

Research Article

Development of an Artificial Neural Network Model for Estimating Agricultural Well Discharge Using Electricity Meter Data (Case Study: Qazvin Plain)

**Zeynab Rahimi Atani¹, Mohammad Bijankhan² , Hadi Ramezani Etedali³ ,
Hamed Mazandaranizade⁴, Sara Fakuri⁵, Sakineh Kohi⁶, Mina Gholizadeh⁷**

1- PhD student in Water Science and Engineering/Irrigation and Drainage, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

***Corresponding Author:** 2-Associate Professor, Department of Water Engineering Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3-Professor, Department of Water Engineering Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

4-Associate Professor, Department of Water Engineering Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

5-PhD in Water Resources, Department of Water Engineering Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

6-PhD in Water Resources, Department of Water Engineering Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

7-Employee of the Regional Water Company of Qazvin Province.

(✉ **Corresponding Author:** bijankhan@ikiu.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 6 June 2026

Revised: 1 July 2026

Accepted: 22 August 2026

Available Online: 9 September 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Rahimi Atani, Z., Bijankhan, M., Ramezani Etedali, H., Mazandaranizade, H., Fakuri, S., Kohi, S., Golizadeh, M., (2026). Development of an Artificial Neural Network Model for Estimating Agricultural Well Discharge Using Electricity Meter Data (Case Study: Qazvin Plain). V.27, No.102, P:45-68
<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373044.1650>

Extended Abstract

Introduction

Groundwater resources play a vital role in sustaining agricultural activities in arid and semi-arid regions. In Iran, over 75% of irrigation water is supplied from aquifers (Yazdanpanah *et al.*, 2019), making groundwater the primary source of agricultural production.

However, continuous groundwater level decline due to overexploitation, reduced natural recharge, and climate change has made accurate monitoring of groundwater abstraction an essential requirement for sustainable water resource management. Direct measurement of well discharge faces numerous challenges, including high equipment costs, operational difficulties, spatial distribution of wells, and the presence of unauthorized wells. While smart water meters have been introduced as a solution for abstraction control, their widespread implementation is constrained by high installation and maintenance costs. In contrast, most agricultural wells are already equipped with electricity meters that continuously record power consumption data, presenting a cost-effective alternative for indirect discharge estimation (Wang *et al.*, 2020; Alam *et al.*, 2023).

This study investigates the feasibility of estimating agricultural well discharge using electricity meter data and physical well characteristics through an Artificial Neural Network (ANN). The novelty of this research lies in developing a cost-effective approach that eliminates the need for expensive flow measurement equipment, relying solely on accessible electricity consumption data.

Methodology

Study Area and Data Collection

The research was conducted in Qazvin Province, central Iran, characterized by diverse climatic conditions and intensive agricultural activities. Field data were collected from 70 agricultural wells, including geographical coordinates, well depth, pipe diameter, electricity consumption parameters, and measured discharge values. Due to incomplete power records, 35 wells with reliable data were selected for modeling. Discharge measurements obtained using an ultrasonic flowmeter served as reference data.

Artificial Neural Network Modeling

A multilayer perceptron (MLP) neural network was implemented in the MATLAB environment using the Levenberg–Marquardt training algorithm. Eight scenarios were defined to evaluate the sensitivity of model performance to various combinations of input parameters, including power consumption, well depth, pipe diameter, geographical coordinates, and aeration condition. The dataset was randomly divided into training (70%), validation (15%), and testing (15%) subsets. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Different numbers of neurons (5 to 10) were tested to identify the optimal network architecture.

Results and Discussion

Model Performance and Scenario Selection

The ANN successfully estimated agricultural well discharge using electricity meter data and well characteristics. Among the evaluated scenarios, Scenario 7 comprising power consumption, well depth, pipe diameter, and geographical coordinates—demonstrated the most stable and reliable performance across training, validation, and testing stages. Although Scenario 8, which included aeration condition, produced slightly lower error during training, it required operational parameters difficult to obtain in practice. Consequently, Scenario 7 was selected as the optimal model. The optimal ANN architecture consisted of one hidden layer with 10 neurons, achieving the highest coefficient of determination ($R^2=0.9204$) and lowest prediction error (MAPE=13/96%). The model achieved average errors of approximately 15%, 13%, and 14% during training, validation, and testing phases, respectively.

Analysis of Input Variables

Power consumption was identified as the most influential variable, consistent with the hydraulic power equation ($P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta$), which establishes a direct physical relationship between power and discharge. Well depth affects pumping head (H), while pipe diameter influences friction losses. Geographical coordinates were incorporated into the model to account for spatial heterogeneity in hydrogeological conditions across the study area, as variations in aquifer thickness, sediment texture, hydraulic conductivity, and water table depth are not uniformly distributed throughout the Qazvin Plain.

Comparison with Previous Studies

The results align with findings by Alam et al. (2023), who achieved $R^2 \approx 0.92$ in alluvial aquifers, and Wang et al. (2020), who reported errors below 20% for energy-to-water conversion. The model performance ($R^2=0.9204$) is comparable to Salimi et al. (2023), who obtained $R^2=0.825$ using Random Forest, and Salamat et al. (2023), who achieved 0/945 accuracy using SVM-PSO. Although the dataset (35 wells) is limited compared to previous studies (e.g., 236–359 samples), the model demonstrates competitive performance, confirming the feasibility of the proposed approach.

Limitations and Sources of Error

The main limitations include: (1) limited sample size (35 wells), increasing the risk of overfitting, mitigated by early stopping and simple network architecture; (2) lack of comparison with other machine learning algorithms (e.g., Random Forest, SVM, XGBoost); (3) absence of hydrogeological variables such as water table level, dynamic head, and pump specifications; (4) limited temporal sampling (August–November 2023), not capturing seasonal variations; and (5) regional specificity, requiring local

calibration for application in other areas. Key sources of error include pump efficiency variations, groundwater level fluctuations, voltage instability, aeration, and differences in maintenance conditions.

Conclusions

This study demonstrates that combining electricity meter data with artificial neural networks provides a practical, cost-effective approach for estimating agricultural well discharge. The proposed method eliminates the need for expensive smart water meters while maintaining acceptable accuracy ($R^2=0.9204$, $MAPE=13.96\%$). Power consumption, well depth, pipe diameter, and geographical location were identified as key predictors. The approach can support groundwater monitoring programs, improve water resource management, and assist policymakers in implementing sustainable abstraction strategies. Future research should expand the dataset, incorporate temporal variations, compare multiple algorithms (Random Forest, SVM, XGBoost), and include hydrogeological variables (water table, dynamic head, pump characteristics) to enhance model accuracy and generalizability.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the preparation and publication of the materials and findings presented in this study.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets generated and analyzed during this study are not publicly available due to applicable restrictions, but are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contributions

Conceptualization: Z. Rahimi Atani, M. Bijankhan, H. Ramazani; Methodology: Z. Rahimi Atani, H. Mazandaranizadeh; Software: Z. Rahimi Atani, H. Mazandaranizadeh; Validation: M. Bijankhan, H. Ramazani; Formal analysis: Z. Rahimi Atani, M. Bijankhan; Investigation: Z. Rahimi Atani, M. Gholizadeh, S. Koohi, Fakouri; Resources: Z. Rahimi Atani; Data curation: M. Bijankhan, H. Ramazani, M. Gholizadeh, S. Koohi, Fakouri; Writing—original draft: Z. Rahimi Atani; Writing—review and editing: M. Bijankhan; Visualization: Z. Rahimi Atani; Supervision: M. Bijankhan, H. Ramazani; Project administration: M. Bijankhan. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the Qazvin Regional Water Company for providing access to well data and facilitating field measurements. This research was supported by the Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. The authors also acknowledge the cooperation of local farmers and agricultural well owners who participated in this study. This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Keywords: Well discharge, Artificial neural network (ANN), Smart water meter, Machine learning



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://10.22092/idser.2026.373044.1650>

نوع مقاله: پژوهشی

توسعه مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد دبی چاه‌های کشاورزی با استفاده از داده‌های کنتور برق (مطالعه موردی: دشت قزوین)

زینب رحیمی آتانی^۱، محمد بی‌جن‌خان^۲، هادی رضانی اعتدالی^۳، حامد مازندرانی زاده^۴، سارا فکوری^۵، سکینه کوهی^۶، مینا قلی‌زاده^۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸

چکیده

در سال‌های اخیر، مدیریت برداشت آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح بوده است. با توجه به هزینه‌بر بودن نصب و نگهداری کنتورهای هوشمند آب، استفاده از داده‌های در دسترس کنتورهای برق می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد جایگزین برای برآورد غیرمستقیم دبی چاه‌های کشاورزی مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، امکان تخمین دبی چاه‌های کشاورزی بر اساس داده‌های کنتور برق و ویژگی‌های فیزیکی چاه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بررسی شده است. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات توان مصرفی، مشخصات هندسی چاه (عمق و قطر)، موقعیت جغرافیایی و شرایط بهره‌برداری از ۳۵ حلقه چاه در منطقه مطالعه می‌باشد. مدل توسعه‌یافته از نوع پرسپترون چندلایه (MLP) بوده و با استفاده از الگوریتم لونیگ-مارکوارت آموزش داده شد. عملکرد مدل بر اساس معیارهای آماری مختلف از جمله ضریب تعیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE) و درصد خطای نسبی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مدل ANN توانایی مناسبی در برآورد دبی چاه‌ها بر اساس داده‌های کنتور برق دارد. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب داده‌های توان مصرفی کنتور برق با ویژگی‌های فیزیکی و مکانی چاه، ارزیابی سناریوهای مختلف ترکیب متغیرهای ورودی و ارائه یک روش کم‌هزینه و قابل اجرا برای برآورد غیرمستقیم دبی چاه‌ها بدون نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری مستقیم است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی در پایش برداشت آب زیرزمینی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مناطق دارای محدودیت تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آبدی چاه- شبکه عصبی مصنوعی - کنتور هوشمند آب - تکنیک‌های یادگیری ماشین

مقدمه

منابع آب است. افزایش برداشت از آبخوان‌ها، کاهش تغذیه مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و طبیعی، توسعه کشاورزی و تغییرات اقلیمی موجب افت نیمه‌خشک یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی مدیران مستمر سطح آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان و

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

^۲ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب؛ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۳ نویسنده مسئول: (Email: bijankhan@ikiu.ac.ir)

^۴ استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۵ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۶ دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۷ دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۸ کارمند شرکت آب منطقه ای استان قزوین

و خروجی، بدون نیاز به تعریف روابط فیزیکی صریح، یکی از پرکاربردترین ابزارها در پیش‌بینی و مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی به شمار می‌روند.

مطالعات متعددی کارایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در مسائل مرتبط با منابع آب نشان داده‌اند. پژوهش‌های سلامت و همکاران (Salamat et al., 2023)، سلیمی و همکاران (Salimi et al., 2023) و دشتی و همکاران (Salimi et al., 2023) بیانگر آن است که الگوریتم‌هایی نظیر شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی (RF) و مدل گروهی داده‌ها (GMDH) توانایی مناسبی در مدل‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی، پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی و برآورد ویژگی‌های آبخوان دارند. در سال‌های اخیر، مطالعات مروری نیز نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در هیدرولوژی و منابع آب با سرعت زیادی گسترش یافته و این مدل‌ها به دلیل توانایی در یادگیری روابط غیرخطی، دقت بالاتری نسبت به بسیاری از روش‌های کلاسیک ارائه می‌کنند. همچنین انتخاب صحیح متغیرهای ورودی، کیفیت داده‌ها و ساختار مدل از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد این روش‌ها شناخته شده‌اند.

در حوزه استفاده از داده‌های مصرف انرژی برای مدیریت منابع آب، مطالعات خارجی نشان داده‌اند که کنتورهای برق نصب‌شده بر روی چاه‌های کشاورزی می‌توانند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای تخمین غیرمستقیم دبی مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روش‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی و منابع آب با سرعت زیادی گسترش یافته و این مدل‌ها به دلیل توانایی در یادگیری روابط غیرخطی پیچیده میان متغیرهای تأثیرگذار و پدیده‌های هیدرولوژیکی، دقت بالاتری نسبت به بسیاری از روش‌های کلاسیک ارائه می‌کنند.

در پژوهشی دیگر، مک‌لوف و همکاران (Makhlouf et al., 2024) رویکردی نوین برای شناسایی نرخ‌های بهینه

به‌ویژه ایران شده است. در این شرایط، پایش دقیق میزان برداشت از چاه‌های کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب زیرزمینی، یکی از ارکان مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود. در کشورهای خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه ایران بیش از ۷۵ درصد از آبیاری‌های کشاورزی از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شوند (Yazdanpanah et al., 2019).

اولین گام در مدیریت منابع آب زیرزمینی، برآورد دقیق میزان برداشت از چاه‌ها است. با وجود اهمیت این موضوع، اندازه‌گیری مستقیم دبی چاه‌ها به دلیل هزینه بالای تجهیزات اندازه‌گیری، دشواری عملیات میدانی، پراکندگی چاه‌ها و محدودیت‌های اجرایی در بسیاری از مناطق به‌صورت مستمر امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، وجود تعداد قابل توجهی چاه فاقد تجهیزات مناسب اندازه‌گیری و همچنین بهره‌برداری از چاه‌های غیرمجاز، پایش و کنترل برداشت آب زیرزمینی را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است.

در سال‌های اخیر، استفاده از کنتورهای هوشمند آب به‌عنوان یکی از ابزارهای کنترل برداشت توسعه یافته است. این سامانه‌ها امکان ثبت و ارسال خودکار اطلاعات مصرف آب را فراهم می‌کنند، اما تجهیز تمامی چاه‌های کشاورزی به این فناوری به دلیل هزینه‌های نصب، نگهداری و زیرساخت‌های ارتباطی، در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست. در مقابل، بخش عمده‌ای از چاه‌های کشاورزی به کنتور برق مجهز هستند که اطلاعات توان مصرفی را به‌صورت پیوسته ثبت می‌کنند. از این‌رو، استفاده از داده‌های ثبت‌شده توسط کنتورهای برق می‌تواند به‌عنوان یک راهکار کم‌هزینه و در دسترس برای برآورد غیرمستقیم میزان برداشت آب مورد توجه قرار گیرد.

در سال‌های اخیر، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، کاربرد گسترده‌ای در مسائل منابع آب و هیدرولوژی پیدا کرده‌اند. در میان این روش‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت استخراج الگوهای پنهان میان متغیرهای ورودی

مشخصات چاه، سطح آب زیرزمینی و عمر پمپ وابسته است و در آبخوان‌های آبرفتی، رابطه قوی‌تری بین مصرف انرژی و دبی نسبت به آبخوان‌های سنگ سخت وجود دارد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که استفاده از داده‌های کنتور برق به‌عنوان شاخص برداشت آب، یک رویکرد قابل اعتماد و کم‌هزینه است، اما موفقیت آن مستلزم انتخاب صحیح متغیرهای ورودی و ساختار مدل می‌باشد.

بن مریم و همکاران (Ben Mariem et al., 2024) با استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند آب و برق در مناطق نیمه‌خشک تونس، رابطه میان حجم آب پمپاژشده و مصرف انرژی را با مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) بررسی کردند. نتایج نشان داد مدل RF با ضریب تعیین $R^2 = 0.88$ عملکرد بهتری داشته و عمق چاه و نوع پمپ از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مصرف انرژی بوده‌اند. این مطالعه بر وجود رابطه معنادار میان مصرف انرژی و برداشت آب زیرزمینی و قابلیت مدل‌های یادگیری ماشین در شبیه‌سازی این رابطه تأکید دارد. اگرچه در مطالعه مذکور مصرف انرژی بر اساس حجم آب پیش‌بینی شده است، در پژوهش حاضر دبی پمپاژ بر اساس توان مصرفی تخمین زده می‌شود؛ با این حال، هر دو پژوهش بر قابلیت استفاده از داده‌های انرژی برای برآورد برداشت آب زیرزمینی تأکید دارند. همچنین، اهمیت عمق چاه و مشخصات تجهیزات پمپاژ در مطالعه بن مریم و همکاران، با در نظر گرفتن مشخصات چاه، از جمله عمق و قطر، در پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

در ایران نیز با وجود گستردگی چاه‌های کشاورزی و دسترسی به داده‌های کنتور برق، مطالعه‌ای که به‌طور سیستماتیک به تلفیق این داده‌ها با شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین دبی پرداخته باشد، انجام نشده است. از این رو، خلأ اصلی پژوهش حاضر، نبود روشی کم‌هزینه، قابل اجرا و مبتنی بر مدل‌سازی غیرخطی برای تخمین دبی چاه‌های کشاورزی با استفاده از داده‌های در دسترس کنتور برق است.

پمپاژ آب زیرزمینی با تلفیق مدل عددی و مدل‌های یادگیری ماشین شامل رگرسیون فرآیند گاوسی، رگرسیون بردار پشتیبان، درخت تصمیم و شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند. این پژوهش در آبخوان‌های الیگوسن و اثوسن در غرب مصر انجام شد و متغیرهای ورودی مدل‌ها شامل مختصات چاه، نوع آبخوان، تبخیر-تعرق، دوره بهره‌برداری و افت سطح آب بودند. نتایج نشان داد که رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) با ضریب همبستگی ۱.۰ و RMSE برابر با ۶/۵۳، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی نرخ‌های پمپاژ داشته است. همچنین مشخص شد که تلفیق مدل‌های عددی و یادگیری ماشین می‌تواند ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیرندگان در مدیریت پایدار آب زیرزمینی فراهم آورد. این مطالعه نشان‌دهنده ظرفیت بالای روش‌های یادگیری ماشین در حل مسائل پیچیده منابع آب است و رویکرد تلفیقی آن، قابل توجه برای پژوهش‌هایی است که به دنبال برآورد غیرمستقیم دبی چاه‌ها با استفاده از داده‌های در دسترس هستند. با این حال، انتخاب صحیح متغیرهای ورودی، کیفیت داده‌ها و ساختار مدل از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد روش‌های یادگیری ماشین شناخته شده‌اند و محدودیت در دسترسی به داده‌های میدانی کافی همچنان یکی از چالش‌های اساسی در کاربرد این روش‌ها محسوب می‌شود.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) در پژوهش خود که در دشت شمال چین با بیش از ۸۰۰۰ حلقه چاه کشاورزی انجام شد، از آزمایش‌های میدانی گسترده برای تعیین ضریب تبدیل انرژی به آب استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که خطای تبدیل انرژی به آب در سطح چاه‌های منفرد کمتر از ۲۰ درصد است و با استفاده از میانگین ضرایب تبدیل در مقیاس منطقه‌ای، این خطا کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر، عالم و همکاران (Alam et al., 2023) با استفاده از رویکرد مشابه در آبخوان‌های آبرفتی هند، موفق به توسعه مدلی با ضریب تعیین $R^2 = 0.92$ برای تخمین برداشت آب زیرزمینی بر اساس مصرف انرژی شدند. آن‌ها نشان دادند که ضریب تبدیل به عواملی مانند توان پمپ،

توسعه مدل با داده‌های گسترده‌تر در مطالعات آینده فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان قزوین در حوزه مرکزی ایران با مساحتی معادل ۱۵ هزار و ۸۲۱ کیلومترمربع، بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد از شمال به استان‌های مازندران و گیلان، از غرب به استان‌های همدان و زنجان، از جنوب به استان مرکزی و از شرق به استان تهران محدود می‌شود.

استان قزوین دارای شرایط اقلیمی متفاوتی است. بخش‌های شمالی که در مجاورت رشته‌کوه البرز واقع شده است، دارای زمستان‌های سرد و پر بارش و تابستان‌های معتدل است. بخش‌های جنوبی و دشت قزوین بر خلاف شمال دارای اقلیم نیمه‌خشک و گرم هستند. میانگین بارندگی سالانه استان حدود ۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دما حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

بخش شمالی استان که کوهستانی است، بخش عمده‌ای از آب سطحی استان را تأمین می‌کند. رودخانه شاهرود یکی از مهم‌ترین رودهای استان است. دشت قزوین در بخش‌های مرکزی و جنوبی استان گسترده شده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پهنه‌های کشاورزی کشور شناخته می‌شود. از نظر هیدروژئولوژیکی، دشت قزوین دارای سازندهای آبرفتی با ضخامت متغیر است که عمدتاً از رسوبات دانه‌درشت تا ریزدانه تشکیل شده‌اند. این شرایط موجب شده است که بهره‌برداری از آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات سطح ایستابی و ناهمگونی لایه‌های آبرفتی از عوامل مهمی هستند که بر عملکرد چاه‌ها و راندمان پمپاژ تأثیر گذارند.

پروژه این خلاقانه تنها از نظر علمی حائز اهمیت است، بلکه از منظر مدیریتی نیز می‌تواند به پایش برداشت آب در مناطقی که کنتور هوشمند آب ندارند، کمک شایانی نماید و ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در اختیار مدیران قرار دهد.

در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از داده‌های کنتور برق و ویژگی‌های فیزیکی چاه برای تخمین دبی برداشت آب زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی توسعه یافته است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که نیازمند داده‌های مستقیم هیدرولوژیکی یا روابط فیزیکی صریح هستند، در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از داده‌های در دسترس‌تر و مدل‌سازی غیرخطی، یک رویکرد کم‌هزینه و قابل اجرا برای پایش برداشت آب ارائه شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در استفاده از داده‌های کنتور برق (شامل توان مصرفی پمپ) در کنار ویژگی‌های فیزیکی چاه (مانند عمق، قطر و موقعیت مکانی) و مدل‌سازی آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین غیرمستقیم دبی چاه‌ها است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کاربردی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطقی که دسترسی به تجهیزات اندازه‌گیری مستقیم محدود است، مورد استفاده قرار گیرد.

با این حال، محدود بودن تعداد نمونه‌های قابل دسترس یکی از چالش‌های مهم این پژوهش بوده است که در تحلیل نتایج باید مورد توجه قرار گیرد. هرچند حجم نمونه محدود است، اما داده‌های مورد استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق و با کیفیت بالا حاصل شده‌اند و نمونه‌ها بخش‌های مختلف دشت قزوین را پوشش می‌دهند. بنابراین نتایج این پژوهش را می‌توان به‌عنوان یک مطالعه امکان‌سنجی و اثبات مفهوم^۸ برای ارزیابی قابلیت استفاده از داده‌های کنتور برق در تخمین دبی چاه‌ها در نظر گرفت. این نتایج مبنایی برای

اقلیم منطقه نیمه‌خشک بوده و بارندگی سالانه محدود است، بنابراین بخش عمده تأمین آب مورد نیاز کشاورزی از طریق برداشت از آبخوان انجام می‌شود. این ویژگی‌ها، دشت قزوین را به یک منطقه مناسب برای بررسی روش‌های غیرمستقیم برآورد برداشت آب زیرزمینی تبدیل کرده است. بر اساس آمار منتشر شده از مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین که در تاریخ ۲۹ آبان ماه ۱۴۰۳ منتشر شده است، از تعداد ۵۹۴۹ حلقه چاه دارای پروانه بهره‌برداری در استان تعداد ۴۰۶۰ حلقه چاه به کنترل هوشمند آب مجهز شده‌اند. به عبارتی ۶۸/۲۵ درصد از چاه

اطلاعات مربوط به توان مصرفی، مشخصات فیزیکی چاه (عمق و قطر) و مختصات جغرافیایی برای آن‌ها ثبت گردیده است. همچنین دبی واقعی برداشت‌شده برای هر چاه با استفاده از فلومتر اولتراسونیک اندازه‌گیری شده و به‌عنوان مقدار هدف در مدل‌سازی استفاده شده است. اگرچه تعداد نمونه‌های نهایی نسبتاً محدود است، اما این نمونه‌ها از شهرهای مختلف استان قزوین انتخاب شده‌اند و دامنه متنوعی از شرایط هیدروژئولوژیکی، عمق چاه، قطر لوله، توان مصرفی و وضعیت بهره‌برداری را پوشش می‌دهند (جدول ۱).

داده‌های مورد استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق و باکیفیت بالا حاصل شده‌اند. در این راستا، برای اندازه‌گیری دبی واقعی چاه‌ها از فلومتر اولتراسونیک مدل TUF-2000H استفاده شد (شکل ۱). شایان ذکر است که دقت اندازه‌گیری فلومتر در محدوده $\pm 5\%$ درصد نسبت به مقیاس واقعی می‌باشد.

بر اساس آمار منتشر شده از مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین که در تاریخ ۲۹ آبان ماه ۱۴۰۳ منتشر شده است، از تعداد ۵۹۴۹ حلقه چاه دارای پروانه بهره‌برداری در استان تعداد ۴۰۶۰ حلقه چاه به کنترل هوشمند آب مجهز شده‌اند. به عبارتی ۶۸/۲۵ درصد از چاه‌های دارای پروانه بهره‌برداری مجهز به کنترل هوشمند آب هستند و ۷۵/۳۱ درصد از چاه‌های موجود فاقد کنترل هوشمند آب می‌باشند.

نمونه برداری

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از ۳۵ حلقه چاه مجاز کشاورزی در منطقه مطالعه به صورت میدانی جمع‌آوری شده است. این چاه‌ها دارای کنترل برق بوده و



شکل ۱- فلومتر اولتراسونیک

Fig. 1- Ultrasonic flow meter

در مرحله اولیه، تعداد بیشتری از چاه‌ها (حدود ۷۰ حلقه) مورد بازدید قرار گرفت. در زمان انجام مطالعات میدانی، تلاش شد اطلاعات تمامی چاه‌های بازدیدشده از طریق شرکت آب منطقه‌ای قزوین و برداشت‌های میدانی تکمیل شود، اما به دلیل محدودیت دسترسی به برخی

داده‌های بهره‌برداری و ناقص بودن اطلاعات ثبت‌شده، تنها چاه‌هایی که دارای مجموعه کامل داده‌های مورد نیاز بودند در فرآیند مدل‌سازی استفاده شدند.

نمونه‌های انتخاب‌شده از شهرهای مختلف استان شامل قزوین، بوئین‌زهره، آبیک، البرز، تاکستان و چند محدوده دیگر

یک رابطه فیزیکی میان توان و دبی وجود دارد، رفتار واقعی سیستم دارای ماهیتی غیرخطی است و استفاده از مدل‌های داده‌محور را ضروری می‌سازد.

رابطه فیزیکی بین توان مصرفی (P) و دبی چاه (Q) اساساً توسط معادله توان هیدرولیکی حاکم می‌شود:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

که در آن:

– P توان مصرفی

– ρ : چگالی آب

– g : شتاب گرانش

– Q : دبی

– H : هد یا ارتفاع پمپاژ

– η : بازده پمپ

در عمل اندازه‌گیری مستقیم تمامی پارامترهای مؤثر بر رابطه فوق برای همه چاه‌ها امکان‌پذیر نیست؛ زیرا اطلاعاتی نظیر هد دینامیکی لحظه‌ای، راندمان واقعی پمپ و افت‌های هیدرولیکی معمولاً در زمان بهره‌برداری ثبت نمی‌شوند. در نتیجه، به جای مدل‌سازی صریح این روابط، از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد تا اثر همزمان این عوامل را به صورت ضمنی از داده‌های موجود استخراج کند.

در حالی که این معادله یک پایه خطی ارائه می‌دهد، در چاه‌های کشاورزی واقعی، پارامترهای ارتفاع و بازده به شدت غیرخطی هستند و به دلیل عوامل مختلفی مانند تغییر در قطر چاه، عمق و ناهمگونی‌های هیدروژئولوژیکی تغییر می‌کنند. مدل ANN برای یادگیری این وابستگی‌های پیچیده و غیرخطی که معادلات تحلیلی سنتی در نمایش آن‌ها دچار مشکل هستند، به کار گرفته شده است؛ به طوری که مدل می‌تواند با در نظر گرفتن تغییرات ضمنی در هد و بازده، نگاشت بین سیگنال‌های توان الکتریکی و دبی حاصل را یاد بگیرد.

با توجه به اینکه بسیاری از پارامترهای مؤثر بر رابطه توان و دبی، از جمله تغییرات هد دینامیکی، راندمان واقعی پمپ، افت اصطکاکی و شرایط بهره‌برداری قرار می‌گیرد. از این‌رو اگرچه

برداشت شدند؛ بنابراین نمونه‌ها تنها محدود به یک ناحیه خاص نبوده و بخشی از تنوع مکانی دشت را پوشش می‌دهند. انتخاب چاه‌ها به صورت هدفمند و بر اساس کامل بودن اطلاعات مورد نیاز مدل انجام شد و نه به صورت تصادفی. از این‌رو نتایج پژوهش باید در چارچوب دامنه داده‌های مورد استفاده تفسیر شوند.

اصل انجام این تحقیق بر اساس وجود توان لحظه‌ای کنتور برق پایه‌ریزی شده است. از آنجایی که برخی از چاه‌ها فاقد این عنوان بوده‌اند، ۳۵ حلقه چاه شرایط لازم جهت بررسی را دارا بوده و سایر چاه‌ها حذف گردیدند. از ۳۵ حلقه چاهی که دارای توان مصرفی کنتور برق هستند، تعداد ۱۰ حلقه چاه دارای مشکل هوادهی هستند.

توان مصرفی به دلیل وجود رابطه فیزیکی مستقیم با دبی، به عنوان مهم‌ترین متغیر ورودی در این پژوهش انتخاب شده است. این رابطه از معادله توان هیدرولیکی قابل تبیین است که در ادامه ارائه می‌شود. بر اساس این معادله، دبی (Q) با توان مصرفی (P) رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر، هرچه توان مصرفی بیشتر باشد، دبی پمپاژ نیز بیشتر است (با فرض ثابت بودن هد و بازده).

این رابطه فیزیکی قوی، مبنای اصلی انتخاب توان مصرفی به عنوان متغیر ورودی در این پژوهش بوده است. علاوه بر رابطه مستقیم ریاضی، در عمل نیز چاه‌هایی که پمپ قوی‌تری دارند، توان مصرفی بیشتری دارند و آب بیشتری پمپاژ می‌کنند. از طرفی، توان مصرفی به سادگی از کنتور برق قابل قرائت است و نیاز به تجهیزات اضافی ندارد که این ویژگی، آن را به گزینه‌ای عملی برای مدل‌سازی تبدیل کرده است.

اساس ایده پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که انرژی مصرف‌شده توسط پمپ با میزان آب برداشت‌شده ارتباط فیزیکی دارد. در شرایط ایده‌آل، افزایش دبی مستلزم افزایش توان مصرفی است، اما این رابطه تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر عمق چاه، هد دینامیکی، راندمان پمپ، افت اصطکاکی و شرایط بهره‌برداری قرار می‌گیرد. از این‌رو اگرچه

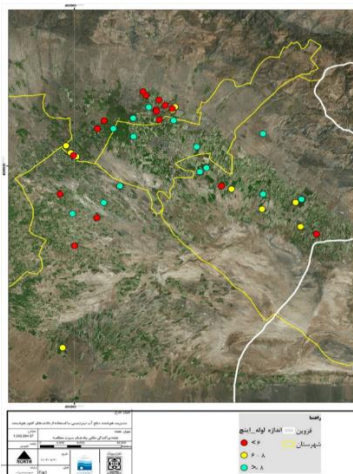
قابل اندازه‌گیری نبودند، استفاده از مدل‌های مبتنی بر مصنوعی به عنوان ابزاری برای یادگیری روابط پیچیده میان یادگیری ماشین می‌تواند این روابط ضمنی را از روی متغیرهای ورودی و دبی برداشت انتخاب شد. داده‌های موجود استخراج کند. از این رو، شبکه عصبی

جدول ۱- پراکندگی جغرافیایی چاه‌هایی که دارای توان مصرفی بوده اند

Table 1- Geographical distribution of wells with power consumption

ردیف Row	شهر City	تعداد چاه Number of wells
1	قزوین	15
2	بوئین‌زهره	8
3	آبیک	4
4	البرز	4
5	سلطان‌آباد	1
6	ولامدره	1
7	شید اصفهان	1
8	تاکستان	1

بر اساس نتایج جدول (۱)، بیشترین تعداد چاه‌های دارای توان مصرفی مربوط به شهرستان قزوین (۱۵ حلقه) و بوئین‌زهره (۸ حلقه) است و شهرستان‌های آبیک و البرز هرکدام ۴ حلقه چاه در مجموعه داده‌ها دارند. پراکندگی چاه‌ها در ۸ شهر مختلف دشت قزوین نشان‌دهنده تنوع مکانی مناسب داده‌هاست که به افزایش نمایندگی نمونه‌ها و بهبود قابلیت تعمیم مدل کمک می‌کند. با این حال، تعداد کم چاه‌ها در برخی شهرها (سلطان‌آباد، ولا مدره، شید اصفهان و تاکستان هرکدام ۱ بگیرد. حلقه) ممکن است باعث شود مدل نتواند ویژگی‌های خاص



شکل ۲- چاه‌های منتخب برای بازدید از کنتورهای هوشمند آب

Fig. 2- Selected wells for smart water meter inspection

روش تحقیق

شبکه عصبی مصنوعی به دلیل توانایی بالای آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی انتخاب شد. رابطه بین توان مصرفی پمپ، عمق چاه، شرایط بهره‌برداری و دبی برداشت‌شده ماهیتی پیچیده و غیرخطی دارد و استفاده از مدل‌های خطی ساده نمی‌تواند این ارتباط را به خوبی توصیف کند. علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات حوزه منابع آب و هیدرولوژی، شبکه‌های عصبی مصنوعی عملکرد مناسبی در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی از خود نشان داده‌اند. با توجه به هدف پژوهش حاضر و محدودیت تعداد داده‌های در دسترس، مدل پرسپترون چندلایه (MLP) با الگوریتم آموزش Levenberg-Marquardt به عنوان مدل اصلی انتخاب شد.

پیاده‌سازی و آموزش شبکه عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و جعبه‌ابزار Neural Network Start انجام گردید. به طور خاص، در این تحقیق از رابط کاربری گرافیکی nnstart استفاده شده است. این رابط شرایطی را فراهم می‌کند که بدون نیاز به کدنویسی گسترده، بتوان شبکه‌های عصبی مختلف را طراحی و آموزش داد. همچنین nnstart این قابلیت را دارد که داده‌های آموزشی و آزمایشی را دریافت نموده، الگوریتم‌های مختلف یادگیری را پیاده‌سازی کرده و در نهایت معیارهایی نظیر میزان خطا، نرخ همگرایی و دقت پیش‌بینی را گزارش دهد.

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) به عنوان یکی از متداول‌ترین مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل می‌شود و ارتباط بین نرون‌ها به صورت پیش‌خور (Feedforward) برقرار است.

فرایند آموزش آن بر اساس الگوریتم پس انتشار خطا (Backpropagation) انجام می‌گیرد که طی آن وزن‌ها و بایاس‌ها با توجه به میزان خطای خروجی اصلاح می‌شوند. ویژگی مهم پرسپترون چندلایه، توانایی یادگیری روابط

غیرخطی پیچیده میان داده‌های ورودی و خروجی است که آن را به ابزاری قدرتمند برای تقریب توابع، پیش‌بینی و شناسایی الگوها تبدیل می‌کند.

در این پژوهش از الگوریتم آموزش Levenberg-Marquardt استفاده شد. این الگوریتم که به اختصار trainlm نیز نامیده می‌شود، دارای دقت و سرعت بیشتری بوده و بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. الگوریتم‌های Bayesian-Regularization و Conjugate-Gradient که به اختصار trainbr و traincg نامیده می‌شوند از دیگر الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی می‌باشند.

توان مصرفی پمپ تابعی از هد دینامیکی، دبی، راندمان پمپ، عمق آب و افت اصطکاکی است. با توجه به تنوع متغیرهای اندازه‌گیری شده و احتمال تأثیر متفاوت هر یک بر دبی برداشت، سناریوهای مختلفی برای ترکیب متغیرهای ورودی تعریف و ارزیابی شد. ارزیابی سناریوهای مختلف ترکیب متغیرهای ورودی صورت پذیرفت. داده‌ها در قالب سناریوهای مختلف در کنار یکدیگر قرار گرفته و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. داده‌های موجود ۸ سناریو را تشکیل داده که در جدول شماره (۲) نمایش داده شده است. برای آموزش شبکه هوش مصنوعی ترکیبی از طول و عرض جغرافیایی، عمق چاه، قطر لوله آبدۀ شرایط هوادهی و توان مصرفی کنتور به عنوان لایه ورودی در نظر گرفته شد.

شایان ذکر است که چاه‌هایی که هوادهی نداشته با عدد (۱) و چاه‌هایی که هوادهی داشته‌اند با عدد (۰) معرفی گردید. دبی کالیبره شده با فلومتر به عنوان لایه خروجی به شبکه معرفی شد. شبکه به صورت پیش فرض صاحب ۲ لایه پنهان می‌باشد.

در این پژوهش، تعداد نرون‌های لایه پنهان به صورت آزمایشی در چند حالت مختلف بررسی شد. برای آموزش شبکه از الگوریتم لونیگ-مارکوارت استفاده گردید و فرآیند آموزش با معیار توقف زود هنگام (Early Stopping) مبتنی بر عدم بهبود عملکرد در مجموعه اعتبارسنجی، متوقف گردید. در نهایت، ساختاری به عنوان مدل نهایی انتخاب شد

که کمترین خطا و بیشترین ضریب تعیین را در داده‌های آزمون ارائه داد.

مختصات جغرافیایی به‌عنوان یک متغیر غیرمستقیم وارد مدل شد تا اثر تغییرات مکانی ناشی از تفاوت شرایط هیدروژئولوژیکی، عمق آب زیرزمینی و ویژگی‌های آبخوان در نقاط مختلف دشت به‌صورت ضمنی در فرآیند یادگیری شبکه لحاظ شود. بدیهی است که مختصات جغرافیایی به‌تنهایی بر دبی اثر مستقیم ندارد، بلکه نماینده تغییرات مکانی سایر ویژگی‌های محیطی است که اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها در این پژوهش امکان‌پذیر نبود.

تأثیر مختصات جغرافیایی را می‌توان به سه دلیل توجیه کرد:

- ۱- تغییرات هیدروژئولوژیکی مکانی: دشت قزوین دارای ناهمگونی‌های هیدروژئولوژیکی قابل‌توجهی است. ضخامت آبخوان، جنس رسوبات (از دانه‌درشت تا ریزدانه)، عمق سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی و سایر ویژگی‌های آبخوان در نقاط مختلف دشت متفاوت است. مختصات جغرافیایی به‌عنوان نماینده این تغییرات مکانی عمل می‌کند.

۲- ارتباط با عمق آب زیرزمینی: عمق آب زیرزمینی در نقاط مختلف دشت متفاوت است و این عامل بر هد پمپاژ (H) تأثیر مستقیم دارد. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم عمق آب زیرزمینی در زمان پمپاژ برای تمام چاه‌ها ممکن نبود، مختصات جغرافیایی به‌عنوان شاخصی برای تغییرات مکانی عمق آب زیرزمینی عمل کرده است.

۳- ثبت تغییرات بهره‌برداری: شرایط بهره‌برداری از چاه‌ها (نوع پمپ، وضعیت نگهداری، کیفیت برق و ...) در نقاط مختلف دشت ممکن است متفاوت باشد و مختصات جغرافیایی به‌طور غیرمستقیم این تغییرات را نیز منعکس می‌کند.

طراحی سناریوهای مختلف با هدف ارزیابی سهم نسبی هر یک از متغیرهای ورودی در عملکرد مدل انجام شد. به عبارت دیگر، با حذف یا اضافه شدن هر متغیر، میزان تغییر دقت پیش‌بینی بررسی گردید تا مشخص شود کدام ترکیب از اطلاعات بیشترین توانایی را در تخمین دبی دارد. این رویکرد امکان مقایسه اثر متغیرهای مختلف بر عملکرد شبکه را فراهم می‌کند.

جدول ۲- سناریوهای مختلف برای در نظر گرفتن لایه ورودی
Table 2- Different scenarios to consider for the input layer

خروجی Output	ورودی Input						سناریو Scenario
دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge(L/s)	هوادهی Aeration	طول X	عرض Y	عمق (متر) Depth(m)	قطر (اینچ) Diameter(in)	توان مصرفی (کیلو وات) Power consumption(kw)	
*					*	*	1
*				*		*	2
*				*	*	*	3
*		*	*			*	4
*		*	*		*	*	5
*		*	*	*		*	6
*		*	*	*	*	*	7
*	*	*	*	*	*	*	8

جدول (۲) هشت سناریوی مختلف را از ساده‌ترین حالت (سناریو ۱ شامل توان و قطر) تا پیچیده‌ترین حالت (سناریو ۸ شامل تمام متغیرها) برای بررسی تأثیر تدریجی افزودن هر متغیر بر عملکرد مدل نشان می‌دهد. سناریوهای ۱ تا ۳ بدون استفاده از مختصات جغرافیایی طراحی شده‌اند تا مشخص شود موقعیت مکانی به‌عنوان نماینده تغییرات هیدروژئولوژیکی چه تأثیری بر دقت مدل دارد. سناریوهای ۴ تا ۶ با ترکیب‌های مختلف توان، عمق، قطر و مختصات و

سناریوهای ۷ و ۸ با تمام متغیرهای اصلی طراحی شده‌اند که سناریوی ۸ با افزودن متغیر هوادهی، کامل‌ترین حالت ممکن را نشان می‌دهد.

تمام سناریوها شامل توان مصرفی به‌عنوان متغیر ثابت هستند، زیرا این متغیر اساس پژوهش را تشکیل می‌دهد و حذف آن امکان‌پذیر نیست. متغیر هوادهی به‌صورت دودویی (صفر و یک) کدگذاری شده است که شدت آن را نشان نمی‌دهد و این خود یک محدودیت محسوب می‌شود، اما به دلیل عدم دسترسی به داده‌های دقیق‌تر، ناگزیر از این روش استفاده شده است. از منظر کاربردی، این سناریوها به مدیران نشان می‌دهند که با حداقل اطلاعات (توان و قطر) نیز می‌توان به دقت نسبی دست یافت و در صورت عدم دسترسی به برخی داده‌ها، می‌توان از سناریوهای ساده‌تر استفاده کرد.

نتایج حاصل از آموزش شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که مدل توسعه‌یافته قادر است رابطه غیرخطی بین توان مصرفی و مشخصات فیزیکی چاه با دبی برداشت آب را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید. ارزیابی عملکرد مدل بر اساس داده‌های آزمون نشان داد که مقادیر ضریب تعیین (R^2) بیانگر توانایی قابل قبول مدل در توضیح تغییرات دبی چاه‌ها است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بین توان مصرفی، مشخصات فیزیکی چاه و میزان دبی برداشت، رابطه‌ای غیرخطی برقرار است؛ ازاین‌رو استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یک مدل غیرخطی، امکان شناسایی این روابط پیچیده را فراهم کرده است. عملکرد مناسب مدل در شاخص‌های آماری بیانگر آن است که اطلاعات ثبت‌شده توسط کنتورهای برق می‌تواند به‌عنوان یک شاخص غیرمستقیم برای برآورد دبی چاه‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع از دیدگاه مدیریت منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در بسیاری از چاه‌های بهره‌برداری، اندازه‌گیری مستقیم دبی به‌صورت مستمر امکان‌پذیر نیست. مقدار میانگین خطا (MAPE) در مجموعه آزمون نشان‌دهنده وجود اختلاف نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده است که می‌تواند ناشی از ناهمگنی شرایط بهره‌برداری در چاه‌های مختلف باشد.

علاوه بر مقایسه شاخص‌های آماری، تغییر عملکرد مدل در سناریوهای مختلف به‌عنوان یک تحلیل حساسیت غیرمستقیم مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، میزان تأثیر هر متغیر ورودی از طریق مقایسه تغییرات دقت مدل پس از حذف یا اضافه شدن آن متغیر ارزیابی شد. اگرچه در این پژوهش از روش‌های کلاسیک تحلیل حساسیت استفاده نشد، اما مقایسه سناریوها اطلاعات مناسبی درباره اهمیت نسبی متغیرهای ورودی فراهم کرد.

نتایج و بحث

در این مطالعه، داده‌های دریافتی با رویکرد ارزیابی سناریوهای مختلف ترکیب متغیرهای ورودی مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، عملکرد شبکه عصبی نسبت به تغییرات در سه مؤلفه اصلی ارزیابی شد. این مؤلفه‌ها شامل تعداد پارامترهای مستقل به‌کاررفته در فرآیند آموزش شبکه

در این مطالعه، داده‌های دریافتی با رویکرد ارزیابی سناریوهای مختلف ترکیب متغیرهای ورودی مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، عملکرد شبکه عصبی نسبت به تغییرات در سه مؤلفه اصلی ارزیابی شد. این مؤلفه‌ها شامل تعداد پارامترهای مستقل به‌کاررفته در فرآیند آموزش شبکه

جدول ۳ - نتایج ارزیابی آموزش سناریوهای مختلف برای تخمین دبی برداشتی از چاه

Table 3- Results of evaluating different training scenarios for estimating well discharge

سناریو Scenario	میانگین خطا(درصد) Average error (%)	ضریب تعیین R^2	میانگین مربعات خطا MSE
1	45/66	0/687	253/5
2	50/24	0/648	106/3
3	74/76	0/607	254/1
4	42/37	0/788	42
5	76/43	0/649	155/2
6	42/90	0/797	91/01
7	15/17	0/9443	20/35
8	12/38	0/9442	20/95

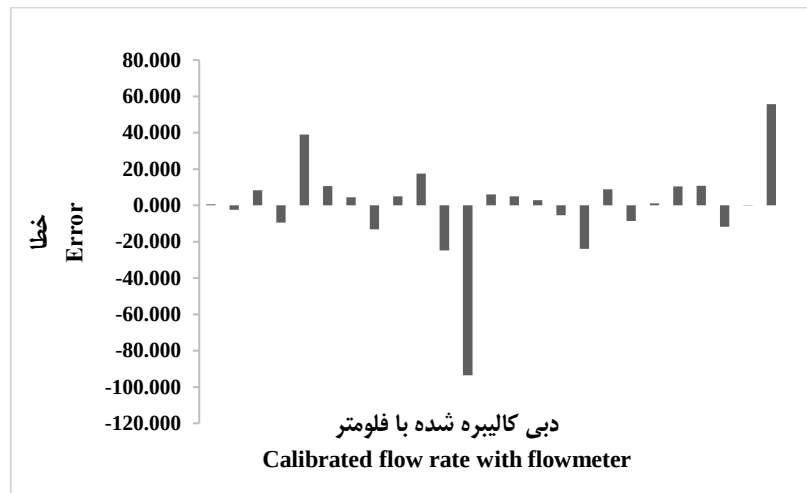
باتوجه به جدول (۳) ملاحظه می‌شود که سناریوی شماره هشت که شامل در نظر گرفتن پارامترهایی چون موقعیت چاه، عمق چاه، قطر لوله آبد، در نظر گرفتن شرایط هوادهی و توان قرائت شده از کنتور می‌باشد با میانگین خطای حدود ۱۲ درصد بهترین مدل برای تخمین دبی برداشتی از چاه‌ها می‌باشد. همچنین سناریوی شماره هفت، که در آن شرایط بهره‌برداری (هوادهی و دل زدن پمپ) لحاظ نشده است با میانگین خطای حدود ۱۵ درصد به عنوان گزینه مطلوب بعدی پیشنهاد می‌شود. سناریوی شماره هفت با ضریب تعیین برابر با ۰/۹۴۴۳ و میانگین مربعات خطای برابر با ۲۰/۳۵ عملکرد بهتری نسبت به سناریوی شماره هشت با ضریب تعیین برابر با ۰/۹۴۴۲ و میانگین مربعات خطای برابر با ۲۰/۹۵ داشت.

عملکرد نزدیک سناریوهای ۷ و ۸ نشان می‌دهد که متغیر هوادهی تأثیر قابل توجهی در بهبود دقت مدل ندارد، زیرا هوادهی یک وضعیت دودویی است که اطلاعات کمی درباره شدت آن ارائه می‌دهد و اثرات آن تا حد زیادی از طریق تغییرات توان مصرفی قابل شناسایی است.

سناریوهای ۱ تا ۶ با خطاهای بالای ۴۲ تا ۷۶ درصد عملکرد ضعیفی داشته‌اند که نشان می‌دهد ترکیب ناقص متغیرهای ورودی، به‌ویژه عدم استفاده از مختصات جغرافیایی یا حذف عمق و قطر، اطلاعات کافی برای تخمین دقیق دبی در اختیار مدل قرار نمی‌دهد. با این حال، نتایج مرحله آموزش صرفاً نشان‌دهنده توانایی مدل در یادگیری داده‌های آموزش است و نمی‌تواند تضمین‌کننده عملکرد خوب در مواجهه با داده‌های جدید باشد و عملکرد خوب سناریوی ۸ ممکن است نشانه بیش‌برازش باشد.

انتخاب بین سناریوهای ۷ و ۸ باید بر اساس سادگی و در دسترس بودن داده‌ها انجام شود و اگر متغیر هوادهی به‌سختی قابل اندازه‌گیری است، سناریوی ۷ با عملکرد مشابه و متغیرهای ساده‌تر، گزینه عملی‌تری است.

بررسی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که افزایش تعداد متغیرهای ورودی الزاماً منجر به بهبود عملکرد مدل نمی‌شود. نتایج نشان دادند که انتخاب متغیرهای مؤثر و دارای ارتباط فیزیکی با فرآیند برداشت آب، نقش مهم‌تری نسبت به افزایش تعداد ورودی‌ها دارد. به همین دلیل، سناریوی هفتم با وجود استفاده از متغیرهای کمتر نسبت به برخی سناریوها، عملکرد مناسب‌تری از نظر همزمان شاخص‌های R^2 ، MSE و MAPE ارائه کرد.



شکل ۳- توزیع خطا در آموزش سناریوی شماره ۷ برای تخمین دبی برداشتی از چاه
Fig. 3- Error distribution in the training of scenario 7 for estimating well discharge

شکل (۳) توزیع خطا در ارزیابی آموزش برای سناریوی شماره هفت را نمایش می‌دهد. بیشترین خطا برابر با ۹۳/۵۴ آن است که عملکرد مدل در شرایط معمول بهره‌برداری درصد و کم‌ترین خطا برابر با ۰/۰۹ درصد می‌باشد. پایدار بوده، اما تغییرات شدید شرایط کاری برخی چاه‌ها بررسی توزیع خطا نشان می‌دهد که بخش عمده نمونه‌ها دارای خطای نسبتاً پایین بوده و تنها تعداد محدودی

جدول ۴ - نتایج ارزیابی اعتبارسنجی سناریوهای مختلف برای تخمین دبی برداشتی از چاه

Table 4- Results of evaluating the validation of different scenarios for estimating well discharge

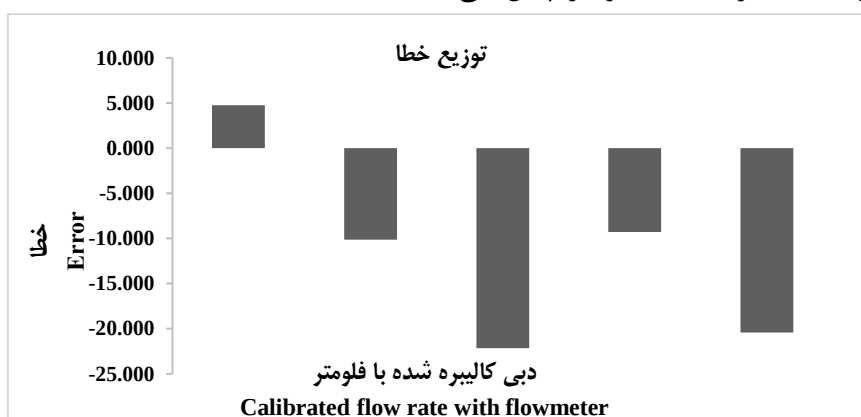
میانگین مربعات خطا MSE	ضریب تعیین R ²	میانگین خطا (درصد) Average error (%)	سناریو scenario
93/93	0/569	47/26	1
59/06	0/9	127/4	2
201/94	0/79	93/57	3
116	0/854	44/57	4
58/18	0/077	18/43	5
69/71	0/945	19/51	6
31/73	0/9589	13/34	7
43/79	0/9588	21/19	8

کاهش داده است و سناریوی ۶ با وجود ضریب تعیین بالا ۰/۹۴۵، خطای ۵۱/۱۹ درصدی نشان می‌دهد که ضریب تعیین به‌تنهایی معیار کافی برای ارزیابی مدل نیست. با وجود انتخاب تصادفی داده‌ها، ترکیب خاص چاه‌های موجود در مجموعه اعتبارسنجی می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد و سناریوی ۵ با ضریب تعیین بسیار پایین (۰/۰۷۷) نشان می‌دهد که حذف عمق چاه از ورودی‌ها، اطلاعات کافی درباره هد پمپاژ را حذف کرده و توانایی مدل را به شدت

در ارزیابی اعتبارسنجی، مطابق جدول (۴) مشاهده می‌شود که سناریوی شماره هفت با میانگین خطای حدود ۱۳ درصد، ضریب تعیین ۰/۹۵۸۹ و میانگین مربعات خطای برابر ۳۱/۷۳ بهترین مدل برای تخمین دبی برداشتی از چاه‌ها می‌باشد.

متغیرهایی متکی است که در اغلب چاه‌های کشاورزی به‌سادگی قابل اندازه‌گیری هستند و این ویژگی امکان توسعه مدل در سایر دشت‌های کشور را فراهم می‌سازد. یک نکته قابل توجه در بررسی معیارهای عملکردی سناریوهای ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. اگرچه سناریوی ۸ در مقایسه با سناریوی ۷ به ضریب تعیین بالاتری ($R^2=0/9210$) در مقابل ($0/9204$) دست یافته است، اما سناریوی ۷ همچنان میانگین خطای کمتری را نشان می‌دهد. این اختلاف ناشی از ماهیت متفاوت این دو شاخص آماری است؛ به طوری که افزایش R^2 در سناریوی ۸ نشان‌دهنده بهبود توانایی مدل در بازنمایی واریانس کلی و ردیابی نوسانات شدید (مقادیر بسیار بالا و پایین) در دبی چاه است، در حالی که میانگین خطای پایین‌تر در سناریوی ۷ بیانگر دقت بیشتر در پیش‌بینی

مقادیر نزدیک به میانگین در توزیع داده‌ها است. بنابراین، سناریوی ۸ برای شناسایی روندها مناسب‌تر و سناریوی ۷ برای دقت در مقادیر متوسط عملکرد بهتری دارد. تفاوت مشاهده‌شده میان شاخص ضریب تعیین و میانگین درصد خطا بیانگر آن است که ارزیابی عملکرد مدل نباید صرفاً بر اساس یک شاخص انجام شود. در این پژوهش انتخاب مدل نهایی بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری صورت گرفت تا علاوه بر توانایی مدل در بازنمایی تغییرات کلی داده‌ها، دقت پیش‌بینی نیز مدنظر قرار گیرد. شکل (۴) توزیع خطا در ارزیابی اعتبارسنجی برای سناریوی شماره هفت را نمایش می‌دهد. بیشترین خطا برابر با $۴/۷۶۰$ درصد می‌باشد. $۲۲/۱۴$ درصد و کم‌ترین خطا برابر با $۴/۷۶۰$ درصد می‌باشد.



شکل ۴- توزیع خطا در اعتبارسنجی سناریوی شماره هفت برای تخمین دبی برداشتی از چاه
Fig. 4- Error distribution in the validation of scenario 7 for estimating well discharge

جدول ۵ - نتایج ارزیابی آزمون سناریوهای مختلف برای تخمین دبی برداشتی از چاه

Table 5- Results of evaluating the test of different scenarios for estimating well discharge

میانگین مربعات خطا MSE	ضریب تعیین R^2	میانگین خطا (درصد) Average error (%)	سناریو scenario
360/76	0/406	43/16	1
240/88	0/4	81/91	2
100/83	0/523	24/31	3
1434/7	0/87	304/5	4
80/2	0/822	58/75	5
286/3	0/357	193/94	6
21/19	0/9204	13/96	7
56/29	0/9210	14/04	8

هستند که سبب ایجاد اختلاف میان دبی واقعی و مقدار پیش‌بینی شده می‌شوند. بنابراین بخشی از خطای مشاهده شده ناشی از شرایط واقعی بهره‌برداری بوده و لزوماً به ضعف مدل ارتباط ندارد.

نتایج عملکرد سناریوها نشان می‌دهد که سناریوهای بدون مختصات جغرافیایی (سناریوهای ۱، ۲ و ۳) با خطاهای بالای ۴۵ تا ۷۴ درصد در مرحله آموزش و ۴۳ تا ۸۱ درصد در مرحله آزمون، عملکرد ضعیفی داشته‌اند. در مقابل، سناریوهای دارای مختصات جغرافیایی (سناریوهای ۴ تا ۸) عملکرد بهتری نشان داده‌اند. این تفاوت آشکار نشان می‌دهد که مختصات جغرافیایی به‌عنوان نماینده تغییرات مکانی شرایط هیدروژئولوژیکی، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار مدل قرار داده است. به عبارت دیگر، چاه‌هایی که در نقاط مختلف دشت قرار دارند، با شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوتی مواجه هستند و مختصات جغرافیایی این تفاوت‌ها را به‌صورت ضمنی به مدل معرفی می‌کند. این موضوع به‌ویژه در دشت قزوین که دارای ناهمگونی‌های هیدروژئولوژیکی قابل توجهی است، از اهمیت بالایی برخوردار است.

نتایج عملکرد سناریوها نشان می‌دهد که تمام سناریوهای دارای توان مصرفی (همه ۸ سناریو) عملکرد بهتری نسبت به حالتی که توان مصرفی در نظر گرفته نشود (که در این پژوهش امکان‌پذیر نبود) داشته‌اند. بررسی تطبیقی سناریوها نشان می‌دهد که حذف سایر متغیرها (مانند سناریوی ۴ که بدون عمق و قطر است) با وجود حفظ توان مصرفی، باعث افزایش خطا می‌شود، اما حذف توان مصرفی اساس مدل را با مشکل مواجه می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که توان مصرفی مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیر در تخمین دبی است.

علاوه بر توان مصرفی و مختصات جغرافیایی، بررسی عملکرد سناریوها نشان می‌دهد که عمق چاه و قطر لوله نیز نقش مهمی در تخمین دبی دارند. سناریوی ۴ (شامل توان و مختصات جغرافیایی، بدون عمق و قطر) با خطای ۳۰۴/۵ درصد در مرحله آزمون، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است

مطابق جدول (۵) در بخش آزمون، سناریوی شماره هفت با میانگین خطای ۱۳/۹۶ درصد، ضریب تعیین برابر با ۰/۹۲۰۴ و میانگین مربعات خطای برابر با ۲۱/۱۹ بهترین مدل برای تخمین دبی برداشتی از چاه‌ها می‌باشد.

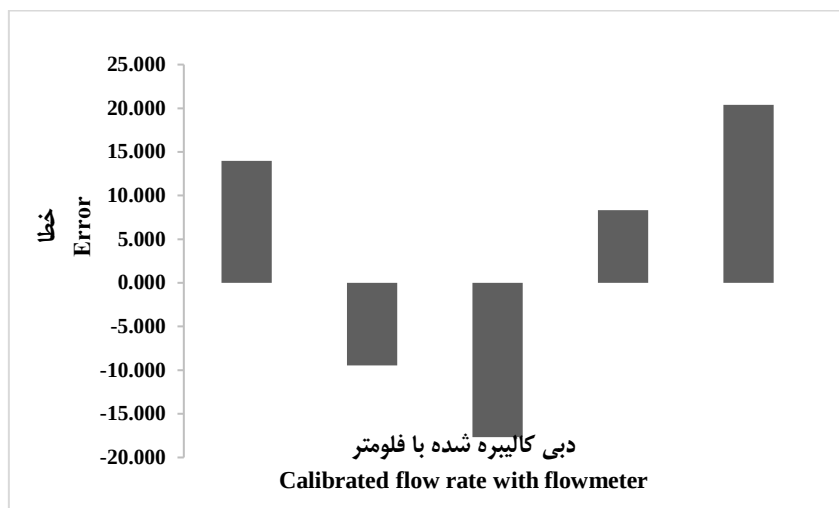
عملکرد مناسب سناریوی ۷ نشان می‌دهد که ترکیب توان مصرفی، عمق چاه، قطر لوله و موقعیت مکانی قادر است بخش عمده تغییرات دبی را تبیین کند و توان مصرفی به‌عنوان مهم‌ترین متغیر، رابطه مستقیمی با دبی دارد و سایر متغیرها به‌عنوان تعدیل‌کننده‌های این رابطه عمل می‌کنند.

سناریوی ۴ با خطای ۳۰۴/۵ درصد نشان می‌دهد که حذف عمق و قطر چاه، تأثیر بسیار منفی بر دقت مدل دارد و سناریوی ۶ با خطای ۱۹۳/۹ درصد نیز نشان می‌دهد که حذف قطر لوله و در نظر نگرفتن افت اصطکاکی، دقت پیش‌بینی را به شدت کاهش می‌دهد. سناریوی ۸ با وجود R^2 بهتر، MSE بالاتری دارد که نشان می‌دهد اگرچه این سناریو توانایی بهتری در ردیابی نوسانات کلی دارد، اما در پیش‌بینی دقیق مقادیر نزدیک به میانگین عملکرد ضعیف‌تری دارد.

با توجه به حجم بسیار محدود داده‌های آزمون (حدود ۵ چاه)، قابلیت اطمینان نتایج آزمون نیاز به تأیید با مجموعه داده‌های بزرگ‌تر دارد و وجود چاه‌های هوادهی در مجموعه آزمون می‌تواند باعث افزایش خطا در برخی نقاط شده باشد. از منظر کاربردی، سناریوی ۷ به‌عنوان مدل نهایی انتخاب می‌شود زیرا ساده‌ترین ترکیب متغیرها را دارد که در اغلب چاه‌ها قابل اندازه‌گیری است و مشکل بیش‌برازش سناریوی ۸ را ندارد و نیازی به تشخیص وضعیت هوادهی ندارد که خود یکی از چالش‌های عملیات میدانی است.

اگرچه میانگین خطای حدود ۱۴ درصد برای مجموعه آزمون نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است، اما بخشی از این خطا را می‌توان به عوامل خارج از مدل نسبت داد. تغییر راندمان پمپ‌ها در طول زمان، افت سطح آب زیرزمینی، نوسانات ولتاژ شبکه برق، تفاوت شرایط نگهداری تجهیزات و وجود هوادهی در برخی چاه‌ها از جمله عواملی

که نشان می‌دهد حذف همزمان عمق و قطر، تأثیر بسیار منفی بر دقت مدل دارد. سناریوی ۶ (شامل توان، عمق و مختصات، بدون قطر) با خطای ۵۸/۷۵ درصد نیز عملکرد ضعیفی داشته‌اند. مختصات، بدون قطر) با خطای ۱۹۳/۹ درصد و سناریوی ۵



شکل ۵- توزیع خطا در آزمون سناریوی شماره هفت برای تخمین دبی برداشتی از چاه

Fig. 5- Error distribution in the testing of scenario 7 for estimating well discharge

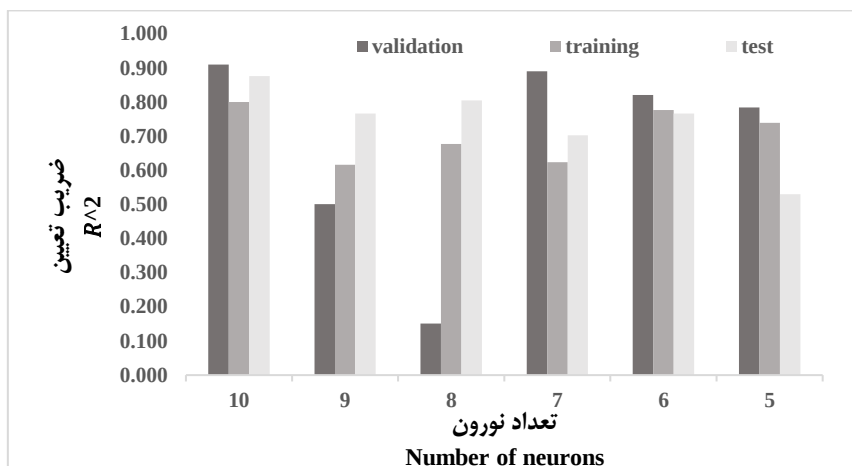
شکل (۵) توزیع خطا در ارزیابی آزمون برای سناریوی شماره هفت را نمایش می‌دهد. بیشترین خطا برابر با ۲۰/۳۹۰ درصد و کم‌ترین خطا برابر با ۸/۳۱۴ درصد

می‌باشد. بررسی توزیع خطاها نشان داد که بیشترین خطاها مربوط به چاه‌هایی است که شرایط بهره‌برداری آن‌ها با سایر چاه‌ها متفاوت بوده است. عواملی مانند تغییرات راندمان پمپ، نوسانات سطح آب زیرزمینی، وجود هوادهی و تفاوت شرایط بهره‌برداری می‌تواند موجب افزایش اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده شود. با وجود این، تمرکز عمده خطاها در محدوده قابل قبول نشان می‌دهد که مدل از پایداری مناسبی برخوردار است.

ارزیابی تعداد نورون در آموزش شبکه

در ادامه سناریوی شماره هفت انتخاب گردید. سپس شبکه عصبی مصنوعی با تعداد نورون‌های متفاوت برای سناریوی شماره هفت اجرا شد. بر اساس شکل (۶) در سه بخش آموزش، ارزیابی و آزمون سناریوی شماره هفت، شبکه عصبی با تعداد ده نورون بهترین عملکرد را از خود نشان داد. است. افزایش تعداد نورون‌ها بیش از مقدار بهینه موجب بهبود محسوسی در عملکرد مدل نشد و در برخی حالت‌ها باعث نوسان شاخص‌های ارزیابی گردید. این موضوع نشان می‌دهد که با توجه به حجم داده‌های موجود، استفاده از ساختارهای پیچیده‌تر لزوماً منجر به افزایش دقت مدل نشده و حتی می‌تواند احتمال بیش‌برازش را افزایش دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سناریوی هفتم علاوه بر دستیابی به دقت مناسب، از منظر کاربرد عملی نیز گزینه مطلوب‌تری محسوب می‌شود؛ زیرا به متغیرهایی متکی است که در اغلب چاه‌های کشاورزی به‌سادگی قابل اندازه‌گیری یا



شکل ۶- نتایج ارزیابی تعداد نورون‌های سناریوی شماره هفت برای تخمین دبی برداشتی از چاه

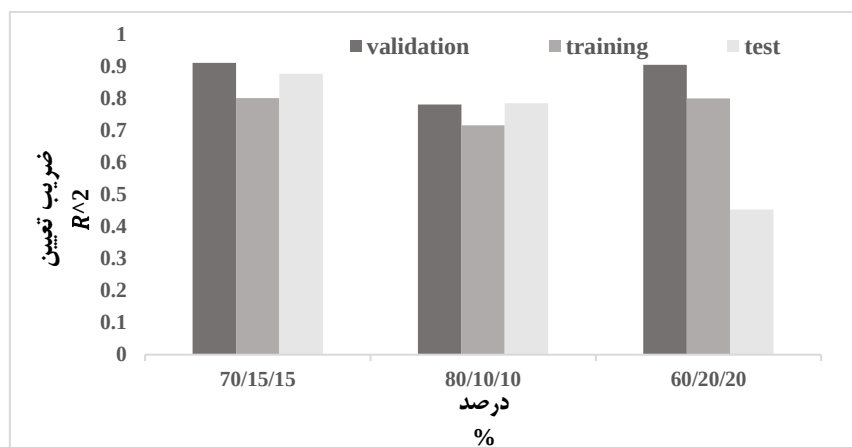
Fig. 6- Results of evaluating the number of neurons in scenario 7 for estimating well discharge

شد، در حالی که حفظ مجموعه‌های اعتبارسنجی و آزمون امکان ارزیابی مناسب قابلیت تعمیم مدل را فراهم نمود.

نتایج این پژوهش با روند کلی مطالعات انجام‌شده در حوزه کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در منابع آب همخوانی دارد و نشان می‌دهد که این روش توانایی مناسبی در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای مؤثر بر دبی چاه‌ها دارد. با این حال، هدف اصلی این پژوهش مقایسه الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین نبوده، بلکه بررسی امکان استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد غیرمستقیم دبی چاه‌های کشاورزی بر پایه اطلاعات کنترلهای برق بوده است.

ارزیابی تقسیم‌بندی آموزش، ارزیابی و آزمون شبکه

سناریوی شماره هفت با تعداد ده نورون انتخاب شد. سپس تقسیم‌بندی داده‌ها در سه قسمت آموزش، ارزیابی و آزمون موردبررسی قرار گرفت. بر اساس شکل (۷) هنگامی که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای ارزیابی و ۱۵ درصد برای آزمون در نظر گرفته شود، شبکه بهترین عملکرد ممکن را از خود نشان می‌دهد. نتایج نشان داد تقسیم‌بندی ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد تعادل مناسبی میان حجم داده‌های آموزشی و ارزیابی عملکرد مدل ایجاد می‌کند. افزایش سهم داده‌های آموزشی موجب بهبود یادگیری شبکه



شکل ۷- نتایج تقسیم‌بندی آموزش، اعتبارسنجی و آزمون سناریوی شماره هفت

Fig. 7- Results of training, validation, and testing splits for scenario 7

انجام شده است که حجم داده‌های بسیار بیشتری نسبت به پژوهش حاضر دارد، در حالی که پژوهش حاضر بر اساس داده‌های ۳۵ حلقه چاه کشاورزی با کنتور برق انجام شده است. این نکته نشان می‌دهد که با وجود حجم محدود داده‌ها در پژوهش حاضر، مدل توسعه‌یافته عملکرد قابل قبولی ارائه کرده است.

محدودیت‌های پژوهش

نتایج این پژوهش با وجود دقت مناسب مدل، تحت تأثیر برخی محدودیت‌ها قرار دارد. مهم‌ترین محدودیت، تعداد محدود چاه‌های دارای اطلاعات کامل بود که ناشی از ناقص بودن داده‌های موجود و عدم دسترسی به اطلاعات برخی چاه‌ها بود. همچنین امکان مقایسه عملکرد شبکه عصبی با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این پژوهش فراهم نشد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با استفاده از مجموعه داده‌های بزرگ‌تر، عملکرد مدل حاضر با روش‌هایی مانند Random Forest، Support Vector Machine و XGBoost مقایسه شود. علاوه بر این، استفاده از متغیرهای هیدروژئولوژیکی نظیر سطح ایستابی، هد دینامیکی و مشخصات پمپ می‌تواند موجب بهبود دقت پیش‌بینی گردد.

اگرچه در این پژوهش مقایسه مستقیم با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام نشده است، اما نتایج به‌دست‌آمده با روند کلی گزارش‌شده در مطالعات مشابه هم‌راستا است؛ به‌طوری که در بسیاری از پژوهش‌های هیدرولوژیکی، شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی مناسبی در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی از خود نشان داده‌اند.

هرچند حجم نمونه محدود است، اما داده‌های مورد استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق و با کیفیت بالا حاصل شده‌اند و نمونه‌ها بخش‌های مختلف دشت قزوین را پوشش می‌دهند. بنابراین نتایج این پژوهش را می‌توان به عنوان یک مطالعه امکان‌سنجی برای ارزیابی قابلیت استفاده از داده‌های کنتور برق در تخمین دبی چاه‌ها در نظر گرفت.

در مطالعه‌ای مشابه با پژوهش حاضر، عالم و همکاران (Alam et al., 2023) در آبخوان‌های آبرفتی با استفاده از مصرف انرژی به‌عنوان شاخص تخمین برداشت آب زیرزمینی، به ضریب تعیین $R^2 \approx 0.92$ دست یافتند که با نتایج پژوهش حاضر ($R^2 = 0.9204$) هم‌خوانی دارد. این هم‌خوانی نشان‌دهنده اعتبار رویکرد پیشنهادی در شرایط هیدروژئولوژیکی مشابه است و بیانگر آن است که رابطه بین توان مصرفی و دبی در آبخوان‌های آبرفتی از الگوی نسبتاً پایداری پیروی می‌کند.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) روش غیرمستقیم تبدیل انرژی به آب را با خطای کمتر از ۲۰ درصد در سطح چاه‌های منفرد گزارش کردند که نتایج پژوهش حاضر (خطای ۱۳/۹۶ درصد) عملکرد بهتری نسبت به این مطالعه نشان داده است. این بهبود عملکرد می‌تواند ناشی از استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به‌جای روابط تجربی ساده باشد؛ به‌طوری که مدل غیرخطی ANN توانسته است وابستگی‌های پیچیده‌تر بین توان مصرفی، مشخصات فیزیکی چاه و دبی را بهتر یاد بگیرد.

در مقایسه با مطالعات داخلی، سلیمی و همکاران (Salimi et al., 2023) با استفاده از مدل جنگل تصادفی به مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی در دشت موسیان با ۲۳۶ حلقه چاه پرداختند و به $R^2 = 0.825$ و $RMSE = 3/41$ دست یافتند. نتایج پژوهش حاضر ($R^2 = 0.9204$ و $MSE = 21/19$) عملکرد بهتری نسبت به این مطالعه داشته است که می‌تواند به دلیل استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و انتخاب مناسب متغیرهای ورودی (ترکیب توان مصرفی، عمق، قطر و مختصات) باشد.

سلامت و همکاران (Salamat et al., 2023) با استفاده از مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (SVM-PSO) به دقت پیش‌بینی ۰/۹۴۵ دست یافتند که با نتایج پژوهش حاضر ($R^2 = ۰/۹۲۰۴$) قابل مقایسه است. هرچند دقت مدل (SVM-PSO) اندکی بالاتر گزارش شده، اما این مطالعه با داده‌های ۳۵۹ چشمه (منابع آب طبیعی)

کنتورهای برق، تخمین قابل قبولی از دبی این چاه‌ها ارائه دهد و بخشی از خلأ اطلاعاتی مدیریت منابع آب را جبران کند.

ب) کاهش هزینه‌های پایش و اندازه‌گیری: روش پیشنهادی نیاز به نصب و نگهداری کنتورهای هوشمند آب (با هزینه‌های بالا) را حذف می‌کند و امکان برآورد دبی را با صرف کمترین هزینه، زمان و انرژی فراهم می‌سازد. این ویژگی به‌ویژه در مناطق با محدودیت بودجه و زیرساخت، کاربرد عملی دارد. ج) امکان ارزیابی سریع در مقیاس منطقه‌ای: با توجه به اینکه کنتورهای برق تقریباً بر روی تمام چاه‌های کشاورزی نصب هستند، این روش امکان ارزیابی کلی و نسبتاً دقیق از وضعیت مصرف آب، الگوهای بهره‌برداری و میزان برداشت از چاه‌ها را در بازه زمانی کوتاه فراهم می‌کند و می‌تواند به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در سطح حوضه آبریز کمک کند. د) پشتیبانی از مدیریت پایدار منابع آب: یافته‌های این پژوهش می‌تواند در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. با تخمین دقیق‌تر میزان برداشت، امکان برنامه‌ریزی برای تعادل بخشی آبخوان، کنترل اضافه‌برداشت و اجرای طرح‌های احیا و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی تسهیل می‌شود.

ه) قابلیت توسعه به سایر دشت‌ها: با توجه به اینکه مدل به متغیرهایی متکی است که در اغلب چاه‌های کشاورزی به‌سادگی قابل اندازه‌گیری هستند (توان مصرفی، عمق، قطر و موقعیت جغرافیایی)، این روش قابلیت توسعه به سایر دشت‌های کشور با شرایط هیدروژئولوژیکی مشابه را دارد (هرچند نیاز به کالیبراسیون محلی دارد). شباهت نتایج با مطالعات بین‌المللی نیز نشان‌دهنده پتانسیل این رویکرد برای کاربرد در سایر مناطق با شرایط مشابه است.

این پژوهش نشان داد که تلفیق داده‌های کنتور برق با شبکه عصبی مصنوعی، یک رویکرد عملی، کم‌هزینه و قابل توسعه برای تخمین دبی چاه‌های کشاورزی ارائه می‌دهد. هرچند بهبود کیفیت داده‌های ورودی و افزایش حجم نمونه‌ها می‌تواند عملکرد مدل را ارتقا دهد، نتایج حاصل

این نتایج مبنایی برای توسعه مدل با داده‌های گسترده‌تر در مطالعات آینده فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه معناداری بین توان مصرفی الکتریکی و دبی چاه‌های کشاورزی وجود دارد و شبکه عصبی مصنوعی قادر است این رابطه غیرخطی را با دقت قابل قبول مدل‌سازی کند. بررسی سناریوهای مختلف نشان داد که توان مصرفی مهم‌ترین متغیر در تخمین دبی است و پس از آن به‌ترتیب عمق چاه، قطر لوله و مختصات جغرافیایی بیشترین تأثیر را بر عملکرد مدل دارند.

متغیر هوادهی تأثیر قابل‌توجهی در بهبود دقت مدل نداشت و حذف آن (سناریوی ۷) نه تنها عملکرد را تضعیف نکرد، بلکه به دلیل جلوگیری از بیش‌برازش، قابلیت تعمیم مدل را افزایش داد. همچنین مشخص شد که مختصات جغرافیایی به‌عنوان متغیر غیرمستقیم، توانسته است تغییرات مکانی شرایط هیدروژئولوژیکی را با موفقیت نمایش دهد و در مناطقی که داده‌های هیدروژئولوژیکی در دسترس نیست، جایگزین مناسبی باشد.

تحلیل خطاهای مدل نشان داد که عوامل خارج از مدل مانند تغییرات راندمان پمپ، نوسانات سطح آب زیرزمینی و شرایط متفاوت بهره‌برداری، سهم قابل‌توجهی در ایجاد خطاهای پیش‌بینی دارند و بخشی از این خطاها لزوماً ناشی از ضعف مدل نیست.

یافته‌های علمی این پژوهش، علاوه بر توسعه دانش نظری در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در تخمین دبی چاه‌ها، دارای پیامدهای عملی و اجرایی مهمی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی است. در ادامه، مهم‌ترین کاربردهای این رویکرد در سطح منطقه‌ای و ملی تبیین می‌شود:

الف) پایش برداشت آب در چاه‌های فاقد کنتور هوشمند: بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای قزوین (۱۴۰۳)، حدود ۳۲ درصد از چاه‌های دارای پروانه بهره‌برداری فاقد کنتور هوشمند آب هستند. روش پیشنهادی می‌تواند بدون نیاز به نصب تجهیزات جدید، با استفاده از داده‌های موجود

به‌ترتیب بر عهده م. بی‌جن‌خان و ه. رضانی و نیز ز. رحیمی آتانی بود. بررسی‌های میدانی و جمع‌آوری اطلاعات توسط ز. رحیمی آتانی، م. قلی‌زاده، س. کوهی و س. فکوری انجام شد و تأمین منابع مورد نیاز بر عهده ز. رحیمی آتانی بود. مدیریت و سازماندهی داده‌ها توسط م. بی‌جن‌خان، ه. رضانی، م. قلی‌زاده، س. کوهی و س. فکوری صورت گرفت. ز. رحیمی آتانی مسئولیت نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله را بر عهده داشت و بازبینی، ویرایش و اصلاح نهایی متن توسط م. بی‌جن‌خان انجام شد. تهیه تصاویر و نمودارها توسط ز. رحیمی آتانی صورت پذیرفت. نظارت علمی بر تمامی مراحل پژوهش بر عهده م. بی‌جن‌خان و ه. رضانی بود و مدیریت اجرایی پروژه توسط م. بی‌جن‌خان انجام شد. همگی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از شرکت آب منطقه‌ای قزوین به‌خاطر فراهم کردن دسترسی به داده‌های چاه‌ها و تسهیل اندازه‌گیری‌های میدانی ابراز می‌دارند. این پژوهش توسط دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) در قزوین، ایران، پشتیبانی شده است. نویسندگان همچنین از همکاری کشاورزان محلی و مالکان چاه‌های کشاورزی که در این مطالعه مشارکت داشتند، تشکر می‌کنند. این پژوهش هیچ گونه کمک مالی مشخصی از هیچ نهاد تأمین‌کننده مالی در بخش‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

بیانگر ظرفیت مناسب این رویکرد برای کاربرد در مدیریت و پایش منابع آب زیرزمینی است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، عملکرد این مدل با الگوریتم‌های نوین یادگیری ماشین مقایسه شده و با استفاده از داده‌های بزرگ‌تر، متغیرهای هیدروژئولوژیکی تکمیلی و روش‌های اعتبارسنجی متقابل، دقت و قابلیت تعمیم مدل افزایش یابد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان در بخش نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچگونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید و تحلیل‌شده در این مطالعه به دلیل محدودیت‌های موجود به‌صورت عمومی در دسترس نیست اما با درخواست معقول از نویسنده مسئول قابل ارائه است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌پردازی و طراحی کلی پژوهش توسط ز. رحیمی آتانی، م. بی‌جن‌خان و ه. رضانی انجام گرفت. روش‌شناسی تحقیق و پیاده‌سازی نرم‌افزاری توسط ز. رحیمی آتانی و ه. مازندرانی‌زاده صورت پذیرفت. اعتبارسنجی نتایج و تحلیل‌های رسمی داده‌ها

منابع

- Alam, M. F., Pavelic, P., Sikka, A., Krishnan, S., Dodiya, M., Bhadaliya, P. & Joshi, V. (2023). Energy consumption as a proxy to estimate groundwater abstraction in irrigation. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 101035.
<https://doi.org/10/1016/j.gsd.2023/101035>
- Alemohammad, S. H. & Gharari, S. (2017). Qanat: An ancient invention for water management in Iran. In *Proceedings of Water History Conference*. Delft, The Netherlands.
- Al-Suraifi, J. A. R., Najarch, S., Rabieifar, H. & Najarch, M. (2024). Prediction of fluctuations in the groundwater level of Sonqor Plain using machine learning methods (in Persian). *Translating Advanced Technologies into Water Efficiency*, 4(1), 99–118.
- Barmezziyar, R. (2015). Design of a web-based remote reading system for mechanical volumetric meters powered by renewable energy (in Persian). [Unpublished/University thesis].
- Ben Mariem, S., Kanzari, S., Zghibi, A., Mouelhi, S., Bahrouni, H. & Ben Abdallah, M. A. (2024). Spatiotemporal monitoring of groundwater supply and active energy for irrigation practice in semi-arid regions of Tunisia with machine learning. *Water Practice & Technology*, IWA Publishing.
<https://doi.org/10/2166/wpt.2024.XXX>

- Burkov, A. (2019). The Hundred-Page Machine Learning Book (F. Lak & M. Amirhoseini, Eds.; First Edition). Qazvin: Academic Jihad Publications.
- Dashti, Z., Nakhaei, M., Vadiati, M. & Kisi, O. (2023). Estimation of unconfined aquifer transmissivity using a comparative study of machine learning models (in Persian). *Water Resources Management*.
<https://doi.org/10/1007/s11269-023-035XX-X>
- Dehghanian, S. (2016). Measurement of water flow rate in pipes and pressurized irrigation systems (Technical Publication No. 37). Tehran: Technical Publication.
- Eidi, A., Kazemiyeh, F. & Zarifian, S. (2021). Investigation of factors affecting farmers' attitude toward sustainable management of agricultural water resources (Case study: Wheat farmers in Maragheh County) (in Persian). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 29(2), 45–62.
- Eslaminejad, S. A., Eftekhari, M., Akbari, M., Hagielyasi, A. & Farhadiyan, H. (2021). Predicting flood prone areas using advanced machine learning models (Birjand Plain) (in Persian). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 885–904.
- Eslaminejad, S. A., Eftekhari, M., Akbari, M. & Hagielyasi, A. (2020). Determining groundwater potential using crowd-sourced machine learning models in a GIS context (Case study: Birjand Plain) (in Persian). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(16), 149–163.
- Faghihkhorsani, A. & Qafari, Q. (2022). Reflections on the ecological modernization process through the use of smart meters in Iran's groundwater distribution sector (in Persian). *Journal of Community Development*, 14(1), 255–276.
- Gobadpoor, R. & Eskandari, F. (2018). Farmers' satisfaction with installing smart meters on underground water wells (Case study: Mahidasht village, Kermanshah Province) (in Persian). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 32(1), 43–55.
<https://doi.org/10/22067/jead2.v32i1/66512>
- Havangi, M. & Khozehmehnezhad, H. (2023). Evaluation of the implementation of the restoration and resilience plan of groundwater resources with an emphasis on the installation of smart meters (Case study: Boshroyeh Plain, South Khorasan) (in Persian). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(2), 161–171.
<https://doi.org/10/22069/jwsc.2023/21147/3631>
- Hosseinejad Ariani, M. & Ghayeni, M. (2019). A new algorithm for controlling the consumption level of distribution customer with smart meter and calculating the participation reward (in Persian). *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, 49(3), 1034–1044.
- Imanzad Tappeh, M. & Molaei, M. (2022). Evaluating factors affecting the satisfaction of installing smart flowmeters on groundwater wells in Urmia Lake Basin (in Persian). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 51(3), 340–355.
- Jafari, A., Kiyani, R., Rezayi, S. & Qarabeygli, F. (2020). Criteria for selection and utilization of water measurement equipment in irrigation and drainage networks (Regulation No. 833). Tehran: Ministry of Energy.
- Jafarimiyanayi, S. et al. (n.d.). Challenges and problems of calibrating smart water and electricity meters in electrified agricultural wells (in Persian). *Journal of Water and Sustainable Development* (in press).
- Kalantari, M., Albourzi Gahroei, S. R., Dehkurdi Lotfizadeh, E. & Kasraei, A. R. (2021). Investigating the effectiveness of using smart meters on the water crisis caused by the outbreak of coronavirus (in Persian). Allameh Tabataba'i University Press, 10(37), 185–214.
- Khodadadi Benis, M., Ramezani, H. & Nouri, Y. (2022). Assessment of the groundwater rehabilitation and balancing with emphasis on smart meters in Shahriar Plain (in Persian). *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(3), 49–56.
<https://doi.org/10/22067/jwsd.v9i3.XXXX>
- Maghamimoghim, G. H. & Taghipour, A. (2020). Investigating the positive effects of humans on changes in the level of underground water in Safi Abad Plain, Esfaryen City (in Persian). *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(40), 210–228.
- Mahdavi, M. (2005). *Applied Hydrology* (Vol. 2). Tehran: Tehran University Press.

- Makhlouf, A., El-Rawy, M., Kanae, S., Ibrahim, M. G. & Sharaan, M. (2024). Integrating MODFLOW and machine learning for detecting optimum groundwater abstraction considering sustainable drawdown and climate changes. *Journal of Hydrology*, 637, 131428.
<https://doi.org/10/1016/j.jhydrol.2024/131428>
- Mohammadzadeh, H. & Torshiri, M. (2025). Investigating the effect of smart meter installation on water level fluctuations and energy consumption of agricultural wells in Roshtkhar Plain (in Persian). *Journal of Water and Sustainable Development*, 12(2), 143–158.
<https://doi.org/10/22067/jwsd.v12i2/2409-1364>
- Niroomandfard, F., Khazimehnejad, H. & Khashei, A. (2020). Investigating management and hydrogeological criteria on water level changes in Dasht Sarayan underground water (in Persian). *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 10(40), 210–228.
- Pakizeh Rouh, S., Sharifzadeh, M. & Eslami, A. (2023). Investigation of factors affecting farmers' participation in the aquifer balance plan of Sarvestan Plain: A case study of Kohanjan (in Persian). *Journal of Water Management in Agriculture*, 10(2), 55–77.
- Patra, S. R., Chu, H. J. & Aman, M. A. (2024). Utilizing deep learning to investigate the impacts of climate change on groundwater dynamics and pumping variability. *Science of the Total Environment*, 957, 177784.
<https://doi.org/10/1016/j.scitotenv.2024/177784>
- Salamat, A., Ardastani, M. & Malrkmohammadi, B. (2023). Modeling the potential of groundwater resources using machine learning models (in Persian). *Research on Watershed Management*, 36(4), 114–132.
- Salimi, N., Faramarzi, M., Tavakoli, M. & Fathizad, H. (2023). Using machine learning algorithms for modeling groundwater resources in arid rangeland western (in Persian). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 10(3), 163–182.
- Shahrokhnia, M. A., Eslami, A. & Jokar, A. (2022). Evaluation of applied water in the farms and gardens equipped with the smart water meters in Arsenjan Plain, Fars Province (in Persian). *Water Resources Engineering Journal*, 15(53), 13–28.
- Varmazyari, H., Kordalivand, S. & Keshavarz, M. (2023). Evaluation of the smart plan of agricultural water wells in Darab City with a hydraulic-social approach (in Persian). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(4), 671–684.
<https://doi.org/10/22092/ijid.2023.XXXX>
- Wang, L., Kinzelbach, W., Yao, H., Steiner, J. & Wang, H. (2020). How to meter agricultural pumping at numerous small-scale wells?—An indirect monitoring method using electric energy as proxy. *Water*, 12(9), 2477.
<https://doi.org/10/3390/w12092477>
- Yazdanpanah, M., Zobeydi, T. & Romina, F. (2019). Factors influencing the drilling of unauthorized agricultural wells in Dashtestan City (in Persian). *Journal of Agricultural Economics Research*, 1(27), 203–222.