



The effectiveness of Monte Carlo-based neural network in analyzing the performance of pumping wells

Abdul-Razzag Ghoolee¹, Abdolreza Zahiri^{2*}, Jamshid Piri^{3*}

1. Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail:

a.r.ghoolee@gmail.com

2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: azahiri@gau.ac.ir

3. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: j.piri@uoz.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 26, 2025

Revised: March. 12, 2025

Accepted: Apr. 23, 2025

Published online: July. 2025

Keywords:

Artificial Neural Networks,
Monte-Carlo Simulation,
Pumping System,
Reliability Index,
Sensitivity Analysis.

ABSTRACT

The present study was conducted with the aim of evaluating the efficiency of the multilayer perceptron artificial neural networks in estimating the pump rotation of drinking water wells located in Bandar Turkman using the key parameters of pump discharge, pump installation depth, and groundwater level. This study involves an integrated approach of artificial neural networks modeling and its sensitivity analysis as well as Monte-Carlo simulation. The neural networks results showed that this model has an acceptable performance for predicting the pump rotation speed of wells. Furthermore, it was revealed that this model performance is highly affected by seasonal changes. The best performance of this model was achieved in May with $R^2=0.98$ and $RMSE=15.15$ and in March with $R^2=0.99$ and $RMSE=15.13$ for training and testing phases, respectively. The sensitivity analysis of input variables indicated that the groundwater level with 48% importance has the greatest effect on the pump rotation speed, followed by the pump discharge and pump installation depth with 37% and 15%, respectively. The reliability index analysis (β) showed that the seasonal changes have high influence on studied pumping system so that in winter season, it has excellent reliability ($\beta=1.7-2.2$) and through summer season, it has negative reliability which indicates the possibility of system failure or excessive energy consumption by pumps. The proposed approach in this study provides a practical framework for water and wastewater managers to optimize pumping operations, reduce energy costs, and enhance water management in arid regions.

Cite this article: Ghoolee, A. R., Zahiri, A. & Piri, J. (2025) The effectiveness of Monte Carlo-based neural network in analyzing the performance of pumping wells, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (5), 1239-1264. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.390979.669891>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.390979.669891>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, optimal management of water resources has become one of the main challenges, particularly in arid and semi-arid regions where droughts and water scarcity pose significant challenges for sustainable development and public health. This issue is of increasing importance due to many influential factors such as climate change, increased human interference in watersheds, population growth and the consequent increase in the need for drinking water. This reality is also true on a smaller scale, as the pumping systems in drinking water wells, despite their important role in water supply infrastructure, are currently facing numerous operational challenges in terms of efficiency, reliability, and energy consumption. These stations face problems such as reduced efficiency, increased energy consumption and operating costs. Currently, many of these systems are managed traditionally without sufficient attention to the variables affecting the efficiency and stability of pump performance. While pumping water out of the wells to the surface distribution systems needs an optimal performance of pumping system, the lack of accurate approaches to analyzing and evaluating the efficiency of these systems has reduced their reliability and increased the likelihood of devices failure and energy waste. Recent publications have shown that optimizing these systems could improve their supply reliability in addition to reducing their operating costs by up to 30%. Approximately 10%-20% of global electrical energy is consumed by water pumping systems, with significant potential for efficiency improvement. Furthermore, this percentage can even increase to 25-30% of water energy use in developing countries. Existing studies have demonstrated that optimization of these systems presents compelling opportunities for energy conservation and operational cost reduction while ensuring reliable water supply for communities. Comprehensive analytical approaches (e.g. probabilistic methods, artificial intelligence techniques, etc) are required to deal with the complex interaction between different operating parameters in water pumping systems. Specifically, in regions with significant seasonal variations in water demand and availability, traditional methods of pump system analysis fail to capture the dynamic nature of these interactions. The present research builds on these advances by combining probabilistic methods with artificial intelligence techniques.

Material and Methods

This study focuses on 17 water wells in the Bandar Torkaman region, a coastal city in Golestan Province, Iran. These wells serve as the primary source of drinking water for the urban and rural populations of Bandar Torkaman and its neighbor, Gomishan. In water wells, five parameters are measured, including well depth, pump installation depth, pump discharge, pump speed, and water level. Initially, four probability distributions are fitted to these data (Normal, Lognormal, Gamma, and Weibull), using model selection criteria to determine the best-fitting distribution. In this study, there are two parallel analytical approaches including convolutional neural networks (CNN) modeling and reliability analysis. CNN models simulate the using output variable of pumping system (pump rotation) based on three more effective input variables (pump discharge, pump installation depth, and groundwater level) through an optimal multi-layer architecture. While the reliability analysis branch calculates the reliability index through Monte Carlo simulation, resulting in a seasonal performance evaluation. Ultimately, both analytical branches converge to provide a comprehensive evaluation of pump performance and reliability. This integrated approach combines deep learning and probabilistic reliability assessment to provide a robust framework for analyzing and optimizing drinking water well systems.

Results and Discussion

MATLAB environment was used to perform a comprehensive statistical analysis of well data on a monthly basis. The Weibull probability distribution showed the best fit for water levels in 10 out of 12 months, while the Lognormal distribution dominated flow rate patterns in 7 months. Operational data from 17 wells showed distinct patterns across the three key parameters of pump rotation, groundwater level, and pump flow discharge. During early months (March-April), Gamma distribution provided the best. During May-June, the distribution shifted to Lognormal while maintaining a high goodness of fit as temperatures increased. In the middle of the year (July-September), the model selection criteria (AIC and BIC) have undergone significant changes, suggesting that operational variability has increased. There was a remarkable consistency in water level measurements for 10 out of 12 months, with Weibull distribution providing the best fit. The AIC and BIC values of these fits (385-860) were higher than those of pump rotation distributions, suggesting a more complex behavior of water levels. Normal distributions provided better fits in September and March, possibly reflecting specific hydrological conditions during those months. Flow discharge analysis revealed that Lognormal distribution was the dominant pattern, which was optimal for 7 months of the year. AIC and BIC values for these fits were lower (80-1010) than those for pump rotation and water level, which suggests simpler

underlying patterns. As a result of seasonal variations in water consumption patterns, Gamma distributions held the best fit in March and October, while Normal distributions held the best fit in July. A significant correlation was observed between the distributions of pump rotation and flow discharge during certain months. For example, both showed Gamma distributions in March and Lognormal distributions in May-June, suggesting a strong relationship between pump performance and water flow. Among the three parameters, pump rotation demonstrated the greatest variability in optimal distribution type, indicating greater sensitivity to operational and environmental factors. Flow discharges exhibited moderate stability with notable seasonal variations, while water level exhibited the most stability. Based on four years of operational data, these findings provide valuable insights for managing and optimizing drinking water wells. They highlight the complex interactions between pump performance, water levels, and flow discharges in drinking water wells, and they suggest seasonal adjustments to operational strategies.

The CNN model's performance also exhibited significant seasonal variations. Optimal accuracy was achieved in February, with a substantial decline in performance observed during autumn (September and October). The model's performance fluctuated during spring and summer seasons, with the best accuracy in June and July. Pump rotation range analysis revealed distinct seasonal patterns, with wider ranges in summer and early autumn indicating increased operational variability. A narrower range in late autumn and winter suggested more stable well conditions or reduced activity. To improve the model's overall performance, seasonal adjustments are crucial. By considering the specific characteristics of each season, the model's predictive capabilities can be significantly enhanced. The R^2 metric further supports these findings, with the highest value (0.95) in February and the lowest (0.44) in September and October. This highlights the importance of addressing seasonal factors in developing robust machine learning models for predicting pump rotation.

Monte Carlo reliability index (beta) analysis also shows significant variations in pump performance and energy consumption throughout the year. In winter (January, February, and March) and early spring (April), the beta index shows high values (between 1.72 and 2.19), indicating optimal and reliable pump performance. As a result of favorable weather conditions and balanced demand, energy consumption may be more efficient. A sharp decline in the beta index occurs during summer months (June and July), with negative values in July and August (-0.05 and -0.15), indicating serious performance challenges for pumps and likely increased energy consumption. A gradual improvement is observed in the index from late summer to autumn, suggesting the system gradually returns to a more optimal state. During the warmer months, specific strategies are required to optimize energy consumption and pump performance, which emphasizes the importance of seasonal management of the pumping system.

Conclusion

This comprehensive study of drinking water well systems in Bandar Torkaman, demonstrated the effectiveness of combining CNN modeling with traditional statistical analysis to optimize pump performance and energy efficiency. Based on the results of the study, significant seasonal variations have been observed in system behavior, ranging from peak accuracy in January to reduced reliability in July. The statistical analysis also revealed distinct distribution patterns for key operational parameters (Weibull distribution of water levels and Lognormal distribution of flow discharges). In light of these findings, it is important to implement seasonal-adjusted operational strategies, with optimal flow rates of 7.5-8.5 m³/h and groundwater levels of 45-65 meters, whereas pump rotation requirements vary significantly between winter (1100-1200 RPM) and summer (2350-3040 RPM). As a result of the research, a foundation has been laid for enhancing drinking water well operations through adaptive management strategies, with future improvements focusing on incorporating environmental parameters, developing season-specific models, and implementing hybrid optimization approaches to address the complex interactions between operational efficiency and seasonal variability.

Author Contributions

Conceptualization, J.Piri and A.Zahiri; methodology, J.Piri; software, A.Ghooli and J.Piri; validation, A.Zahiri; formal analysis, A.Zahiri, and J.Piri; investigation, A.Ghooli; resources, A.Ghooli; data curation, A.Ghooli and J.Piri; writing-original draft preparation, A.Zahiri; writing-review and editing, A.Ghooli, A.Zahiri, and J.Piri; visualization, A.Zahiri and J.Piri; supervision, A.Zahiri and J.Piri; project administration, A.Zahiri and J.Piri; funding acquisition, A.Zahiri. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations



The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

کارایی شبکه عصبی مبتنی بر مونت کارلو در ارزیابی عملکرد چاه‌های پمپاژ

عبدالرزاق قولی^۱، عبدالرضا ظهیری^۲ و جمشید پیری^۳^۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.r.ghoolee@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: azahiri@gu.ac.ir^۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: J.piri@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه در تخمین دور پمپ چاه‌های آب شرب بندر ترکمن با استفاده از پارامترهای آبدهی پمپ، عمق نصب پمپ و تراز آب زیرزمینی انجام شده است. این مطالعه شامل یک رویکرد یکپارچه از مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی و تحلیل حساسیت آن و نیز شبیه‌سازی مونت-کارلو است. نتایج شبکه عصبی نشان داد که این مدل دارای عملکرد قابل قبولی برای پیش‌بینی دور پمپ چاه‌ها می‌باشد. همچنین مشخص شد که عملکرد این مدل به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار دارد. بهترین عملکرد آن در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب در ماه خرداد با $R^2=0/98$ و $RMSE=15/15$ و در ماه فروردین با $R^2=0/99$ و $RMSE=16/13$ مشاهده شد. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی نشان داد که سطح آب زیرزمینی با ۴۸ درصد، بیشترین تأثیر را بر دور پمپ دارد و پس از آن آبدهی پمپ با ۳۷ درصد و عمق نصب پمپ با ۱۵ درصد قرار دارند. تحلیل شاخص قابلیت اطمینان (بتا) نشان داد که سامانه پمپاژ مورد مطالعه دارای تغییرات عملکرد فصلی قابل توجهی است، به‌طوری که در ماه‌های زمستان، دارای قابلیت اطمینان عالی (با بتای ۱/۷-۲/۲) و در ماه‌های تابستان دارای قابلیت اطمینان منفی است که نشان‌دهنده احتمال خرابی سامانه و یا مصرف بیش از حد انرژی توسط پمپ‌ها است. روش ارائه شده در این تحقیق، چارچوب عملی برای مدیران آب و فاضلاب برای بهینه‌سازی عملیات پمپاژ، کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود مدیریت منابع آب در مناطق خشک را ارائه می‌دهد.
واژه‌های کلیدی: سامانه پمپاژ، شبیه‌سازی مونت-کارلو، شاخص قابلیت اطمینان، شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل حساسیت.	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۳	
تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۴	
استناد: قولی؛ عبدالرزاق، ظهیری؛ عبدالرضا، پیری؛ جمشید، (۱۴۰۴) کارایی شبکه عصبی مبتنی بر مونت-کارلو در ارزیابی عملکرد چاه‌های پمپاژ، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۵)، ۱۲۶۴-۱۲۳۹. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.390979.669891	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.390979.669891	



مقدمه

در سال‌های اخیر، مدیریت بهینه منابع آب به یکی از چالش‌های اصلی در کشورهای خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. این مسئله با توجه به عوامل مهمی مثل تغییر اقلیم، افزایش دخالت‌های انسانی در سطح حوضه‌های آبخیز، رشد جمعیت و به تبع آن افزایش نیاز به آب شرب، دارای اهمیتی روزافزون می‌باشد. یکی از راه‌کارهای مدیریت بهینه منابع آب، بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ به منظور افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی است. در این میان، ایستگاه‌های پمپاژ چاه‌های آب شرب به عنوان یکی از اجزاء کلیدی در تأمین آب شهرها و روستاها، نقش حیاتی در انتقال منابع آبی به نقاط مصرف دارند. این ایستگاه‌ها با مشکلاتی از قبیل کاهش کارایی، افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی روبه‌رو هستند (Piri et al., 2021). هم‌اکنون بسیاری از این سامانه‌ها به‌صورت سنتی و بدون توجه کافی به متغیرهای مؤثر بر کارایی و پایداری عملکرد پمپ‌ها مدیریت می‌شوند. این در حالی است که پمپاژ آب از چاه‌ها به سامانه‌های توزیع، نیازمند عملکرد بهینه تجهیزات پمپاژ است. با این حال، عدم وجود رویکردهای دقیق برای تحلیل و ارزیابی کارایی این سامانه‌ها، باعث کاهش قابلیت اطمینان و افزایش احتمال خرابی تجهیزات و هدررفت انرژی شده است (Blischke and Murthy, 2011). این نقص به‌ویژه در شرایط فعلی که نیاز به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های انرژی بیشتر از همیشه احساس می‌شود، اهمیت بیشتری دارد. ارزیابی و تحلیل کارایی این سامانه‌ها به کمک مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک شایانی نماید (Salimi et al., 2018).

با توجه به اهمیت تأمین پایدار آب شرب و ضرورت کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های پمپاژ، روش‌های مختلفی برای ارزیابی کارایی این سامانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا امروزه روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های ژنتیک به عنوان رویکردهای نوین برای تحلیل و بهینه‌سازی سامانه‌های پیچیده در زمینه‌های مختلف مهندسی آب از قبیل مطالعات مرتبط با افزایش بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ معرفی شده‌اند (Gan et al., 2022). این مدل‌ها در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و پیش‌بینی نتایج تحت شرایط مختلف کارایی مناسبی دارند. در سیستم‌های پمپاژ آب، کارایی به معنای بهره‌وری بهینه از منابع آب و انرژی است که با توجه به اهداف اصلی بهره‌برداری از جمله کاهش مصرف انرژی، افزایش عملکرد پمپ‌ها و بهبود فرآیند انتقال آب سنجیده می‌شود. سامانه‌های پمپاژ آب باید دارای کارایی مناسبی باشند تا مصرف انرژی کاهش یافته و آب با حداقل هدررفت به مصرف‌کنندگان برسد. کارایی یک سامانه پمپاژ تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله دبی پمپاژ، عمق نصب پمپ، تغییرات سطح ایستابی و توان ورودی پمپ قرار دارد. ارزیابی این شاخص‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد سامانه، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش طول عمر تجهیزات منجر شود.

در پژوهش‌های مرتبط با کارایی سامانه‌های پمپاژ، شاخص‌های متعددی برای سنجش و ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها معرفی شده‌اند که هر یک بیانگر یک جنبه خاص از کارایی هستند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در این زمینه، شاخص بهره‌وری انرژی^۱ است که به منظور ارزیابی میزان مصرف انرژی نسبت به حجم آب جابجا شده توسط پمپ به کار می‌رود. این شاخص، نسبت توان مفید یا خروجی پمپ (توان مکانیکی که برای جابجایی آب به کار می‌رود) به توان ورودی یا الکتریکی مصرف شده است. با بهینه‌سازی شاخص بهره‌وری انرژی، مصرف انرژی در سامانه‌های پمپاژ کاهش یافته و مستقیماً بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقاء کارایی کلی سامانه موثر است (Zhang et al., 2012). شاخص دوم، شاخص کارایی هیدرولیکی^۲ است که بیانگر نسبت انرژی مفید هیدرولیکی تولید شده توسط پمپ به انرژی ورودی به سامانه است. این شاخص شدیداً وابسته به طراحی پمپ و شرایط عملیاتی آن قرار دارد. بنابراین رعایت اصول طراحی پمپ‌ها و توجه به شرایط بهره‌برداری از جمله آبدهی و بار استاتیکی پمپ، تأثیر مستقیمی بر افزایش کارایی هیدرولیکی دارند. پیری و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که بهبود کارایی هیدرولیکی پمپ‌ها در سامانه‌های پمپاژ فاضلاب، بهره‌وری سامانه و کاهش خرابی‌ها آنها را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است که کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن را به دنبال خواهد داشت (Piri et al., 2021). شاخص سوم، شاخص کارایی مکانیکی^۳ است که نسبت انرژی مکانیکی خروجی پمپ به انرژی مکانیکی ورودی آن است. این شاخص نشان می‌دهد که چه درصدی از انرژی مکانیکی واردشده به پمپ به‌طور مفید برای جابجایی آب استفاده شده و چه درصدی از آن به دلیل

1 Energy Efficiency Index

2 Hydraulic Efficiency

3 Mechanical Efficiency

اصطکاک و سایر عوامل مکانیکی هدر رفته است. عواملی مثل نحوه طراحی قطعات مکانیکی پمپ، کیفیت مواد مورد استفاده و روش‌های نگهداری بر مقدار این شاخص موثر می‌باشند. بهینه‌سازی شاخص کارایی مکانیکی می‌تواند به کاهش استهلاک پمپ و افزایش عمر مفید آن منجر شود (Lavric et al., 2024). شاخص چهارم، شاخص قابلیت اطمینان^۱ است که به‌عنوان یکی از مفاهیم کلیدی در سامانه‌های مهندسی، بیانگر احتمال عملکرد صحیح یک سامانه برای انجام وظایف مشخص‌شده در مدت‌زمان معین و تحت شرایط عملیاتی تعریف شده است. مفهوم قابلیت اطمینان از دهه‌های گذشته به‌ویژه در صنایع حساس مانند هوافضا، نظامی و انرژی مورد توجه قرار گرفته و در سال‌های اخیر به مباحث مهندسی آب و سامانه‌های پمپاژ نیز وارد شده است. هدف اصلی در ارزیابی قابلیت اطمینان، بهبود پایداری سامانه و کاهش ریسک خرابی‌ها و عملکرد ناکارآمد است. به‌کارگیری این شاخص در سامانه‌های پمپاژ به مدیران و مهندسان کمک می‌کند تا به‌طور دقیق‌تری عملکرد و پایداری سامانه را ارزیابی کنند. استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت کارلو به تحلیل و بهبود این شاخص کمک می‌کند. بر اساس تحلیل شاخص قابلیت اطمینان می‌توان پایداری سامانه‌های پمپاژ را ارتقاء داده و خرابی‌های پیش‌بینی‌نشده را کاهش داد (Barandier and Cardoso, 2023). شاخص پنجم، شاخص هزینه-کارایی^۲ است که به تحلیل اقتصادی کارایی سامانه‌های پمپاژ می‌پردازد. این شاخص بیانگر نسبت بهره‌وری انرژی یا حجم آب پمپاژشده به هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سامانه است. استفاده از این شاخص برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و راهبردی در بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ مفید است زیرا امکان مقایسه کارایی اقتصادی و عملکردی سامانه‌های مختلف را فراهم می‌کند (Piri et al., 2021).

تاکنون تحقیقات نسبتاً زیادی در زمینه مباحث فوق انجام شده است. Piri et al. (2021) در مطالعه‌ای جامع، به تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های پمپاژ فاضلاب پرداختند و از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این روش‌ها می‌تواند منجر به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های انرژی در سامانه‌های پمپاژ شود. Mayer et al. (2020) از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی محیط‌زیستی و اقتصادی سامانه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هیبریدی در سطح خانگی استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به ارتقاء جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی الگوهای مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر مثل توربین‌های بادی، پانل‌های خورشیدی، و ... منجر شود. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر بهبود کارایی سیستم و کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ بود. Alizadeh et al. (2013) در مطالعه‌ای به بررسی بهره‌وری سامانه‌های پمپاژ در شبکه‌های آبیاری و زهکشی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که بهینه‌سازی این سامانه‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مانند مونت کارلو می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش اتلاف منابع آبی منجر شود. Mohammadi et al. (2023) قابلیت اطمینان و کارایی سامانه‌های پمپاژ آب کشاورزی را بررسی نموده و تأثیر متغیرهای ورودی مانند دبی پمپاژ و هد استاتیک پمپ را بر عملکرد سامانه مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، از روش مونت کارلو و تحلیل حساسیت برای ارزیابی عملکرد سامانه‌ها استفاده شد. Zhang et al. (2012) یکی از اولین مطالعات جامع در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی در سامانه‌های پمپاژ آب و فاضلاب را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های ژنتیک، توانستند مصرف انرژی را کاهش داده و عملکرد سامانه را بهبود بخشند. این تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی می‌تواند به افزایش دقت و کارایی در بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ کمک کند. Brahami et al. (2022) از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ در ایستگاه‌های آبرسانی استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که الگوریتم‌های ژنتیک به دلیل توانایی بالا در یافتن نقاط بهینه عملکردی، می‌توانند به بهبود کارایی سامانه و کاهش هزینه‌های انرژی کمک کنند. Yi and Wenhao (2023) از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ فاضلاب استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش منجر به بهبود عملکرد سامانه و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که این الگوریتم‌ها می‌توانند به‌طور مؤثری در ترکیب با سایر روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت کارلو به‌کار گرفته شوند. Ramin et al. (2022) از روش مونت کارلو برای تحلیل قابلیت اطمینان و کارایی سامانه‌های پمپاژ استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که شبیه‌سازی‌های مبتنی بر مونت کارلو می‌توانند به ارزیابی دقیق‌تری از رفتار سامانه‌های پمپاژ تحت شرایط مختلف کمک کرده و باعث کاهش خرابی و افزایش پایداری سامانه‌ها شوند. Almazrouei et al. (2023) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های پمپاژ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که این شبکه‌ها به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده، می‌تواند در بهبود کارایی و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد پمپ‌ها مفید باشد. Yu et al. (2020) در مطالعه‌ای

1 Reliability Index

2 Cost-Effectiveness Index

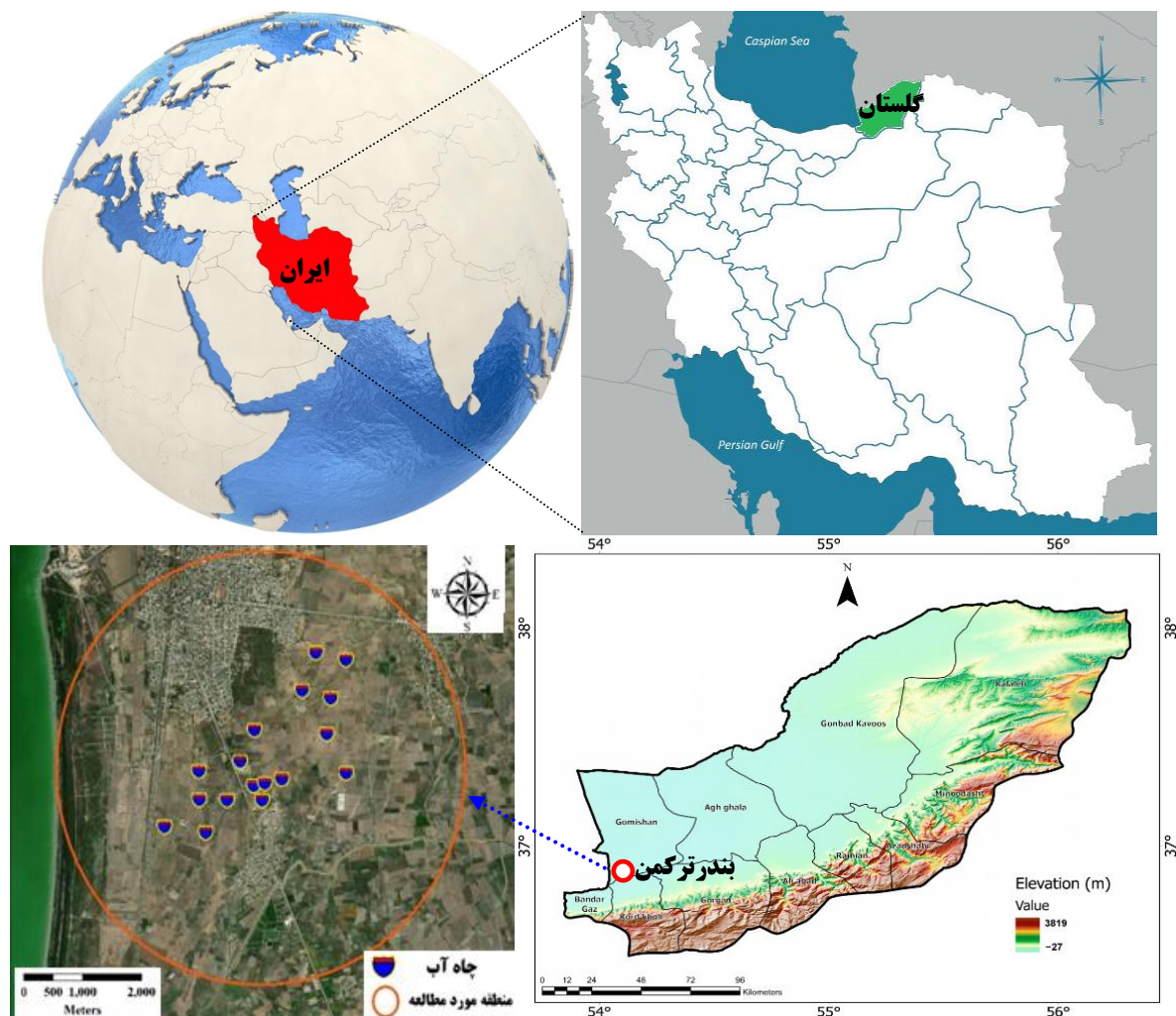
مشابه از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ در نیروگاه‌های آبی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی منجر شود. (Ahmed and Demirci (2022) در تحقیقی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌سازی عملکرد پمپ‌های آب در نیروگاه‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش، توانایی بالایی در مدیریت اهداف متضاد در سامانه‌های پمپاژ دارد. آن‌ها تأکید کردند که بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به بهبود هم‌زمان مصرف انرژی و بهره‌وری منابع منجر شود. (Chojaczyk et al. (2015 با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، قابلیت اطمینان سامانه‌های مهندسی را ارزیابی نموده و نشان دادند که این روش می‌تواند به‌طور مؤثری رفتار سامانه‌ها را تحت شرایط مختلف عدم قطعیت تحلیل کند. (da Silva et al. (2024 از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف ورودی بر کارایی سامانه‌های پمپاژ آب استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند به کاهش ریسک خرابی سامانه‌ها کمک کند.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در سامانه‌های پمپاژ و به ویژه ابزار هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری، نقشی کلیدی در بهبود عملکرد این سیستم‌ها ایفا می‌کنند. تاکنون تحقیقات داخلی بر بهبود مصرف انرژی و بهره‌وری در شبکه‌های آبیاری و سیستم‌های پمپاژ آب کشاورزی تمرکز داشته‌اند، در حالی که پژوهش‌های خارجی بیشتر بر استفاده از ابزارهای پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی سامانه‌های پمپاژ آب شهری و صنعتی متمرکز بوده‌اند. نتایج کلی این مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم اهمیت سامانه‌های پمپاژ آب شرب، تاکنون مطالعه جامعی در زمینه ارزیابی کارایی این سامانه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در شرایط عملکردی در ایران انجام نشده است. نوآوری اصلی این پژوهش، ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی مونت کارلو در قالب یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی کارایی چاه‌های پمپاژ آب شرب است. در این رویکرد، ابتدا از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی ارتباط بین متغیرهای ورودی (آبدهی پمپ، تراز سطح ایستابی و عمق نصب پمپ) و متغیر خروجی (دور پمپ) استفاده شده و سپس با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای ورودی مدل‌سازی شده است. در این روش، برای هر یک از پارامترهای ورودی (آبدهی پمپ، تراز سطح ایستابی و عمق نصب پمپ)، توزیع‌های احتمالاتی مناسب برازش داده شده و سپس با تولید اعداد تصادفی از این توزیع‌ها (حدود ۱۰۰۰۰ نمونه برای هر پارامتر)، طیف وسیعی از شرایط محتمل شبیه‌سازی شده است. این رویکرد امکان ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر خروجی مدل (دور پمپ) را فراهم می‌کند و به برآورد دقیق‌تر شاخص قابلیت اطمینان سامانه کمک می‌نماید. به این منظور از داده‌های ۱۷ حلقه از چاه‌های آب شرب منطقه بندرترکمن که با کمبود شدید منابع آب شرب مواجه است، استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بندر ترکمن در استان گلستان واقع شده است. مختصات جغرافیایی این شهر به صورت عرض $35^{\circ} 54' 36''$ شمالی و طول جغرافیایی $54^{\circ} 04' 25''$ شرقی می‌باشد (شکل ۱). ارتفاع این شهر از سطح دریا حدود ۲۰ متر است. بندر ترکمن در نزدیکی دریای خزر قرار دارد و دارای زمین‌های مسطح و کم‌ارتفاع است. این منطقه به دلیل نزدیکی به دریا و وجود تالاب‌ها و جزایر کوچک مانند آشوراده، دارای اکوسیستم‌های متنوعی است. این شهر از نظر اقلیمی دارای آب و هوای گرم و مرطوب است. تابستان‌های این منطقه بسیار گرم و شرجی بوده و زمستان‌ها نیز معتدل و مرطوب هستند. میانگین دمای سالانه در بندرترکمن حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر است که اغلب این بارندگی‌ها در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. خاک‌های این منطقه عمدتاً شنی و رسی بوده و پوشش گیاهی شامل گیاهان ساحلی و تالابی هستند. این منطقه دارای آبخوان‌های ساحلی بوده که توسط آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌شوند. این آبخوان‌ها به دلیل نزدیکی به دریا و تالاب‌ها، دارای کیفیت آب متفاوتی می‌باشند. ضخامت این آبخوان‌ها متغیر بوده و حدود ۱۰ تا ۳۰ متر تخمین زده می‌شود (دائی‌چینی و همکاران، ۱۴۰۰). سنگ بستر در این منطقه عمدتاً از رسوبات آبرفتی و ماسه‌ای تشکیل شده است. این رسوبات به دلیل نزدیکی به دریا و رودخانه‌ها، دارای نفوذپذیری بالایی بوده و به تغذیه آبخوان‌ها کمک می‌کند. سطح ایستابی نسبتاً بالا بوده و ممکن است در برخی مناطق به سطح زمین نزدیک باشد.



شکل ۱- موقعیت استان گلستان در کشور و موقعیت چاه‌های مورد مطالعه در استان گلستان و بندر ترکمن

داده‌های اصلی تحقیق و تحلیل اولیه آن‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از ۱۷ حلقه چاه آب شرب در طول یک دوره چهار ساله (۱۳۹۹-۱۴۰۲) جمع‌آوری شده است. انتخاب ۱۷ حلقه چاه مورد مطالعه بر اساس دو معیار اصلی صورت گرفته است: (۱) پوشش کامل منطقه مطالعاتی از نظر موقعیت جغرافیایی به منظور در نظر گرفتن تنوع شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه؛ و (۲) دسترسی به داده‌های کامل و قابل اعتماد برای دوره چهارساله مورد مطالعه. استفاده از تعداد چاه‌های بیشتر (به جای تنها یک چاه) امکان توسعه مدلی جامع‌تر با قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتر را فراهم می‌کند که می‌تواند شرایط متنوع هیدرولیکی و ژئوفیزیکی منطقه را پوشش دهد. همچنین، این تعداد چاه، امکان ارزیابی تغییرات مکانی پارامترها و شناسایی الگوهای منطقه‌ای را فراهم می‌آورد. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌ها شامل عمق چاه‌ها، عمق نصب پمپ‌ها در چاه، دبی یا آبدهی چاه‌ها، دور پمپ‌ها و سطح ایستابی آب است که به صورت ماهانه تنظیم شده است. آبدهی چاه‌ها با استفاده از فلومترهای الکترومغناطیسی یا اولتراسونیک اندازه‌گیری شده است. دقت این اندازه‌گیری درصد ± 0.5 درصد مقادیر خوانده شده است. دور پمپ با استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی پمپ‌ها و با دقت ± 1 دور در دقیقه اندازه‌گیری شده است. سطح ایستابی نیز با استفاده از حسگرهای فشار یا سوندهای الکترونیکی و با دقت ± 1 سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است.

برای اطمینان از صحت و دقت داده‌های فوق، ابتدا داده‌هایی که خارج از محدوده فیزیکی قابل قبول بودند، شناسایی و حذف شدند. برای شناسایی داده‌های پرت از روش آماری Z-score استفاده شد. مقادیری که بیش از ۳ برابر انحراف معیار از میانگین فاصله داشتند، به عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند. سپس این داده‌ها از نظر پیوستگی زمانی و وجود داده‌های گمشده بررسی شدند. همچنین داده‌های هر چاه با چاه‌های مجاور مقایسه شدند تا ناهنجاری‌های احتمالی شناسایی شوند. برای تکمیل داده‌های گمشده از روش درون‌یابی خطی برای فاصله‌های زمانی کوتاه (کمتر از ۳ روز) و روش رگرسیون چندگانه برای فاصله‌های زمانی طولانی‌تر استفاده شد. در گام بعدی برای بهبود عملکرد مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، داده‌ها نرمال‌سازی شدند. برای این کار از روش Min-Max Scaling استفاده شد.

تا تمام داده‌ها در محدوده $[0, 1]$ قرار گیرند.

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که X_{norm} مقدار نرمال شده، X مقدار اصلی، $X_{\min}$ کوچکترین مقدار در مجموعه داده‌ها و $X_{\max}$ بزرگترین مقدار در مجموعه داده‌ها است.

برای بررسی وجود روند در داده‌ها، از آزمون Mann-Kendall با سطح معناداری ۰/۰۵ استفاده شد. این آزمون برای هر پارامتر و برای هر چاه به صورت جداگانه انجام شد. همچنین برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف، از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. ماتریس همبستگی برای سه پارامتر اصلی (دور پمپ، سطح ایستابی و دبی پمپاژ) محاسبه شد. برای بررسی تغییرات فصلی در پارامترها، داده‌ها به چهار فصل تقسیم شدند و آمار توصیفی برای هر فصل به طور جداگانه محاسبه شد. علاوه بر این، برای هر پارامتر، چهار توزیع آماری رایج (نرمال، لاگ‌نرمال، گاما و ویبول) برازش داده شد. برای انتخاب بهترین توزیع از معیار اطلاعات آکائیک^۱، معیار اطلاعات بیزی^۲ و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۳ استفاده شد (Shirazi et al., 2024). توزیعی که کمترین مقدار AIC و BIC و بیشترین p-value در آزمون K-S را داشت، به عنوان بهترین توزیع انتخاب شد. انتخاب توزیع آماری بهینه به کمک نرم‌افزار Easyfit انجام شد. همچنین برای ارزیابی نرمال بودن داده‌های مربوط به متغیرهای اصلی از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد:

$$D = \sup x |F_n(x) - F(x)| \quad \text{رابطه (۲)}$$

که D حداکثر فاصله بین توزیع تجربی داده‌ها $F_n(x)$ و توزیع نرمال فرضی $F(x)$ است.

برای مقایسه میانگین عملکرد سامانه پمپاژ در شرایط مختلف (مانند فصول مختلف سال و تغییرات سطح ایستابی)، از آزمون مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. این آزمون برای بررسی تفاوت معنادار بین میانگین دو گروه مستقل به کار می‌رود. همچنین برای بررسی ارتباط بین چندین متغیر و تعیین تأثیر آن‌ها بر متغیر وابسته (مانند مصرف انرژی یا کارایی پمپ)، از آزمون رگرسیون خطی استفاده شد. با توجه به ماهیت تغییرات فصلی در پارامترهای هیدرولوژیکی و عملکرد چاه‌های آب شرب، تمامی شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های اشاره شده در بخش‌های فوق در مقیاس ماهانه انجام شده است. این مقیاس زمانی، امکان بررسی تغییرات فصلی در عملکرد سامانه را فراهم می‌کند و برای مدیریت عملیاتی چاه‌های آب شرب مناسب است. داده‌های ورودی به صورت ماهانه جمع‌آوری شده و مدل‌ها نیز برای هر ماه به طور جداگانه آموزش داده شده‌اند.

مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی^۴

با توجه به تعداد کم داده‌های چاه‌های پمپاژ آب شرب در این تحقیق، باید ابتدا روابط یا مدل‌هایی برای بیان رفتار متغیر خروجی (دور پمپ) بر اساس متغیرهای ورودی (آبدهی پمپ، تراز سطح ایستابی و عمق نصب پمپ) استخراج شود تا بتوان حجم داده‌ها را به کمک تولید اعداد تصادفی تا حد قابل قبولی افزایش داد. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از ابزار کلیدی در هوش مصنوعی، برای استخراج مدل مناسب بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) یکی از روش‌های یادگیری ماشین هستند که با الهام از ساختار نورون‌های مغز انسان طراحی شده‌اند. با وجود امکان انتخاب مدل‌های نوین‌تری مانند RF، KNN و GPR نیز برای حل مسائل وجود دارند، انتخاب شبکه MLP بر اساس دلایل اصلی زیر صورت گرفت:

ساختار ساده و قابل تفسیر MLP که امکان تحلیل حساسیت مستقیم را فراهم می‌کند.

توانایی اثبات‌شده MLP در مدل‌سازی روابط غیرخطی در سامانه‌های هیدرولیکی که در مطالعات متعدد نشان داده شده است.

۱. در این مطالعه، علاوه بر دستیابی به دقت بالا در پیش‌بینی‌ها، درک ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و تحلیل حساسیت

سامانه نیز مدنظر بوده است که MLP برای این منظور مناسب است.

این شبکه‌ها از تعدادی لایه تشکیل شده‌اند که هر لایه شامل تعدادی نورون است. شبکه عصبی به کار رفته در این مطالعه از نوع

پرسپترون چندلایه (MLP) است که از یک لایه ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. ساختار این شبکه با معماری

1 AIC

2 BIC

3 K-S test

4 ANN

۳-۱۰-۵-۱ است. لایه ورودی شامل سه نورون متناظر با متغیرهای ورودی (آبدهی پمپ، تراز سطح ایستابی و عمق نصب پمپ)، دو لایه پنهان به ترتیب با ۱۰ و ۵ نورون، و یک لایه خروجی با یک نورون (دور پمپ) است. انتخاب این معماری بر اساس آزمون و خطا و با هدف به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی انجام شد. در این فرآیند، معماری‌های مختلفی با تعداد متفاوت لایه‌های پنهان (۱ تا ۳ لایه) و تعداد متنوعی از نورون‌ها در هر لایه (۵ تا ۲۰ نورون) مورد بررسی قرار گرفتند. برای لایه‌های پنهان از تابع فعال‌سازی سیگموید و برای لایه خروجی از تابع فعال‌سازی خطی استفاده شد. انتخاب این توابع بر اساس ماهیت مسئله و با توجه به مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی سامانه‌های هیدرولیکی انجام شده است. برای آموزش شبکه از الگوریتم بهینه‌سازی Adam با تابع خطای میانگین مربعات (MSE) استفاده شد که نسبت به الگوریتم‌های سنتی‌تر مثل گرادیان نزولی، همگرایی سریع‌تری دارد و کمتر در بهینه‌های محلی گیر می‌افتد. داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش آموزش (۸۰٪ داده‌ها) و آزمون (۲۰٪ داده‌ها) تقسیم شدند. برای اطمینان از پایداری نتایج، فرآیند تقسیم داده‌ها و آموزش مدل، ۱۰ بار تکرار شد و میانگین نتایج گزارش شده است. همچنین، برای جلوگیری از بیش‌برازش، از تکنیک توقف زودهنگام استفاده شد که در آن فرآیند آموزش، زمانی متوقف می‌شود که خطای مدل بر روی داده‌های اعتبارسنجی (۲۰٪ از داده‌های آموزش) برای ۵۰ دوره متوالی بهبود نیابد. انتخاب متغیرهای ورودی بر اساس اصول هیدرولیک پمپ‌ها و با استناد به مطالعات پیشین انجام شد. همچنین، برای تأیید ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی، از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد.

همچنین در این مرحله علاوه بر مدل‌سازی، برای ارزیابی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی شبکه عصبی (دور پمپ)، از روش حذف متغیر استفاده شد. در این روش، تأثیر هر متغیر ورودی با حذف آن از مدل و مقایسه عملکرد مدل کامل با مدل فاقد آن متغیر ارزیابی می‌شود. برای هر متغیر ورودی، مدل شبکه عصبی با دو متغیر باقی‌مانده آموزش داده شد و عملکرد آن با مدل کامل (شامل هر سه متغیر ورودی) مقایسه گردید. میزان افت عملکرد مدل یا همان افزایش مقدار (RMSE) به عنوان معیاری از اهمیت متغیر حذف‌شده در نظر گرفته شد. این فرآیند برای تمام متغیرهای ورودی تکرار شد و سهم نسبی هر متغیر در عملکرد مدل به صورت درصد محاسبه گردید. همچنین، برای تأیید نتایج این روش، از تحلیل حساسیت جزئی نیز استفاده شد که در آن، تأثیر تغییرات جزئی در هر متغیر ورودی بر خروجی مدل ارزیابی می‌شود.

روش مونت کارلو

روش مونت کارلو یکی از ابزارهای آماری قدرتمند در شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده و تحلیل عدم قطعیت‌ها است. روش مونت کارلو در این پژوهش با دو هدف اصلی مورد استفاده قرار گرفته است: (۱) تولید نمونه‌های تصادفی از متغیرهای ورودی برای بررسی تأثیر عدم قطعیت‌ها بر عملکرد سامانه پمپاژ، و (۲) محاسبه شاخص قابلیت اطمینان سامانه تحت شرایط مختلف. با استفاده از این روش، عملکرد سامانه پمپاژ در طیف وسیعی از شرایط محتمل شبیه‌سازی می‌شود که امکان ارزیابی جامع‌تری از قابلیت اطمینان سامانه را فراهم می‌کند.

ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از دو دسته شاخص برای ارزیابی عملکرد استفاده شده است: (۱) شاخص‌های ارزیابی خطا (شامل RMSE و R^2) که برای سنجش دقت پیش‌بینی مدل شبکه عصبی به کار می‌روند و (۲) شاخص قابلیت اطمینان (β) که معیار اصلی برای ارزیابی عملکرد کلی سامانه پمپاژ در شرایط مختلف است.

شاخص‌های ارزیابی خطای مدل

عملکرد مدل با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا^۱ و ضریب تعیین^۲ ارزیابی شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

که n تعداد کل داده‌ها، y_i و $\hat{y}_i$ به ترتیب مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده متغیر خروجی (دور پمپ) می‌باشند. این معیارها برای هر ماه به طور جداگانه محاسبه شدند تا عملکرد مدل در شرایط مختلف فصلی ارزیابی شود.

1 RMSE

2 R^2

شاخص قابلیت اطمینان

شاخص قابلیت اطمینان به عنوان خروجی نهایی مدل، امکان مقایسه عملکرد سامانه در شرایط مختلف را فراهم می‌کند و برای برنامه‌ریزی عملیاتی و مدیریتی سامانه پمپاژ کاربرد دارد. بعد از اجرای روش مونت کارلو، شاخص قابلیت اطمینان برای هر ماه با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\beta = (\mu - R) / \sigma \quad \text{رابطه (۵)}$$

که β شاخص قابلیت اطمینان، μ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده با مونت کارلو، R میانگین داده‌های واقعی و σ انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده است. بر اساس این شاخص، وضعیت پایداری سامانه مورد مطالعه مشخص خواهد شد. برای حالت‌های مختلف مقادیر بتا یعنی $\beta > 1/7$ ، $0/5 < \beta < 1/7$ ، $0 < \beta < 0/5$ و $\beta < 0$ به ترتیب سامانه دارای قابلیت اطمینان عالی، خوب، ضعیف و شرایط خراب است.

روندنمای انجام تحقیق

مراحل انجام این تحقیق در روندنمای شکل ۲ نشان داده شده است. کلیه مراحل پیش‌پردازش داده‌ها، تحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی‌های این پژوهش در محیط نرم‌افزار MATLAB نسخه 2022b انجام شده است. برای پیاده‌سازی شبکه عصبی مصنوعی از جعبه ابزار Deep Learning Toolbox، برای تحلیل‌های آماری از جعبه ابزار Statistics and Machine Learning Toolbox، و برای شبیه‌سازی مونت کارلو از توابع تولید اعداد تصادفی MATLAB استفاده شده است. همچنین برای تحلیل داده‌های زمانی و آزمون‌های روند از جعبه ابزار Signal Processing Toolbox بهره گرفته شد.

مراحل اجرای روش مونت کارلو به صورت گام به گام عبارتند از:

۱. تعریف متغیرهای ورودی شامل آبدهی پمپ، تراز سطح ایستابی و عمق نصب پمپ.
۲. تعیین توزیع‌های احتمالاتی با برازش توزیع‌های آماری مناسب برای هر یک از متغیرهای ورودی.
۳. تولید اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرهای ورودی (حدود ۱۰۰۰۰ نمونه) بر اساس توزیع‌های احتمالاتی منتخب در گام دوم و در محدوده $\pm 2\sigma$ که μ میانگین و σ انحراف معیار داده‌های ورودی. این محدودیت برای اطمینان از واقعی بودن مقادیر شبیه‌سازی شده اعمال شده است. مقادیر تصادفی به عنوان ورودی برای شبیه‌سازی سامانه پمپاژ استفاده شدند.
۴. شبیه‌سازی سیستم پمپاژ به کمک مونت کارلو با تعریف مقادیر تصادفی تولیدشده در گام سوم به عنوان ورودی‌های مدل شبکه عصبی مصنوعی و اجرای مدل برای پیش‌بینی دور پمپ متناسب با هر سری از ورودی‌های تصادفی
۵. تکرار شبیه‌سازی‌ها برای ماه‌های مختلف سال و تحلیل نتایج شامل استخراج آمار توصیفی برای نتایج شبیه‌سازی (میانگین، انحراف معیار، حداقل، حداکثر) و مقایسه توزیع‌های احتمال دور پمپ مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده برای هر ماه (مقایسه توزیع‌های احتمال دور پمپ مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده با هدف ارزیابی توانایی مدل شبکه عصبی در بازتولید الگوهای احتمالاتی واقعی دور پمپ انجام می‌شود. این مقایسه، اطلاعات ارزشمندی در مورد قابلیت مدل در پیش‌بینی رفتار سامانه تحت شرایط متنوع (و نه فقط شرایط میانگین) ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر، این مقایسه به این سوال جواب می‌دهد که آیا مدل شبکه عصبی قادر است پاسخ سامانه به طیف کاملی از شرایط ورودی محتمل را به درستی شبیه‌سازی کند یا خیر. این امر به ویژه برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان که به توزیع احتمال خروجی مدل وابسته است، اهمیت دارد).

۶. محاسبه شاخص قابلیت اطمینان برای هر ماه از رابطه (۵) و تعیین وضعیت سامانه پمپاژ.

۷. تحلیل حساسیت هر یک از پارامترهای ورودی بر نتایج شبیه‌سازی و تعیین میزان تأثیر هر پارامتر بر دور پمپ.



شکل ۲- روندنمای انجام تحقیق برای ارزیابی عملکرد ایستگاههای پمپاژ آب شرب بندر ترکمن

نتایج و بحث

تحلیل آماری داده‌های ورودی

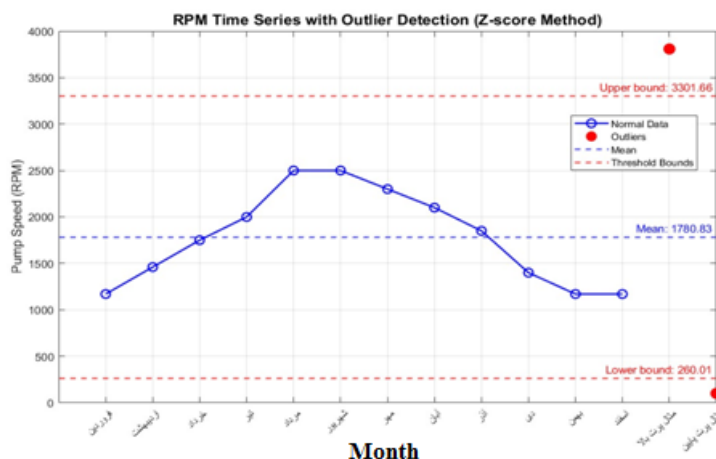
بررسی داده‌های ۱۷ حلقه چاه آب شرب شهرستان بندر ترکمن در بازه زمانی چهارساله (۱۳۹۹-۱۴۰۲) نشان داد که پارامترهای دبی پمپ، عمق نصب پمپ، سطح ایستابی و دور پمپ دارای تغییرات فصلی قابل توجهی هستند. در جدول ۱، خلاصه آماری داده‌های مورد استفاده برای ۱۷ چاه ارائه شده است. در این جدول، برای هر پارامتر، آمار توصیفی شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، محدوده تغییرات (حداقل تا حداکثر) و ضریب تغییرات ارائه شده است. تحلیل داده‌های آماری ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که این پارامترها در دوره چهارساله (۱۳۹۹-۱۴۰۲) از تغییرات قابل توجهی برخوردار هستند. آبدهی پمپ‌ها با میانگین ۲۸/۴ لیتر بر ثانیه و ضریب تغییرات ۰/۲۴، نشان‌دهنده تنوع نسبتاً زیاد در ظرفیت چاه‌ها است. عمق نصب پمپ با میانگین ۷۵/۳ متر، کمترین ضریب تغییرات (۰/۱۷) را نشان می‌دهد که بیانگر ثبات نسبی این پارامتر در مقایسه با سایر پارامترها است. سطح ایستابی با میانگین ۱۸/۷ متر، بیشترین ضریب تغییرات (۰/۲۸) را دارد که می‌تواند ناشی از تغییرات فصلی، تغذیه آبخوان و الگوهای متنوع برداشت آب باشد. دور پمپ با میانگین ۱۸۷۰ دور در دقیقه و محدوده تغییرات گسترده (۳۱۵۰-۹۵۰)، نشان‌دهنده تنظیمات متفاوت پمپ‌ها برای سازگاری با شرایط متغیر هیدرولیکی و نیازهای مصرفی است.

جدول ۱- خلاصه آماری داده‌های ۱۷ چاه آب شرب مورد استفاده در این تحقیق

ضریب تغییرات	محدوده تغییرات	انحراف معیار	میانه	میانگین	پارامتر
۰/۲۴	۱۴/۲-۴۵/۷	۶/۸	۲۷/۵	۲۸/۴	آبدهی پمپ
۰/۱۷	۴۵/۲-۱۱۰/۵	۱۲/۶	۷۳/۸	۷۵/۳	عمق نصب پمپ
۰/۲۸	۸/۴-۳۲/۸	۵/۳	۱۷/۹	۱۸/۷	سطح ایستایی
۰/۲۲	۹۵۰-۳۱۵۰	۴۲۰	۱۸۲۰	۱۸۷۰	دور پمپ

شناسایی داده‌های پرت

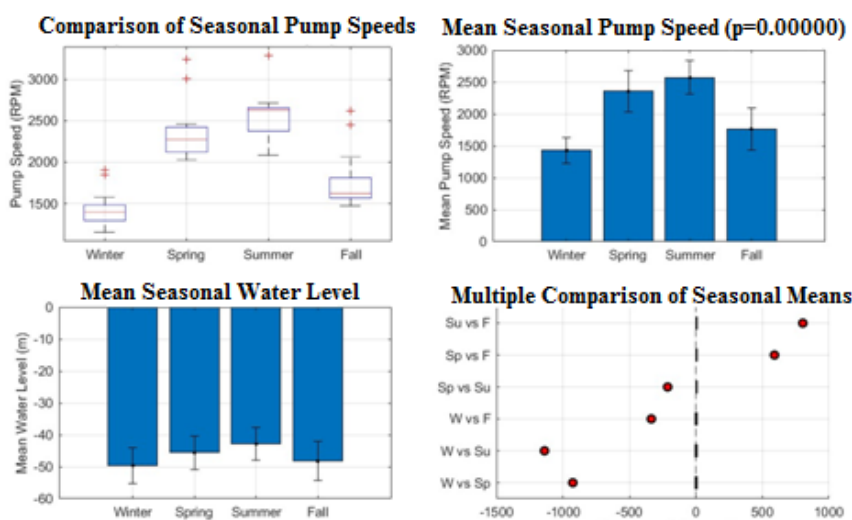
برای نمایش بهتر داده‌های پرت در سری زمانی دور پمپ، با استفاده از روش Z-score، داده‌های خارج از محدوده ± 3 برابر انحراف معیار را شناسایی نموده و آنها را به عنوان داده پرت در نظر می‌گیرد. شکل ۳، نتایج انجام این فرایند را برای متغیر دور پمپ در طول زمان نشان می‌دهد.



شکل ۳- شناسایی داده‌های پرت در متغیرهای موثر بر مدل‌سازی

آزمون مقایسه میانگین‌ها

از تحلیل ANOVA برای مقایسه میانگین دور پمپ در فصول مختلف سال استفاده شد. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین فصول سال وجود دارد.

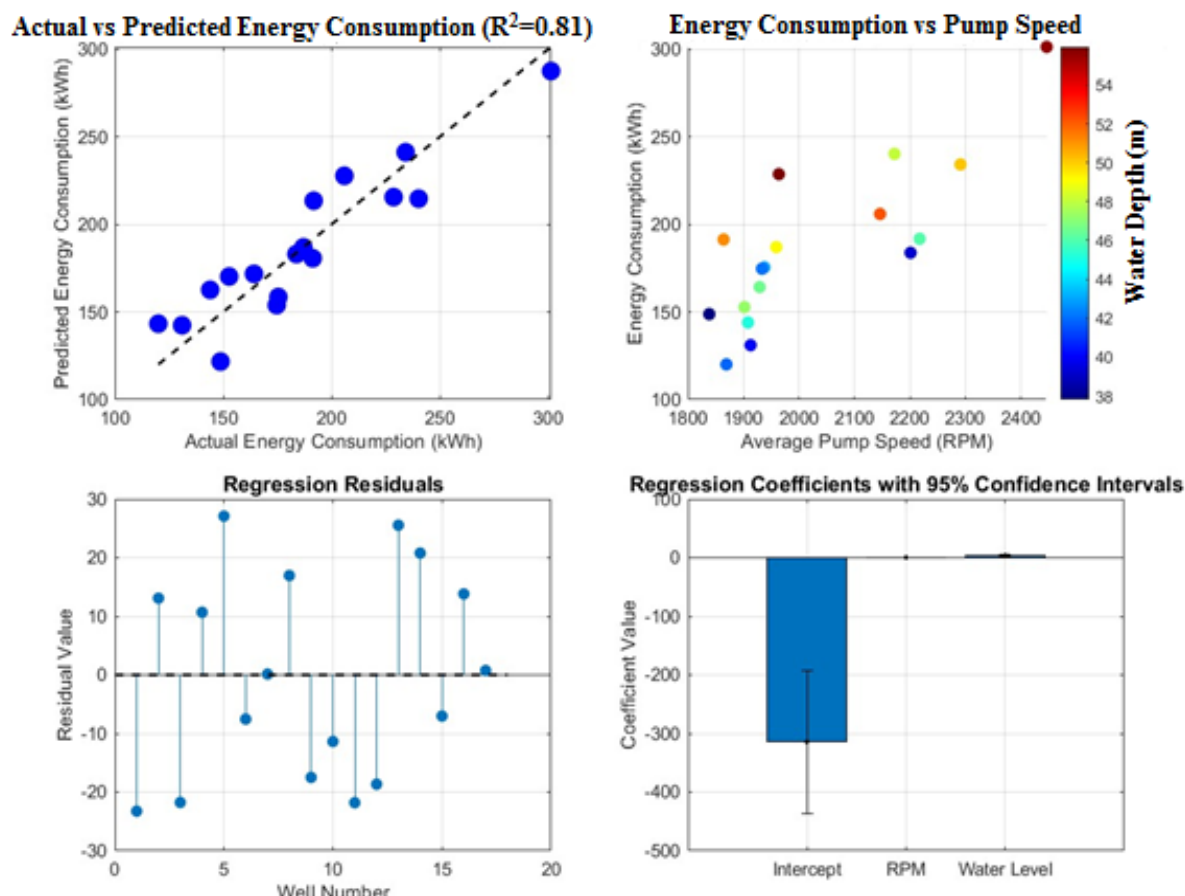


شکل ۴- تحلیل ANOVA برای مقایسه میانگین دور پمپ در فصول مختلف سال

آزمون رگرسیون خطی

برای بررسی ارتباط بین چندین متغیر و تعیین تأثیر آنها بر متغیر وابسته (مانند مصرف انرژی یا کارایی پمپ)، از آزمون رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل رگرسیون خطی برازش داده شده برای تعیین تأثیر دور پمپ و سطح

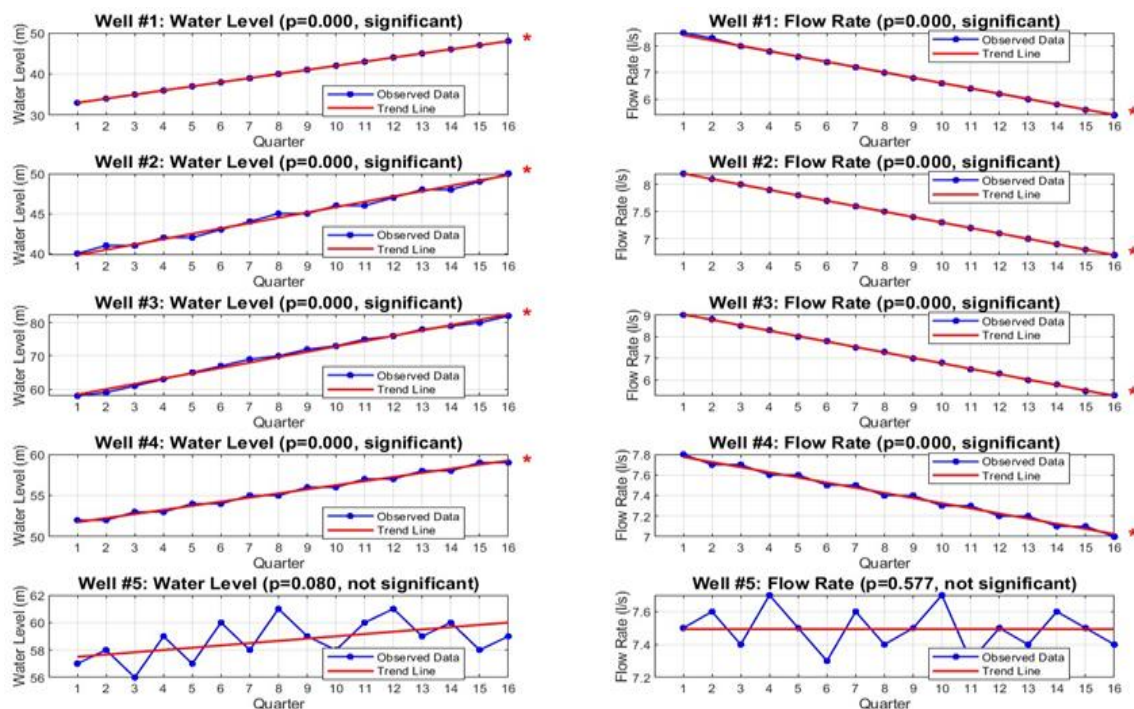
آب بر مصرف انرژی ایجاد شده است. این مدل با ضریب تعیین 0.81 نشان می‌دهد که این متغیرها به خوبی می‌توانند مصرف انرژی را توضیح دهند.



شکل ۵- آزمون رگرسیون خطی برای تعیین تأثیر دور پمپ و سطح آب بر مصرف انرژی

برای بررسی خودهمبستگی بین داده‌ها که می‌تواند نتایج آزمون Mann-Kendall را تحت تأثیر قرار دهد، ابتدا از تابع خودهمبستگی (autocorrelation) در MATLAB استفاده شد تا میزان خودهمبستگی در سری‌های زمانی مشخص شود. سپس، برای سری‌های زمانی با خودهمبستگی معنادار (با ضریب خودهمبستگی بیشتر از 0.3 در تأخیر اول)، از روش پیش‌سفیدسازی (prewhitening) استفاده گردید. در این روش، ابتدا مقدار خودهمبستگی مرتبه اول محاسبه و سپس از داده‌ها حذف می‌شود. این فرآیند پیش از انجام آزمون Mann-Kendall، اثر خودهمبستگی را کاهش می‌دهد و از نتایج مثبت کاذب جلوگیری می‌کند.

آزمون‌های آماری Mann-Kendall نشان داد که در بیشتر چاه‌ها، روند معناداری ($p < 0.05$) در افزایش سطح ایستابی و کاهش آبدی طی دوره مطالعه وجود دارد. این روند می‌تواند نشان‌دهنده افت تدریجی سطح آب زیرزمینی در منطقه باشد که احتمالاً ناشی از برداشت‌های بی‌رویه و کاهش تغذیه آبخوان‌ها است. در شکل ۶ به صورت نمونه، سری‌های زمانی و خطوط روند را برای پنج چاه نشان می‌دهد. در این نمودارها، داده‌های واقعی (خط آبی با نقاط) و خط روند (خط قرمز) برای ۱۶ فصل (چهارسال) نمایش داده شده‌اند. مقادیر p برای هر چاه در عنوان نمودارها مشخص شده است. چاه‌های اول تا چهارم با مقادیر $p = 0.000$ نشان‌دهنده روندهای کاملاً معنادار هستند، در حالی که چاه ۵ با مقادیر $p = 0.080$ برای سطح ایستابی و $p = 0.577$ برای آبدی، فاقد روند معنادار است. این یافته‌ها از دیدگاه هیدرولوژیکی نیز قابل توجیه است، زیرا با افزایش برداشت آب و تخلیه آبخوان، سطح ایستابی افزایش می‌یابد (یعنی عمق آب از سطح زمین بیشتر می‌شود) و همزمان آبدی چاه‌ها کاهش می‌یابد. این روند می‌تواند هشدار برای مدیریت منابع آب در منطقه باشد، زیرا نشان‌دهنده کاهش توان آبدی چاه‌ها در طول زمان است که می‌تواند به چالش‌های تأمین آب شرب در آینده منجر شود.



شکل ۶- نمایش سری‌های زمانی و خطوط روند برای پنج چاه مطالعاتی

نتایج برازش توزیع‌های آماری

بررسی توزیع‌های آماری نشان داد که متغیرهای مختلف از توزیع‌های متفاوتی پیروی می‌کنند. برای دور پمپ، توزیع بهینه در طول سال متغیر بوده و بین توزیع‌های Gamma، Log-Normal، Weibull و Normal در نوسان است (جدول ۲). برای تراز سطح آب، توزیع Weibull در اکثر ماه‌های سال (۱۰ ماه از ۱۲ ماه) بهترین برازش را نشان داد. در مورد آبدهی پمپ، توزیع Log-Normal در ۷ ماه از سال غالب بود. این تغییرات در توزیع‌های آماری نشان‌دهنده پیچیدگی رفتار هیدرولیکی چاه‌ها در فصول مختلف است. تغییر توزیع‌های آماری در طول سال همچنین بیانگر لزوم استفاده از رویکردهای احتمالاتی مانند شبیه‌سازی مونت کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در شبیه‌سازی سامانه است.

مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی

با توجه به تعداد محدود داده‌ها در این تحقیق، روش اعتبارسنجی متقابل ۵-بخشی^۱ برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، داده‌ها به ۵ بخش مساوی تقسیم شده و در هر مرحله، ۴ بخش برای آموزش و ۱ بخش برای آزمون استفاده شد. این فرآیند ۵ بار تکرار شد به طوری که هر بخش یک بار برای آزمون استفاده شود. نتایج نهایی، میانگین عملکرد مدل در این ۵ مرحله است. در این مرحله، مقادیر پارامترهای آموزش به صورت تعداد دوره^۲ = ۱۰۰۰، اندازه دسته^۳ = ۳۲ و نرخ یادگیری^۴ = ۰/۰۰۱ انتخاب شدند. برای جلوگیری از بیش‌پرازش^۵، از تکنیک توقف زودهنگام^۵ استفاده شد. همچنین، توابع محرک یا فعال‌سازی سیگموئید و خطی به ترتیب برای لایه‌های پنهان و خروجی انتخاب شدند. عملکرد مدل در شکل‌های ۳ تا ۵ و شاخص‌های ارزیابی مدل در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل‌های ۷ تا ۱۸ مشخص است، این شبکه دارای عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌ها می‌باشد. همچنین جدول ۳ نشان می‌دهد که عملکرد این مدل به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار دارد.

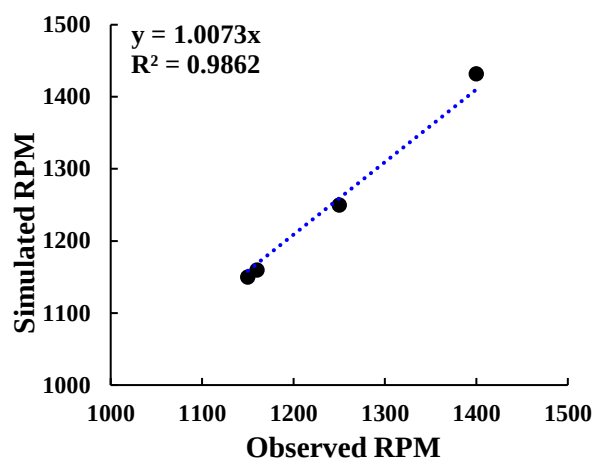
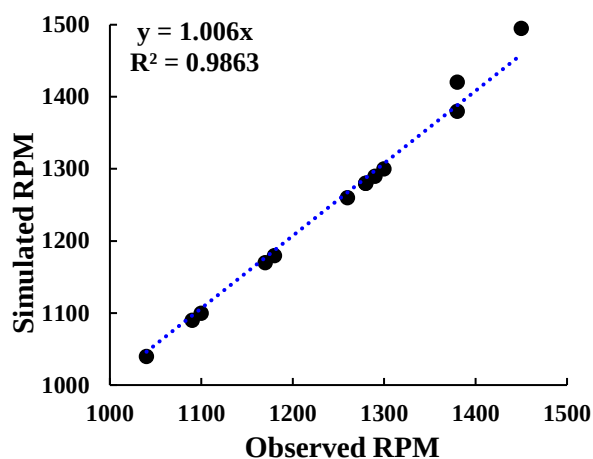
بهترین عملکرد مدل در مراحل آموزش و آزمون به ترتیب در ماه خرداد با $R^2=0/98$ و $RMSE=15/15$ و در ماه فروردین با $R^2=0/99$ و $RMSE=16/13$ مشاهده شد. در مقابل، ضعیف‌ترین عملکرد مدل در هر دو مرحله آموزش و آزمون در ماه مهر و به ترتیب با $R^2=0/58$ و $RMSE=173/8$ در مرحله آموزش و $R^2=0/50$ و $RMSE=188/4$ در مرحله آزمون اتفاق افتاده است. نکته مهم و اساسی که به صورت

1 5-fold cross-validation
2 Epoch
3 Batch Size
4 Over-fitting
5 Early Stopping

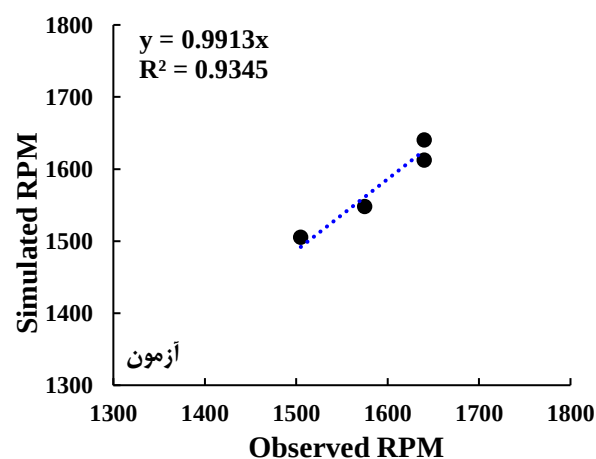
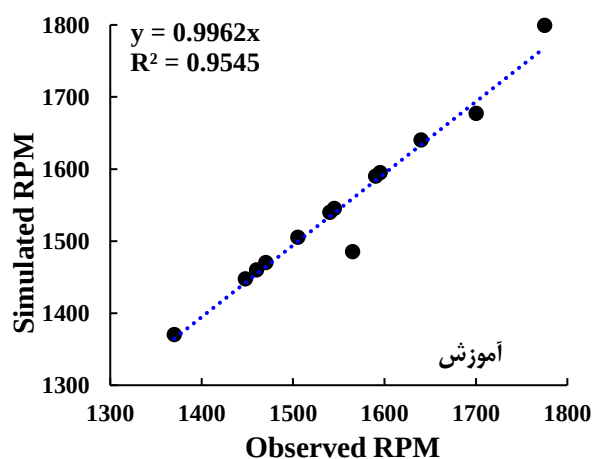
کاملاً واضح در نمودارها و جدول ارزیابی خطای این مدل قابل مشاهده است، کاهش قابل توجه عملکرد مدل شبکه عصبی در ماه‌های گرم سال (تیر تا آبان) همراه است. این کاهش عملکرد می‌تواند ناشی از چندین عامل باشد. بررسی متغیرهای ورودی نشان می‌دهد که در این دوره، نوسانات سطح ایستابی و آبدهی چاه‌ها به دلیل افزایش تقاضای آب و برداشت بیشتر، شدیدتر است. همچنین، ارتباط بین متغیرهای ورودی و دور پمپ در این دوره پیچیده‌تر می‌شود، زیرا عوامل دیگری مانند دمای آب و هوا، تغییر در الگوی مصرف، و کاهش راندمان پمپ‌ها در دماهای بالاتر نیز بر عملکرد سامانه تأثیر می‌گذارند. این عوامل که در مدل فعلی لحاظ نشده‌اند، می‌توانند علت اصلی کاهش دقت پیش‌بینی مدل در این دوره باشند. برای بهبود عملکرد مدل در ماه‌های گرم، می‌توان متغیرهای اضافی مانند دمای محیط و فشار کاری پمپ را نیز به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفت.

جدول ۲- توزیع‌های آماری بهینه ماهانه برای پارامترهای مختلف سامانه پمپاژ

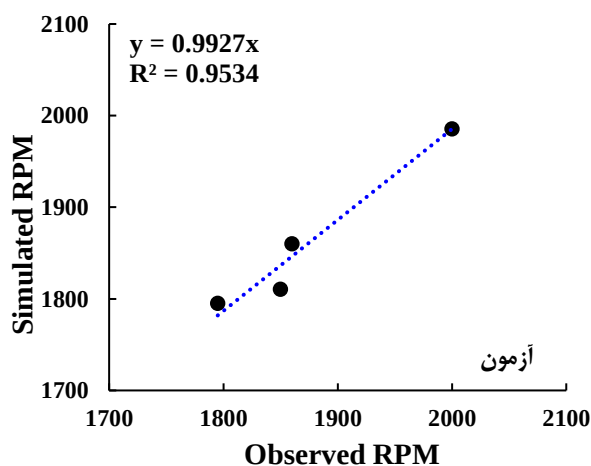
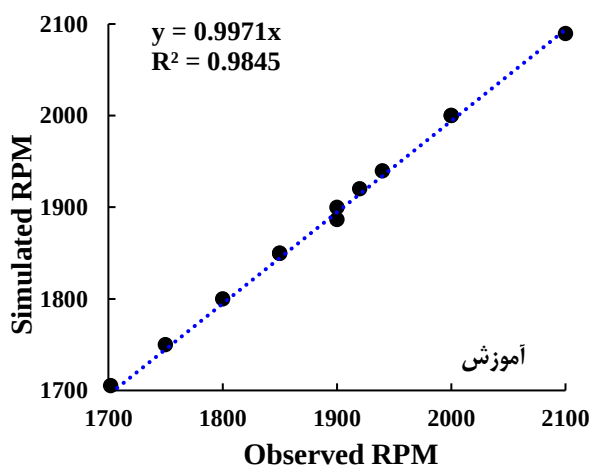
ماه	پارامتر	توزیع بهینه	AIC	BIC	K-S p-value
فروردین	دور پمپ	Gamma	۲۱۳/۴۸	۲۱۵/۱۵	۰/۹۵
	تراز سطح آب	Weibull	۳۵۸/۱۲	۳۸۹/۱۰	۰/۱۸
	آبدهی پمپ	Gamma	۹۱/۷۸	۹۵/۷۶	۰/۴۱
اردیبهشت	دور پمپ	Gamma	۲۰۷/۷۹	۲۰۹/۴۶	۱/۰
	تراز سطح آب	Weibull	۳۸۵/۷۸	۳۸۹/۷۶	۰/۳۴
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۹۸/۱۲	۱۰۲/۰۹	۰/۵۲
خرداد	دور پمپ	Log-Normal	۲۰۹/۶۹	۲۱۱/۳۶	۰/۹۸
	تراز سطح آب	Weibull	۴۰۱/۴۴	۴۰۵/۴۵	۰/۴۲
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۹۸/۴۶	۱۰۲/۴۸	۰/۴۴
تیر	دور پمپ	Log-Normal	۲۱۷/۵۴	۲۱۹/۲۱	۰/۹۸
	تراز سطح آب	Weibull	۳۸۹/۷۲	۳۹۳/۷۷	۰/۰۹
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۸۲/۷۰	۸۶/۸۲	۰/۲۱
مرداد	دور پمپ	Weibull	۲۳۰/۳۵	۲۳۲/۰۱	۰/۳۴
	تراز سطح آب	Weibull	۴۵۹/۷۴	۴۶۳/۷۶	۰/۱۱
	آبدهی پمپ	Normal	۱۰۵/۴۰	۱۰۹/۴۲	۰/۳۶
شهریور	دور پمپ	Weibull	۲۲۷/۱۵	۲۲۸/۸۲	۰/۰۸
	تراز سطح آب	Weibull	۳۹۶/۳۳	۴۰۰/۳۸	۰/۳۹
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۱۰۳/۵۶	۱۰۷/۶۱	۰/۱۲
مهر	دور پمپ	Weibull	۲۲۸/۷۹	۲۳۰/۴۵	۰/۷۱
	تراز سطح آب	Normal	۳۹۳/۷۵	۳۹۸/۸۰	۰/۱۰
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۸۸/۳۷	۹۲/۴۳	۰/۵۳
آبان	دور پمپ	Normal	۲۱۲/۴۶	۲۱۴/۱۲	۰/۹۸
	تراز سطح آب	Weibull	۳۹۴/۵۶	۳۹۸/۶۱	۰/۲۴
	آبدهی پمپ	Gamma	۹۳/۳۶	۹۷/۴۱	۰/۴۳
آذر	دور پمپ	Log-Normal	۲۱۸/۸۳	۲۲۰/۴۹	۰/۹۸
	تراز سطح آب	Weibull	۴۰۲/۹۴	۴۰۷/۰۶	۰/۱۳
	آبدهی پمپ	Lognormal	۸۲/۷۰	۸۶/۸۲	۰/۲۱
دی	دور پمپ	Gamma	۲۱۳/۴۸	۲۱۵/۱۵	۰/۹۵
	تراز سطح آب	Weibull	۴۱۵/۲۹	۴۱۹/۴۱	۰/۱۳
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۹۱/۹۶	۹۶/۰۸	۰/۵۸
بهمن	دور پمپ	Normal	۲۱۳/۵۰	۲۱۵/۱۶	۰/۹۴
	تراز سطح آب	Weibull	۴۱۸/۱۸	۴۲۲/۳۰	۰/۱۳
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۱۰۵/۰۸	۱۰۹/۲۰	۰/۳۰
اسفند	دور پمپ	Normal	۲۱۳/۵۰	۲۱۵/۱۶	۰/۹۴
	تراز سطح آب	Normal	۴۲۲/۱۹	۴۲۶/۳۱	۰/۱۳
	آبدهی پمپ	Log-Normal	۱۰۵/۰۸	۱۰۹/۲۰	۰/۳۰



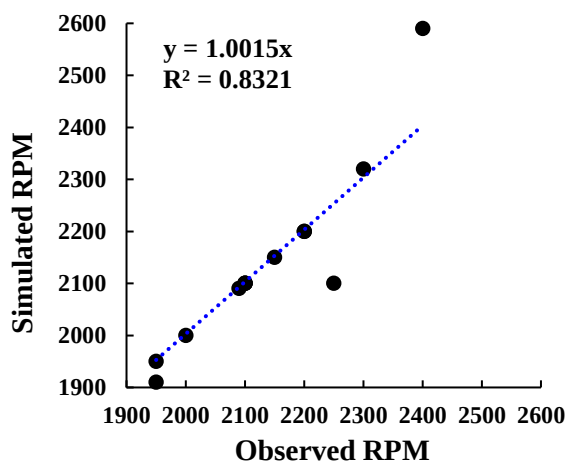
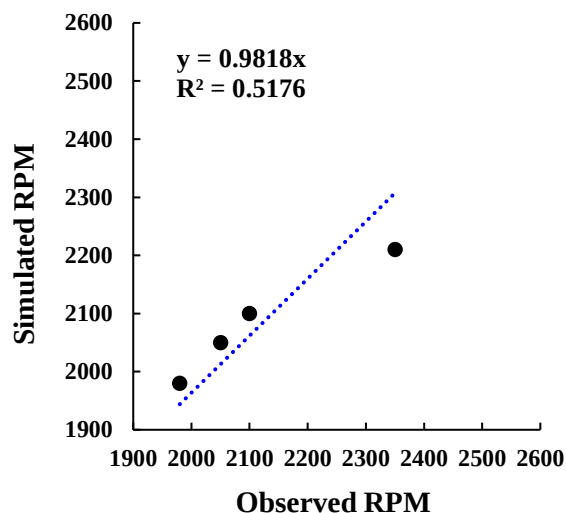
شکل ۷- تحلیل جامع عملکرد فروردین ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



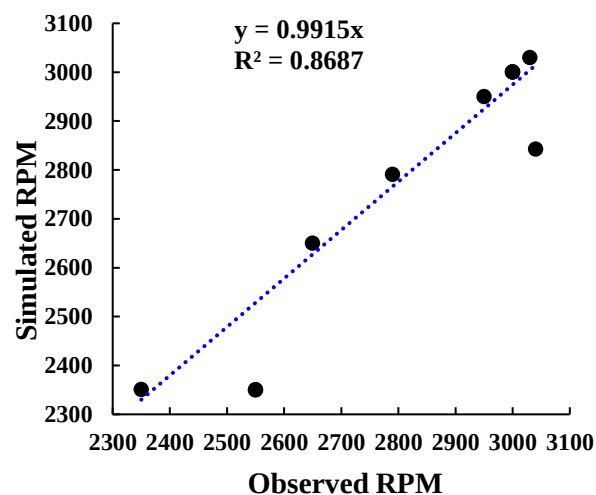
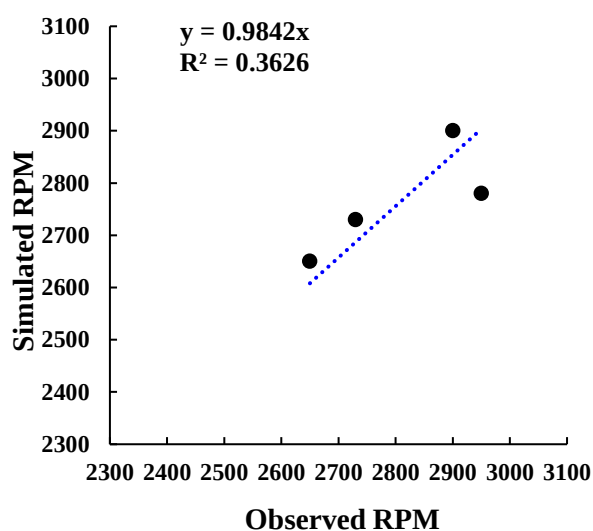
شکل ۸- تحلیل جامع عملکرد اردیبهشت ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



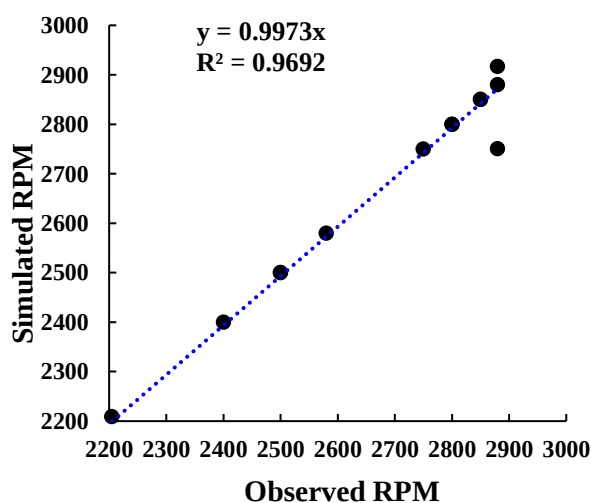
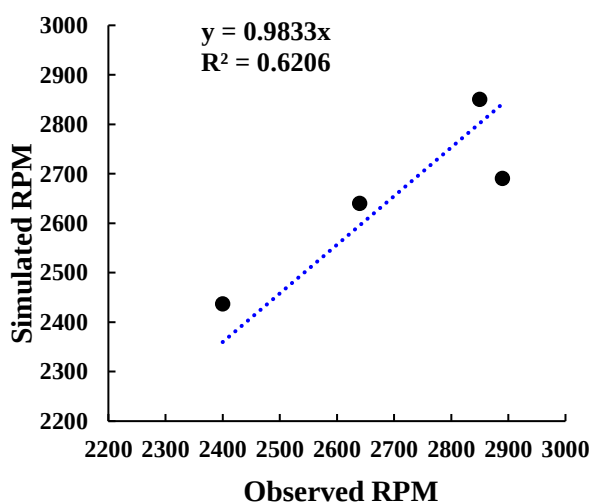
شکل ۹- تحلیل جامع عملکرد خرداد ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



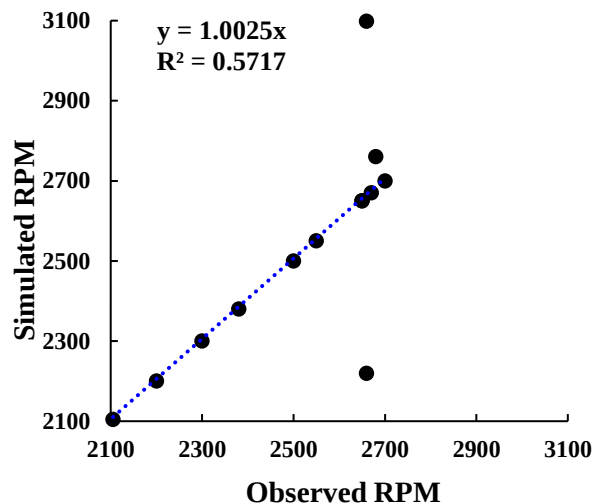
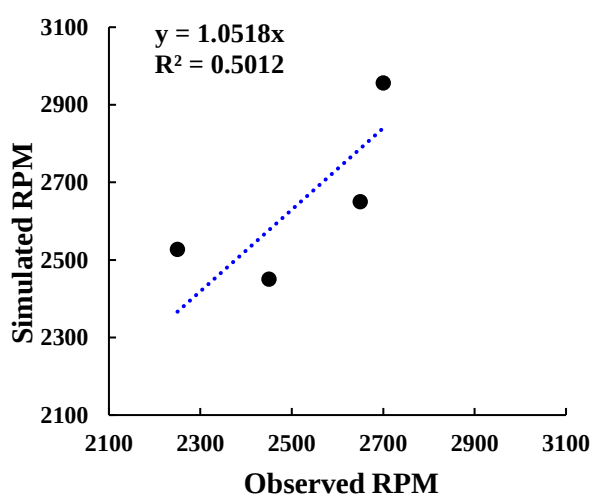
شکل ۱۰- تحلیل جامع عملکرد تیرماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



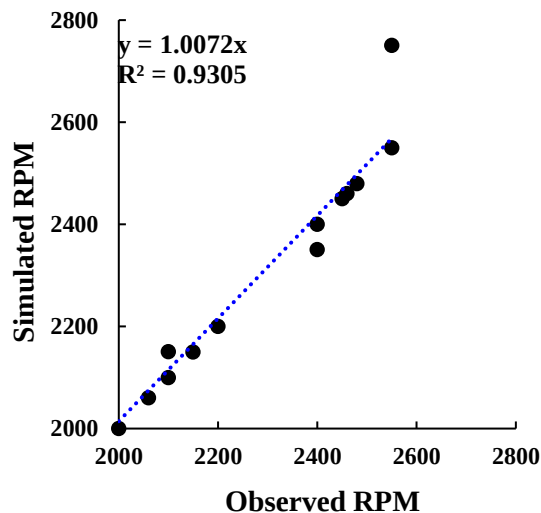
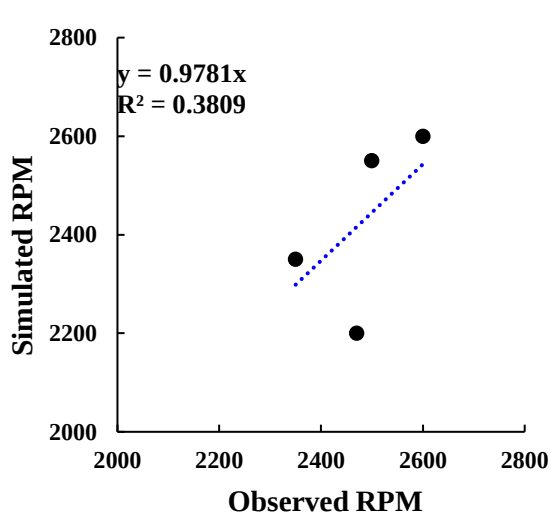
شکل ۱۱- تحلیل جامع عملکرد مردادماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



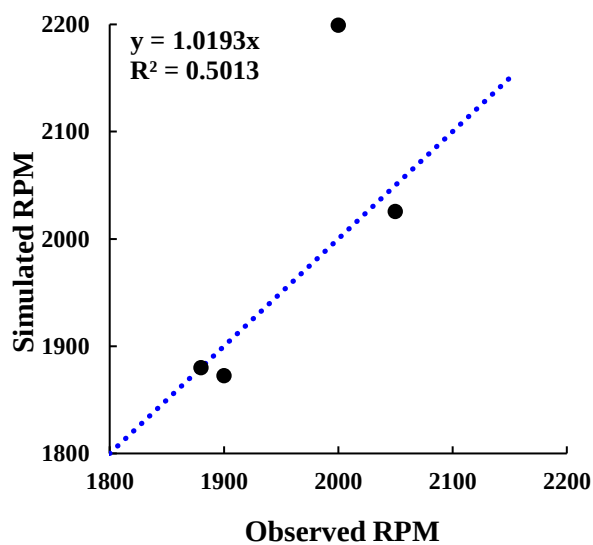
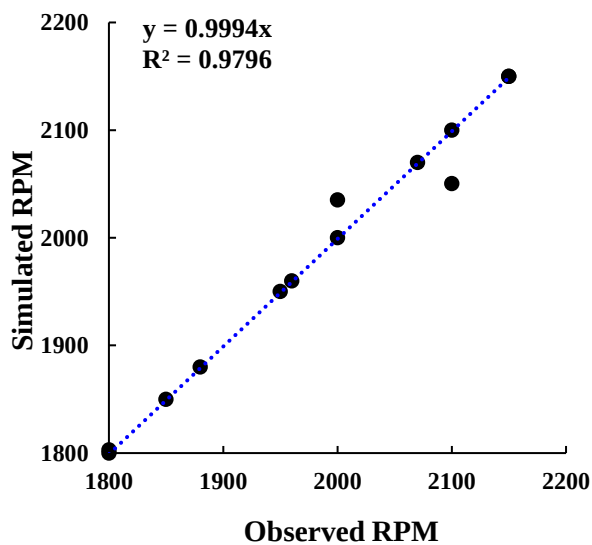
شکل ۱۲- تحلیل جامع عملکرد شهریورماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



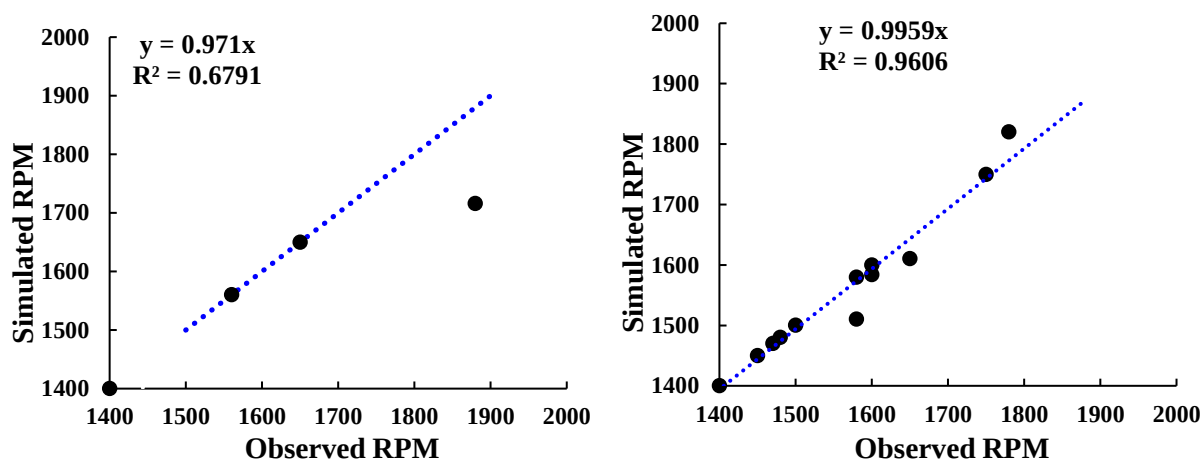
شکل ۱۳- تحلیل جامع عملکرد مهرماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



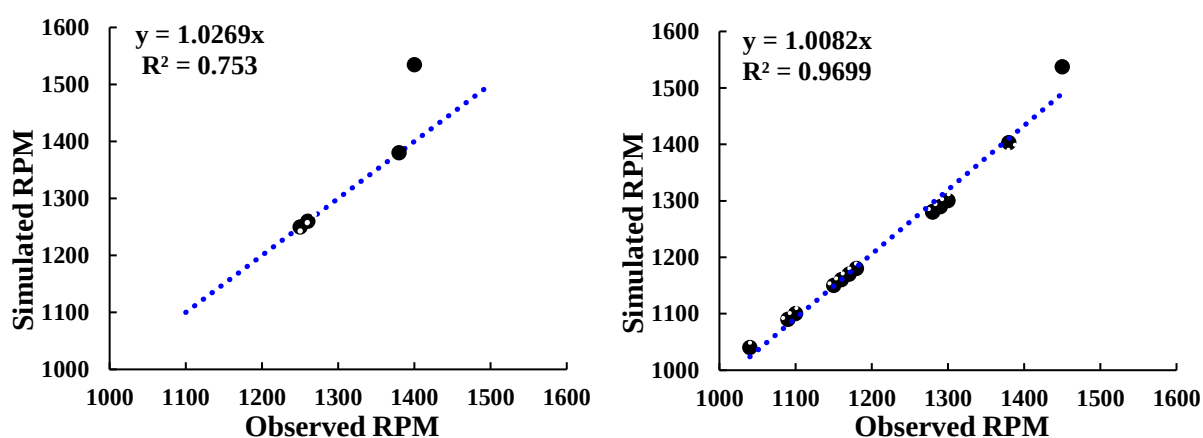
شکل ۱۴- تحلیل جامع عملکرد آبان‌ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



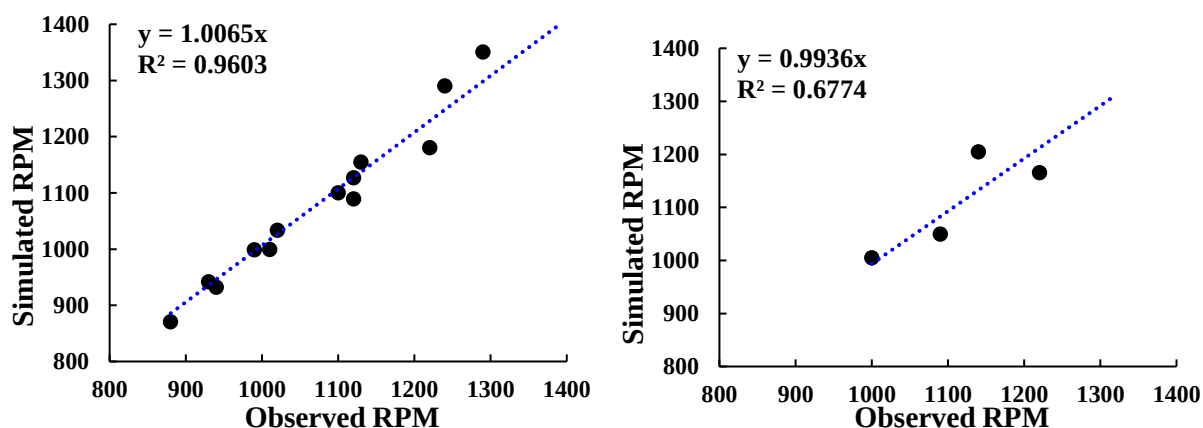
شکل ۱۵- تحلیل جامع عملکرد آذرماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



شکل ۱۶- تحلیل جامع عملکرد دی ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



شکل ۱۷- تحلیل جامع عملکرد بهمن ماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون



شکل ۱۸- تحلیل جامع عملکرد اسفندماه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ چاه‌های آب شرب در مراحل آموزش و آزمون

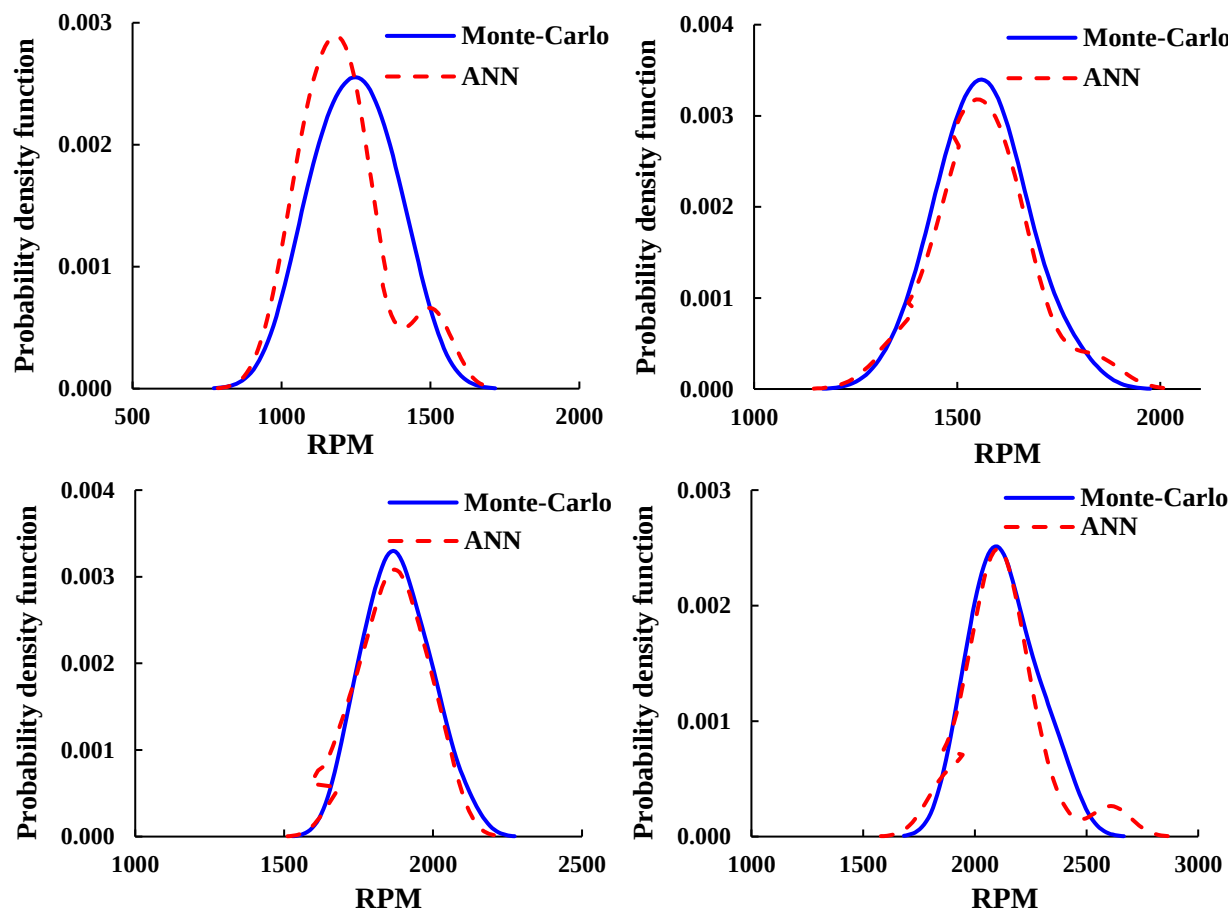
تحلیل حساسیت مدل ANN نشان داد که سطح ایستابی با ۴۸ درصد، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر دور پمپ است، پس از آن دبی پمپاژ با ۳۷ درصد و عمق نصب پمپ با ۱۵ درصد قرار دارند.

مقایسه توزیع‌های احتمال RPM

مقایسه توزیع‌های احتمال RPM مشاهداتی (مونت کارلو) و پیش‌بینی شده با مدل ANN برای ماه‌های مختلف، تفاوت‌های قابل توجهی را در دقت پیش‌بینی‌ها نشان داد (شکل‌های ۱۹ تا ۲۱). در ماه‌های سرد سال (آذر تا اسفند)، تطابق خوبی بین توزیع‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده وجود دارد به‌طوری‌که در بهمن ماه، منحنی‌های مشاهداتی و محاسباتی تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. در مقابل، در ماه‌های گرم (خرداد تا شهریور)، تفاوت قابل توجهی بین توزیع‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود. بنابراین مدل ANN در پیش‌بینی



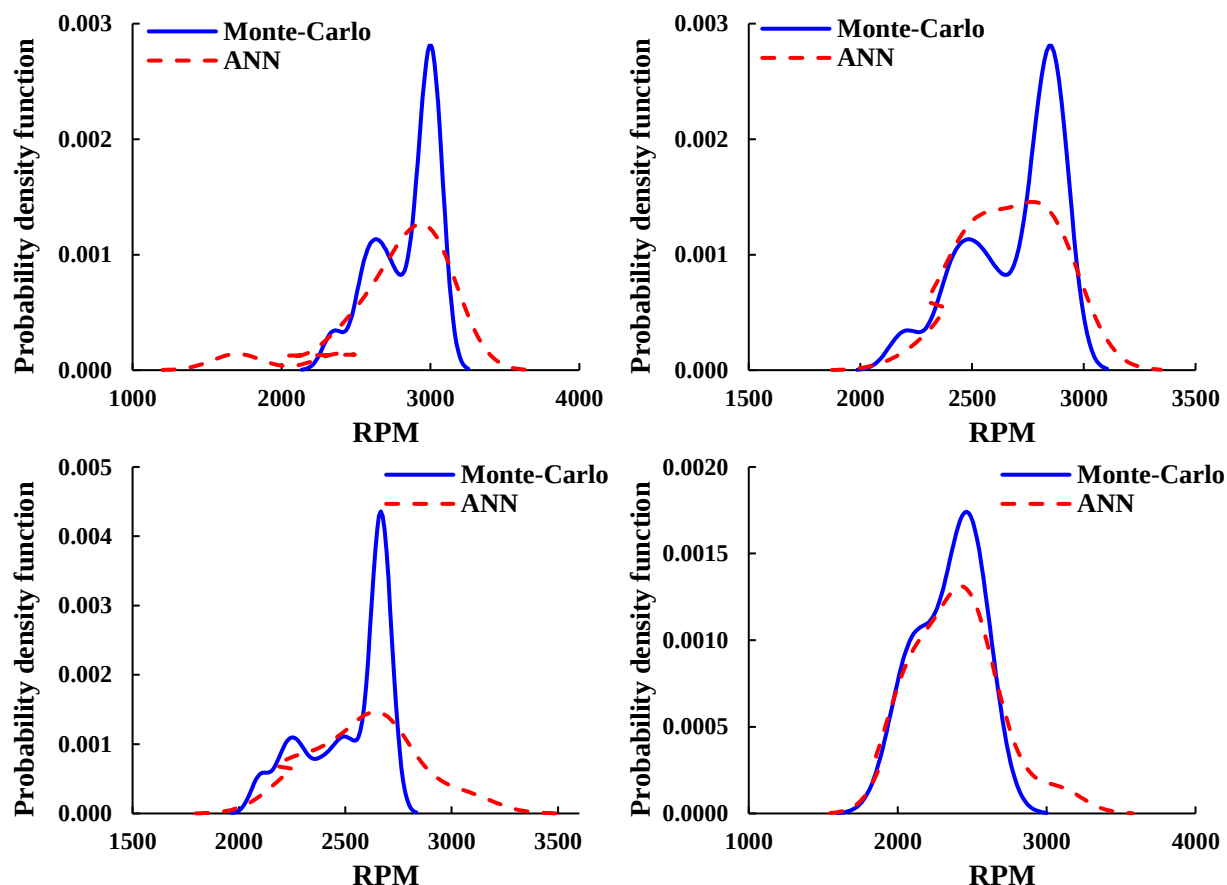
توزیع RPM در ماه‌های تابستان با چالش همراه است و نمی‌تواند پیچیدگی‌های توزیع واقعی را به خوبی پوشش دهد. این مشکل به‌ویژه در مرداد ماه بارزتر است به‌طوری‌که مدل یک توزیع نسبتاً هموار پیش‌بینی کرده است در حالی که داده‌های واقعی دارای چندین پیک مشخص می‌باشند.



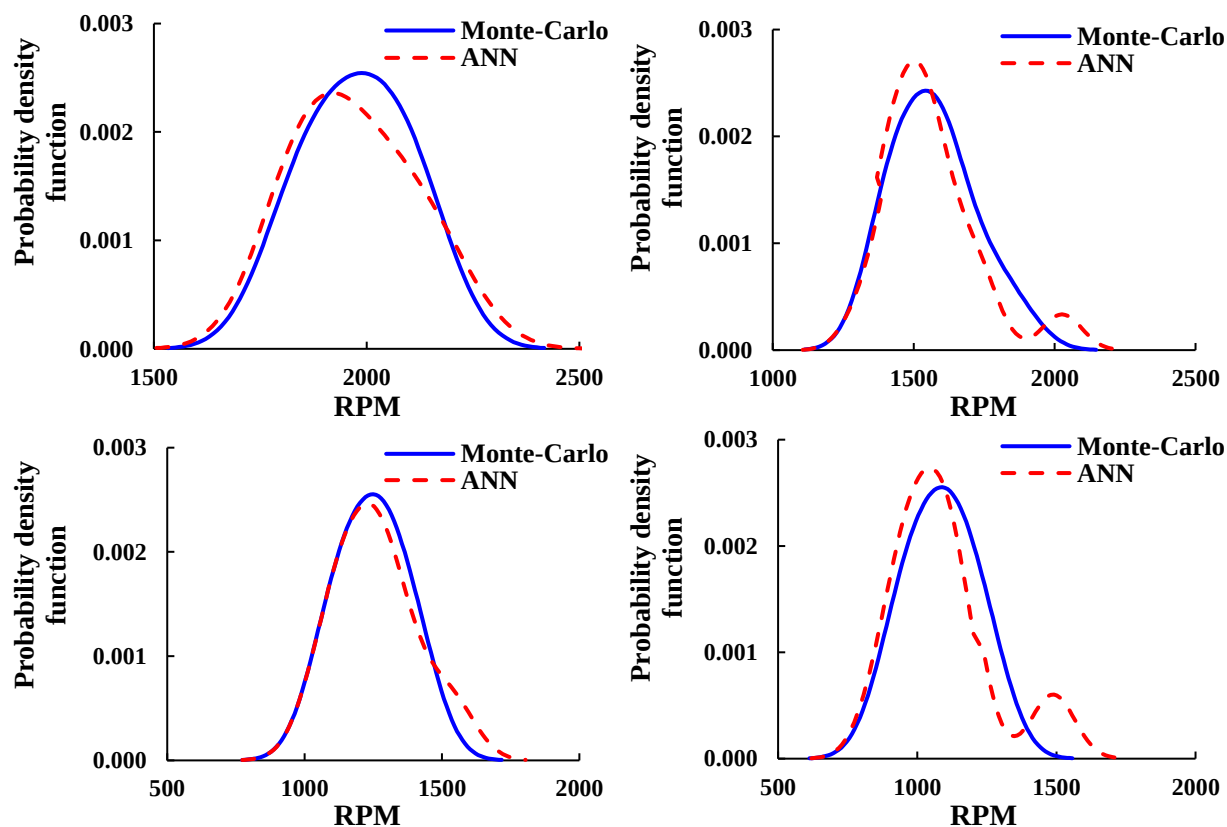
شکل ۱۹- مقایسه توزیع‌های احتمال RPM پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مونت‌کارلو برای ۴ ماه اول سال

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد ماهانه مدل MLP در پیش‌بینی دور پمپ برای مراحل آموزش و آزمون

مرحله آموزش		مرحله آموزش		ماه
R ²	RMSE	R ²	RMSE	
۰/۹۸۶	۱۶/۱۳	۰/۹۸۶	۱۶/۸۵	فروردین
۰/۹۳	۱۹/۴۱	۰/۹۵	۲۳/۹۴	اردیبهشت
۰/۹۵	۲۱/۱۹	۰/۹۸	۱۵/۱۵	خرداد
۰/۹۹	۱۰۵/۵	۰/۹۹	۶۸/۲۲	تیر
۰/۳۶	۸۵/۰	۰/۸۷	۱۰۶/۵۳	مرداد
۰/۶۲	۱۰۱/۵	۰/۹۷	۳۷/۴	شهریور
۰/۵۰	۱۸۸/۴	۰/۵۷	۱۷۳/۸	مهر
۰/۳۸	۱۵۱/۹	۰/۹۳	۵۸/۹	آبان
۰/۵۰	۱۰۱/۳	۰/۹۸	۱۶/۹	آذر
۰/۶۸	۸۲/۱	۰/۹۶	۲۵/۳	دی
۰/۷۵	۶۷/۴	۰/۹۷	۲۵/۱	بهمن
۰/۶۸	۴۷/۰	۰/۹۶	۲۷/۷	اسفند



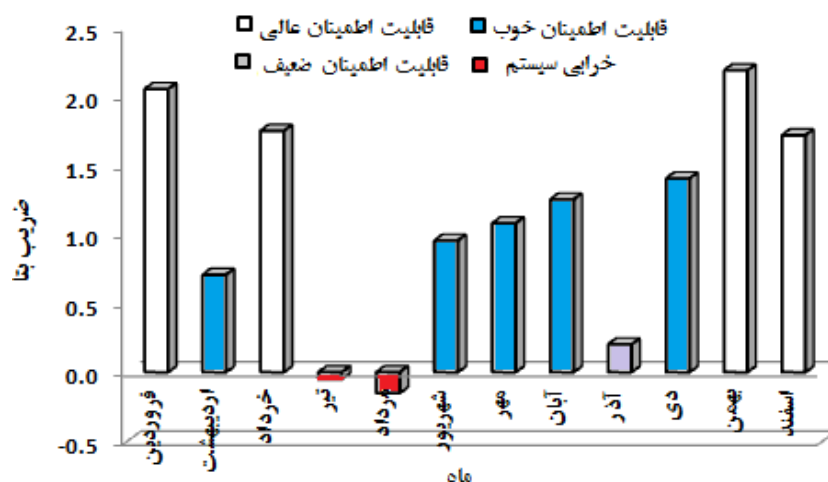
شکل ۲۰- مقایسه توزیع های احتمال RPM پیش بینی شده توسط شبکه عصبی و مونت کارلو برای ۴ ماه دوم سال



شکل ۲۱- مقایسه توزیع های احتمال RPM پیش بینی شده توسط شبکه عصبی و مونت کارلو برای ۴ ماه سوم سال

شاخص قابلیت اطمینان مونت کارلو

نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و محاسبه شاخص قابلیت اطمینان (بتا) برای ماه‌های مختلف سال، الگوی مشخصی از تغییرات فصلی را نشان داد (شکل ۲۲). شاخص قابلیت اطمینان در ماه‌های زمستان (دی، بهمن، اسفند) و فروردین به دلیل کاهش دما و کاهش مصرف آب و نیز تراز بالای سطح آب زیرزمینی دارای مقادیر بالایی (بین ۱/۴۱ تا ۲/۱۹) است که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای سامانه پمپاژ در این دوره است. در مقابل، در ماه‌های تیر و مرداد، شاخص بتا به مقادیر منفی رسیده است که بیانگر عدم قطعیت بالا و قابلیت اطمینان پایین سامانه در این دوره است. این کاهش چشمگیر در قابلیت اطمینان سامانه در ماه‌های گرم سال می‌تواند ناشی از عوامل متعددی مثل افزایش دما و در نتیجه افزایش تقاضای آب و فشار بیشتر بر سامانه پمپاژ (افزایش شدید دور پمپ)، افت سطح آب زیرزمینی به دلیل برداشت بیشتر و تغذیه کمتر، کاهش کارایی پمپ‌ها در دماهای بالاتر و تغییر در خصوصیات هیدرولیکی آبخوان به دلیل تغییرات فصلی باشد.



شکل ۲۲- تغییرات شاخص قابلیت اطمینان (بتا) در ماه‌های مختلف سال

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ چاه‌های آب شرب شهرستان بندرترکمن، از طریق تلفیق مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی مونت کارلو به یافته‌های قابل توجهی دست یافت که ارزش عملیاتی و کاربردی مناسبی دارند. تحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان دادند که پارامترهای هیدرولیکی چاه‌ها به‌ویژه تراز سطح آب زیرزمینی، دبی پمپ و دور پمپ، تغییرپذیری قابل توجهی در طول سال دارند. این تغییرات با الگوهای فصلی مشخصی همراه هستند که درک آن‌ها برای مدیریت بهینه سامانه‌های پمپاژ ضروری است. شاخص قابلیت اطمینان مونت کارلو به‌عنوان یک معیار کلیدی، تفاوت چشمگیری بین عملکرد سامانه در فصول سرد و گرم سال نشان داد، به‌طوری که مقادیر این شاخص از حداکثر ۲/۱۹ در بهمن‌ماه به حداقل ۰/۱۵- در مردادماه رسید. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی شبکه‌های عصبی مصنوعی همچنین نشان داد که تراز سطح آب زیرزمینی با ۴۸٪ تأثیر، مهم‌ترین عامل در تعیین دور بهینه پمپ‌ها بوده و بنابراین تغییرات آن در طول زمان باید به‌دقت پایش شود. یافته‌های این پژوهش همچنین اهمیت مدیریت فصلی سامانه‌های پمپاژ را برجسته می‌کند. با توجه به افت شدید قابلیت اطمینان در ماه‌های گرم سال، برنامه‌ریزی برای کاهش فشار بر سامانه در این دوره‌ها، از طریق مدیریت تقاضا و توزیع بار پمپاژ بین چاه‌های مختلف ضروری است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که برنامه‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه باید با در نظر گرفتن الگوهای فصلی تنظیم شوند، به‌طوری که بیشترین آمادگی سامانه برای دوره‌های پرفشار تابستان تضمین شود. در نهایت می‌توان گفت که نتایج این پژوهش نه تنها برای سامانه‌های پمپاژ چاه‌های آب شرب بندرترکمن کاربرد دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای بهینه‌سازی سامانه‌های مشابه در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک به کار گرفته شود. رویکرد توسعه‌یافته در این پژوهش، با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت بهینه منابع آب و انرژی، می‌تواند گامی مؤثر در راستای توسعه پایدار و سازگاری با چالش‌های تغییر اقلیم باشد. علی‌رغم نتایج قابل توجه این پژوهش، لازم است به محدودیت‌های آن نیز اشاره شود. مدل توسعه‌یافته در این مطالعه بر اساس داده‌های منطقه خاصی (بندرترکمن) آموزش دیده است و تعمیم نتایج آن به مناطق دیگر با شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوت نیازمند بررسی و واسنجی مجدد است. همچنین، محدودیت در تعداد داده‌های در دسترس و عدم لحاظ

- برخی متغیرهای تأثیرگذار مانند دمای محیط و کیفیت آب می‌تواند بر دقت پیش‌بینی‌ها تأثیر بگذارد.
- بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، راهکارهای زیر برای ارتقاء عملکرد سامانه پمپاژ چاه‌های آب شرب بندرت‌رکمن پیشنهاد می‌شود:
۱. تنظیم دور پمپ‌ها بر اساس تغییرات فصلی تراز سطح آب زیرزمینی به‌ویژه کاهش دور پمپ در ماه‌های مرداد و شهریور برای کاهش فشار بر سامانه و افزایش قابلیت اطمینان
 ۲. برنامه‌ریزی برای تعمیر و نگهداری پیشگیرانه پمپ‌ها قبل از شروع فصل گرم
 ۳. استفاده از سامانه کنترل هوشمند برای تنظیم خودکار دور پمپ‌ها بر اساس تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و دبی مورد نیاز
 ۴. مدیریت برداشت آب از چاه‌ها در فصول مختلف سال به منظور جلوگیری از افت شدید سطح آب زیرزمینی در ماه‌های گرم
 ۵. توزیع بار پمپاژ بین چاه‌های مختلف بر اساس شرایط هیدرولیکی آن‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی
 ۶. استفاده از مدل‌های نوین‌تر یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی با یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی و نیز استفاده از متغیرهای بیشتر در مدل‌سازی
 ۷. توسعه یک سامانه پایش بلادرنگ برای اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای عملکردی چاه‌ها.

"هیچ‌گونه تعارض منابع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

دایی‌چینی، فاطمه، وفاخواه، مهدی، موسوی، وحید، و ذبیحی سیلابی، مصطفی (۱۴۰۰). برآورد شاخص‌های جریان محیط زیستی در پایین‌دست سدهای گلستان و وشمگیر. *مجله اکوهیدرولوژی*، سال ۸، شماره ۳، ص. ۶۹۰-۶۷۷.

REFERENCES

- Ahmed, E.E. & Demirci, A. (2022). Multi-stage and multi-objective optimization for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems. *Energy*, 252, 124048.
- Alizadeh, H. & Mousavi, S.J. (2013). Coupled stochastic soil moisture simulation-optimization model of deficit irrigation. *Water Resources Research*, 49(7), 4100-4113.
- Almazrouei, S.M., Dweiri, F., Aydin, R., & Alnaqbi, A. (2023). A review on the advancements and challenges of artificial intelligence based models for predictive maintenance of water injection pumps in the oil and gas industry. *SN Applied Sciences*, 5(12), 391-412.
- Barandier, P. & Cardoso, A.J.M. (2023). A review of fault diagnostics in heat pumps systems. *Applied Thermal Engineering*, 228, 120454.
- Blischke, W.R. & Murthy, D.P. (2011). Reliability: modeling, prediction, and optimization. John Wiley & Sons.
- Brahmi, M.A., Dahane, M., Souier, M., & Sahnoun, M. (2022). Sustainable capacitated facility location/network design problem: a non-dominated sorting genetic algorithm based multiobjective approach. *Annals of Operations Research*, 311(2), 821-852.
- Chojaczyk, A.A., Teixeira, A.P., Neves, L.C., Cardoso, J.B., & Soares, C.J. (2015). Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures. *Structural Safety*, 52, 78-89.
- Daechini, F., Vafakhah, M., Moosavi, V., & Zabihi Silabi, M., (2021). Estimation of environmental flow indicators in the downstream of golestan and Voshmgir dams. *Journal of Ecohydrology*, 8(3), 677-690. in persian.
- da Silva, J.B., Santos Júnior, E.P., Siqueira e Silva, S.M., Maciel, V.G., Sales, A.T., de Sá Barreto Sampaio, E.V., Rotela Junior, P., Coelho Junior, L.M., Dubeux Jr, J.C.B., Cezar Menezes, R.S., & Dutra, E.D. (2024). Economic and energetic analysis of cactus pear biomass production systems with increasing levels of technological intensity. *Industrial Crops and Products*, 208, 117883.
- Gan, X., Pei, J., Pavesi, G., Yuan, Sh., & Wang, W. (2022). Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. *Energy Reports*, 8, 11592-11606.
- Lavrič, H., Drobní, K., & Fišer, R. (2024). Model-Based Assessment of Energy Efficiency in Industrial Pump Systems: A Case Study Approach. *Applied Sciences*, 14(22), 10430.
- Mayer, M.J., Szilágyi, A., & Gróf, G. (2020). Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*, 269, 115058.



- Mohammadi, Z., Heidari, F., Fasamanesh, M., Saghafian, A., Amini, F., & Jafari, S.M. (2023). Centrifugal pumps. Transporting Operations of Food Materials Within Food Factories. Elsevier. 155-200.
- Piri, J., Pirzadeh, B., Keshtegar, B., & Givvehchi, M. (2021). Reliability analysis of pumping station for sewage network using hybrid neural networks-genetic algorithm and method of moment. *Process Safety and Environmental Protection*, 145, 39-51.
- Ramin, E., Flores-Alsina, X., Gaszynski, C., Harding, Th., Ikumi, D., Brouckaert, C., Brouckaert, B., Modiri, D., Al, R., Sin, G., & Gernaey, K.V. (2022). Plant-wide assessment of alternative activated sludge configurations for biological nutrient removal under uncertain influent characteristics. *Science of The Total Environment*, 822.
- Salimi, S., Mawlana, M., & Hammad, A. (2018). Performance analysis of simulation-based optimization of construction projects using high performance computing. *Automation in Construction*, 87, 158-172.
- Shirazi, F., Zahiri, A., Piri, J., & Dehghani, A.A. (2014). Estimation of river high flow discharges using friction-slope method and hybrid models. *Water Resources Management*, 38(3), 1099-1123.
- Yu, W., Wenjin Yu a, Zhou, P., Miao, Z., Zhao, H., Mou, J., & Zhou, W. (2024). Energy performance prediction of pump as turbine (PAT) based on PIWOA-BP neural network. *Renewable Energy*, 222, 119873.
- Zhang, H., Xia, X., & Zhang, J. (2012). Optimal sizing and operation of pumping systems to achieve energy efficiency and load shifting. *Electric Power Systems Research*, 86, 41-50.