Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 45-58

10.22077/jaaq.2025.8597.1086

Evaluation of The Accuracy of Fuzzy Neural Network in Estimating The Discharge of Qanats in Birjand City

Amir Khayat[1]✉ | Zahra Akhondi [2] | Hossein Khozeymehnezhad[3]

1. PhD student of Irrigation and Drainage, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Master of Science in Hydraulic Structures, University of Zabol, Zabol, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: Amir.khayat@birjand.ac.ir

Received:
18 November 2024

Accepted:
07 December 2024

Published:
20 December 2024

Keywords:

Qanats,
Water Resources Management,
Fuzzy Neural Network,
Birjand City.

Extended abstract

Introduction

This paper examines the application of the Adaptive Neural Fuzzy Networks (ANFIS) model in predicting the flow of Qanats in Birjand County, one of the arid and semi-arid regions of Iran. Qanats, as a traditional and vital source of water supply in these areas, are affected by several factors, including climate change, excessive groundwater extraction, and reduced rainfall. This has increased the need for accurate and efficient methods to predict their flow. Introduction:

Research Objectives

The main objective of this research is to evaluate the accuracy of the ANFIS model in estimating the monthly flow of Qanats in Brijand County and to determine its ability to predict flow fluctuations based on climatic and hydrological data. Based on the results obtained, the aim is to provide solutions for sustainable management of water resources.

Materials and Methods

Study Area: Birjand County, located in South Khorasan Province, focuses on the Birjand watershed, which has 1875 qanat streams.

Cite this article: Khayat, A., Akhondi, Z. & Khozeymehnezhad, H. (2024). Evaluation of the accuracy of fuzzy neural network in estimating the discharge of qanats in Birjand city, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 45-58. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2025.8597.1086

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Data

Monthly data on precipitation, evaporation, temperature (maximum, minimum, and average), humidity (minimum), and qanat discharge were collected from 2011 to 2021 (120 months of data). Data Preprocessing: The gamma test was used to select input variables with the greatest impact on qanat discharge and to remove outliers.

ANFIS Model: This model was selected due to its ability to model nonlinear and complex systems. The model was optimized using 70% data for training and 30% for evaluation, with the Fuzzy C-Means algorithm and trial and error method.

Evaluation criteria: Correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) were used to measure the accuracy of the model.

Results

The results of the study show that the ANFIS model can predict the discharge of Qanats with high accuracy. The results obtained are:

Table 1- Performance of the adaptive Fuzzy Neural Network in Predicting the Discharge of Qanats

RMSE	R^2	NS	Modeling stage
0.43	0.93	0.92	Training
0.049	0.98	0.97	Test

These results indicate that the model performs very well in predicting the discharge of Qanats according to the evaluation criteria. Also, the graphs show that the model can accurately predict the changes in discharge during different months of the year.

Discussion

Comparison of the results with similar studies shows that the ANFIS model performs better in predicting the discharge of Qanats compared to other models. This high accuracy is due to the model's ability to learn complex and nonlinear patterns in the data and the use of an appropriate optimization method. The results show that the decrease in qanat flow is significant in the dry months of the year, which indicates the need for greater attention to water resources management during this period.

Suggestions

Based on the results of this study, the following are suggested:

Further studies: Conduct further studies using long-term and diverse data to increase the accuracy of the model and examine the impact of various factors on qanat flow.

Sustainable water resources management: Implementing management plans to reduce excessive abstraction and optimize water consumption, especially in the dry months.

Qanat restoration and repair: Investing in the restoration and repair of worn-out qanats and using modern technologies to improve their performance.

Use of monitoring systems: Use of accurate monitoring and measurement systems of qanat discharge to collect more accurate and up-to-date data for better modeling.

Conclusion

This study showed that the ANFIS model is a powerful tool for predicting qanat discharge in arid and semi-arid regions and can help water resource managers in planning and decision-making related to sustainable water resource management. Considering the importance of qanats in providing agricultural water and people's livelihoods, the use of these methods can play an important role in preserving and restoring these water resources.

مقاله پژوهشی

مجله
آبخوان و قنات

دوره پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۵۸-۴۵

10.22077/jaaq.2025.8597.1086

ارزیابی دقت شبکه عصبی فازی در تخمین دبی قنات‌های شهرستان بیرجند

امیر خیاط [۱] ✉| زهرا آخوندی [۲] | حسین خزیمه‌نژاد [۲]

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. دانش آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

✉نویسنده مسئول: Amir.khayat@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه‌ها:
قنات،
مدیریت منابع آب،
شبکه عصبی فازی،
شهرستان بیرجند.

چکیده

کاهش نزولات جوی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی، منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی و کاهش دبی قنات‌ها شده است. با توجه به اینکه شهرستان بیرجند با داشتن بیش از ۱۸۷۵ رشته قنات و تخلیه ۲۳ میلیون مترمکعب در سال، بیشترین تعداد قنات‌ها را در سطح استان دارد و بیش از ۹۰ درصد آب مصرفی در این شهرستان از طریق قنات‌ها تأمین می‌شود، پیش‌بینی دقیق دبی آن‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است. در این پژوهش، از شبکه عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی استفاده شده است. این مدل قادر است روابط پیچیده بین متغیرهای ورودی (مانند بارندگی، تبخیر، سطح آب زیرزمینی) و خروجی (دبی قنات) را شناسایی کرده و پیش‌بینی دقیقی از دبی آینده ارائه دهد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مدل ANFIS با ضریب همبستگی ۰/۹۸، ضریب نش - ساتکلیف ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۹، در مقایسه با سایر مدل‌ها با دقت بسیار بالایی قادر به پیش‌بینی دبی قنات‌ها است و می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

مقدمه

تأمین آب یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های امروزه در بسیاری از کشورهای جهان به‌خصوص کشورهای خاورمیانه در راستای تداوم توسعه پایدار می‌باشد و به عنوان یکی از با ارزش‌ترین منابع طبیعی و مهم‌ترین مسئله و چالش در قرن حاضر می‌باشد .آب‌های زیرزمینی یکی از منابع عمده آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند، که نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی دارند (Emamgholizadeh et al., 2014). محدودیت منابع آب‌های سطحی، افزایش تقاضای مصرف آب همزمان با توسعه صنعتی و اقتصادی جوامع و افزایش کشاورزی، آب‌های زیرزمینی را به یک منبع طبیعی ارزشمند در جهت تأمین نیازهای مربوطه تبدیل کرده است. از طرفی استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی به یک مسئله جدی جهانی خصوصاً در کشورهای در حال توسعه تبدیل گردیده است (Konikow & Kendy, 2005).

باتوجه‌به شرایط بارندگی در کشور، وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی و همچنین شرایط و انرژی مصرفی لازم برای برداشت آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها، ترجیح داده می‌شود تا برای این منظور از قنات و تنها از طریق نیروی ثقل استفاده شود. قنات یا کاریز یکی از پیچیده‌ترین و شگفت‌انگیزترین ابتکارات ایرانیان جهت مبارزه با کمبود آب و تأمین آب کشاورزی خصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. قنات‌ها به‌عنوان سرمایه‌های ملی، نقش و اهمیت به سزایی در توسعه‌بخش کشاورزی می‌توانند ایفا کنند. احداث قنات و بهره‌برداری از آن‌ها یکی از روش‌های باستانی تأمین آب در ایران است. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از طریق بهره‌برداری بی‌رویه از چاه‌ها همراه با افزایش تعداد چاه‌ها و عدم تغذیه طبیعی به‌دلایل مختلف به‌خصوص تغییر کاربری اراضی، نحوه بهره‌برداری از اراضی و آب و هوا، منجر به کاهش آبدهی و یا خشک‌شدن قنات‌ها شده است.

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و به خصوص قنات‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مطالعات این منابع آبی می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌سازی در برداشت بهینه و پایدار از این منابع آبی در درازمدت داشته باشد (Mohtasham et al., 2017). یکی از ملزومات دستیابی به یک برنامه پایدار در زمینه مدیریت منابع آب، مدل‌سازی و آگاهی از طرز رفتار سطح ایستابی آب زیرزمینی خصوصاً برای فصول خشک، است. امروزه کنترل و مدیریت در سفره‌های آب زیرزمینی به ابزاری مدیریتی برای بهره‌وری آب تبدیل شده است. تخمین تراز سطح ایستابی از مسائل مهم و اساسی است که در برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان به‌ویژه در مواردی که از راهکارهای کم‌آبیاری بهره برده می‌شود، دارای اهمیت فراوانی است (Rakhshandehroo et al., 2018). بدین‌منظور برای آگاهی از وضعیت منابع آب زیرزمینی، لازم است پیش‌بینی دقیقی از نوسانات سطح آب زیرزمینی انجام شود. با پیش‌بینی دقیق نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌توان از آن در برنامه‌ریزی تأمین آب قابل اعتماد و نیز در مدیریت منابع آب استفاده نمود.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از نقطه نظرهای مختلف، یافتن روشی مناسب برای انجام آن حائز اهمیت می‌باشد. ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی و پیش‌بینی آن با توجه به وجود پارامترهای متنوع، یک مسئله غیرخطی و پیچیده است (Daliakopoulos et al., 2005). در این میان مدل‌های هوشمند، نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی بدون در نظر گرفتن فیزیک مسئله و تنها براساس آموزش، قادر به مدل‌سازی رفتار دینامیک یک فرآیند غیرخطی بوده و قادر هستند روابط پیچیده حاکم بر چنین فرآیندهایی را مدل‌سازی نمایند (Khashei et al., 2013; Nikmanesh, 2011).

با معرفی مجموعه‌های فازی و منطق فازی، موضوع استفاده از شبکه‌های عصبی فازی مطرح گردید. شبکه‌های عصبی فازی از ترکیب سیستم‌های فازی که مبتنی بر قواعد منطقی‌اند و شبکه‌های عصبی مصنوعی که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند؛ ایجاد می‌گردد و قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی داده‌ها داشته و در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی از سرعت پردازش و توانایی بالایی در یادگیری برخوردار می‌باشند. در مسائل مربوط به مهندسی آب، نظیر جریان آب‌های زیرزمینی به طور گسترده‌ای عدم قطعیت پارامترها مطرح است (Koorehpazan Dezfouli, 2015) و بنابراین، بسط مدلی مبتنی بر شبکه‌های عصبی فازی به عنوان ابزاری کارآمد در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار منابع آب زیرزمینی محسوب می‌گردد. مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی

با استفاده از روش‌های هوشمند توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است.

میرعربی و نخعی به بررسی دقت سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات پیزومتری در دشت بیرجند پرداختند و نتیجه گرفتند که با وارد کردن میزان بارندگی و برداشت با تأخیر زمانی دو ماهه دقت شبکه افزایش می‌یابد. آنها از برداشت و بارندگی کل دشت، به‌عنوان ورودی مدل استفاده کردند درحالی‌که میزان بارندگی و تخلیه در قسمت‌های مختلف دشت با هم متفاوت است و تأثیر به سزایی بر نوسانات سطح آب دارد (Mirarabi & Nakhaei, 2009). در ارزیابی توانایی شبکه‌های مختلف عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان محدوده سعادت‌شهر فارس، نتایج نشان داد که از نظر توانایی شبکه‌های مختلف مورد استفاده، شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشرو با الگوریتم لونبرگ- مارکوارت[1] بهترین نتایج را ارائه می‌دهند (Nikmanesh & Rakhshandehroo, 2010).

سلامتیان و همکاران، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت قم را با استفاده از مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی انجام دادند. تعداد ۹ چاه مشاهده‌ای در محدوده دشت قم انتخاب کردند. در این مدل‌سازی، الگوها و ترکیبات متفاوتی از داده‌های ورودی، شامل سطح آب‌های زیرزمینی، تخلیه از چاه‌ها و بارندگی در ۱۲ ماه قبل استفاده شدند و خروجی مدل، سطح آب زیرزمینی در ماه فعلی انتخاب شد. نتایج نشان داد این مدل، با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۲۶ از دقت مناسبی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه برخوردار می‌باشد (Salamatian et al., 2023). تراهی و درافشان، پیش بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای دشت جهرم انجام داده و نتیجه گرفتند که شبکه پرسپترون چند لایه[2] (MLP) با تعداد ۵ نرون در لایه اول و ۵ نرون در لایه میانی، سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌نماید (Tarahi & Darafshan, 2018).

در مورد توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در سازند سخت در منطقه اوریسا[3] در هندوستان تحقیقی انجام شد. آن‌ها انواع شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی را مورد آزمون قراردادند. نتایج حاصله حاکی از دقت بالای شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا در تراز آب زیرزمینی در این سازندها بود (Sethi et al., 2010). در تحقیقی دیگر از روش نرو فازی برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه رودخانه آماراواتی[4] در جنوب هند استفاده کردند. مدل به کار رفته توانست سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Umamaheswari & Kalamani, 2014). نورانی و همکاران، به ارزیابی توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی سطح ایستایی آب زیرزمینی آبخوان چند لایه تبریز پرداختند. در آن مطالعه از ساختارهای مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان استفاده شد. آنها یک مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند که می‌توانست تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی ماهیانه در چاه مشاهده‌ای را با دقت قابل قبول پیش‌بینی نماید (Nourani et al., 2006).

در مطالعه‌ای با هدف پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، ۷ ساختار مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از داده‌های ماهانه باران، دما، جریانات سطحی و سطح سفره آب زیرزمینی به مدت ۱۵ سال برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. آنها توانستند با استفاده از مدل تهیه شده سطح ایستابی این آبخوان آبرفتی که بین ۵ تا ۴۵ متر بوده است را پیش‌بینی نمایند (Daliakopoulos et al., 2005). کورتولوس و رازاک با استفاده از مدل‌های فازی و عصبی به بررسی ارتباط بین بارندگی، سطح آب و میزان دبی استحصالی در روزهای قبل با میزان دبی خروجی از آبخوان‌های کارستی در فرانسه پرداختند (Kurtulus & Razack, 2010).

[1] Levenberg Marquardt algorithm
[2] Multi Layer Perceptron
[3] Orissa
[4] Amaravati River

تحقیقات مشابه زیادی جهت پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام پذیرفته است. در این زمینه، می‌توان به تحقیقات (Adhikary et al., 2012; Habibi et al., 2016; Mohtasham et al., 2017; Chitsazan et al., 2015; Yang et al., 1997; Adamowski & Chan, 2011; Hamed et al., 2015) نمود که همگی آن‌ها در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفتند.

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی تراز آب به کار گرفته شده‌اند. در مقابل، مدل‌های عصبی فازی که ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی هستند، علی‌رغم پتانسیل بالای خود در سیستم‌های خبره، کمتر در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه قنات‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

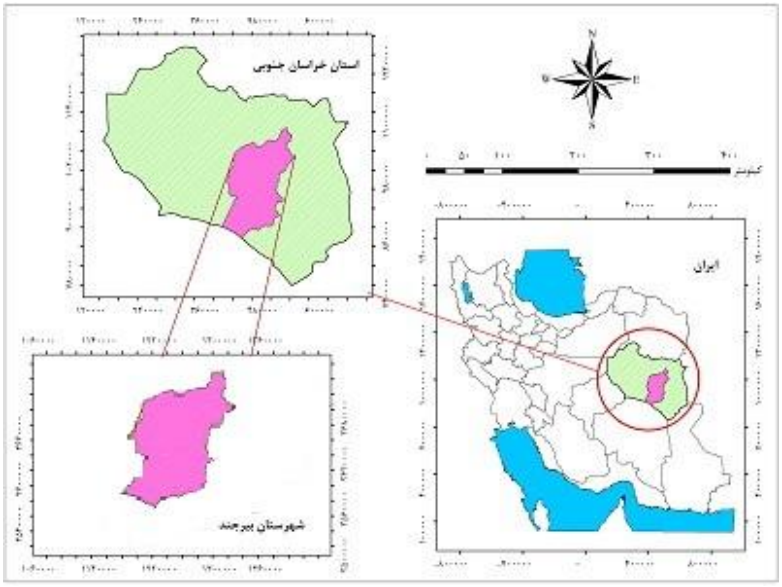
با توجه به اینکه استان خراسان جنوبی با دارا بودن حدود ۶۹۸۳ رشته از قنات‌های ایران، یکی از غنی‌ترین استان‌ها در این زمینه است و همچنین با توجه به نقش حیاتی این منابع آبی در تأمین آب کشاورزی و سهم قابل توجه آن‌ها در تولید، کمبود مطالعات جامع در خصوص مدل‌سازی دبی قنات‌ها به چشم می‌خورد و ضرورت توسعه ابزارهای پیش‌بینی دقیق دبی قنات‌ها بیش از پیش احساس می‌شود.

در این پژوهش، مدل استنتاج تطبیقی عصبی فازی به عنوان یک روش نوین برای پیش‌بینی دبی ماهیانه قنات‌های شهرستان بیرجند مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب این مدل به دلیل مزایایی همچون نیاز به داده‌های ورودی اندک، سرعت بالای پردازش و توانایی بالا در یادگیری و طبقه‌بندی داده‌ها بوده است. انتظار می‌رود که استفاده از این مدل بتواند گامی مؤثر در جهت مدیریت بهینه و پایدار منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه قنات‌ها، بردارد.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیرجند دارای وسعت ۳۱۵۵ کیلومترمربع بوده، که ۱۸۴۵ کیلومترمربع دشت و بقیه مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. این دشت از شرق به ارتفاعات مؤمن‌آباد و سیستان، از جنوب به کوه‌های باقران و کوه رچ، از شمال به ارتفاعات شاه ناصر و اسفدن و از غرب به ارتفاعات چنگ‌در و گرونگ محدود می‌گردد. دشت بیرجند، طبق طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی مرتفع‌ترین نقطه آن مربوط به ارتفاعات شمالی منطقه بند دره با ارتفاع ۲۷۸۷ متر و پست‌ترین نقطه آن در خروجی دشت در روستای فدشک با ارتفاع ۱۱۸۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد، که موقعیت مکانی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

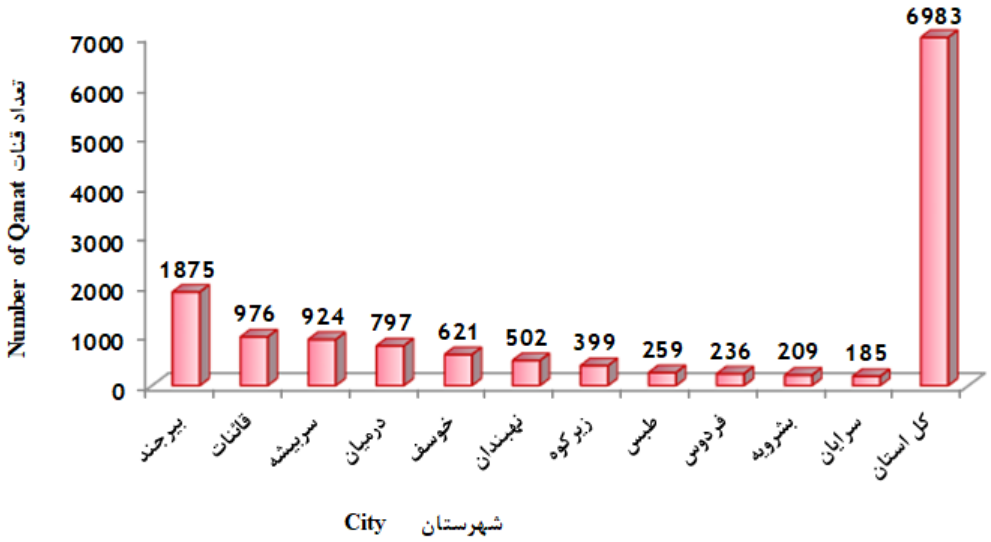


شکل ۱- موقعیت مکانی استان خراسان جنوبی و شهرستان بیرجند

Fig 1- Location of South Khorasan province and Birjand City

منابع آبی شهرستان بیرجند

استان خراسان جنوبی با داشتن بیش از ۶۹۸۳ رشته قنات، اولین استان در سطح کشور از لحاظ تعداد قنات‌ها می‌باشد و در این میان شهرستان بیرجند دارای بیشترین تعداد قنات در سطح شهرستان‌های استان است. شکل (۲) تعداد قنات‌های شهرستان‌های استان خراسان جنوبی را نشان می‌دهد.

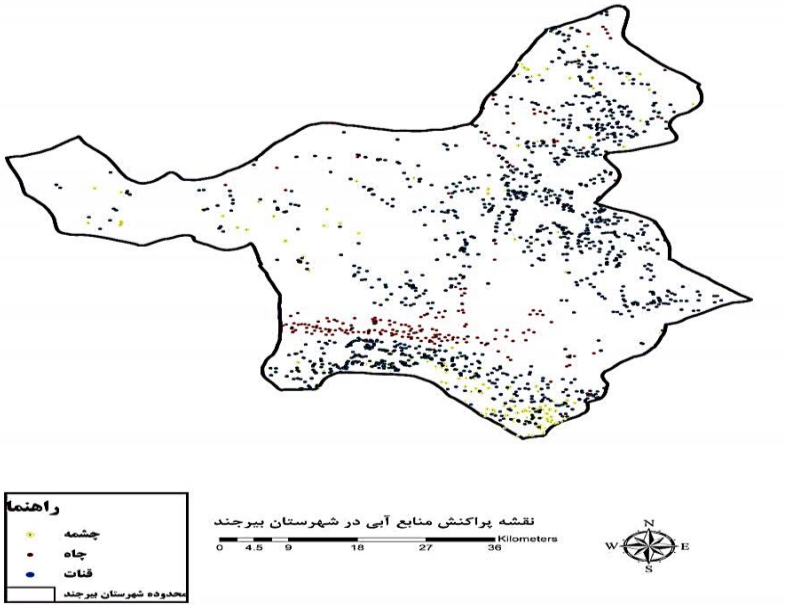


شکل ۲- تعداد قنات‌های استان خراسان جنوبی به تفکیک شهرستان (گزارش سیمای منابع آب استان،۱۴۰۳)

Fig 2- Number of Qanats in South Khorasan Province by County (Report on the State of Water Resources in South Khorasan Province, 2024)

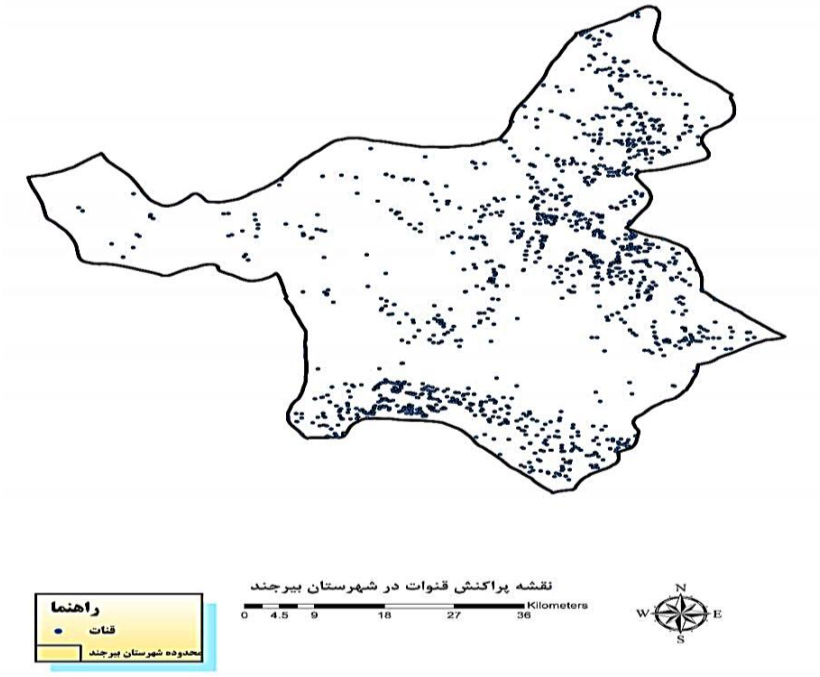
طبق گزارش سیمای منابع آب استان خراسان جنوبی در سال ۱۴۰۳ از نظر منابع آبی، شهرستان بیرجند دارای ۱۸۷۵ رشته قنات، ۲۸۳ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق و ۹۲۲ رشته چشمه با تخلیه‌ای بالغ بر ۷۰/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (Regional Water Company, 2024). شکل (۳) پراکنش منابع آبی شهرستان بیرجند را نشان می‌دهد. استحصال آب زیرزمینی در استان خراسان جنوبی عمدتاً از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و سپس قنات‌ها و چشمه‌ها صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که، از مجموع تخلیه سالیانه کل این محدوده، حدود ۷۵ درصد متعلق به چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و ۲۵ درصد مربوط به قنات‌ها بوده است.

عمده آب زیرزمینی استحصال شده توسط قنات‌ها جهت مصارف کشاورزی بوده که در مجموع تعداد ۱۸۷۵ رشته قنات با مجموع تخلیه سالیانه ۲۳/۳۹ میلیون مترمکعب در سال در شهرستان بیرجند وجود دارد که قسمت اعظم آن در آبرفت‌های میان ارتفاعات قرار دارد. از نظر آبدهی تنها ۱۹ رشته قنات که حدود ۱ درصد از مجموع قنات‌ها را شامل می‌شود آبدهی بالای ۱۰ لیتر بر ثانیه داشته و بیش از ۸۵ درصد مابقی قنات‌ها آبدهی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه دارند. شکل (۴) پراکنش قنات‌ها را در سطح شهرستان بیرجند نشان می‌دهد.



شکل ۳- نقشه پراکنش منابع آبی در شهرستان بیرجند

Fig 3- Distribution map of water resources in Birjand city

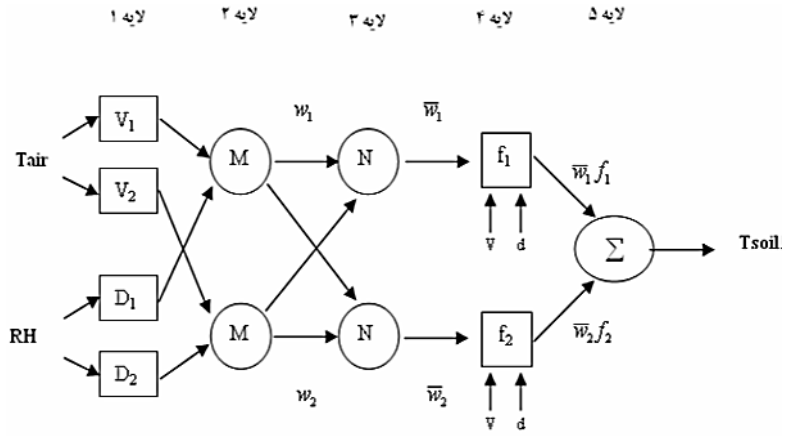


شکل ۴- نقشه پراکنش قنات‌ها در شهرستان بیرجند

Fig 4- Distribution map of Qanats in Birjand city

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (ANFIS)

برای اولین بار سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی توسط ژانگ (Jang et al., 1997) معرفی شد. این مدل، به کمک مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی، یک سیستم استنتاج فازی ایجاد می‌کند (Mokarram et al., 2017). شکل (۵) ساختار معادل شبکه استنتاج تطبیقی عصبی فازی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ساختار سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی

Fig 5- Structure of the Neuro-Fuzzy Adaptive Inference System

مدل سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی دربرگیرنده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار است. بخش فازی رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به‌وسیله شبکه عصبی تعیین می‌گردد. در فرآیند استنباط فازی، ۵ مرحله باید صورت گیرد:

۱) فازی‌سازی متغیرهای ورودی؛

۲) به کاربردن عملگرهای (و، یا) در بخش مقدمه؛

۳) استنتاج از مقدمه به نتیجه در ساختار؛

۴) ترکیب نتایج قوانین؛

۵) غیر فازی کردن.

روش مدل‌سازی به‌وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی مشابه بسیاری از روش‌های متداول می‌باشد. ابتدا ساختار یک مدل با پارامترهای مشخص (تابع و درجه عضویت) فرض می‌شود. سپس یک سری داده ورودی / خروجی به‌شکلی که قابل استفاده برای آموزش سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی باشد، جمع‌آوری می‌گردد. در ادامه به‌وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی، مدل سیستم استنباط فازی را با داده‌های موجود آموزش داده، تا با اصلاح پارامترهای تابع درجه عضویت مطابق با حد خطای انتخاب‌شده، داده‌های حاصل از مدل به مقدار واقعی نزدیک شوند. با توجه به پیچیده‌بودن شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی، بخش بیشتری از داده‌های مشاهداتی با لحاظ بیش برازش‌ی به مرحله واسنجی اختصاص یافت. لذا داده‌های وردی به مدل شبکه فازی عصبی تطبیقی ۷۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و ۳۰ درصد برای صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شدند. پس از بررسی کیفی مدل فازی عصبی تطبیقی این مدل برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. جهت اطلاعات بیشتر از مدل‌های استنتاج تطبیقی عصبی فازی می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط (Koorehpazan Dezfouli, 2015; Emamgholizadeh et al., 2014; Vahedi et al., 2015) مراجعه کرد.

معیارهای ارزیابی مدل

در پژوهش حاضر، از میان شاخص‌های آماری متعدد در دسترس، شاخص‌هایی برای ارزیابی درستی عملکرد مدل انتخاب‌شده است که با استفاده از آنها میزان خطای موجود در نتایج به‌دست‌آمده، میزان همبستگی داده‌ها، پراکندگی آنها و همچنین بالادست یا پایین‌دست بودن نتایج حاصل نسبت به مقادیر واقعی نشان داده شده و ارزیابی شده است. به منظور ارزیابی صحت و کارایی مدل از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد. مقدار ضریب همبستگی در محدوده بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند و درصدی از داده‌هایی که نزدیک خط بهترین برازش قرار گرفته‌اند را بیان می‌کند. ریشه میانگین مربعات خطا، تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل خطای کمتری دارد و ضریب نش- ساتکلیف نیز از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. هر چه مقدار این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، مدل از عملکرد بهتری برخوردار است (Zandi Dareh Gharibi et al.,

2017). شاخص‌های آماری فوق به ترتیب از رابطه‌های ذیل به‌دست می‌آیند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (۱)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{si})^2} \quad (۲)$$

$$NS = (1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (۳)$$

که در رابطه‌های فوق: Q_{oi} "دبی آب مشاهداتی، Q_{si}" دبی آب شبیه‌سازی شده در زمان i،n "تعداد داده‌های مشاهداتی و $\bar{Q}_{oi}$ "میانگین دبی آب مشاهداتی می‌باشد. طریقه انتخاب بهترین مدل به این صورت است که مدلی که در آن معیارهای R^2 و NS به عدد یک و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، به عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود.

نتایج و بحث

در این پژوهش، کاربرد مدل موسوم به شبکه عصبی فازی تطبیقی در پیش بینی دبی قنات‌ها شهرستان بیرجند مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از ۱۴ سری داده به عنوان متغیر ورودی به صورت ماهیانه استفاده گردید. در ابتدا داده‌های ورودی به کمک آزمون گاما پیش پردازش شدند و داده‌هایی که بیشترین ضریب همبستگی را با دبی قنات‌ها داشتند؛ انتخاب و داده‌های پرت حذف گردیدند. از میان این ۱۴ سری داده، متغیرهای تبخیر، بارندگی ماه قبل، حداقل رطوبت، حداکثر دما و متوسط دما به‌عنوان ورودی و دبی قنات به‌عنوان متغیر خروجی به صورت ماهیانه برای شبکه عصبی فازی در نظر گرفته شدند. اطلاعات از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۴۰۰ یعنی به میزان ۱۲۰ ماه مورد استفاده قرار گرفت. که ۸۴ ماه آن برای آموزش و ۳۶ ماه برای آزمون مدل به کار گرفته شد. اساس آموزش شبکه‌های عصبی بر مبنای آزمون و خطا می‌باشد تا بهترین آرایش شبکه با تغییر تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های آنها، تابع فعالیت، الگوریتم آموزش و تعداد تکرار در مرحله آموزش جهت برآورد پارامتر خروجی مورد نظر ارائه شود (Izadi et al., 2007). به منظور شناسایی ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل به کمک شبکه عصبی فازی ۷۰ درصد کل داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون جهت ارزیابی عملکرد شبکه و بررسی دقت پیش‌بینی مدل پیشنهادی استفاده شد.

نتایج ارزیابی مدل در پیش بینی دبی قنات‌ها

پس از بررسی روش‌های مختلف، برای انتخاب بهترین ترکیب از آزمون GAMMA استفاده شد. با استفاده از این روش، به روش آماری، هر یک از داده‌ها به ترتیب تأثیرشان بر داده هدف (خروجی) مرتب شدند. در این پژوهش با پیش‌پردازش داده‌های ورودی توسط روش گاما تست، مدل انتخاب بهترین ترکیب از میان پارامترهای ورودی، تعیین شد.

داده‌هایی که به کمک آزمون گاما پیش پردازش شده و انتخاب گردیده بودند در جعبه ابزار منطق فازی و در محیط نرم‌افزار متلب[1] بارگذاری شدند و مدل مورد آزمایش و آزمون قرار گرفت. در مدل ارائه‌شده، داده‌ها با الگوریتم Fuzzy C-Means دسته‌بندی شده و مدل جهت آموزش بهینه شده است. این الگوریتم محبوب‌ترین روش خوشه‌بندی فازی است که با به حداقل رساندن تابع هدف، خوشه‌ها را پیدا می‌کند. نتایج اجرای مدل برای قنات‌های شهرستان بیرجند در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همچنین شکل (۶) و (۷) نتایج اجرای مدل برای دبی ماهیانه قنات‌های شهرستان بیرجند را در مرحله آزمایش و آزمون مدل نشان می‌دهد و همان‌گونه که مشخص است در برخی از ماه‌ها مقادیر پیش‌بینی بیشتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده است. با توجه به نتایج جدول (۱) ملاحظه می‌گردد دبی قنات‌های شهرستان بیرجند با دقت مناسبی، توسط مدل شبیه‌سازی و پیش‌بینی گردیده است و مقادیر شاخص‌های آماری در محدوده قابل قبولی قرار گرفته‌اند.

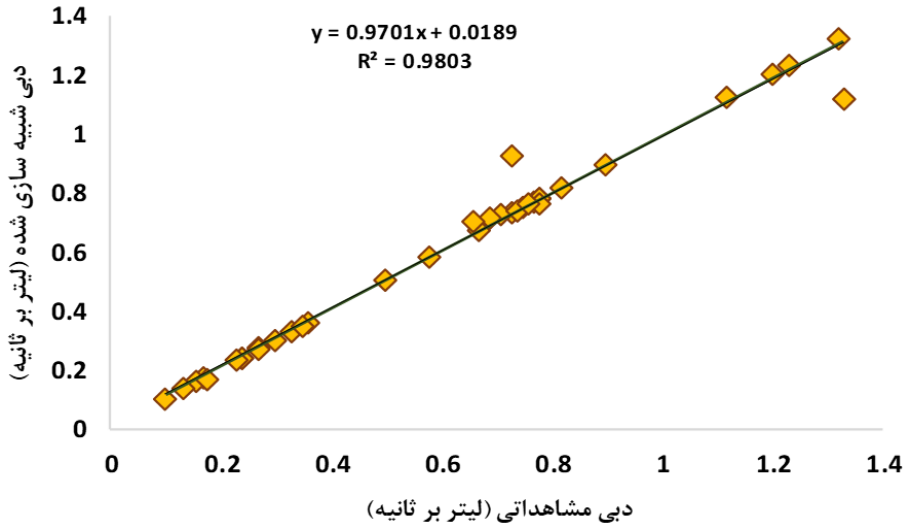
[1] Matlab

جدول ۱- عملکرد شبکه عصبی فازی تطبیقی در پیش بینی دبی قنات‌ها

Table 1- Performance of the adaptive Fuzzy Neural Network in Predicting the Discharge of Qanats

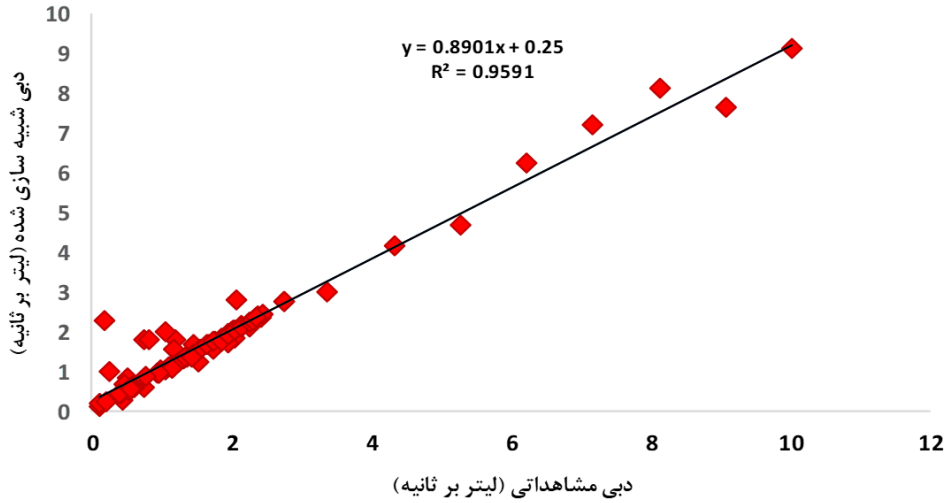
مرحله مدل‌سازی Modeling stage	ضریب نش- ساتکلیف NS	ضریب همبستگی R^2	مجذور میانگین مربعات خطا RMSE
آموزش training	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۴۳
اعتبارسنجی Test	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۰۴۹

باتوجه به نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبکه عصبی فازی ANFIS توانسته است با دقت بسیار خوبی دبی قنات‌های شهرستان بیرجند را شبیه‌سازی کند. کاهش قابل توجه خطا در مرحله اعتبارسنجی نسبت به مرحله آموزش نشان‌دهنده تعمیم‌پذیری خوب مدل و توانایی آن در پیش‌بینی دبی قنات‌ها در شرایط مختلف است.



شکل ۶- مقایسه دبی مشاهداتی و نتایج شبکه عصبی فازی تطبیقی در مرحله آزمایش

Fig 6- Comparison of the observed flow rate and the results of the adaptive fuzzy neural network in the test phase

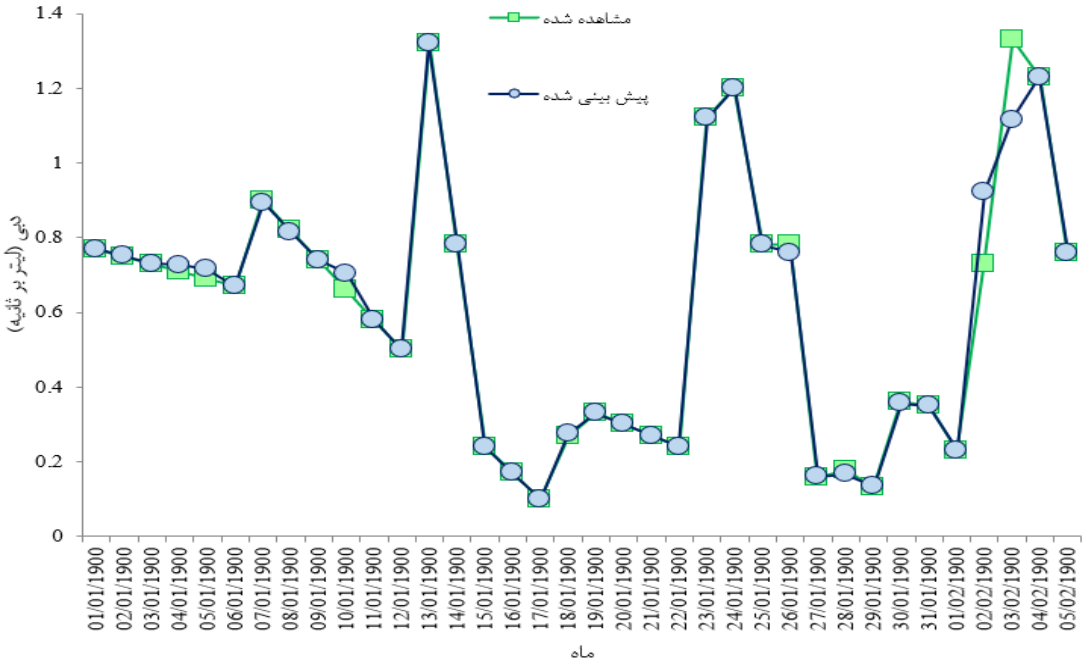


شکل ۷- مقایسه دبی مشاهداتی و نتایج شبکه عصبی فازی تطبیقی در مرحله آزمون

Fig 6- Comparison of the observed flow rate and the results of the adaptive fuzzy neural network in the training phase

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی است. ضریب همبستگی ۰/۹۸، ضریب نش-ساتکلیف ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۹، نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی دبی قنات‌ها داشته که با نتایج (Emamgholizadeh et al., 2014) و (Nazari et al., 2022) مطابقت دارد. نمودار تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در طول زمان، روند کاهشی قابل توجهی را در دبی قنات‌ها نشان می‌دهد که به‌ویژه در ماه‌های خشک سال تشدید می‌شود. کاهش دبی قنات‌های شهرستان بیرجند را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله هیدرولوژی قنات‌ها، شرایط اقلیمی منطقه، افزایش برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تغییر الگوی بارندگی و افزایش دما نسبت داد و همانگونه که مشاهده می‌گردد در ماه‌های که میزان بارندگی نسبت به ماه‌های خشک سال بیشتر بوده، دبی قنات‌ها افزایش یافته است که این موضوع با توجه به هوابین بودن اکثر قنات‌های منطقه که دبی آن ها تابع شرایط اقلیمی منطقه بوده صدق می‌کند.

نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی در شهرستان بیرجند بسیار مفید باشد. با استفاده از این مدل، می‌توان تغییرات آینده دبی قنات‌ها را پیش‌بینی کرده و اقدامات لازم برای مقابله با کاهش دبی و جلوگیری از خشک شدن قنات‌ها و حفظ این میراث ارزشمند، را مانند: احیا و مرمت قنات‌های قدیمی، تعیین الگوی بهینه بهره‌برداری از آب قنات‌ها، تعیین اولویت‌بندی قنات‌ها، افزایش آگاهی بهره‌برداران، توسعه روش‌های آبیاری کم‌مصرف و مدیریت و کنترل میزان برداشت از آبخوان را اتخاذ نمود. مدل ارائه شده تنها به تغییرات دبی قنات‌ها در پاسخ به تغییرات عوامل اقلیمی پرداخته است و تأثیر سایر عوامل مانند عوامل هیدرولوژیکی، تغییرات کاربری اراضی و توسعه شهری بر دبی قنات‌ها در این مدل لحاظ نشده است. لذا برای بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی، نیاز به انجام مطالعات بیشتر و جامع‌تر در این زمینه وجود دارد.



شکل ۸- مقایسه دبی مشاهده شده و محاسبه شده

Fig 8 - Comparison of observed and calculated flow rate

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل ترکیبی عصبی فازی به عنوان یکی از روش‌های نوین در پیش بینی دبی قنات‌های شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی با الگوریتم Fuzzy C-Means نشان داد مدل استنتاج عصبی فازی تطبیقی از دقت مناسبی در

پیش‌بینی دبی قنات‌ها برخوردار بوده. با این حال، لازم به ذکر است که این مدل به کیفیت و کمیت داده‌های ورودی بسیار حساس بوده و ممکن است در شرایطی که تغییرات محیطی و هیدرولوژیکی قابل توجه باشد، دقت پیش‌بینی کاهش یابد. همچنین، مقایسه نتایج این مدل با سایر مدل‌های رایج در این زمینه، نشان‌دهنده برتری آن در شرایط خاص مطالعه حاضر است. با این وجود، برای بهبود قابلیت اطمینان مدل و گسترش کاربرد آن در سایر مناطق، نیاز به تحقیقات بیشتر در جهت کاهش حساسیت مدل و توسعه آن برای پیش‌بینی‌های بلندمدت احساس می‌شود.

از آنجایی که قنات‌ها از مهم‌ترین منابع آبی و به عنوان شاهرگ حیاتی استان خراسان جنوبی محسوب شده و حیات بسیاری از روستاها و آبادی‌ها به آنها وابسته است، مدیریت بهینه منابع آب، احیا و مرمت قنات‌ها و اصلاح الگوی مصرف ضرورت دارد. پیشنهاد می‌گردد بررسی اثرات تغییر اقلیم و اثرات برداشت از چاه‌ها بر دبی قنات‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد و اگرچه مدل ارائه شده در این پژوهش یک مدل شبیه‌سازی است، اما می‌توان با تلفیق آن با مدل‌های بهینه‌سازی از آن در مدیریت یکپارچه منابع آب شهرستان بیرجند استفاده کرد. جهت آگاهی دقیق از میزان آبدهی قنات‌های شهرستان بیرجند توصیه می‌گردد آمار برداری از دبی قنات‌ها با توجه به اهمیت این منابع در منطقه مورد مطالعه با نظم و دقت بیشتر انجام پذیرد. همچنین با توجه به روند کاهشی دبی قنات‌ها، اجرای طرح‌های احیا و مرمت قنات‌ها، لایروبی منظم، اصلاح سیستم‌های سنتی آبرسانی و مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی، از جمله اقدامات ضروری برای حفظ و پایداری این منابع آبی است. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند در پایش وضعیت قنات‌ها و برنامه‌ریزی برای مدیریت بهینه آن‌ها بسیار مفید باشد. با این حال، موفقیت این طرح‌ها مستلزم مشارکت فعال جوامع محلی و آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت پایدار منابع آب است.

منابع

Adamowski, J., & Chan, H. F. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, *407*(1-4), 28-40 .https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.013

Adhikary, S. K., Rahman, M., & Gupta, A. D. (2012). A stochastic modeling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series analysis. *International journal of applied science and engineering research*, *1*(2), 238-249 . https://doi/10.6088/ijaser.0020101024.

Chitsazan, M., Rahmani, G., & Neyamadpour, A. (2015). Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India*, *85*, 98-106. https://doi.org/10.1007/s12594-015-0197-4

Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., & Tsanis, I. K. (2005). Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* (4-1)309, 229-240, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.001

Emamgholizadeh, S., Moslemi, K., & Karami, G. (2014). Prediction of the groundwater level of Bastam Plain (Iran) by artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Water resources management*, *28*, 5433-5446. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0810-0

Habibi, M. H., Nadiri, A. A., & Asghari Moghaddam, A. (2016). Spatio-temporal groundwater level prediction using hybrid genetic-Kriging model (Case study: Hadishahr Plain). *Iran-Water Resources Research*, *11*(3), 85-99. https://www.iwrr.ir/article_1401_9eaba82f2055b7ee746423ed1be21e3c.pdf

Hamed, Y., Elkiki, M., & Al Gahtani, O. S. (2015). Prediction of future groundwater level using artificial Neural Network, southern Riyadh, KSA (CASE STUDY). *International Water Technology Journal*, *5*(2), 149-162 . https://www.researchgate.net/publication/327834035

Izadi, A., Davari, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., & Haghayeghi, M. S. G. (2007). Water Table Forecasting Using Artificial Neural Networks .*Iranian Journal Of Irrigation And Drainage, 1(2), 59-71. Sid. Https://Sid.Ir/Paper/131658/En*

Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., & Mizutani, E. (1997). Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence [Book Review]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *42*(10), 1482-1484 . http://dx.doi.org/10.1109/TAC.1997.633847

Khashei, A., Siuki, Ghahrama, B., & Kouchakzadeh, M. (2013). Comparison of ANN, ANFIS, and Regression Models to Estimate Groundwater Level of Neyshaboor Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *7*(1), 10-. https://www.magiran.com/paper/1135006

Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, *13*, 317-320 .https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8

Koorehpazan Dezfouli, A. (2015). *Principles of Fuzzy Set Theory and its Applications in Modeling Water Engineering Problems* .

https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001591

Regional Water Company, S. K. (2024). *Report on the State of Water Resources in South Khorasan Province* . https://skhrw.ir/uploaded_files/DCMS/wysiwyg/files/Gozaresh

Salamatian, S. A., Abrari, H., & Nazari, A. (2023). Predicting the Groundwater Level by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Case Study: Qom plain). *Irrigation and Water Engineering*, *13*(3), 285-304. https://doi.org/10.22125/iwe.2023.169890

Sethi, R. R., Kumar, A., Sharma, S., & Verma, H. (2010). Prediction of water table depth in a hard rock basin by using an artificial neural network. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, *2*(4), 95-102. https://www.researchgate.net/publication/266472104_Prediction_of_water_table_depth_in_a_hard_rock_basin_by_using_artificial_neural_network .

Tarahi, M., & Darafshan, A. (2018). *Prediction of Groundwater Level Using Artificial Neural Network Model (ANN): Case Study of Jahrom Plain* https://civilica.com/doc/748670

Second National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development, https://civilica.com/doc/748670

Umamaheswari, G., & Kalamani, D. (2014). Fuzzy logic model for the prediction of groundwater level in Amaravathi River Minor Basin. *International Journal of Mathematics Trends and Technology-IJMTT*, *11* . https://doi.org/10.14445/22315373/IJMTT-V11P505

Vahedi, F., Nadiri, A., & AsghariMoghaddam, A. (2015). *Evaluation of Artificial Neural Network and Fuzzy Logic Models Efficiency in Groundwater Level Prediction* he 1st International Congress on Earth, Space and Clean Energy, https://civilica.com/doc/456421

Yang, C.-C., Prasher, S. O., Lacroix, R., Sreekanth, S., Patni, N. K., & Masse, L. (1997). Artificial neural network model for subsurface-drained farmlands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *123*(4), 285-292 . https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:4(285(

Zandi Dareh Gharibi, F., Khorsandi Kouhanestani, Z., Mozayan, M., & Arman, N. (2017). Technical Note: Evaluating the proficiency of GR2M and GR4J rainfall-runoff models in Darehtakht Basin runoff simulation. *Watershed Engineering and Management*, *9*(3), 360-370. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.112377

Kurtulus, B., & Razack, M. (2010). Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy .*Journal of Hydrology*, *381*(1-2), 101-111 .https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.029

Mirarabi, A., & Nakhaei, M. (2009). Groundwater Level Fluctuation Forecasting in Birjand Aquifer Using Artificial Neural Network . https://civilica.com/doc/1776123

Mohtasham, M., Dehghani, A. A., Akbarpour, A., & Meftah, M. (2017). Evaluation of Artificial Neural Networks and MODFLOW Numerical Model in Forecasting Groundwater Table (Case Study: Birjand Aquifer, Southern Khorasan). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *11*(1), 1-10. https://idj.iaid.ir/article_79421_d72337fd05734ec488f46d80ff۳۲۸۷ad.pdf

Mokarram, M., Mokarram, M. J., Zarei, A. R., & Safarianejadian, B. (2017). Using of adaptive Neuro-Fuzzy network (ANFIS) to predict underground water quality in the west of Fars province from 2003 to 2013 period. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, *4*(2), 547-559. https://www.magiran.com/paper/1686874

Nazari, H., Dehghani, M., Pirkharrati, H., Asadzadeh, F., & Hajizadeh, F. (2022). Monitoring of groundwater quality parameters using adaptive neural-fuzzy inference system (ANFIS) method (Case study: Ardabil plain). *Journal of New Findings in Applied Geology*, *16*(31), 1-12. https://www.magiran.com/paper/2454855

Nikmanesh, M. R. (2011). *Application of Hybrid Artificial Intelligence Methods in Predicting Daily Average Discharge of the Kor River at Chamriz Station* The 4th Iranian Water Resources Management Conferencehttps://civilica.com/doc/117158 .

Nikmanesh, M. R., & Rakhshandehroo, G. R. (2010). Forecasting Groundwater Level In Saadat-Shahr Plain, Iran, Using Artificial Neural Networks. *Iran-Water Resources Research*, *7*(1), 82-8 .٦ https://www.iwrr.ir/article_16061_808dea423d0803fb34108f631404c74d.pdf

nourani, V., AsghariMoghaddam, A., & Nadiri, A. (2006). *Evaluation of groundwater levels in the aquifer of Tabriz city using artificial neural networks* 3rd National Congress on Civil Engineering.https://civilica.com/doc/16415

Rakhshandehroo, G., Akbari, H., Afshari Igder, M., & Ostadzadeh, E. (2018). Long-term groundwater-level forecasting in shallow and deep wells using wavelet neural networks trained by an improved harmony search algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, *23*(2), 04017058 .