ بکار گرفته شد. بر اساس روش بهینه برگرفته از الگوریتم ژنتیک انرژی مورد نیاز پمپاژ بهینه گردید. داده‌های بهینه حاصل از طراحی شامل دبی پمپاژ، دبی ورودی، ارتفاع استاتیکی و ارتفاع پمپاژ به عنوان ورودی مدل شبکه عصبی برای شبیه‌سازی سرعت دوران پمپ توسعه یافت. با به‌کارگیری داده‌های حاصل از مدل‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، میزان انرژی بهینه شده و راندمان پمپ محاسبه گردید. نتایج نشان داد جریان متغیر راندمان بالاتری نسبت به جریان ثابت دارد و استفاده از جریان با سرعت متغیر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در انرژی شود. همچنین، نتایج به‌خوبی دقت شبکه عصبی را در شبیه‌سازی میزان سرعت دوران پمپ نشان داد به نحویکه میزان R2 در ایستگاه پمپاژ زابل از ۰/۹۷ تا ۱ تغییر کرد.

کلیدواژه‌ها: ایستگاه پمپاژ زابل، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی، سرعت دوران پمپ

۱- مقدمه

زندگی داشته باشند. در این زمینه، مصرف انرژی نقش مهمی ایفا می‌کند، زیرا سوخت‌های فسیلی هنوز هم منبع اصلی انرژی هستند و افزایش تقاضای انرژی نشان‌دهنده انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است، که هم بر

امروزه توجه زیادی به مشکلات زیست‌محیطی می‌شود که ممکن است تاثیر زیادی بر تغییرات آب و هوایی و کیفیت

گرم شدن کره زمین و هم آلودگی هوا تاثیر می‌گذارد.

کاهش مصرف انرژی یکی از اهداف صنایع است، و صنعت آب یک مصرف‌کننده انرژی بزرگ است که توسط تحقیقات جهانی در زمینه مصرف انرژی نشان داده شده است (Mamade et al. 2017; Ramos et al. 2019; Su and Karney 2015). در واقع، هزینه‌های انرژی بخشی از بزرگ‌ترین هزینه‌های مصرف آب در سراسر جهان را تشکیل می‌دهند و می‌توانند تا ۶۵ درصد از بودجه عملیاتی سالانه یک مصرف‌کننده آب را مصرف کنند (Ostojin et al. 2011). در انگلستان مصرف انرژی به ۹۰۱۶ گیگاوات ساعت در سال، در سال ۲۰۱۲ رسید (Water 2008)، و در سال ۲۰۰۶ انرژی مورد نیاز برای خدمات فاضلاب (جمع‌آوری، تصفیه، تخلیه و مدیریت لجن) ۶۳۴ کیلووات ساعت در هر مایل بود (Water 2008).

در ایالات متحده ۴ میلیارد دلار در سال صرف عملیات و نگهداری ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود (Zilberman et al. 2008)، و ۴٪ از کل مقدار برق ملی مصرف‌شده در ایالات متحده را تشکیل می‌دهد (Castro-Gama et al. 2017). بنابراین تصفیه خانه‌های فاضلاب (WWTPs¹) تجهیزات مصرف‌کننده انرژی هستند و ۴٪ برق الکتریکی جهان را برای تصفیه آب فاضلاب و حرکت دادن آنها مصرف می‌کنند (Fecarotta et al, 2018).

کاهش در انرژی پمپاژ که در شبکه‌های آبی استفاده می‌شود یکی از کارهایی هست که در مفهوم بازیابی انرژی و راندمان مستتر است. در یک ایستگاه پمپاژ، پمپ‌ها معمولاً در خطوط مختلف برای تامین ارتفاع اضافی به منظور بالابردن آب از یک سطح پایین‌تر به یک سطح بالاتر استفاده می‌شوند. سیستم‌های پمپاژ درون شبکه‌های تامین آب و فاضلاب معمولاً با چندین پمپ مجهز شده است. کمترین تعداد آن ۲ می‌باشد که یکی از آنها برای هدف جایگزینی است.

سیستم‌های پمپاژ معمولاً برای کار در سرعت ثابت و شرایط هیدرولیکی ثابت طراحی می‌شوند که به بهترین نقطه راندمانی پمپ نزدیک می‌باشد. بنابراین، این طراحی

برای داشتن بهترین عملکرد ممکن می‌باشد. پس از طراحی این مدل، برای داشتن بهترین عملکرد، ممکن است تعدادی پمپ در سیستم و شرایط عملیاتی آنها (به عنوان مثال؛ تخلیه متغیر و سطح مخزن متغیر)، برای عملکرد بهینه سیستم به یک برنامه‌ریزی نیاز داشته باشد. استفاده از پمپ دور متغیر که در شرایط بهره‌برداری، انعطاف‌پذیری بیش‌تری دارد، می‌تواند تا حد زیادی از اتلاف انرژی جلوگیری کند. پس، می‌توان ترکیب پمپ‌های دور متغیر و دور ثابت را برای تامین نیاز واقعی سامانه به کار گرفت، این رویکرد در خط‌های لوله با تلفات اصطکاکی زیاد به‌خوبی کار می‌کند و اگر پمپ با سرعت و تخلیه کم به‌مدت بیشتری کار کند، در مقایسه با عملکرد با سرعت ثابت، انرژی مصرفی الکتریکی کاهش پیدا می‌کند (Afshar 2007; De Paola et al. 2017).

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مختلفی جهت برنامه‌ریزی بهینه ارائه شده است، این الگوریتم‌های بهینه‌سازی، برای متغیرها و تابع‌های هدف، متفاوت بوده است (Fecarotta et al. 2018). برای تکامل الگوریتم‌ها جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی در شبکه‌های آبی از برنامه‌نویسی خطی (Jowitt and Germanopoulos 1992) و برنامه‌نویسی غیرخطی و دینامیکی استفاده شده است ولی از آنجایی که این روش‌ها قیودهای مسئله را بیش از حد ساده کرده‌اند، جواب‌های خوبی به‌دست نیاورده‌اند (DAJANI et al. 1977).

اخیراً، الگوریتم‌های هوش مصنوعی مثل الگوریتم ژنتیک، مورچگان، فاخته و هارمونی در شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی اعمال می‌شوند (De Paola et al. 2017). استفاده از هوش مصنوعی زمان محاسبات را بهبود می‌بخشد و کنترل بهتر سیستم‌های پمپاژ را فراهم می‌سازد.

در سال‌های اخیر، برخی نویسندگان (Rao and Alvarruiz 2007) یک مدل راندمان انرژی را برای برنامه‌ریزی پمپ با چند تابع هدف، توسعه داده‌اند. پولنو و همکاران با استفاده از رابطه‌سازی غیرخطی الکتروپمپ‌ها بیان کردند که این روابط باعث ساده‌سازی و افزایش سرعت حل مسئله بهینه‌سازی در کاهش هزینه‌های مصرف انرژی خواهد شد

¹ Wastewater Treatment Plant

فاضلاب از شهر زابل که در جنوب شرقی کشور ایران واقع شده، استفاده گردیده است (شکل ۲). این داده‌ها به صورت ساعتی در هر شبانه روز و در مدت ۹ ماه از اول سال ۲۰۱۷ بوده و واحد آنها لیتر بر ثانیه است.

۲-۲- طراحی آبگاہ برای ایستگاه‌ها (مشخصات هندسی)

ساخت ایستگاه پمپاژ زمانی نیاز است که سطح آب پایین تر از سطح تخلیه می‌باشد و یا زمانی که میزان خروج از سیستم کمتر از میزان ورودی به آن باشد. دبی ورودی آب در آبگاہ ذخیره می‌شود که پمپ غوطه‌ور در آن قرار دارد. پمپ آب را از طریق لوله‌های تحت فشار به سمت سیستم برداشت دیگر (مثلا کانال یا مخزن) آب بالا می‌برد. معمولا، پمپ در سرعت دورانی ثابت و تخلیه نسبتا ثابتی کار می‌کند در حالی که دبی ورودی به زمان وابسته است. فرکانس شبکه بهینه نشده باشد، سرعت موتور (N) به حداکثر مقدار خود N_{max} می‌رسد.

تفاوت بین دبی ورودی و خروجی به‌خاطر تغییر سطح آب در مخزن روی می‌دهد. در شرایط کنترل کلاسیک (CS^1)، سرعت پمپ ثابت بر اساس سطح آب است. وقتی بالاتر از سطح شاخص برود، پمپ راه‌اندازی می‌شود در نتیجه تخلیه آن بالاتر از دبی ورودی بیشینه است. به این منظور، وقتی پمپ روشن شد، سطح آب کاهش پیدا می‌کند. چون سطح آب به کمترین مقدارش رسید، پمپ خاموش شده و این چرخه بار دیگر تکرار می‌شود. یک طرح از آبگاہ در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات هندسی مقطع براساس دبی ورودی فاضلاب و نوع پمپ طراحی خواهد گردید.

۲-۳- انتخاب پمپ

نوع تک پمپ استفاده شده در این تحقیق سانتریفیوژ با سرعت دوران ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ بود.

۲-۴- آنالیز اولیه و انتخاب مدل برنامه‌ریزی

بهترین تابع توزیع برازش شده (تابع توزیع لوگ نرمال) برای

(Puleo et al. 2014). ژانگ و همکاران با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، شروع به بهینه‌سازی انرژی پمپاژ نمودند و در نهایت باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش اطمینان شبکه مطابق با شرایط حاکم بر سیستم‌های آبی شد (Zhang et al. 2009). سان و همکاران هزینه‌های مصرف برق شبکه پمپاژ را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی نمودند و نشان دادند که این الگوریتم از کارایی بالایی جهت بهینه‌سازی انرژی برخوردار است (Sun et al. 2014).

یکی از آخرین روش‌های راندمان انرژی رویکرد داده‌کاوی است که شبکه‌های عصبی را برای توسعه مدل‌ها اعمال کرده است و مصرف انرژی پمپ و دبی پس از پمپاژ را پیش‌بینی می‌کند (Khatavkar and Mays 2017; Piri et al. 2021c; Piri et al. 2021b; Piri et al. 2021a). خروجی بهینه‌سازی مقادیری را که پمپ در یک زمان مشخص، روشن یا خاموش باشد توضیح می‌دهد (León-Celi et al. 2018). در این مدل‌ها گام‌ها به صورت یک ساعته است.

برای سیستم‌های پمپاژ فاضلاب کنترل اصلی با استفاده از سطح آب مخزن می‌باشد. معمولا برای پمپاژ آب از این مخازن به یک سیستم پمپاژ پیچیده برای رفتار غیرخطی دبی فاضلاب نیازمند هستیم. بنابراین برای کاهش مصرف انرژی باید یک سیستم کنترل را تولید کرده که توانایی مقابله با رفتار غیرخطی و پیچیده‌ی دبی ورودی فاضلاب در ایستگاه تصفیه فاضلاب را داشته باشد. در این تحقیق، میزان مصرف انرژی سیستم‌های پمپاژ بر اساس سرعت بهینه دوران پمپ با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی تعیین، و با میزان مصرف انرژی در سیستم پمپاژ با سرعت ثابت مقایسه می‌شود. به این منظور، یک برنامه کنترل سرعت دوران برای یک ایستگاه تک پمپی معرفی و توالی روشن و خاموش شدن پمپ بهینه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده‌های ایستگاه جمع‌آوری

¹. Control System

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln Q_{N,i}^{-\mu}}{\sigma}\right) - RN = 0 \quad \text{حل معادله} \quad \blacklozenge$$

برای بدست آوردن $Q_{N,i}$ بنابراین نتیجه خواهد داد:

$$E[Q_{N,i}] = 1 \quad (1)$$

$$E[Q_{N,i}^2] = e^{(2\mu+2\sigma^2)} \quad (2)$$

براساس معادله (۱) و (۲)، واریانس و انحراف معیار به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\operatorname{Var}[Q_{(N,i)}] = E[Q_{(N,i)}] - E[Q_{N,i}^2] = 1 - e^{(2\mu+2\sigma^2)} \quad (3)$$

$$SD[Q_{(N,i)}] = \sqrt{\operatorname{Var}[Q_{(N,i)}]} = \sqrt{1 - e^{(2\mu+2\sigma^2)}} \quad (4)$$

$\mu = \text{Average of } \ln Q_{N,i}$

$\sigma = \text{SD of } \ln Q_{N,i}$

بنابراین:

$$CV = \frac{\sqrt{\operatorname{Var}[Q_{N,i}]}}{E[Q_{N,i}]} \quad (5)$$

بنابراین می‌توان گفت که:

$$\mu' = \ln E[Q_{(N,i)}] - \frac{1}{2} \ln(1 + cv^2) = -\frac{1}{2} \ln(1 + cv^2) \quad (6)$$

$$\sigma' = \sqrt{\ln(1 + CV^2)} \quad (7)$$

در نهایت مقدار دبی در فاصله زمانی یک دقیقه محاسبه خواهد شد:

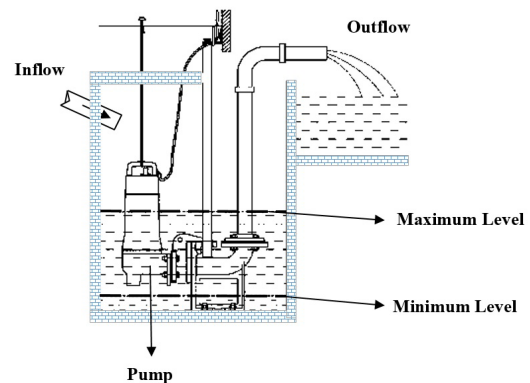


Fig. 1 The pumping station with a single submersible pump.

شکل ۱ طرح آبگاه ایستگاه پمپاژ با یک پمپ غوطه‌ور شونده.

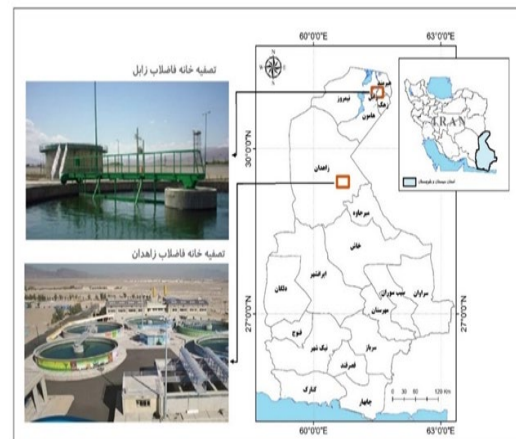


Fig. 2 The location of Zabol study station.

شکل ۲ موقعیت مکانی ایستگاه مورد مطالعه زابل

بدست آوردن احتمال دبی روزانه، استفاده شد. (Piri et al. 2021a; Piri et al. 2021b; Piri et al. 2021d). با کمک این توزیع، شبیه‌سازی دبی در فاصله زمانی یک دقیقه‌ای بر اساس تولید تصادفی از شبیه‌سازی مونت کارلو صورت گرفت. مراحل تولید تصادفی داده برای دبی به صورت زیر می‌باشد:

◆ فاصله زمانی داده‌ها برابر با ۱ ساعت

◆ تقسیم داده‌ها بر متوسط کل، تعریف شده $\bar{Q}_{\Delta t,i}$

◆ محاسبه $Q_{N,i}$ برای هر فاصله زمانی: $Q_{N,i} = \frac{Q_i}{\bar{Q}_{\Delta t,i}}$

◆ برای هر یک دقیقه، یک شماره تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌گردد.

بهتری دارند، نسل‌ها و کروموزوم‌های بهینه‌تری را تولید می‌کند تا در نهایت به یک جواب خوبی (بدون گشتن و امتحان کردن تمامی حالت‌ها) برسد (Zounemat et al. 2019). روش استفاده شده در این تحقیق مبتنی بر یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی ژنتیک بر مبنای مجموعه دستورالعمل‌های پاول^۳ است (Cimorelli et al. 2018). الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده بر اساس روش پاول، چندین برتری نسبت به الگوریتم برنامه‌نویسی کلاسیک دارد:

- ◆ بدون مشتق است، بنابراین نیاز به مشتقات اول نیست.
- ◆ همگرایی از نوع درجه دوم دارد.
- ◆ تابع هدف باید تک‌متغیره باشد، بنابراین نیازی به تابع محذب نیست (تابع یا شرط کمینه یا شرط بیشینه را محقق خواهد ساخت).
- ◆ به توابع نویزی چندان حساس نمی‌باشد، یعنی قادر به یافتن نقطه‌ی بهینه با سرعت زیاد.

محدودیت‌های مورد نظر در حل مسائل را می‌تواند به عنوان توابع جریمه‌ای تلقی کرد.

$$Q_i = Q_{N,i} * \bar{Q}_{\Delta,i} \quad (8)$$

۲-۵- شبیه‌سازی ایستگاه پمپاژ

شناسایی قابلیت‌های مدل ریاضی ارائه شده در ایستگاه پمپاژ زابل، بصورت برنامه‌نویسی شبیه‌سازی شده است (شکل ۳). ورودی‌های مدل، عبارتند از: دبی ورودی فاضلاب در ایستگاه، مشخصات هندسی ایستگاه و تعداد پمپ‌هایی که در مدار قرار گرفته‌اند. خروجی‌های مدل شامل دبی پمپاژ، ارتفاع سطح پمپاژ، دور پمپ و میزان مصرف انرژی در هر لحظه که از کار ایستگاه به دست می‌آیند، است.

بنابراین متوسط داده‌های بدست آمده از روش مونت کارلو در بازه زمانی یک دقیقه (هر ماه) با مدل هیبریدی الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی مقادیر بهینه‌ی ارتفاع، توان، خروجی پمپ و دور پمپ را نتیجه می‌دهد. فلوچارت بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک - شبکه عصبی در شکل ۴ آورده شده است.

۲-۶- الگوریتم ژنتیک

در واقع الگوریتم ژنتیک، با انجام عملیات برش^۱، جهش^۲ و دادن احتمال انتخاب بیشتر به کروموزوم‌هایی که ژن‌های

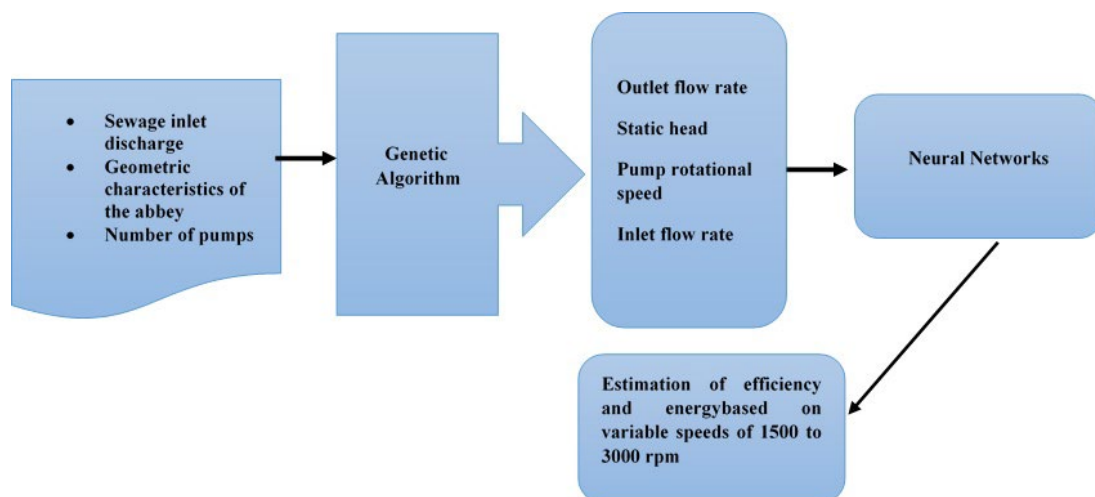


Fig. 3 The system studied in MATLAB software.
شکل ۳ نمایی از سیستم مورد مطالعه در نرم افزار متلب

³. Powell Direction Set

¹. Crossover

². Mutation

۲-۷- شبکه عصبی مصنوعی

در مطالعه حاضر از یک شبکه عصبی مصنوعی مولتی لایر پرسپترون استفاده می‌شود که دارای ۵ عنصر است (Piri et al. 2009). عناصر اول X ها شامل دبی ورودی، ارتفاع استاتیکی، ارتفاع پمپاژ و دبی خروجی می‌باشند. اینها همان ورودی‌های ما (نرون های ورودی) هستند که از مجموعه‌ی داده‌ها استفاده می‌کنند. در واقع ورودی الگوریتم، همین Xها هستند که در این تصویر از X_1 تا X_m وجود دارند. عناصر دوم، وزن‌ها هستند. در شبکه‌های عصبی هر کدام از Xها یک وزن دارد که با W نمایش می‌دهیم.

همان‌طور که مشاهده می‌کنید هر کدام از ورودی‌های ما به یک وزن متصل شده است. در واقع هر ورودی بایستی در وزن خود ضرب شود. مثل X_1 که یک وزن به اسم W_1 دارد. عنصر سوم، در شبکه‌ی عصبی تابع جمع (سیگما) است که حاصل ضرب X ها در W ها را با هم جمع می‌کند. عنصر چهارم، یک تابع فعال‌سازی است که تابع مورد استفاده شده

در این مدل تابع گوسین بوده است. عنصر پنجم و آخر نیز خروجی شبکه‌ی عصبی که سرعت دوران پمپ می‌باشد. لازم به ذکر است که شبکه عصبی پرسپترون با هشت نرون در لایه پنهان با تابع انتقال گوسین و تابع انتقال خطی برای نرون خروجی جهت مدل‌سازی طراحی و آموزش داده شده است. همچنین فلوچارت ترکیبی الگوریتم ژنتیک با شبکه عصبی در شکل ۴ آورده شده است.

بر طبق قانون پیوستگی و بقای جرم در آبگاہ (۹) است:

$$\frac{dv}{dt} = Q_{in} - Q_{out}, v = H \times A \quad (1)$$

V: حجم آب داخل آبگاہ

A: سطح مقطع آبگاہ

طبق معادله (۱۰) ما بر اساس دور پمپ باید مقدار تخلیه از پمپ را داشت:

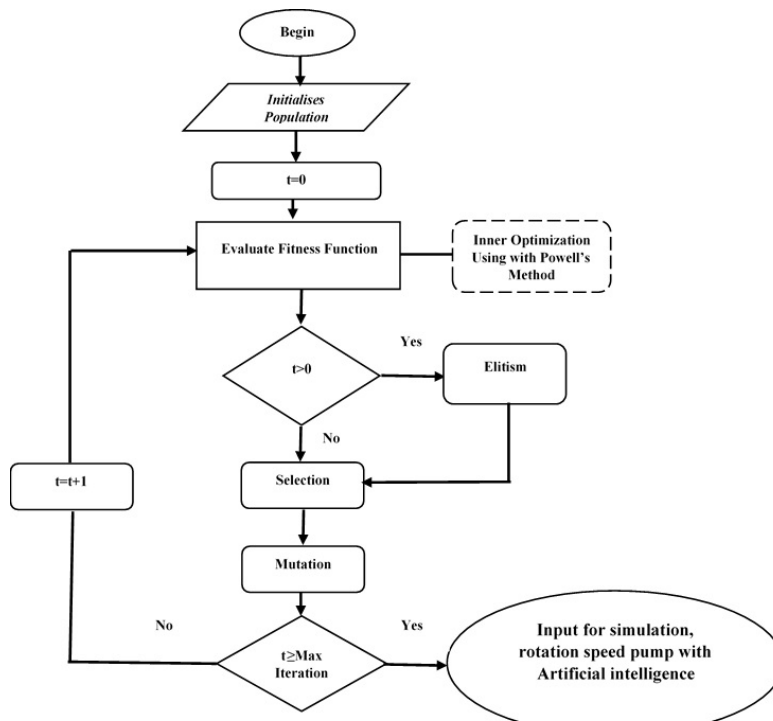


Fig. 4 The flowchart of Genetic Algorithm Hybrid Program.

شکل ۴ فلوچارت برنامه هیبرید الگوریتم ژنتیک.

$$A \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad \text{if } H \geq H_{Min} \text{ and } H \leq H_{Max} \rightarrow 1500 \leq \text{RPM} \leq 3000 \quad (2)$$

براساس معادله (۱۱) محاسبات را جهت حل معادله (۱۰) ادامه داد:

$$A \frac{H(t) - H(t-dt)}{dt} = 0.5 [Q_{in}(t) + Q_{in}(t-dt)] - 0.5 [Q_{out}(t) + Q_{out}(t-dt)] \quad (3)$$

N_s : دور پمپ

براساس معادله (۱۱) ارتفاع استاتیکی حاصل شد:

a_h, b_h , and c_h : ضرایب ثابت هستند.

$$H(Q_{out}) = \left[a_h \times \left(\frac{Q}{N_s} \right)^2 + b_h \left(\frac{Q}{N_s} \right) + c_h \right] \times N_s^2 \quad (4)$$

راندمان بهینه پمپ براساس معادله (۱۳) حاصل گردید:

$$\eta(Q) = \frac{(\gamma \times Q \times H)}{a_p \times \left(\frac{Q}{N_s} \right)^3 + b_p \times \left(\frac{Q}{N_s} \right)^2 + c_p \times \left(\frac{Q}{N_s} \right) + d_p} \times \eta_{coraction} \quad (5)$$

$$\gamma = 9810 \frac{N}{m^3} \text{ for water, and } a_p, b_p, c_p \text{ and } d_p = \text{Constant}$$

$$\eta_{coraction}(N_s) = a_\eta \times N_s^3 + b_\eta \times N_s^2 + c_\eta \times N_s + d_\eta \quad (6)$$

a_η, b_η, c_η and $d_\eta = \text{Constant}$

معادله (۱۵)، میزان بهینه دبی خروجی پمپ حاصل گردید

$$Q_{out}(I) = (\Delta t - 2 \times A \times b_h \times N_s - \sqrt{\left(\Delta t - 2 \times A \times b_h \times N_s \right)^2 - 8 \times \left(A \times (2 \times A \times (H_w(I-1, I_{GA}) - H_v + c_h \times N_s^2) \right)}) \quad (7)$$

$$+ \Delta t \times (Q_{in}(I-1) + Q_{in}(i) - Q_{out}(I-1, I_{GA})) \times (a_h - R_k) / (4 \times A \times (a_h - R_k))$$

I : گام برای نرخ دبی جدید
 Δt : فاصله زمانی، Q_{in} : دبی ورودی، H_w : سطح آب در حوضچه، β : حاصل تقسیم ارتفاع استاتیکی به ارتفاع بهینه شده براساس بهترین راندمان و حداکثر دور پمپ،

I_{GA} : گام‌های الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله

بهینه‌سازی برای هر یک از آنها حل شد. حل بهینه برای یک روز کامل، یعنی سلسله‌ی پاسخ‌های بهینه برای سرعت و سویچ‌ها، در قالب اتحاد حل‌های پی در پی n_w بدست آمده است. سپس، انرژی بهینه روزانه E_{opt} ، را می‌توان به صورت جمع انرژی‌های هر پنجره زمانی E_T محاسبه نمود.

$$E_{opt} = \sum_{T=1}^{n_w} E_{total} \quad (11)$$

۳- نتایج و بحث

در تولید داده‌ها بصورت یک دقیقه‌ای بهترین تابع توزیع لوگ نرمال بدست آمد. سپس با استفاده از روش مونت کارلو داده‌ها در بازه زمانی مورد نظر حاصل گردید. در مرحله بعد داده‌ها به مدل بهینه‌ساز داده شد، مدل بهینه‌سازی برای شرایط مختلف اعمال گردید. اطلاعات مربوط به ایستگاه عبارت است، حجم آبگاہ ۱۱۲ مترمکعب، حداقل و حداکثر ارتفاع آبگاہ به ترتیب ۱ و ۸ متر و سطح ثابت آبگاہ ۱۶ متر مربع است. این شرایط برای متوسط ۹ ماه از سال ۱۳۹۷ در نظر گرفته شد. مقداردهی β به میزان ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ شبیه‌سازی شد. نتیجه آن مقادیر H تلفات ارتفاع استاتیکی متفاوت است. برای هر سناریو؛ مقادیر دبی پمپاژ (Qout)، ارتفاع استاتیکی (H)، سرعت دوران پمپ (Ns) و ارتفاع پمپاژ (Hman) محاسبه شد. در جدول ۱ شاخص‌های آماری مثل حداکثر و متوسط هر پارامتر مربوط به هر β و یا زمانی که دور پمپ نزدیک به ۳۰۰۰ بوده است، می‌باشد که در هر دو ایستگاه تکرار شده است. کمترین مقدار سرعت دوران پمپ در $\beta = 0$ و ماکزیمم میزان سرعت در $\beta = 1$ رخ می‌دهد که در دو ایستگاه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

شکل ۵، شبیه‌سازی سرعت دوران پمپ بهینه شده برای ایستگاه زابل با ورودی‌های ارتفاع استاتیکی، ارتفاع پمپاژ، دبی ورودی و دبی خروجی با مدل شبکه عصبی انجام گرفت، نتایج شبیه‌سازی شبکه عصبی در تخمین میزان سرعت دوران پمپ برای متوسط ۹ ماه در ایستگاه پمپاژ

H_v : ارتفاع پایین دست، R_k براساس معادله (۱۶) حل شد:

$$R_k = H_{BEST} \frac{(1-\beta)}{Q_{BEST}^2} \quad (8)$$

β ضریبی بین صفر و یک می‌باشد.

برای شبیه‌سازی دبی ورودی را با مقداردهی بیشترین دبی ورودی Q_{Max}^{in} به عنوان یک دبی ماکزیمم در بهترین نقطه راندمان $Q_{N_{Max}}^{Best}$ را می‌توان از معادله (۱۷) محاسبه نمود (Fecarotta et al. 2018).

$$Q_{Max}^{in} = \frac{Q_{N_{Max}}^{BEST}}{\alpha} \quad (9)$$

که α ضریبی است، که مقدار α در دو وجه به روی طراحی ایستگاه پمپاژ اثر می‌گذارد. اول برای یک الگوی در نظر گرفته شده، مقادیر بالاتر α به یک تصفیه‌خانه‌ی بزرگتر با یک پمپ بزرگتر و در نتیجه یک آبگاہی بزرگتر منجر می‌شود و وجه دوم برعکس. همچنین جهت محاسبه انرژی کل مورد نیاز روزانه از معادله (۱۸) محاسبه گردیده است.

بر اساس معادلات ۱۶ و ۱۷ می‌توان مدل بهینه معادله ۱۸ را برای راندمان پمپ نوشت

$$\begin{cases} \text{Minimize } (H_i, S_i, Q_i, N_{si}) & E_{total} = \sum_T P_i \Delta t \\ (H_0 - H_{wi}) \times S_i + f Q_i^2 = \left(a_h^2 Q_i^2 + b_h^1 Q_i N_i + c_h^0 N_i^2 \times S_i \right) \\ H_{wi} = H_{wi-1} + \frac{Q_{wi} + Q_{wi-1} - Q_i - Q_{i-1}}{2A} \times \Delta t \\ \text{Subject to} \\ 0 \leq Q_i \leq Q_{Max}^M \times S_i, \quad 1500 \leq N_{si} \leq 3000 \\ 0 \leq S_i \leq 1, \quad H_w^{Min} \leq H_{wi} \leq H_w^{Max}, \quad ST_i^h \leq ST_{Max}^h \\ S_i \in R, \quad Q_i \in Z, \quad N_{si} \in Z, \quad \forall_i = 1, 2, \dots, n_T \end{cases} \quad (10)$$

به منظور برداشت نتایج قابل اعتماد در یک زمان منطقی، چون Δt انتخاب شده بود، کل روز به n_w پنجره زمانی با طول T تقسیم بندی شد. که $n_w \times T = 1day$ ، و مسئله‌ی

ضرایب α و β ساخته شده است. این بدان معنی است که برای پمپ مورد نظر، با مقداردهی α به میزان ۱ و ۲ به ترتیب الگوی ورودی مختلفی را محاسبه نموده‌ایم. مقادیر نهایی Q_{Max}^{in} در جدول ۲ نشان داده شد. تصفیه‌خانه نیز با مقداردهی β به میزان ۰، ۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۵، ۰.۶، ۰.۷، ۰.۸، ۰.۹ و ۱ شبیه‌سازی شد که نتیجه آن مقادیر H_0 تلفات ارتفاع مختلف بوده است. برای هر سناریو یک مقدار انرژی کل مورد نیاز روزانه که نامش E_p می‌باشد، محاسبه

به‌خوبی نشان داده است. نتایج دقت مدل را در شبیه‌سازی میزان سرعت دوران پمپ را نشان داد. همچنین مدل بهینه‌سازی برای شرایط مختلف اعمال شده است. ایستگاه پمپاژ نیز برای پمپ بر اساس معادله‌ی (۹) طراحی شده که ۱۱۲ متر مکعب را نتیجه داده است. یک سطح مقطع ثابت برای آبگاہ با مساحت پایه ی ۱۲ مترمربع انتخاب شده است، در نتیجه H_{max} بطور متوسط برای ایستگاه ۴.۱۵ متر بوده است. سناریوهای مختلفی با استفاده از انتخاب مقادیر

جدول ۱ پارامترهای سناریوهای مختلف بررسی شده متوسط ۹ ماه برای ایستگاه زابل

Table 1 The parameters of different scenarios studied, average 9 months for Zabol station.

β	Max Qout(m3/s)	Mean Qout(m3/s)	Max H(m)	Mean H(m)	Max Hman(m)	Mean Hman(m)	Max Ns(rpm)	Mean Ns(rpm)
0	0.128	0.055	4.15	2.93	10.43	4.51	1568.89	697.21
0.1	0.227	0.055	4.15	3.05	40.34	5.44	2996.66	773.04
0.2	0.227	0.055	4.15	3.51	40.31	6.75	2996.96	882.29
0.3	0.228	0.055	4.15	3.83	40.30	9.27	2984.42	1094.21
0.4	0.220	0.055	4.15	3.78	37.63	11.82	2888.46	1187.87
0.5	0.221	0.055	4.15	3.65	38.92	11.94	2938.75	1062.70
0.6	0.228	0.055	4.15	3.50	39.38	11.87	2992.54	976.45
0.7	0.229	0.055	4.15	3.53	39.99	12.38	2999.03	967.36
0.8	0.229	0.055	4.15	3.46	39.59	12.79	2979.63	956.66
0.9	0.238	0.055	4.15	3.19	40.08	10.46	2997.05	782.10
1	0.244	0.055	4.15	3.03	40.82	9.30	3000	711.10

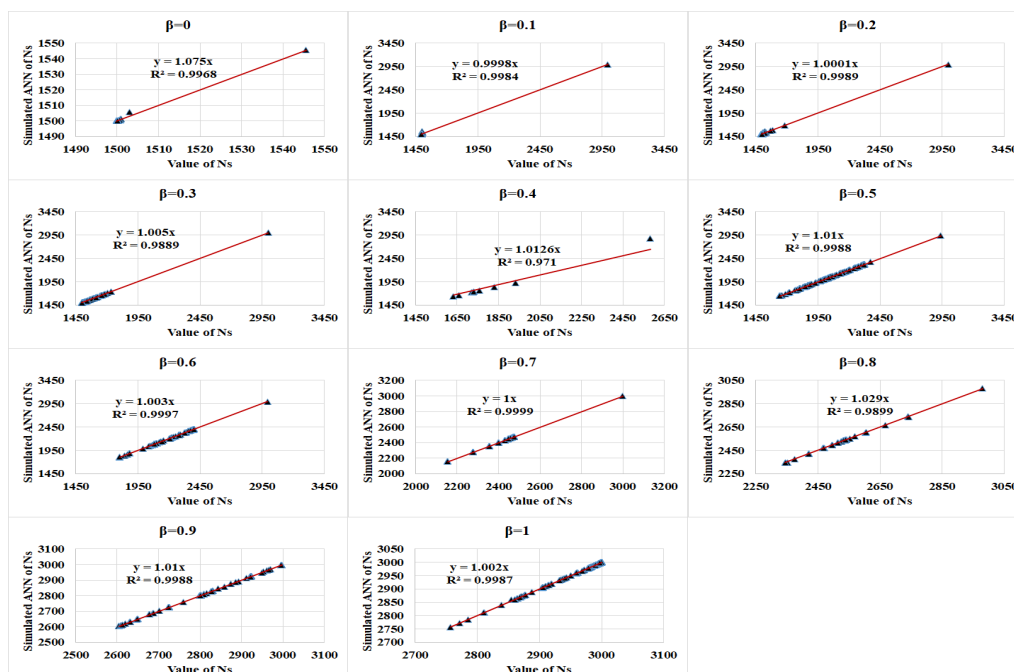


Fig. 5 The comparison of optimization data with genetic algorithm with simulated neural network data for rotation speed at Zabol pumping station.

شکل ۵ مقایسه داده‌ای بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک با داده‌های شبیه‌سازی شده شبکه عصبی برای سرعت دوران در ایستگاه پمپاژ زابل

الگوریتم ترکیبی ژنتیک در بهینه‌کردن انرژی را داشته است. در بررسی ایستگاه جهت بهینه‌کردن انرژی از لحاظ سناریوهای مختلف باز هم دقت الگوریتم ترکیبی ژنتیک به وضوح قابل مشاهده می‌باشد (جدول ۲). شکل ۶ وابستگی بین دور ثابت و متغیر را به α و β برای ایستگاه زابل نشان می‌دهد. راندمان تنظیمات کلاسیک عموماً بالاتر از راندمان عملکرد بهینه است، اما اختلافشان با افزایش β کاهش پیدا می‌کند (یعنی کاهش تلفات ارتفاعی). راندمان هر دو سیستم وقتی α کمتر شود، بالاتر است.

شکل ۷ تغییرات بین Ecs (انرژی مصرف شده با دور ثابت) و Eopt (انرژی مصرف شده با دور متغیر) را به α و β برای ایستگاه زابل نشان می‌دهد.

میزان انرژی بهینه با دور متغیر پایین‌تر از روش دور ثابت است. این نشان می‌دهد که با بکار بردن سرعت دوران متغیر در ایستگاه پمپاژ می‌توان به‌خوبی میزان انرژی را بهینه نمود و میزان قابل توجهی صرفه جویی در انرژی داشت.

شده که نتایج در جدول ۲ آمده است. در جدول ۲، هر سناریو با مقداردهی پنجره زمانی ۶۰ دقیقه و یک Δt یک دقیقه‌ای که نتیجه آن $(n_t = 60)$ ، بهینه‌سازی شده که برای هر یک از پنجره‌های زمانی (H_i, S_i, Q_i, N_{si}) ، ۲۴۰ متغیر بهینه پیدا شده است. مقادیر انرژی مورد نیاز برای حل بهینه که با مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک بهینه شده و با کنترل ثابت مقایسه شده را نشان می‌دهد، کنترل ثابت (یعنی ایستگاه پمپاژی که پمپ‌ها تنها در سرعت بیشینه‌ی خود کار کنند و استارت و توقف‌هایش تنها با استفاده از سطح آب کنترل شود) نیز محاسبه شده است. همچنین در تحقیق حاضر مقایسه‌ها براساس α و β متفاوت بوده است. نتایج، دقت بالای الگوریتم ترکیبی ژنتیک با شبکه عصبی در به حداقل رساندن انرژی مصرفی توسط پمپ برای ایستگاه را نشان داده است. نتایج راندمان کلی^۱ حاکی از دقت بالاتر الگوریتم ترکیبی ژنتیک در مقایسه با کنترل ثابت (CS) می‌باشد که در جدول ۲، نشان داده شده است. این دقت در حالتی که α مقدار ۲ هم بود، نشان از برتری

جدول ۲ نتایج بررسی سناریوهای مختلف در ایستگاه پمپاژ زابل

Table 2 The comparison of the optimization results with different values of time window (T) in Zabol pumping station

Overall efficiency (%)	E _{cs} (kwh/day)	Overall efficiency (%)	E _p (kwh/day)	E _{total} (kwh/day)	H _o (m)	Q _{max} (lit/s)	α	λ
65	2091.58	36	1153.56	3196.96	0	223.67	1	0
67	2091.10	41	1270.50	3114.82	4.04	223.67	1	0.1
69	2089.11	46	1395.23	3030.36	8.08	223.67	1	0.2
71	2088.10	51	1500.00	2945.90	12.11	223.67	1	0.3
73	2090.18	56	1605.00	2861.60	16.15	223.67	1	0.4
75	2088.50	62	1701.00	2777.36	20.19	223.67	1	0.5
78	2087.89	67	1805.00	2692.49	24.22	223.67	1	0.6
79	2077.88	73	1909.00	2624.58	28.26	223.67	1	0.7
81	2065.90	79	1995.00	2543.22	32.30	223.67	1	0.8
84	2056.90	83	2030.00	2640.80	36.33	223.67	1	0.9
86	2053.43	86	2050.00	2378.78	40.37	223.67	1	1
26	399.62	12	184.36	1550.25	0	111.84	2	0
30	477.66	198	294.39	1600.50	4.04	111.84	2	0.1
34	555.41	26	420.30	1650.20	8.08	111.84	2	0.2
37	633.16	30	510.60	1700.62	12.11	111.84	2	0.3
41	710.97	36	620.20	1720.45	16.11	111.84	2	0.4
45	788.82	42	725.50	1750.35	20.19	111.84	2	0.5
51	866.92	51	860.40	1700.45	24.22	111.84	2	0.6
56	952.37	60	1015.00	1710.25	28.26	111.84	2	0.7
60	1031.67	67	1150.00	1720.35	32.30	111.84	2	0.8
64	1110.37	78	1350.00	1725.55	36.33	111.84	2	0.9
69	1189.39	84	1450.00	1720.41	40.37	111.84	2	1

¹ . Overall efficiency

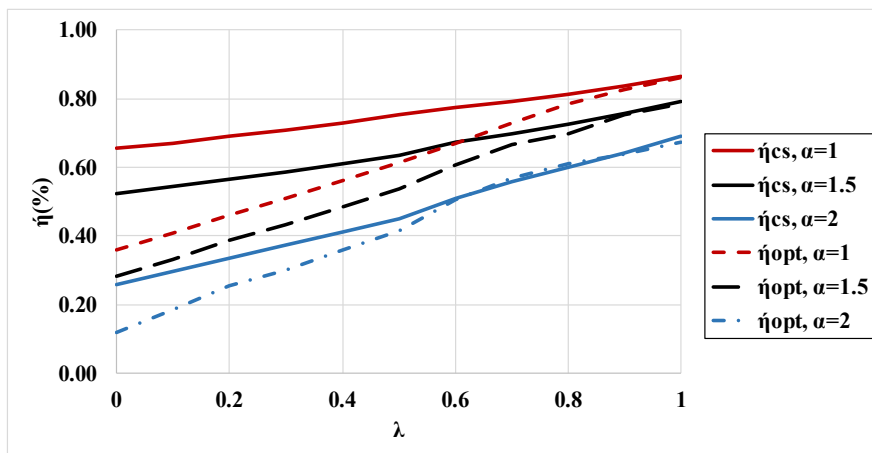


Fig. 6 Comparison of energy efficiency in a constant (η_{cs}) and variable speed (η_{opt}) pumping station with α for Zabol station.
شکل ۶ مقایسه راندمان انرژی در یک ایستگاه پمپاژ با دور ثابت (η_{cs}) و متغیر (η_{opt}) با α برای ایستگاه زابل

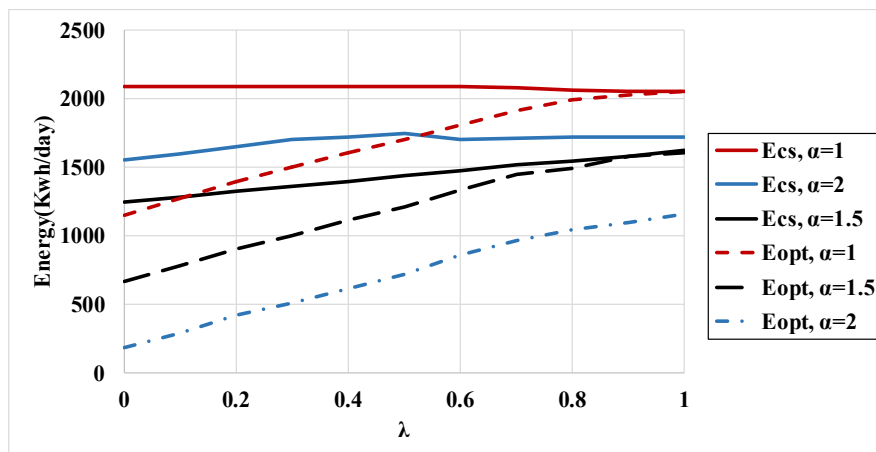


Fig. 7 Comparison of energy consumption in a pumping station with constant speed (η_{cs}) and variable (η_{opt}) of Zabol station.
شکل ۷ مقایسه مصرف انرژی در یک ایستگاه پمپاژ با دور ثابت (η_{cs}) و متغیر (η_{opt}) ایستگاه زابل

و زمان روشن و خاموش شدن پمپ ایجاد شد. مرحله بعدی شبیه‌سازی میزان سرعت دوران پمپ با شبکه عصبی مصنوعی بوده که با دقت زیادی برآورد شد. در مرحله نهایی برای دو ایستگاه پمپاژ با توجه به سناریوهای مختلف، میزان انرژی در دو حالت متغیر و ثابت محاسبه شد. که در مقایسه ی این دو، دقت بهتر الگوریتم ترکیبی ژنتیک در بهینه‌کردن انرژی در ایستگاه نشان داده شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد، اگر برنامه‌ریزی پمپ (استارت و سرعت دورانی پمپ بهینه شده باشد) داشته باشیم، صرفه‌جویی انرژی مورد نظر را می‌توان دنبال نمود. میزان انرژی حفظ شده به مشخصه‌های دبی ورودی و تلفات ارتفاع تصفیه‌خانه‌ها وابسته است. در بیشتر سناریوها معمولاً می‌توان تا بیش از

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی با توجه به برنامه‌ریزی پمپ در ایستگاه پمپاژ زابل انجام گرفت. متغیر اصلی، سرعت دوران پمپ می‌باشد که توانایی تغییر در محدوده‌ی داده شده را دارد. در ابتدای تعریف، مسئله با توجه به داده‌های ایستگاه‌ها به صورت ساعتی اندازه‌گیری شده و نیاز به تولید داده به صورت یک دقیقه‌ای بوده است. بنابراین، تولید داده‌ها بصورت تصادفی با توزیع لوگ نرمال و روش مونت کارلو انجام گرفته است. در مرحله بهینه‌سازی، متغیرهای دبی پمپاژ، ارتفاع استاتیکی، سرعت دوران پمپ

H_W^{min}	سطح کمینه‌ی مجاز آب درون آبگاه (L)		۵۰٪ صرفه جویی داشته باشیم. همچنین راندمان سیستم بهینه را می‌توان با اختلاف بین دبی بیشینه پمپ و کاهش دبی ورودی افزایش داد.
$P_{N_{max}}$	توان پمپ شده در سرعت دورانی $(ML^2T^{-2}) N_{max}$		
$Q_{N_{max}}^{BEST}$	دبی پمپ در BEP خود برای سرعت دورانی بیشینه (L^3T^{-1})		
Q_{max}^{in}	بیشینه‌ی تخلیه دبی ورودی (L^3T^{-1})	α	نسبت بین $Q_{N_{max}}^{BEST}$ و Q_{max}^{in} (-)
A	سطح مقطع آبگاه (L^2)		نسبت ارتفاع استاتیکی به ارتفاع بهینه شده براساس بهترین راندمان و حداکثر دور پمپ (-)
BEST	بهترین نقطه راندمان (-)	β	
CS	سیستم کنترل ثابت (-)		
E	انرژی مورد نیاز پمپ (ML^2T^{-2})	Δt	طول هر مرحله زمانی (T)
E_{CS}	انرژی مورد نیاز پمپاژ روزانه برای شرایط کاری CS (ML^2T^{-2})	η_{pump}	راندمان پمپ (-)
E_{opt}	انرژی مورد نیاز پمپاژ روزانه بدست آمده از بهینه‌سازی (ML^2T^{-2})	η_{motor}	راندمان دستگاه (-)
E_T	انرژی مورد نیاز پمپاژ برای هر پنجره زمانی (ML^2T^{-2})	η_{CS}	راندمان با دور ثابت (-)
H	هد پمپ شده (L)	η_{opt}	راندمان با دور متغیر (-)
H_{man}	هد پمپاژ مورد نیاز (L)	a_n, b_n, c_n	ضریب‌های رگرسیون منحنی هد (-)
H_w	سطح آب درون آبگاه (L)	a_p, b_p, c_p, d_p	ضریب‌های رگرسیون منحنی پمپ (-)
I	گام برای نرخ دبی جریان (-)	a_n, b_n, c_n, d_n	ضریب‌های رگرسیون منحنی راندمان (-)
i	زیرنویس نشان‌دهنده مرحله زمانی i ام (-)	E_p	انرژی مرجع روزانه (ML^2T^{-2})
K	ضریب تلفات هد (-)	h_i	افت هد کل سیستم (L)
N	سرعت دورانی پمپ (T^{-1})	H_{sat}	هد استاتیکی کل (L)
N_{max}	سرعت دورانی بیشینه پمپ (T^{-1})	H_v	ارتفاع آب پایین دست (L)
n_t	تعداد گام‌های زمانی در پنجره زمانی (-)	S_i	سوییچ پمپ (-)
P	توان پمپ شده (ML^2T^{-2})	P_h	توان هیدرولیک (ML^2T^{-2})
Z	ارتفاع ثقلی (L)	P_s	توان شفت پمپ (ML^2T^{-2})
		Q_{in}	دبی ورودی فاضلاب (L^3T^{-1})
		Q_{out}	دبی خروجی فاضلاب (L^3T^{-1})
		ρ	چگالی سیال (ML^{-3})
		g	شتاب ثقل (LT^{-2})
		$H_{N_{max}}$	هد پمپ شده در سرعت دورانی N_{max} (L)
		$H_{N_{max}}^{BEST}$	هد پمپ شده در سرعت دورانی N_{max} و BEST پمپ (L)
		H_W^{max}	سطح بیشینه‌ی مجاز آب درون آبگاه (L)

۵- فهرست نشانه‌ها

۶- سپاس‌گذاری

لازم است در اینجا از حمایت مالی کارگروه تخصصی آب، خشکسالی، فرسایش و محیط زیست معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری کمال تشکر را داشته باشیم.

- prediction wastewater inflow Computers and Piri J, Pirzadeh B, Keshtegar B, Givehchi M (2021b) Probabilistic Modeling and Estimation of Flow Rate of Sewage Treatment Plant Using Monte Carlo Hybrid Method مجله آب و فاضلاب
- Piri J, Pirzadeh B, Keshtegar B, Givehchi M (2021c) Probabilistic Modeling and Estimation of Flow Rate of Sewage Treatment Plant Using Monte Carlo Hybrid Method مجله آب و فاضلاب ۳۱:۶۰-۶۹
- Piri J, Pirzadeh B, Keshtegar B, Givehchi M (2021d) 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
- Puleo V, Morley M, Freni G, Savić D (2014) Multi-stage linear programming optimization for pump scheduling Procedia Engineering 70:1378-1385
- Ramos HM, Zilhao M, López-Jiménez PA, Pérez-Sánchez M (2019) Sustainable water-energy nexus in the optimization of the BBC golf-course using renewable energies Urban Water Journal 16:215-224
- Rao Z, Alvarruiz F (2007) Use of an artificial neural network to capture the domain knowledge of a conventional hydraulic simulation model Journal of Hydroinformatics 9:15-24
- Su P-A, Karney B (2015) Micro hydroelectric energy recovery in municipal water systems: A case study for Vancouver Urban Water Journal 12:678-690
- Sun J, Feng X, Wang Y, Deng C, Chu KH (2014) Pump network optimization for a cooling water system Energy 67:506-512
- Water U (2008) Sustainability Indicators 2007/08 Water UK, London, UK, see <http://www.water.org.uk/home/news/press-releases/sustainable-water/sustainability2008.pdf> (accessed 03/07/2012)
- Zhang W, Zou Z, Wang H Optimal Operation Model of Water Supply Network and Application. In: 2009 IITA International Conference on Services Science, Management and Engineering, 2009. IEEE, pp 499-502
- Zilberman D, Sproul T, Rajagopal D, Sexton S, Hellegers P (2008) Rising energy prices and the economics of water in agriculture Water policy 10:11-21
- Zounemat-Kermani M, Kisi O, Piri J, Mahdavi-Meymand A (2019) Assessment of artificial intelligence-based models and metaheuristic algorithms in modeling evaporation Journal of Hydrologic Engineering 24:04019033

References

منبع‌ها

- Afshar M (2007) Partially constrained ant colony optimization algorithm for the solution of constrained optimization problems: Application to storm water network design Advances in Water Resources 30:954-965
- Castro-Gama M, Pan Q, Lanfranchi EA, Jonoski A, Solomatine DP (2017) Pump scheduling for a large water distribution network. Milan, Italy Procedia Engineering 186:436-443
- Cimorelli L, D'Aniello A, Cozzolino L, Pianese D A derivative free non-linear programming method for the optimal setting of PATs to be used in a hybrid genetic algorithm: a preliminary work. In: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 2018. vol 11. p 684
- DAJANI JS, HASIT Y, McCULLERS SD (1977) Mathematical programming in sewer network design Engineering Optimization 3:27-35
- De Paola F, Fontana N, Giugni M, Marini G, Pugliese F (2017) Optimal solving of the pump scheduling problem by using a Harmony Search optimization algorithm Journal of Hydroinformatics 19:879-889
- Fecarotta O, Carravetta A, Morani MC, Padulano R (2018) Optimal pump scheduling for urban drainage under variable flow conditions Resources 7:73
- Jowitt PW, Germanopoulos G (1992) Optimal pump scheduling in water-supply networks Journal of Water Resources Planning and Management 118:406-422
- Khatavkar P, Mays LW (2017) Model for optimal operation of water distribution pumps with uncertain demand patterns Water Resources Management 31:3867-3880
- León-Celi C-F, Iglesias-Rey PL, Martínez-Solano FJ, Savić D (2018) Operation of multiple pumped-water sources with no storage Journal of Water Resources Planning and Management 144:04018050
- Mamade A, Loureiro D, Alegre H, Covas D (2017) A comprehensive and well tested energy balance for water supply systems Urban Water Journal 14:853-861
- Ostojin S, Mounce S, Boxall J (2011) An artificial intelligence approach for optimizing pumping in sewer systems Journal of hydroinformatics 13:295-306
- Piri J, Amin S, Moghaddamnia A, Keshavarz A, Han D, Remesan R (2009) Daily pan evaporation modeling in a hot and dry climate Journal of Hydrologic Engineering 14:803-811
- Piri J, Pirzadeh B, Keshtegar B, Givehchi M (2021a) A hybrid statistical regression technical for