

Energy Consumption Optimization in a Two-Pump Wastewater Pumping Station Using Grey Wolf Algorithm and Reliability Analysis: A Case Study of Mashhad Treatment Plant

Elham Nakhaei Zeynali¹, Bahareh Pirzadeh^{*2}, Jamshid Piri³

¹PhD Candidate in Civil Engineering - Hydraulic Structures, University of Sistan and Baluchestan, Iran

²Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Iran

³Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir

Received: 26 Sep. 2025 Accepted: 10 June 2026
Revised: 18 Dec. 2025 Published: 21 June 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Optimizing the design and operation of pumping stations can facilitate energy conservation. This paper investigates the energy consumption of pumps at a wastewater pumping station in Mashhad-subject to a recurring inflow pattern-by employing the Grey Wolf Optimizer algorithm in conjunction with a system reliability analysis. By employing the optimized variable speed, energy savings of over 70% can be achieved. The results clearly show that the efficiency of the system can be maintained over many years through an optimal scheduling of pump operation. The standard reliability index, ranging from 0.75 to 0.95, indicates that both pumps maintain good operational reliability across various flow parameters. The results from the Monte Carlo simulation show values around 0.61. The moment method indices vary between 0.58 and 0.8, providing a precise evaluation that considers the magnitude and distribution of operational deviations, these values correlate well with the results from the standard reliability index.

Keywords: wastewater pumping station,, energy consumption optimization, reliability index, Two-Stage Pump.

Introduction: The urban water and wastewater sector faces challenges in process optimization due to driving factors such as climate change, population growth, aging infrastructure, and electricity costs, in order to reduce energy consumption and lower greenhouse gas emissions from water and wastewater transportation and treatment (Co-operation and Development 2009). Pumping is the largest consumer of electrical energy in this sector (Kebir et al. 2014). Therefore, the control of pumping stations can help utility companies reduce operational costs (such as electricity expenses) while increasing energy savings and environmental performance (Filipe et al. 2019). Properly designed variable-speed pumping, adjusted according to changes in head and flow, can achieve optimal performance and energy savings (Stolberg 2003). Pumping stations are usually designed to operate at a fixed speed and under constant hydraulic conditions (head and discharge), typically for maximum flow, and are generally controlled through a classical on/off switch based on the fluid level in the inlet well. Such local control can lead to poor pumping system performance and increased energy consumption, even though maximum flow is not always required (Ostojin et al. 2011). According to previous research, there is still a lack of automated systems for analyzing pump energy consumption on a daily basis and evaluating the effects of startup and operation conditions independently.

Methodology: In this study, the energy consumption of a two-pump pumping station at the Mashhad Wastewater Treatment Plant was examined under both constant-speed and optimal rotational-speed conditions. Mashhad Wastewater Treatment Plant No. 5, with a capacity of 64,000 cubic meters per day and serving approximately 530,000 people in the northeast of Mashhad, in the Khin Arab area, was considered. The wet well volume was 111 cubic meters, with minimum and maximum water heights of 1 and 12 meters, respectively, and a constant cross-sectional area of 12 square meters. Using the Grey Wolf Optimization algorithm, the variable pumping speed for the two-pump station was determined, and the pump on/off sequence during the three summer months was established for speed variation coefficients ($\lambda = 0.25, 0.5, 0.75$) and flow variation coefficients ($\alpha = 1, 1.5$). The results were compared with the fixed-speed (classical) mode in [Tables 4-6](#) and the efficiency values were calculated. The Grey Wolf Algorithm has a higher speed than the Genetic Algorithm due to dividing the population

into smaller groups and has improved performance through the linear combination of group positions. Pump performance was analyzed using three different indices: standard reliability, Monte Carlo, and the method of moments, as shown in [Figs. 5-7](#).

Results and Discussion: The optimization results demonstrated that the proposed variable-speed operating strategy consistently outperformed the conventional constant-speed approach in terms of both energy efficiency and operational performance. As presented in [Tables 4-6](#), the optimized system achieved higher hydraulic efficiency and significantly lower power consumption under all investigated operating conditions. System efficiency increased as the flow variation coefficient (α) decreased, whereas increasing the speed variation coefficient (λ) resulted in a slight reduction in efficiency. Nevertheless, variable-speed operation remained superior to the constant-speed strategy across all scenarios. The results further showed that implementing variable rotational speeds reduced energy consumption by more than 70% compared with fixed-speed operation ([Tables 4-6](#)), highlighting the considerable economic and environmental benefits of optimized pump control. Furthermore, the optimized scheduling strategy enables the pumping system to maintain high operational efficiency over extended periods, thereby reducing unnecessary energy losses, mechanical wear, and operating costs while ensuring sustainable long-term performance. Reliability analysis further confirmed the robustness of the proposed operating strategy. As summarized in [Figs. 6-8](#), the Standard Reliability Index ranged from 0.75 to 0.95, indicating that both pumps maintained satisfactory operational reliability under different hydraulic conditions. In comparison, Monte Carlo simulations produced reliability values of approximately 0.61, providing a more conservative estimate by incorporating random uncertainties in the operating parameters. The Moment Method yielded reliability indices ranging from 0.58 to 0.80 ([Figs. 6-8](#)), offering a more comprehensive assessment by considering both the magnitude and statistical distribution of operational deviations. The comparison of the three reliability approaches confirmed the stability of the optimized system under varying operating conditions. The highest reliability values were consistently obtained at $\lambda = 0.50$, identifying this operating condition as the optimal flow variation coefficient for both pumps. Moreover, as illustrated in [Figs. 7 and 8](#), both pumps achieved their maximum reliability during August, with indices of 0.9473 and 0.9517 for Pumps 1 and 2, respectively, indicating the most stable and reliable operating conditions throughout the study period.

Conclusion: It is generally true that classical settings are more efficient than optimized performance settings, but utilizing variable rotation speed can effectively reduce energy consumption. When those two variables are decreased or increased, the efficiency of the system increases. As a result of the optimization process, significant energy savings were obtained in all scenarios, with the variable speed system consistently outperforming the constant speed system. There was the highest reliability at $\lambda=0.5$, indicating the optimal operating point for the pumps. The purpose of this research is to demonstrate the effectiveness of the Grey Wolf Algorithm in optimizing pump operation and energy consumption in wastewater pumping stations. According to the results, the system efficiency can be maintained over many years through optimal scheduling of pump operations.

© 2024 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 مصرف انرژی در ایستگاه پمپاژ دوپمپه فاضلاب با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری و تحلیل قابلیت اطمینان: مطالعه موردی تصفیه‌خانه مشهد

الهام نخعی زینلی^۱، بهاره پیرزاده^{۲*}، جمشید پیری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

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

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

چکیده: بهینه‌سازی در طراحی و بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ می‌تواند باعث مدیریت حفظ انرژی مصرفی شود. در این مقاله میزان مصرف انرژی پمپ‌ها در یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب شهر مشهد، تحت الگوی مکرر دبی جریان ورودی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری و تلفیق آن با تحلیل کمی قابلیت اطمینان سیستم بررسی شد. به‌وسیله مدل بهینه‌سازی، سرعت متغیر پمپاژ برای یک ایستگاه دو پمپی و توالی روشن – خاموش شدن پمپ در تابستان برای ضرایب مختلف تغییرات سرعت و دبی مشخص شد و با حالت سرعت ثابت مقایسه گردید. مقدار بهینه متغیرهای دبی، دور پمپ، توان پمپ و در نتیجه راندمان پمپ محاسبه و با استفاده از سه شاخص مختلف؛ قابلیت اطمینان استاندارد، مونت‌کارلو و روش گشتاور، عملکرد پمپ تحلیل گردید. میزان انرژی مصرفی با دور متغیر پایین‌تر از حالت کلاسیک شد. با بکار بردن سرعت دوران متغیر بهینه می‌توان تا بیش از ۷۰٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی داشت. شاخص قابلیت اطمینان استاندارد در محدوده ۰/۷۵ تا ۰/۹۵، نشان می‌دهد که هر دو پمپ در پارامترهای مختلف جریان قابلیت اطمینان عملیاتی خوبی را حفظ می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقادیر حدود ۰/۶۱ را نشان می‌دهد. شاخص‌های روش گشتاور بین ۰/۵۸ و ۰/۸ متغیر است، ارزیابی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد که بزرگی و توزیع انحرافات عملیاتی را در نظر می‌گیرد و این مقادیر همبستگی خوبی با نتایج قابلیت اطمینان استاندارد دارند.

کلیدواژه‌ها: ایستگاه پمپاژ فاضلاب، بهینه‌سازی مصرف انرژی، شاخص قابلیت اطمینان، سرعت دوران متغیر، پمپ دومرحله‌ای.

۱- مقدمه

بخش آب و فاضلاب شهری باوجود عوامل محرک مانند تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت، فرسودگی زیرساخت‌ها و هزینه‌های برق با چالش بهینه‌سازی فرایندها مواجه است تا بتواند مصرف انرژی را کاهش داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل و تصفیه آب و فاضلاب را کاهش دهد (Co-operation and Development 2009). پمپاژ بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی الکتریکی در این بخش است (Kebir et al. 2014). بنابراین، کنترل ایستگاه‌های پمپاژ می‌تواند به شرکت‌های خدماتی کمک کند تا هزینه‌های عملیاتی (مانند هزینه‌های برق) را کاهش داده و صرفه‌جویی انرژی و عملکرد محیط‌زیستی را افزایش دهند (Filipe et al. 2019). با تنظیم سرعت متغیر پمپاژ نسبت به تغییرات هد و دبی می‌توان به عملکرد بهینه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی دست یافت (Stolberg 2003). ایستگاه‌های پمپاژ معمولاً برای کار در سرعت و شرایط هیدرولیکی (هد و تخلیه) ثابت و به‌طور معمول برای بیشینه دبی طراحی می‌شوند. معمولاً از طریق کلید روشن/خاموش کلاسیک (CS) براساس سطح سیال در چاه ورودی کنترل می‌شوند. چنین کنترل محلی می‌تواند منجر به عملکرد ضعیف سیستم پمپاژ و افزایش مصرف انرژی شود. در صورتی‌که همیشه به بیشینه دبی نیازی نیست (Ostojin et al. 2011).

در این راستا تحقیقاتی برای بهینه‌سازی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ انجام شده است. یکی از روش‌های محاسبه راندمان انرژی رویکرد داده‌کاوی است که الگوریتم شبکه عصبی را برای توسعه مدل‌ها اعمال کرده است تا مصرف انرژی پمپ و دبی پس از پمپاژ را پیش‌بینی کند، خروجی بهینه‌سازی شامل مقادیری است که برنامه‌ریزی روشن یا خاموش بودن پمپ در یک زمان مشخص توضیح می‌دهد. این روش توانایی مقابله با رفتار غیرخطی و پیچیده دبی فاضلاب را دارد و برای سیستم‌های پمپاژ فاضلاب، کنترل اصلی با استفاده از سطح آب در مخزن بالادست پمپ‌ها انجام می‌شود (Behandish and Wu 2014; Sperlich et al. 2018). Baran (2005) الگوریتم تکاملی

چندهدفه را برای حل یک مسئله زمان‌بندی پمپ و به حداقل رساندن چهار هدف، هزینه انرژی الکتریکی، هزینه تعمیر و نگهداری، حداکثر توان و تغییر سطح در یک مخزن ارائه داد. ارزیابی نتایج تجربی نشان داد که این الگوریتم قدرت عملکرد کلی بهتری نسبت به سایر، در مسئله آزمایشی داشت و طیف گسترده‌ای از زمان‌بندی‌های پمپ بهینه را برای انتخاب فراهم می‌کرد (Barán et al. 2005). Ostojin (2011) جزئیات یک سیستم منطق فازی توسعه‌یافته برای کنترل ایستگاه‌های پمپاژ فاضلاب و صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی را ارائه داد. در این تحقیق قواعد منطق فازی برای تصمیم‌گیری زمان‌بندی عملکرد پمپ و اجتناب از پمپاژ در ساعت اوج، به‌عنوان یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی استفاده شد. طبق نتایج، استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) به‌منظور حداقل‌سازی هزینه‌های انرژی، قابل‌انتقال به ایستگاه پمپاژ دیگری با اندازه پمپ‌های مختلف و الگوی ورودی مختلف است (Ostojin et al. 2011). Fecarotta (2018) یک مدل بهینه‌سازی اعداد صحیح مختلط با در نظر گرفتن تغییرات سرعت چرخش پمپ و الگوی تکرارشونده دبی ورودی ایستگاه پمپاژ در شهر ناپل (ایتالیا) طراحی کرد. نتایج این مدل نشان داد که بین کنترل کلاسیک و بهینه، می‌تواند تا ۷۰٪ کاهش مصرف انرژی وجود داشته باشد (Fecarotta et al. 2018).

رجب پور و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات یک مدل برای کنترل توالی روشن و خاموش شدن پمپ‌های ایستگاه پمپاژ طرح آب‌رسانی از سد کازرون به شهر شیراز ارائه کردند که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی شده بود (Rajabpour and Afshar 2008). رسول‌زاده (۲۰۱۲)، با ابداع الگوریتم ترکیبی GA-NLP، به بهینه‌سازی مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ پرداخت. این الگوریتم می‌توانست بر مبنای دبی موردنیاز که باید توسط سامانه پمپاژ شود، متغیرهای طراحی ایستگاه‌های پمپاژ شامل تعداد، نوع پمپ‌ها و متغیرهای بهره‌برداری شامل عملکرد پمپ‌ها را بهینه‌سازی کند. طبق نتایج، الگوریتم ترکیبی مذکور نسبت به الگوریتم ژنتیک در همگرا شدن به سمت نقطه بهینه سرعت بالاتری داشت (Rasulzadeh and

است. لذا، هدف اصلی این تحقیق ارائه روش مناسب برای کاهش میزان مصرف انرژی در ایستگاه پمپاژ فاضلاب است. مدل‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ دوپمپه که الگوهای عملکردی متفاوت‌تری نسبت به ایستگاه‌های تک‌پمپه دارند، از جمله موارد مغفول مانده است و اگرچه در برخی مطالعات از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده، اما استفاده از این الگوریتم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تلفیق آن با تحلیل کمی قابلیت اطمینان سیستم کمتر دیده شده است. در این تحقیق، با استفاده از مدل بهینه‌سازی گرگ خاکستری، میزان انرژی مصرفی سیستم‌های پمپاژ در حالت سرعت بهینه با سرعت ثابت دوران پمپ مقایسه شده است. برای این منظور، یک برنامه کنترل سرعت دوران برای یک ایستگاه دو پمپی معرفی و توالی روشن/خاموش شدن پمپ بهینه می‌شود. همچنین از داده‌های ورودی واقعی ایستگاه پمپاژ تصفیه‌خانه فاضلاب شهر مشهد جهت شبیه‌سازی موردنظر و از روش متفاوت و الگوریتمی به‌روزتر نسبت به مطالعات پیشین استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، بهینه‌سازی مصرف انرژی دو پمپ در یک ایستگاه پمپاژ فاضلاب با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری برنامه‌ریزی شده است. آرایش پمپ‌های سانتریفیوژ در آبگاه به‌صورت موازی با جریان ورودی متغیر در نظر گرفته شده است و دبی جریان ورودی براساس داده‌های واقعی گزارش شده از ایستگاه پمپاژ مدل‌سازی شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش از داده‌های ایستگاه تصفیه‌خانه شماره پنج مشهد استفاده گردید، داده‌های دبی ورودی به‌صورت دقیقه‌ای در هر شبانه‌روز به مدت سه ماه تابستان اندازه‌گیری شده است. ظرفیت این تصفیه‌خانه ۶۴ هزار مترمکعب در شبانه‌روز است و با تحت پوشش قرار دادن ۵۳۰ هزار نفر در شمال شرق مشهد در منطقه خین عرب فعال است که بخش میانی مشهد را پوشش می‌دهد (شکل ۱). این تصفیه‌خانه شامل ۱۲ مخزن با فرایند راکتورهای

(haddad 2012). سامی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای مصنوعی ویژه مسائل صفر و یکی به بهینه‌سازی نحوه بهره‌برداری (روشن و خاموش بودن) پمپ‌های موجود در سیستم پمپاژ انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز باهدف کاهش هزینه برق مصرفی پرداختند (Kashkuli et al. 2016). پیری و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی سرعت چرخش در ایستگاه پمپاژ تک پمپی تصفیه‌خانه فاضلاب پرداختند و نتایج به‌خوبی نشان داد که به‌کارگیری پمپ با دور متغیر باعث کاهش مصرف انرژی نسبت به حالت دور ثابت می‌شود (Piri et al. 2021a). معین فر و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی به استخراج الگوی بهینه دور پمپ‌های ایستگاه پمپاژ شبکه توزیع شهر حسن‌آباد پرداختند و نتایج نشان داد که این رویکرد، می‌تواند مصرف انرژی را نسبت به وضعیت موجود تا ۹/۶٪ در طول یک دوره زمانی مشخص کاهش دهد (Moeenfar and Yazdi 2023). جزایری و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش بهینه‌سازی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) یک برنامه بهینه زمان‌بندی برای ساعات کارکرد پمپ‌های با دور ثابت ایستگاه پمپاژ شبکه توزیع آب نجف‌آباد ارائه کردند که موجب کاهش هزینه انرژی نسبت به حالت سنتی شد (Farsani and Safavi 2024). رضاپور (۲۰۲۴) یک مدل بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی زمان کار پمپ‌ها با قابلیت محدودسازی تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ و با هدف کاهش مصرف انرژی معرفی کرد. این مدل با استفاده از یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی و با استفاده از فن‌های خطی‌سازی به یک مسئله بهینه‌سازی خطی آمیخته تبدیل شده است و طی ارزیابی با یک مثال کاربردی نشان داد که تا ۱۶ درصد موجب کاهش هزینه‌های مصرف انرژی در سیستم پمپاژ می‌شود (Rezapoor 2024).

باوجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته، خلأهای تحقیقاتی مهمی در این حوزه باقی‌مانده است. یکی از خلأهای موجود در پژوهش‌های مرور شده، محدود بودن مطالعات به شرایط آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی‌های ساده و فقدان مطالعات با در نظر گرفتن نوسانات مصرف، شرایط محیطی و بار متغیر سیستم برای شرایط ایستگاه‌های فاضلاب شهری در ایران

متناظر با گرگ‌های بتا و دلتا است. گرگ‌ها در فرایند شکار پس از پیدا کردن طعمه، آن را محاصره می‌کنند. فرایند شکار توسط گرگ آلفا هدایت می‌شود. در فرایند جستجو پاسخ‌های آلفا، بتا و دلتا بهترین و برازنده‌ترین پاسخ موجود در جمعیت هستند. پاسخ‌های امگا باید موقعیت خود را با توجه به موقعیت این سه پاسخ به‌روزرسانی کنند. روابط (۱) تا (۳) نحوه به‌روزرسانی موقعیت پاسخ‌ها را نشان می‌دهند (Mirjalili et al. 2014):

$$\begin{aligned} \overrightarrow{D_\alpha} &= \left| \overrightarrow{C_1} \cdot \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{X} \right|, \overrightarrow{D_\beta} = \left| \overrightarrow{C_2} \cdot \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{X} \right| \\ \overrightarrow{D_\delta} &= \left| \overrightarrow{C_3} \cdot \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{X} \right| \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{X_1} &= \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1} \cdot (\overrightarrow{D_\alpha}), \\ \overrightarrow{X_2} &= \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_2} \cdot (\overrightarrow{D_\beta}) \\ \overrightarrow{X_3} &= \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_3} \cdot (\overrightarrow{D_\delta}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{X(t+1)} = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \quad (3)$$

$\overrightarrow{D_\alpha}$ و $\overrightarrow{D_\delta}$ فاصله پاسخ موردنظر به‌ترتیب تا پاسخ آلفا،

ناپیوسته متوالی است. حجم آبگاه عبارت است از ۱۱۱ مترمکعب و حداقل و حداکثر ارتفاع آبگاه به‌ترتیب ۱ و ۱۲ متر است و یک سطح مقطع ثابت برای آبگاه با مساحت پایه ۱۲ مترمربع انتخاب شده است.

۲-۲- الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است. این الگوریتم مبتنی بر جمعیت بوده، فرایند ساده‌ای دارد و به‌سادگی قابلیت تعمیم به مسائل با ابعاد بزرگ را دارد. گرگ‌های خاکستری اغلب در یک گروه زندگی می‌کنند. در هر گله از گرگ‌ها برای شکار کردن چهار درجه وجود دارد که در رأس، گرگ‌های آلفا رهبر گروه نامیده می‌شوند و بر گروه تسلط دارند. گرگ‌های بتا وظیفه کمک به گرگ‌های آلفا را در فرایند تصمیم‌گیری دارند. گرگ‌های دلتا شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان می‌شود. گرگ‌های امگا پایین‌ترین مرتبه را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند و در فرایند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند. بهینه‌سازی با استفاده از گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا انجام می‌شود. گرگ آلفا هدایت‌کننده اصلی الگوریتم فرض می‌شود. در این الگوریتم بهینه‌سازی، فرایند شکار متناظر با فرایند یافتن پاسخ بهینه و محل قرارگرفتن شکار متناظر با موقعیت پاسخ بهینه است. بهترین پاسخ موجود در جمعیت متناظر با گرگ آلفا و پاسخ‌های دوم و سوم هم

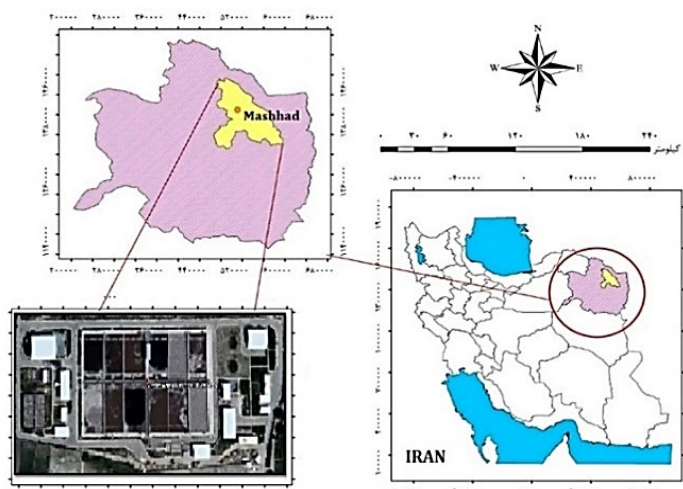


Fig. 1 Wastewater pumping station of Mashhad city

شکل ۱ ایستگاه پمپاژ فاضلاب شهر مشهد

بهتر و به‌دست آوردن بهینه‌ترین موقعیت می‌شود و برای مسائل پراکنده و پیچیده کارایی بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد (Makhadmeh et al. 2023).

۲-۳- بهینه‌سازی مصرف انرژی

میزان مصرف انرژی سیستم پمپاژ براساس سرعت بهینه دوران پمپ با استفاده از مدل بهینه‌سازی گرگ خاکستری محاسبه می‌شود و با میزان مصرف انرژی در سیستم پمپاژ با سرعت ثابت کلاسیک (یعنی ایستگاه پمپاژی که پمپ تنها در سرعت بیشینه خود یعنی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه کار کند و استارت و توقف‌هایش تنها با استفاده از سطح آب کنترل شود)، مقایسه می‌شود. به‌این‌منظور، یک برنامه کنترل سرعت دوران برای یک ایستگاه دو پمپی معرفی و توالی روشن و خاموش شدن پمپ بهینه‌شده است. سرعت دوران پمپ‌های سانتری‌فیوژ ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ و مجهز به یک موتور القایی دوقطبی با درایور سرعت متغیر است. قطر ورودی پمپ ۳۵۰ میلی‌متر و قطر خروجی پمپ ۲۵۰ میلی‌متر است.

ساخت سناریوهای مختلف

در مدل بهینه‌سازی و همچنین سیستم با دور ثابت برای محاسبه انرژی مصرفی، شرایط مختلفی اعمال گردید. ۶ سناریو مختلف با استفاده از انتخاب مقادیر α و λ ساخته شد. برای پمپاژ موردنظر، با مقداردهی α به میزان ۱ و ۱/۵ به ترتیب دبی ورودی مختلفی محاسبه گردید و مقداردهی λ برای تنظیم دور پمپ به میزان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ شبیه‌سازی شد. برای هر سناریو، ورودی‌های مدل بهینه‌سازی، عبارت است از دبی ورودی فاضلاب، تعداد پمپ‌ها و مشخصات هندسی ایستگاه و خروجی‌های مدل شامل ارتفاع سطح پمپاژ، دبی پمپاژ، دور پمپ و میزان انرژی مصرفی در هر لحظه است.

۲-۴- بررسی روابط جهت بهینه‌سازی با الگوریتم گرگ خاکستری

طبق قانون پیوستگی و بقای جرم در آبگاه در معادله (۶) داریم (Fecarotta et al. 2018):

بتا و دلتا است. X_α و X_β موقعیت این سه پاسخ، X موقعیت پاسخ موردنظر، t نشان‌دهنده شماره تکرار، A و C بردارهای ضرایب ثابتی هستند که از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (5)$$

در این روابط بردار a به‌صورت خطی در طول تکرارهای الگوریتم از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد و بردارهای r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. بردار C به‌عنوان موانع موجود در طبیعت که نزدیک شدن گرگ‌ها به شکار را کند می‌کنند درنظر گرفته می‌شود. وقتی شکار احاطه‌شده توسط گرگ‌ها از حرکت بایستد، حمله به رهبری گرگ آلفا شروع می‌شود. مدل کردن این فرآیند با استفاده از کاهش بردار a انجام می‌شود و از آنجا که A برداری تصادفی در بازه $[-2a, 2a]$ است، بردار ضرایب هم کاهش می‌یابد. اگر $|A| < 1$ باشد، پاسخ موردنظر به سمت موقعیت پاسخ آلفا حرکت خواهد کرد که این متناظر با جستجو پیرامون پاسخ بهینه یافت شده است و اگر $|A| > 1$ باشد، پاسخ‌های امگا و اگرآ شده و از شکار (پاسخ آلفا) دور خواهد شد. در هر تکرار بردار a و به‌تبع آن A و C به‌روز می‌شوند. در پایان تکرارها موقعیت گرگ آلفا به‌عنوان نقطه بهینه معرفی می‌شود (Hatta et al. 2019; Mirjalili et al. 2014).

مراحل مختلف الگوریتم گرگ خاکستری به‌ترتیب شامل تولید یک جمعیت اولیه تصادفی محاسبه برازندگی آن‌ها، مشخص کردن پاسخ‌های آلفا، بتا و سپس به‌روزرسانی موقعیت همه پاسخ‌ها با استفاده از روابط (۱) تا (۵)، محاسبه برازندگی پاسخ‌ها، مشخص شدن پاسخ‌های آلفا، بتا و دلتا، به‌روزرسانی مقادیر پارامترهای a و A و C است و در پایان ارائه موقعیت پاسخ آلفا به‌عنوان بهترین پاسخ یافت شده، است. الگوریتم گرگ خاکستری به‌دلیل تقسیم جمعیت به گروه‌های کوچک‌تر، سرعت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد و به‌دلیل استفاده از ترکیب خطی موقعیت‌های گروه‌ها بهبودیافته است، که باعث همگرایی

در آزمایشگاه به‌دست‌آمده است. منحنی‌های پمپ‌های مورد استفاده در [شکل ۲](#) نشان داده شده است.

در معادله (۱۱) میزان بهینه دبی خروجی پمپ حاصل می‌گردد (Fecarotta et al. 2018):

$$Q_{out}(I) = (\Delta t - 2A.b_h.N_s - \sqrt{(\Delta t - 2A.b_h.N_s)^2 - 8A.(H_w - H_v) + c_h.N_s^2} + \Delta t.[Q_{in}(i-1) + Q_{in}(i) - Q_{out}].(a_h - \partial) / (4A.(a_h - \partial)) \quad (11)$$

i گام برای نرخ دبی جدید برای حل مسئله، Δt فاصله زمانی، Q_{in} دبی ورودی، H_w سطح آب در حوضچه، H_v ارتفاع در پایین دست، λ حاصل تقسیم هد استاتیکی به هد بهینه شده است و ∂ به صورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$\partial = H_{best} \frac{(1 - \lambda)}{Q_{best}^2} \quad (12)$$

λ ضریبی بین صفر و یک است. 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 (۱۳) محاسبه نمود (Fecarotta et al. 2018):

$$Q_{max}^{in} = \frac{Q_{N_{max}}^{best}}{\alpha} \quad (13)$$

مقدار ضریب α به دو وجه روی طراحی ایستگاه پمپاژ اثر می‌گذارد، اول برای یک الگوی در نظر گرفته شده مقادیر بالاتر α در نظر گرفته شده منجر به یک آبگاہ بزرگ تر و یک پمپ بزرگ تر می‌شود و وجه دوم برعکس.

۲-۵- رابطه ارتفاع با دبی سیستم

تا زمانی که سطح آب در مخزن تغییر نکند، هد استاتیکی کل ثابت باقی می‌ماند. اما افت ارتفاع کل که شامل افت ارتفاع اصطکاکی و افت ارتفاع‌های فرعی است با دبی پمپاژ

$$V = H \times A, \quad \frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (6)$$

V حجم آب داخل آبگاہ، A سطح مقطع آبگاہ و H هد پمپاژ، Q_{in} دبی ورودی و Q_{out} دبی خروجی است. طبق معادله (۷) براساس دور پمپ باید مقدار تخلیه از پمپ محاسبه شود:

$$A \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad \text{if} \quad H \geq H_{min} \text{ and } H \leq H_{max} \quad (7)$$

براساس معادله (۷) محاسبات جهت حل معادله (۸) ادامه دارد:

$$A \frac{H(t) - H(t - \Delta t)}{\Delta t} = 0.5 [Q_{in}(t) + Q_{in}(t + \Delta t)] - 0.5 [Q_{out}(t) + Q_{out}(t + \Delta t)] \quad (8)$$

به کمک معادله (۹) ارتفاع استاتیکی حاصل خواهد شد:

$$H(Q_{out}) = \left[a_h \times \left(\frac{Q_{out}}{N_s} \right)^2 + b_h \times \left(\frac{Q_{out}}{N_s} \right) + c_h \right] \times N_s^2 \quad (9)$$

در نتیجه η ، راندمان بهینه پمپ براساس معادله (۱۰) حاصل گردیده است:

$$\eta(Q_{out}) = \frac{(\gamma \times Q_{out} \times H)}{a_p \times \left(\frac{Q_{out}}{N_s} \right)^3 + b_p \times \left(\frac{Q_{out}}{N_s} \right)^2 + c_p \times \left(\frac{Q_{out}}{N_s} \right) + d_p} \times \eta \quad (10)$$

$$\eta = a_\eta \times N_s^3 + b_\eta \times N_s^2 + c_\eta \times N_s + d_\eta$$

N_s دور متغیر پمپ و a, b, c ضرایب رگرسیون منحنی پمپ و راندمان است که به صورت تجربی برای پمپ مورد نظر

$$k = \frac{H_{Nmax}^{best} - H_0}{Q_{Nmax}^{best^2}} = \frac{H_{Nmax}^{best} - \lambda H_{Nmax}^{best}}{Q_{Nmax}^{best^2}} \quad (16)$$

H_w سطح آب درون آبنگاه را می‌توان از طریق معادله پیوستگی (۱۷) مشخص کرد:

$$Q_{in}(t) - Q_p(t) = \frac{dW_w}{dt} \quad (17)$$

که W_w حجم آب درون آبنگاه است. اگر A سطح مقطع آبنگاه باشد، آنگاه $W_w = AH_w$. سپس معادله پیوستگی جریان را می‌توان به صورت معادله (۱۸) نوشت:

$$H_w(t) = H_w(t - dt) + \frac{Q_{in}(t) - Q_p(t)}{A} dt \quad (18)$$

۲-۶- مدل بهینه‌سازی

مدل بهینه‌سازی را به منظور کاهش دادن انرژی مورد نیاز برای پمپ کردن آب به خارج از چاه مرطوب، بکار برده می‌شود. در نتیجه تابع هدف E ، انرژی مورد نیاز پمپ به شکل معادله (۱۹) تعیین می‌گردد (Piri et al. 2021a):

$$E_T = \sum_{i=1}^{n_t} P_i \Delta t \quad (19)$$

E_T انرژی مورد نیاز پمپاژ برای هر پنجره زمانی، i فاصله زمانی است که طول آن Δt است. در طول Δt هر متغیر را ثابت فرض می‌کنند. برای هر فاصله زمانی i ، توان P_i یک تابع از سرعت دورانی پمپ (N_i) و تخلیه پمپاژ (Q_i) است. به علاوه، پمپ می‌تواند روشن و خاموش شود. در نتیجه، یک متغیر دودویی با نام سویچ نیز اضافه شده است که اگر در فاصله زمانی i ام، پمپ روشن باشد برابر یک و در غیر این صورت صفر است. پس، توان مورد نیاز برای هر فاصله زمانی را می‌توان مطابق معادله (۲۰) محاسبه کرد (Fecarotta et al. 2018):

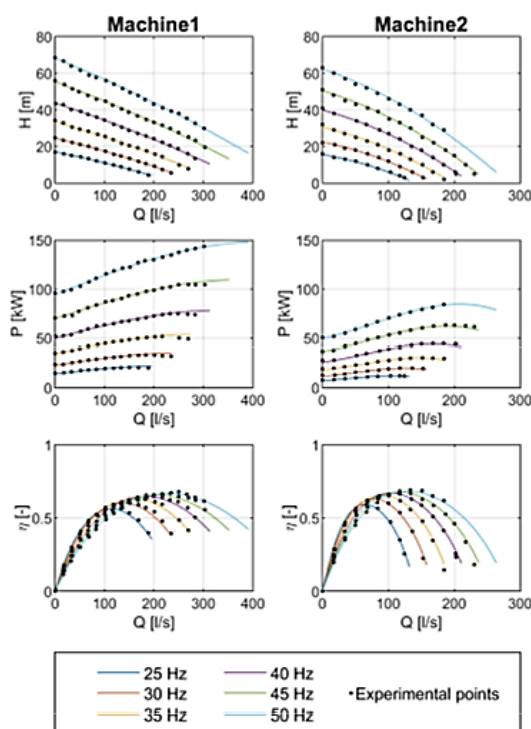


Fig. 2 Performance curves of the tested machines

شکل ۲ منحنی‌های عملکرد پمپ مورد آزمایش

تغییر می‌کند.

$$H_{man} = H_0 - H_w(t) + kQ_p(t)^2 \quad (14)$$

که kQ_p رابطه افت ارتفاع بر حسب Q_p است. H_0 هد استاتیک به هنگام خالی بودن آبنگاه است. H_w سطح آب در آبنگاه است که به زمان و k وابسته است. k یک ضریب است که به جنس و قطر لوله خروجی بستگی دارد.

H_0 را می‌توان به صورت نسبت هد $best$ در بیشترین H_{Nmax}^{best} سرعت مقداره‌ی شود و λ نام گذاری شود:

$$\lambda = \frac{H_0}{H_{Nmax}^{best}} \quad (15)$$

در نتیجه ضریب k طبق معادله (۱۶) حاصل می‌گردد:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{optimization}(H_{wi}, Q_{out_i}, I_i, N_i) : \quad E_T = \sum_T P_i \Delta t \\
 (H_0 - H_{wi}) . I_i + Q_i^2 = a_h^2 Q_i^2 + b_h^1 Q_i N_i + c_h^0 N_i^2 . I_i \\
 H_{wi} = H_{wi-1} + \frac{Q_{in_i} - Q_{in_{i-1}} - Q_i - Q_{i-1}}{2s} . \Delta t \\
 0 \leq Q_i \leq Q_{max} . I_i \\
 1500 \leq N(t) \leq 3000 \\
 0 \leq I(t) \leq 1 \\
 H_w^{min} \leq H_{wi} \leq H_w^{max} \\
 N_i \in R, \quad I_i \in Z, \quad Q_{out_i} \in R, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n_T
 \end{array} \right. \quad (20)$$

$$P_i = P(Q_i, N_i, I_i) = (P_i^{N_{max}} . N_i^3 . e_i . \eta_{best}^N) . I_i$$

$$P_i^{N_{max}} = a_P \left(\frac{Q_i}{N_{max}} \right)^3 + b_P \left(\frac{Q_i}{N_{max}} \right)^2 + c_P \left(\frac{Q_i}{N_{max}} \right)$$

$$\eta_{best}^N = a_\eta N_i^2 + b_\eta N_i + c_\eta$$

$$e_i = \eta_{N_i} / \eta_{best}^N$$

$$e_i = a_e \left(\frac{Q_i}{N_i} \right)^3 + b_e \left(\frac{Q_i}{N_i} \right)^2 + c_e \left(\frac{Q_i}{N_i} \right)$$

۷-۲- تحلیل قابلیت اطمینان

تحلیل قابلیت اطمینان توسط سه شاخص قابلیت اطمینان استاندارد، مونت کارلو و گشتاور برای هر پمپ در ایستگاه پمپاژ فاضلاب براساس داده‌های عملکردی شامل دبی، ارتفاع، سرعت و انرژی انجام می‌شود.

شاخص قابلیت اطمینان استاندارد یک معیار مهم برای ارزیابی عملکرد پمپ است که انحراف پارامترهای اصلی عملکردی یعنی دبی، ارتفاع و سرعت را از مقادیر میانگین آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند (Piri et al. 2021b):

$$\begin{aligned}
 Q_{dev} &= |Q - Q_{mean}| / Q_{mean} \\
 H_{dev} &= |H - H_{mean}| / H_{mean} \\
 N_{dev} &= |N - N_{mean}| / N_{mean}
 \end{aligned} \quad (21)$$

Q_{dev} انحراف دبی، H_{dev} انحراف هد، N_{dev} انحراف سرعت است و سپس میانگین این سه انحراف محاسبه شده و در یک تابع نمایی قرار می‌گیرد:

$$\begin{aligned}
 \text{reliability_index} &= \\
 \exp(-\text{mean}([Q_{dev}; H_{dev}; N_{dev}]))
 \end{aligned} \quad (22)$$

این یک شاخص تجربی است و هر چه انحراف کمتر باشد، شاخص بزرگ‌تر خواهد بود.

شاخص تجربی - وزنی شبه گشتاور با در نظر گرفتن انحراف

e راندمان نسبی و I سویچ پمپ و N_{max} سرعت دوران بیشینه پمپ و η_{best}^N راندمان بهینه و i پایین‌نویس نشان‌دهنده مرحله زمانی است. از معادله (۱۵)، توان در هر فاصله زمانی به صورت تابعی از میزان تخلیه، سرعت دورانی و سویچ، ظاهر می‌شود. سرعت دورانی را می‌توان متناظر با فرکانس بیشینه شبکه تنظیم نمود که در این تحقیق، پمپ‌های فاضلاب ۱۵۰ کیلوواتی مجهز به یک موتور القایی دوقطبی سرعت متغیر و فرکانس ۵۰ هرتز متناظر با ۳۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است و نمی‌توان آن را کمتر از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه نظر گرفت چراکه خطر داغ شدن پمپ وجود خواهد داشت. به علت اینکه سرعت دورانی انتخاب شده بود، تخلیه می‌توانست محاسبه شود؛ اگر پمپ خاموش باشد، تخلیه به طور واضح صفر خواهد بود. با معادل‌سازی منحنی هد پمپ و ایستگاه، مفهومی یاد شده را می‌توان برای مدل بهینه با پنجره زمانی T و گام زمانی i به صورت زیر خلاصه کرد (Fecarotta et al. 2018; Piri et al. 2021a):

عملکردی این چهار پارامتر و تعدیل آن‌ها براساس شرایط هیدرولیکی و ضرایب وزنی، میزان پایداری و اعتمادپذیری سیستم را بیان می‌کند. این تابع در حال حاضر فقط یک شاخص وزنی شبه گشتاوری تولید می‌کند. مثل قسمت قبل بعد از محاسبه انحراف گشتاور اول (میانگین) برای پارامترهای عملکردی با استفاده از توابع نمایی حساسیت و ضرایب وزنی که تجربی است، یک شاخص بدون بعد بین صفر و یک تولید می‌کند.

در شاخص مونت کارلو، ابتدا انرژی مرجع پمپ براساس روابط هیدرولیکی محاسبه می‌شود. سپس با اجرای شبیه‌سازی تصادفی، مقادیر Q ، H و N با در نظر گرفتن توزیع آماری نرمال، تغییر داده می‌شوند و برای هر حالت انرژی تولیدی محاسبه می‌گردد. اگر انرژی شبیه‌سازی شده در محدوده قابل قبول ($\pm 10\%$ انرژی مرجع) قرار گیرد، آن حالت "موفق" تلقی می‌شود. نسبت تعداد حالت‌های موفق (X_S) به کل شبیه‌سازی‌ها (X_T)، به عنوان شاخص مونت کارلو (MC) تعریف می‌شود (Piri et al. 2021b):

$$MC = \frac{X_S}{X_T} \quad (23)$$

این شاخص‌ها مقداری بین صفر و یک دارند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالاتر پمپ در شرایط عدم قطعیت است.

۳- نتایج و بحث

در مدل بهینه‌ساز و همچنین سیستم با دور ثابت برای

محاسبه انرژی مصرفی، شرایط مختلفی اعمال گردید. این شرایط برای ۳ ماه تابستان در نظر گرفته شد. بهینه‌سازی برای الگوی تمام‌روز یعنی ۱۴۴۰ دقیقه صورت گرفت و دبی ورودی به صورت میانگین داده‌های هر ماه در نظر گرفته شده است. سناریوهای مختلفی با استفاده از انتخاب مقادیر α و λ ساخته شد. برای پمپاژ مورد نظر، با مقداردهی α به میزان ۱ و ۱/۵ به ترتیب دبی ورودی مختلفی محاسبه گردید و مقداردهی λ برای تنظیم دور پمپ به میزان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ شبیه‌سازی شد. برای هر سناریو، مقادیر دبی پمپاژ (Q_{out})، ارتفاع استاتیکی (H)، سرعت دوران پمپ‌ها (N_S) و ارتفاع پمپاژ (H_{man}) برای تعیین انرژی مصرفی (E_{opt}) محاسبه گردید. [جدول های ۱ تا ۳](#)، این شاخص‌های آماری بهینه‌شده را به صورت متوسط و ماکزیمم هر سناریو در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور برای پمپ اول و پمپ دوم ایستگاه پمپاژ نشان می‌دهد.

مقادیر دبی ورودی به صورت مقدار ماکزیمم (Q_{max}^{in}) در [جدول های ۱ تا ۳](#) نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول هر ماه ملاحظه می‌شود؛ سرعت پمپاژ برای پمپ اول و دوم نسبت به حالت ثابت کلاسیک (یعنی ۳۰۰۰ دور در دقیقه) کاهش یافته است و بهینه‌شده است. طبق [جدول - های ۱ تا ۳](#) کمترین مقدار سرعت در λ برابر ۰/۲۵ رخ می‌دهد و با افزایش ضریب λ که تنظیم‌کننده دور پمپ است، مقدار دور پمپ، دبی خروجی و ارتفاع پمپاژ هر دو پمپ افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی مصرفی بهینه‌شده افزایش یافته است. همچنین هنگامی که جریان ورودی کاهش پیدا می‌کند ($\alpha = 1/5$)، سرعت دوران پمپ‌ها و در نتیجه مقدار مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

جدول ۱ پارامترهای سناریوهای مختلف بررسی شده ماه تیر در ایستگاه شهر مشهد

Table 1 Parameters of the different scenarios analyzed in July at the Mashhad station

α	λ	Q_{max}^{in} (lit/s)	Mean H(m)	Pump 1				Pump 2			
				Mean H_{man} (m)	Max Q_{out} (lit/s)	Mean N_S (rpm)	E_{opt}	Mean H_{man} (m)	Max Q_{out} (lit/s)	Mean N_S (rpm)	E_{opt}
1	0.25	637.5	9	10.54	322.35	1342.76	284.25	10.47	313.77	1332.49	276.93
1	0.5	637.5	9.26	16.47	337.8	1421.26	406.40	16.41	338.74	1545.75	452.63
1	0.75	637.5	9.27	23.74	351.53	1431.91	471.24	23.63	346.64	1580.90	401.91
1.5	0.25	425	8.84	6.37	311.51	1052.04	153.07	6.82	312.89	1241.17	203.57
1.5	0.5	425	9.18	14.12	316.27	1398.47	375.97	13.98	311.34	1324.95	346.13
1.5	0.75	425	9.21	22.35	3125.22	1400.88	410.51	22.39	315.96	1480.60	342.91

جدول ۲ پارامترهای سناریوهای مختلف بررسی شده ماه مرداد در ایستگاه شهر مشهد

Table 2 Parameters of the different scenarios analyzed in August at the Mashhad station

α	λ	Q_{max}^{in} (lit/s)	Mean H(m)	Pump 1				Pump 2			
				Mean H _{man} (m)	Max Q _{out} (lit/s)	Mean N _s (rpm)	E _{opt}	Mean H _{man} (m)	Max Q _{out} (lit/s)	Mean N _s (rpm)	E _{opt}
1	0.25	611.3	8.85	11.74	299.37	1199.68	252.80	11.97	285.73	1185.73	249.48
1	0.5	611.3	8.89	17.04	300.94	1260.83	360.50	16.65	299.70	1268.19	364.91
1	0.75	611.3	8.74	22.21	323.41	1081.35	445.54	22.64	313.33	1009.91	399.16
1.5	0.25	407.5	9.07	6.97	265.98	1200.9	194.80	7.03	265.14	1057.19	151.21
1.5	0.5	407.5	8.89	13.48	272.45	1243.98	364.60	14.54	280.07	1159.32	334.84
1.5	0.75	407.5	9.02	22.49	280.89	1145.43	389.96	22.52	286.27	1052.38	349.24

جدول ۳ پارامترهای سناریوهای مختلف بررسی شده ماه شهریور در ایستگاه شهر مشهد

Table 3 Parameters of the different scenarios analyzed in September at the Mashhad station

α	λ	Q_{max}^{in} (lit/s)	Mean H(m)	Pump 1				Pump 2			
				Mean H _{man} (m)	Max Q _{out} (m ³ /s)	Mean N _s (rpm)	E _{opt}	Mean H _{man} (m)	Max Q _{out} (m ³ /s)	Mean N _s (rpm)	E _{opt}
1	0.25	532.1	8.95	12.0	286.89	1241.47	247.47	11.77	289.57	1240.76	244.29
1	0.5	532.1	8.83	17.79	289.39	1358.53	364.11	17.76	294.17	1315.1	349.4
1	0.75	532.1	8.63	21.60	298.24	1433.23	385.42	25.0	231.29	1449.43	413.28
1.5	0.25	354.7	8.79	7.94	249.54	1150.47	175.91	7.68	242.27	1019.69	144.23
1.5	0.5	354.7	9.60	14.21	265.21	1274.23	367.07	13.99	255.24	1222.45	297.87
1.5	0.75	354.7	9.15	22.43	278.85	1283.69	369.94	20.87	269.94	1296.10	356.28

۳-۱- مقایسه نتایج مدل بهینه‌ساز گرگ خاکستری

با سیستم ثابت

با توجه به بهینه‌سازی برای الگوی تمام روز، به‌منظور برداشت نتایج قابل‌اعتماد در یک زمان منطقی، کل روز به n پنجره زمانی با طول Δt تقسیم‌بندی شده است. در این مقاله با توجه به داده‌های ورودی دقیقه‌ای، Δt برابر یک دقیقه در نظر گرفته شد و مسئله بهینه‌سازی برای هر یک از آن‌ها حل شده است. حل بهینه برای یک روز کامل، یعنی سلسله پاسخ‌های بهینه برای سرعت و سویچ‌ها، در قالب اتحاد حل‌های پی‌درپی n به‌دست‌آمده است و می‌توان طبق رابطه (۱۹)، انرژی بهینه روزانه، E_{opt} را به‌صورت جمع E_T یعنی انرژی‌های هر پنجره زمانی محاسبه نمود:

$$E_{opt} = \sum_{T=1}^n E_T \quad (24)$$

برای هر سناریو، یک مقدار انرژی مرجع موردنیاز روزانه، E_{ref} به‌صورت معادله (۲۵) محاسبه گشته است:

$$E_{ref} = \int \gamma Q^{in}(t) \left[H_0 + k Q^{in^2}(t) \right] dt \quad (25)$$

در جدول های ۴-۶ نتایج انرژی کل موردنیاز برای حل بهینه با مدل گرگ خاکستری (E_{opt})، انرژی مرجع روزانه (E_{ref}) و راندمان عملکرد بهینه (η_{opt}) به‌صورت مجموع نتایج دو پمپ در مقایسه با انرژی پمپاژ با دور ثابت (E_{cs}) و راندمان عملکرد آن (η_{cs}) قرار گرفته است.

طبق جدول های ۴-۶، نتایج دقت بالای الگوریتم گرگ خاکستری در به حداقل رساندن انرژی مصرفی توسط پمپ‌ها را برای ایستگاه نشان می‌دهد. در هر سه ماه مذکور، میزان انرژی مصرفی بهینه با دور متغیر پایین‌تر از حالت دور ثابت است. این نشان می‌دهد که با به‌کار بردن سرعت دوران متغیر در ایستگاه پمپاژ می‌توان به‌خوبی میزان انرژی را بهینه نمود و طبق جدول ۷، صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف انرژی داشت. در جدول ۷، مقدار صرفه‌جویی در مصرف انرژی پمپاژ برای هر سناریو در هر سه ماه ذکر شده است. مقدار انرژی مصرفی بهینه‌شده در ماه شهریور با توجه

جدول ۴ نتایج بررسی سناریوهای مختلف ایستگاه پمپاژ مشهد در ماه تیر

Table 4 Results of the analysis of different scenarios of the Mashhad pumping station in July

α	λ	H_0 (m)	E_{ref} (kwh/day)	E_{opt} (kwh/day)	Overall efficiency(opt)	E_{cs} (kwh/day)	Overall efficiency(CS)
1	0.25	10.21	1258.29	561.18	0.95	5086.37	0.59
1	0.5	20.43	9623.53	859.03	0.91	5033.53	0.47
1	0.75	30.65	6659.58	873.15	0.86	4989.67	0.25
1.5	0.25	10.21	5866.54	356.64	0.93	3541.47	0.39
1.5	0.5	20.43	4714.63	722.11	0.84	3501.27	0.25
1.5	0.75	30.65	3562.68	753.43	0.78	3444.37	0.03

جدول ۵ نتایج بررسی سناریوهای مختلف ایستگاه پمپاژ مشهد در ماه مرداد

Table 5 Results of the analysis of different scenarios of the Mashhad pumping station in August

α	λ	H_0 (m)	E_{ref} (kwh/day)	E_{opt} (kwh/day)	Overall efficiency(opt)	E_{cs} (kwh/day)	Overall efficiency(CS)
1	0.25	10.21	9391.30	502.29	0.94	4630.79	0.5
1	0.5	20.43	7364.20	726.42	0.90	4564.36	0.38
1	0.75	30.65	5336.96	844.71	0.84	4517.10	0.15
1.5	0.25	10.21	4966.30	346.01	0.93	3156.78	0.36
1.5	0.5	20.43	3850.64	699.45	0.81	3142.60	0.18
1.5	0.75	30.65	3274.69	739.20	0.77	3080.07	0.05

جدول ۶ نتایج بررسی سناریوهای مختلف ایستگاه پمپاژ مشهد در ماه شهریور

Table 6 Results of the analysis of different scenarios of the Mashhad pumping station in September

α	λ	H_0 (m)	E_{ref} (kwh/day)	E_{opt} (kwh/day)	Overall efficiency(opt)	E_{cs} (kwh/day)	Overall efficiency(CS)
1	0.25	10.21	8241.37	491.76	0.94	4380.05	0.46
1	0.5	20.43	6520.95	713.51	0.89	4352.36	0.33
1	0.75	30.65	4800.41	798.7	0.83	4316.14	0.10
1.5	0.25	10.21	4222.79	320.14	0.92	2957.45	0.29
1.5	0.5	20.43	3484.9	664.95	0.80	2933.95	0.15
1.5	0.75	30.65	2998.10	726.23	0.75	2874.94	0.04

دیده شده است، می توان به منبع (Fecarotta et al. (2018 اشاره کرد و نتایج در بازه بررسی شده روند مشابه دارد.

با مقایسه سناریوهای مختلف ماه تیر در شکل ۳، هنگامی که دبی ورودی افزایش پیدا می کند ($\alpha=1$) راندمان عملکرد پمپ سرعت متغیر نسبت به قبل ($\alpha=1/5$) افزایش می یابد و برعکس. همچنین راندمان هر دو سیستم بهینه و کلاسیک وقتی α کمتر می شود، بالاتر است و این به λ وابسته نیست. این روند برای سناریوهای شکل های ۴ و ۵ نیز مشاهده می شود. با بررسی هر ماه در شکل های ۳-۵، با افزایش مقدار λ در سناریوهای مختلف میزان انرژی مصرفی هر دو سیستم افزایش و راندمان عملکرد آن کاهش یافته است و از آنجاکه با بیشتر شدن λ تقریباً اختلاف بین مقدار راندمان عملکرد بهینه در سناریوهای مختلف کم

به مقدار دبی ورودی کمتر نسبت به دو ماه دیگر کمتر بوده است. مقدار انرژی مصرفی بهینه در دو ماه پرمصرف دیگر به دلیل دبی ورودی مشابه تقریباً مشابه است و در ماه تیر به دلیل دبی ورودی بیشتر مقدار انرژی مصرفی بیشتر است.

در شکل های ۳-۵ مقایسه این راندمان ها براساس α و λ مختلف نشان داده شده است. در هر ماه، راندمان عملکرد بهینه عموماً بالاتر از راندمان تنظیمات کلاسیک است. نتایج راندمان کلی نشان دهنده دقت بالاتر الگوریتم گرگ خاکستری در مقایسه با کنترل ثابت است که در جدول های ۴-۶ آمده است و این دقت در حالتی یک و نیم برابر هم می شود نشان از برتری الگوریتم گرگ خاکستری در بهینه کردن انرژی دارد. این نتیجه در کار محققان دیگر نیز

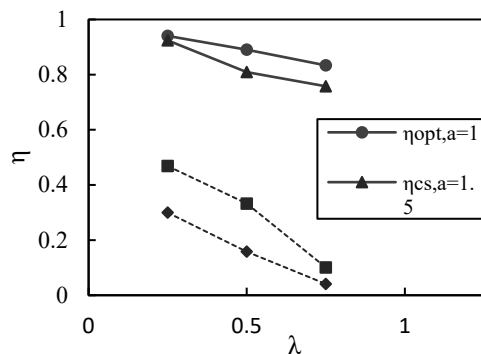


Fig. 5 Comparison of energy efficiency in the pumping station with constant speed (η_{cs}) and variable speed (η_{opt}) for September

شکل ۵ مقایسه راندمان انرژی در ایستگاه پمپاژ با دور ثابت (η_{cs}) و دور متغیر (η_{opt}) برای ماه شهریور

۲-۳- تحلیل ساده هزینه-سود (Cost-Benefit) و دوره بازگشت سرمایه (Payback Period)

با توجه به این که مقاله حاضر صرفاً میزان انرژی صرفه‌جویی شده ناشی از به‌کارگیری درایورهای دور متغیر گزارش می‌کند، برای تصمیم‌گیری عملی و مهندسی، یک تحلیل هزینه-سود مبتنی بر هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های نگهداری و قیمت برق محلی ارائه می‌شود.

هزینه سرمایه‌ای اولیه (C_{VFD}) شامل هزینه خرید تجهیزات و هزینه نصب است. هزینه نگهداری سالانه به‌صورت درصدی از هزینه سرمایه اولیه در نظر گرفته می‌شود:

$$C_{maint} = \beta C_{VFD}, \quad \beta = 0.02 - 0.05 \quad (26)$$

صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش مصرف انرژی مستقیماً تابع میزان انرژی ذخیره‌شده و قیمت برق است و به‌صورت رابطه (۲۷) حساب می‌شود:

$$B_{energy} = C_e \times \Delta E_{year} \quad (27)$$

که در آن ΔE_{year} ، انرژی صرفه‌جویی شده سالانه و C_e ، قیمت برق است. B_{net} ، سود خالص سالانه بیانگر جریان نقدی مثبت سالانه ناشی از اجرای پروژه است و به‌صورت رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود:

است، می‌توان راندمان سیستم را با یک برنامه‌ریزی بهینه برای عملکرد پمپ‌ها در طی سالیان سال ثابت نگه داشت.

جدول ۷ درصد صرفه‌جویی مصرف انرژی در ماه‌های تابستان برای هر سناریو

Table 7 The percentage of energy consumption savings during the summer

α	λ	Tir %	Mordad %	Shahrivar %
1	0.25	88	89	88
1	0.5	82	84	83
1	0.75	82	81	81
1.5	0.25	89	89	89
1.5	0.5	79	77	77
1.5	0.75	78	76	74

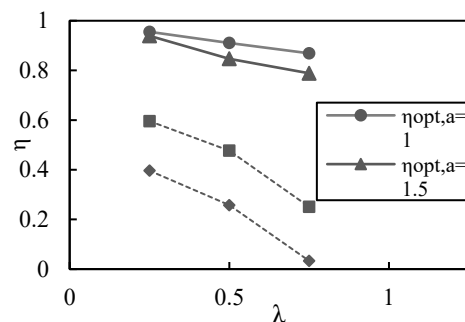


Fig. 3 Comparison of energy efficiency in the pumping station with constant speed (η_{cs}) and variable speed (η_{opt}) for July

شکل ۳ مقایسه راندمان انرژی در ایستگاه پمپاژ با دور ثابت (η_{cs}) و دور متغیر (η_{opt}) برای ماه تیر

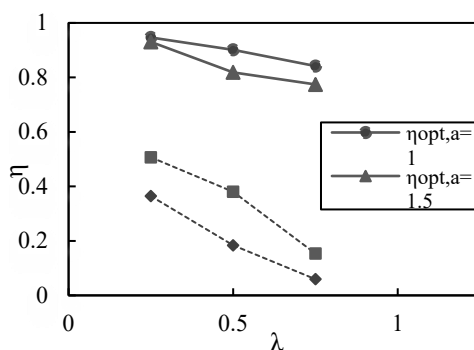


Fig. 4 Comparison of energy efficiency in the pumping station with constant speed (η_{cs}) and variable speed (η_{opt}) for August

شکل ۴ مقایسه راندمان انرژی در ایستگاه پمپاژ با دور ثابت (η_{cs}) و دور متغیر (η_{opt}) برای ماه مرداد

جدول ۸ دوره بازگشت سرمایه (Payback) برای ماه تیر

Table 8 Payback period for the month of July

α	λ	E_{CS}	E_{opt}	B_{energy}	B_{net}	Payback (month)
1	0.25	5086.377	561.19	1195825957	1177825957	6.1
1	0.5	5033.531	859.03	1103153648	1085153648	6.5
1	0.75	4989.674	873.15	1087832739	1069832739	6.4
1.5	0.25	3541.479	356.64	841625511	823625511	8.7
1.5	0.5	3501.272	722.11	734421367	716421367	10.0
1.5	0.75	3444.378	753.4318	711109413	693109413	10.7

جدول ۹ دوره بازگشت سرمایه (Payback) برای ماه مرداد

Table 9 Payback period for the month of August

α	λ	E_{CS}	E_{opt}	B_{energy}	B_{net}	Payback (month)
1	0.25	4630.794	502.29	1090998356	1072998356	6.7
1	0.5	4564.362	726.4219	1014213998	996213998	7.2
1	0.75	4517.105	844.7158	970465533	952465533	7.5
1.5	0.25	3156.785	346.01	742775421	724775421	9.9
1.5	0.5	3142.602	699.4527	645626510	627626510	11.4
1.5	0.75	3080.071	739.2083	618596323	600596323	11.9

جدول ۱۰ دوره بازگشت سرمایه (Payback) برای ماه شهریور

Table 10 Payback period for the month of September

α	λ	E_{CS}	E_{opt}	B_{energy}	B_{net}	Payback (month)
1	0.25	4380.057	491.76	1027521465	1009521465	7.1
1	0.5	4352.364	713.51	961603468	943603468	7.6
1	0.75	4316.144	798.7	929519877	911519877	7.8
1.5	0.25	2957.45	320.14	696935491	678935491	10
1.5	0.5	2933.954	664.95	599606926	581606926	12.3
1.5	0.75	2874.949	726.23	567820383	549820383	13.0

بازگشت سرمایه بین شش تا سیزده ماه گزارش شده است که با افزایش مقدار α و λ مقدار دوره بازگشت افزایش می‌یابد.

۳-۳- شاخص قابلیت اطمینان

نتایج براساس تحلیل قابلیت اطمینان پمپ‌ها با استفاده از سه شاخص مختلف: قابلیت اطمینان استاندارد، مونت کارلو و روش گشتاور، بینش جامعی از عملکرد پمپ تحت شرایط مختلف کاری ارائه می‌دهد. مقدار این شاخص برای هر ساعت از شبانه‌روز در سه ماه تیر، مرداد و شهریور به‌ازای α و λ مختلف محاسبه و به‌صورت میانگین یک شبانه‌روز نشان داده شده است.

با بررسی نتایج طبق شکل های ۶-۸، شاخص قابلیت اطمینان استاندارد، که در محدوده تقریبی ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ قرار دارد، نشان می‌دهد که هر دو پمپ در پارامترهای

$$B_{net} = B_{energy} - C_{maint} \quad (28)$$

دوره بازگشت سرمایه نشان می‌دهد چه مدت‌زمان لازم است تا سود انباشته‌شده پروژه، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را جبران کند. مقدار آن طبق رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$Payback - period = \frac{C_{VFD}}{B_{net}} \quad (29)$$

براین اساس، در جدول های ۸-۱۰ مقدار نرخ سود و دوره بازگشت سرمایه برای مقدار انرژی صرفه‌جویی شده در ماه‌های تیر و مرداد و شهریور ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای سناریوهای مختلف مقدار دوره

مونت کارلو در نقاط عملیاتی مختلف نشان می‌دهد که هر دو پمپ علیرغم تغییرات پارامتر، عملکرد پایداری را حفظ می‌کنند.

همچنین طبق نتایج نمودارهای ۶ تا ۸، شاخص‌های روش گشتاور، که بین ۰/۵۸ و ۰/۸۰ متغیر است، ارزیابی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد که هم بزرگی و هم توزیع انحرافات عملیاتی را در نظر می‌گیرد. این مقادیر همبستگی خوبی با نتایج قابلیت اطمینان استاندارد دارند اما حساسیت بیشتری به تغییرات پارامتر، به‌ویژه در مقادیر بالای λ نشان می‌دهند. شاخص‌های پایین‌تر گشتاور در λ برابر ۰/۷۵ (حدود ۰/۶۵ تا ۰/۷۰) با کاهش مشاهده‌شده در قابلیت اطمینان استاندارد مطابقت دارد و تایید می‌کند که هر دو پمپ در پارامترهای جریان بالاتر با کارایی کمتری کار می‌کنند.

مختلف جریان و هد قابلیت اطمینان عملیاتی خوبی را حفظ می‌کنند. بالاترین مقادیر قابلیت اطمینان به‌طور مداوم در λ برابر ۰/۵ نشان می‌دهد که پمپ‌ها در این نقطه عملکردی، پایداری و قابل‌اعتمادترین شرایط را دارند. در دوره شهریور، هر دو پمپ به بالاترین مقادیر قابلیت اطمینان خود (۰/۹۴ برای پمپ اول و ۰/۹۵ برای پمپ دوم) رسیدند که نشان‌دهنده شرایط کاری مطلوب در این ماه است.

همچنین با بررسی نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو، که مقادیر حدود ۰/۶۱ تا ۰/۶۳ را نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن تغییرات تصادفی در پارامترهای عملیاتی، ارزیابی محافظه‌کارانه‌تری از قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌دهد.

این روش عدم قطعیت‌ها و نوسانات ذاتی در عملکرد پمپ را در نظر می‌گیرد و تخمین قابل‌اعتمادی از عملکرد سیستم تحت شرایط متغیر ارائه می‌دهد. شاخص‌های نسبتاً ثابت

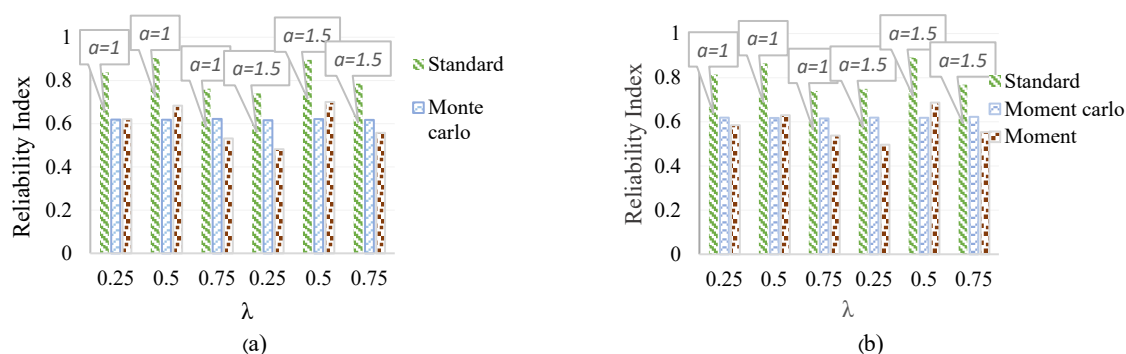


Fig. 6 Comparison of three reliability analysis methods: standard, moment, and Monte Carlo in July: a) Pump 1, b) Pump 2

شکل ۶ مقایسه سه روش تحلیل قابلیت اطمینان استاندارد، روش گشتاور و مونت کارلو در ماه تیر: (a) پمپ اول، (b) پمپ دوم

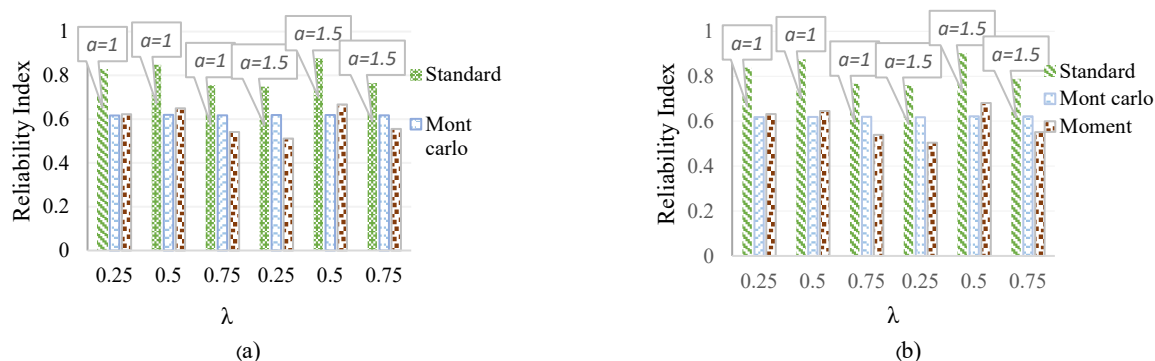


Fig. 7 Comparison of three reliability analysis methods: standard, moment, and Monte Carlo in August: a) Pump 1, b) Pump 2

شکل ۷ مقایسه سه روش تحلیل قابلیت اطمینان استاندارد، روش گشتاور و مونت کارلو در ماه مرداد: (a) پمپ اول، (b) پمپ دوم

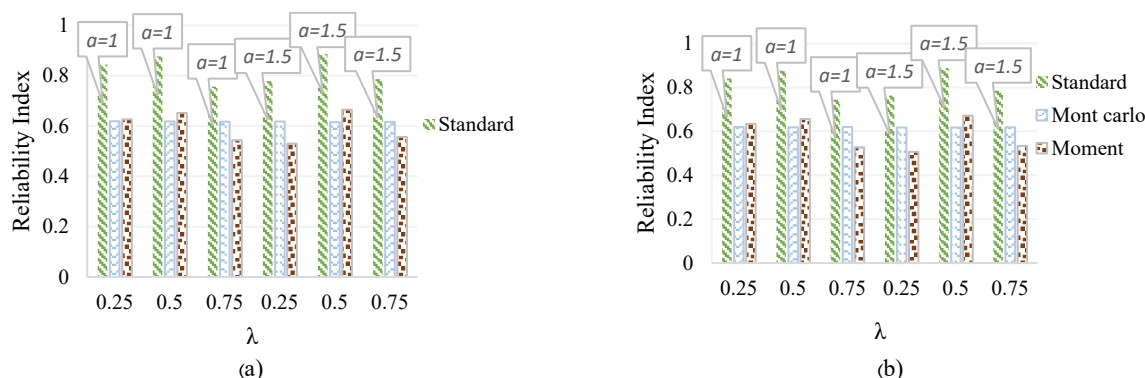


Fig. 8 Comparison of three reliability analysis methods: standard, moment, and Monte Carlo in September: a) Pump 1, b) Pump 2

شکل ۸ مقایسه سه روش تحلیل قابلیت اطمینان استاندارد، روش گشتاور و مونت کارلو در ماه شهریور: (a) پمپ اول، (b) پمپ دوم

ایستگاه پمپاژ می‌توان به‌خوبی میزان انرژی را بهینه نمود و میزان قابل‌توجهی تا حداقل بیش از ۷۰٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی داشت. نتایج نشان می‌دهد، می‌توان راندمان سیستم را با یک برنامه‌ریزی بهینه برای عملکرد پمپ‌ها در طی سالیان سال ثابت نگه داشت. با استفاده از سه شاخص مختلف؛ قابلیت اطمینان استاندارد، مونت کارلو و روش گشتاور، عملکرد پمپ تحلیل گردید. شاخص قابلیت اطمینان استاندارد در محدوده تقریبی ۰/۷۵ تا ۰/۹۵، نشان می‌دهد که هر دو پمپ در پارامترهای مختلف جریان (λ) و α قابلیت اطمینان عملیاتی خوبی را حفظ می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو، در محدوده ۰/۶۱ تا ۰/۶۳، با در نظر گرفتن تغییرات تصادفی در پارامترهای عملیاتی، ارزیابی محافظه‌کارانه‌تری از قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌دهد. شاخص‌های روش گشتاور که بین ۰/۵۸ و ۰/۸۰ متغیر است، ارزیابی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد که هم بزرگی و هم توزیع انحرافات عملیاتی را در نظر می‌گیرد. طبق نتایج شاخص قابلیت اعتماد ارائه‌شده برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، مقادیر بالای این شاخص (حدود ۰/۸۵ تا ۰/۹۵) در λ برابر ۰/۵ نشان می‌دهد که پمپ‌ها در این نقطه عملکردی، پایدارترین و قابل‌اعتمادترین شرایط را دارند.

این روش بینش ارزشمندی در مورد رفتار دینامیکی پمپ‌ها را در محدوده عملیاتی آن‌ها ارائه می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله بهینه‌سازی انرژی مصرفی دو پمپ موازی با استفاده از داده‌های واقعی دبی فاضلاب یک ایستگاه پمپاژ در شهر مشهد انجام شد. متغیر اصلی در متن سرعت دوران پمپ بود که توانایی تغییر در محدوده داده‌شده را داشت. با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری مقدار بهینه متغیرهای دبی، دور پمپ، توان پمپ و در نتیجه راندمان پمپ محاسبه گردید و توالی روشن و خاموش شدن پمپ در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور برای ضریب تغییرات سرعت (۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵) λ و ضریب تغییرات دبی (۱/۵)، $\alpha = 1$ تعیین شد و با حالت سرعت ثابت مقایسه شد. راندمان تنظیمات سیستم بهینه عموماً بالاتر از راندمان عملکرد سیستم کلاسیک است. راندمان هر دو سیستم با کاهش α افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش λ کاهش می‌یابد. میزان انرژی مصرفی با دور متغیر پایین‌تر از حالت کلاسیک است و با بکار بردن سرعت دوران متغیر در

5- List of Symbols

α (-)	Ratio between $Q_{N_{max}}^{BEP}$ and Q_{max}^{in}
λ (-)	The ratio between static head and $H_{N_{max}}^{BEP}$
Δt (Sec)	Length of each time step
η (-)	Pump efficiency
$\eta_{N_{max}}^{best}$ (-)	Optimum pump efficiency at the maximum rotational speed
η_{CS} (-)	CS activity efficiency
η_{opt} (-)	Efficiency of Optimal Planning
θ (-)	Ratio between Q_{in} and $Q_{N_{max}}^{BEP}$
$best$	Best Efficiency Point
c_h^2, c_h^1, c_h^0 (-)	Regression Coefficients of the Head Curve
c_p^2, c_p^1, c_p^0 (-)	Pump Curve Regression Coefficients
$c_\eta^2, c_\eta^1, c_\eta^0$ (-)	Regression Coefficients of the Efficiency Curve
CS	Constant-Speed Operation
e (-)	Efficiency Ratio
E (kwh/day)	Pump Energy Consumption
E_{CS} (kwh/day)	Required Daily Pumping Energy for CS Operating Conditions
E_{opt} (kwh/day)	Optimized Daily Pumping Energy Requirement
E_{ref} (kwh/day)	Daily Reference Energy Pumping Requirement
E_T (kwh/day)	Required Pumping Head
H (m)	Pumped Head
$H_{N_{max}}^{best}$ (m)	Pumped Head at the Maximum Rotational Speed
H_{man} (m)	Required Pumping Head
H_0 (m)	Static Head
H_N (m)	Pumped Head at Rotational Speed
H_w (m)	Water Level in the Reservoir
H_w^{max} (m)	Maximum Allowable Water Level in the Reservoir
H_w^{min} (m)	Minimum Allowable Water Level in the Reservoir
i (-)	Subscript indicating the i -th time step
I (-)	Pump On/Off Switch

K (-)	Head Loss Coefficient
n_t (-)	Number of Time Steps in the Time Window
n_w (-)	Number of Time Windows in a Day
N (rpm)	Pump Rotational Speed
N_{max} (rpm)	Maximum Pump Rotational Speed
P (w)	Pumped Power
$P_{N_{max}}$ (w)	Pumped Power at the Maximum Rotational Speed
Q (m ³ /sec)	Pumped Discharge
$q(t)$ (m ³ /sec)	Dimensionless Inflow Pattern
$Q_{N_{max}}^{BEP}$ (m ³ /sec)	Optimal Pump Discharge at the Maximum Rotational Speed
Q_{max}^{in} (m ³ /sec)	Maximum Inflow Discharge
Q_{exp} (m ³ /sec)	Measured Drainage Discharge
Q_{in} (m ³ /sec)	Inflow Discharge
Q_{out} (m ³ /sec)	Outflow Discharge
S (m ²)	Cross-Sectional Area of the Reservoir
t (sec)	Time
T (-)	Time Window
V (m ³)	Reservoir Volume

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to their respected supervisors for their invaluable guidance, continuous support, and constructive suggestions throughout the course of this research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, E.N.Z., B.P., and J.P.; Methodology, E.N.Z., B.P., and J.P.; Software, E.N.Z., B.P., and J.P.; data analysis, E.N.Z., J.P.; WritingOriginal Draft Preparation, E.N.Z.; Writing-Review and Editing, E.N.Z., B.P., and J.P.; Supervision, B.P.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This article is derived from a doctoral dissertation completed at the University of Sistan and Baluchestan and was not supported by any financial funding or contractual agreement with any other organization.

Data Availability Statement

Data access is available on a limited basis if needed.

Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest.

References:

- Barán B, Von Lücken C, Sotelo A (2005) Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies *Advances in Engineering Software* 36:39-47
- Behandish M, Wu ZY (2014) Concurrent pump scheduling and storage level optimization using meta-models and evolutionary algorithms *Procedia Engineering* 70:103-112
- Co-operation OfE, Development (2009) *Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing-Key Messages for Policy Makers*. OECD Publishing,
- Farsani, Safavi P (2024) Forecasting daily urban water demand and optimizing pumping station operation hours: case study of najafabad *Science and engineering of water and wastewater* 9:17-28
- Fecarotta O, Carravetta A, Morani MC, Padulano R (2018) Optimal pump scheduling for urban drainage under variable flow conditions *Resources* 7:73
- Filipe J, Bessa RJ, Reis M, Alves R, Póvoa P (2019) Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station *Applied Energy* 252:113423
- Hatta N, Zain AM, Sallehuddin R, Shayfull Z, Yusoff Y (2019) Recent studies on optimisation method of Grey Wolf Optimiser (GWO): a review (2014–2017) *Artificial intelligence review* 52:2651-2683
- Kashkuli S, Bahrami, Ansari (2016) Optimal Operation of water Supply sYstem pumping station using the Bee algorithm *Journal of water and soil conservation research* 23:175-189
- Kebir FO, Demirci M, Karaaslan M, Ünal E, Dincer F, Arat HT (2014) Smart grid on energy efficiency application for wastewater treatment *Environmental Progress & Sustainable Energy* 33:556-563
- Makhadmeh SN, Al-Betar MA, Doush IA, Awadallah MA, Kassaymeh S, Mirjalili S, Zitar RA (2023) Recent advances in Grey Wolf Optimizer, its versions and applications *Ieee Access* 12:22991-23028
- Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A (2014) Grey wolf optimizer *Advances in engineering software* 69:46-61
- Moeenfar, Yazdi (2023) Optimizing energy use in water distribution network with variable speed pumps *Hydraulic Journal* 18:45-61
- 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, Pirzade B, Keshtegar B, Givechi M (2021a) Energy optimization of wastewater pumping under variable flow conditions using GMDH model with genetic algorithm. university of sistan and baluchestan
- Piri J, Pirzadeh B, Keshtegar B, Givechi M (2021b) 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
- Rajabpour R, Afshar Mh (2008) Optimal operation of consecutive pumping station using the PSO algorithm *Iranian Journal of water and wastewater*, no 66
- Rasulzadeh S, haddad OB (2012) Development and Application of a hybrid NLP-GA algorithm in the optimal Design and operation of pumping stations *Iranian Journal of Soil and water research* 43
- Rezapoor (2024) An optimization model for minimizing pumping costs in water distribution systems *Engineering Modeling* 22:255-265
- Sperlrich A, Pfeiffer D, Burgschweiger J, Campbell E, Beck M, Gnirss R, Ernst M (2018) Energy efficient operation of variable speed submersible pumps: Simulation of a ground water well field *Water* 10:1255
- Stolberg CG (2003) Variable speed pumping for submersible wastewater pumping systems *World Pumps*:29-32