



Comparative Performance of Artificial Intelligence Models for Groundwater Level Prediction: The Zaveh–Torbat Heydarieh Aquifer

Ehsan Bahrami Jovein¹ | Iman Zabbah² | Marjan Hosseini Somaie³ | Alireza Roshani³

1. Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran.

2. Department of Electrical and Computer Engineering, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran.

3. Department of Water Engineering, ToH.C., Islamic Azad University, Torbat Heydarieh, Iran.

✉Corresponding Author: e.bahrami.j@gmail.com

Submit Date
05 July 2026

Revise Date
16 August 2026

Accept Date
29 August 2026

Keywords:

Artificial intelligence, data-driven models, groundwater level, Zaveh-Torbat Heydariyeh aquifer.

Extended abstract

Introduction

Groundwater resources are among the most strategic and vital sources of freshwater, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran, where they play an essential role in sustaining agricultural activities, drinking water supplies, and regional economic development. Excessive and unregulated extraction of groundwater, driven by population growth, agricultural expansion, and recurring droughts, has led to a severe decline in the water table, reduced aquifer storage, the drying up of subterranean qanats and deep wells, and land subsidence. Consequently, understanding the dynamic behavior of aquifers and accurately predicting groundwater level fluctuations are critical steps toward sustainable water resources management.

Traditional physical and numerical groundwater models require extensive hydrogeological datasets and complex boundary conditions, which are often unavailable or associated with high uncertainty. In contrast, data-driven machine learning and artificial intelligence models have gained widespread popularity due to their high capability in capturing complex, non-linear relationships between input variables and system outputs.

Cite this article: Bahrami Jovein, E., Zabbah, I., Hosseini Somaie, & Roshani, A. (2027). Comparative performance of Artificial Intelligence models for groundwater level prediction: the Zaveh–Torbat Heydarieh Aquifer. *Journal of Aquifer and Qanat*, 7 (2), 91- 110. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2026.11594.1148>.



Copyright: © 2027 by the authors. Licensed by the 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/>).

The primary objective of this study was to evaluate and compare the efficiency of advanced data-driven models—namely Multilayer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF), and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)—coupled with a robust k-fold cross-validation approach, for predicting monthly groundwater level fluctuations in the Zaveh–Torbat-e Heydarieh aquifer, Iran.

Materials and Methods

The study area, the Zaveh–Torbat-e Heydarieh plain, spans approximately 2.504 square kilometers within the central-eastern part of Iran, characterized by an arid climate and an average annual precipitation of 275 mm. Monthly groundwater level data from 18 observation wells (piezometers) spanning a 20-year historical period (October 1996 to September 2016) were utilized.

To prepare the dataset, missing values were reconstructed, and input variables were normalized using the Min-Max technique to scale values between 0 and 1. The input vector comprised meteorological and hydrological parameters including monthly time steps, evaporation rates, maximum and minimum temperatures, total precipitation, average relative humidity, and the time-lagged groundwater level from the previous month (h_{t-1}), with the current month's water table defined as the model output.

To prevent model overfitting and guarantee evaluation robustness, a k-fold cross-validation method equal to $k=5$ was implemented. The dataset was split into 5 equal subsets; iteratively, 4 subsets were used for training, and the remaining subset served for validation. The performance of the MLP, RBF, and ANFIS models was evaluated and compared using statistical performance metrics, namely the Root Mean Square Error (RMSE) and the Coefficient of Determination (R^2).

Results and Discussion

Evaluation of the downscaling method at the GRACE cell scale showed that the estimated cumulative groundwater storage changes closely matched the reference GRACE values in most cells across the study area, with coefficients of determination exceeding 0.95 in the majority of cells and exceeding 0.99 in some. In a limited number of cells (six), model performance was weaker, with coefficients of determination ranging from -0.991 to 0.068 , some of which were negative. This reduced performance was attributed to hydrogeological heterogeneity, the asymmetric distribution of SWAT subbasins within cells, a constant spatial withdrawal pattern assumed throughout the study period, and insufficient data in boundary cells. Nevertheless, approximately 76% of the cells (32 of 42) exhibited coefficients of determination greater than 0.95. Analysis of the temporal trend also showed that the estimated time series aligned well with the actual trend in most cells, and the method reconstructed the onset of decline, the direction of change, and the long-term declining trend of groundwater storage with acceptable accuracy. At the Zanzan aquifer scale, comparison of the estimated cumulative time series with actual values derived from 66 piezometric wells over the 2002–2016 period showed that both series exhibited a similar declining trend, with a coefficient of determination of 0.846, indicating that approximately 85% of the cumulative groundwater storage variation was reproduced by the model. The estimated trend slope (-55.31 million cubic meters per year) was slightly steeper than the actual slope (-42.47 million cubic meters per year), indicating that the model somewhat overestimated the severity of the decline; the largest discrepancies occurred during periods of intense storage depletion. Nonetheless, the overall agreement between the two trends confirms that the downscaling method employed is capable of effectively transferring GRACE-derived information to the aquifer scale.

Conclusion

The downscaling method employed in this study, based on GRACE data and the SWAT model, demonstrates a high capability for reconstructing groundwater storage changes from the regional to the local scale. The performance evaluation of the model at both the GRACE cell and aquifer scales showed that the coefficient of determination exceeded 0.95 in most grid cells, while at the aquifer scale, a coefficient of determination of 0.846 was obtained, indicating the model's suitable capability in reconstructing the time series of groundwater storage changes. Although discrepancies between the estimated and reference values were observed in some cells, particularly during periods of severe groundwater decline, these discrepancies were mainly attributed to local factors such as heterogeneity in hydrogeological properties, changes in withdrawal patterns, differences in aquifer recharge, and the limited spatial resolution of GRACE data and the local SWAT model. Despite these limitations, the model was able to reconstruct the long-term declining trend of groundwater storage with acceptable accuracy and effectively transfer satellite-derived information to the local scale. Therefore, the method used in this study can serve as a reliable approach for monitoring groundwater storage changes particularly in basins and aquifers facing a shortage of observational data and can be applied in groundwater resources management and planning.



مقایسه عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی: آبخوان زاوه - تربت حیدریه

احسان بهرامی جوین^۱ | ایمان ذباح^۲ | مرجان حسینی^۳ | علیرضا روشنی^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.
۲. گروه علمی مهندسی برق و رایانه، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران.
۳. گروه علمی مهندسی کشاورزی، واحد تربت حیدریه، دانشگاه آزاد اسلامی، تربت حیدریه، ایران.

✉ نویسنده مسئول: m.naderi@iasbs.ac.ir

چکیده

منابع آب زیرزمینی از حیاتی‌ترین و راهبردی‌ترین منابع آب شیرین در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند. برداشت بی‌رویه از این منابع، افت شدید تراز آب و پیامدهای زیست‌محیطی ناگواری را به همراه داشته است. پژوهش حاضر با هدف به‌کارگیری و ارزیابی کارایی سیستم‌های هوشمند برای پیش‌بینی دقیق تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان زاوه - تربت حیدریه با رویکرد مدیریت بهینه منابع آب انجام شده است.

در این تحقیق، از داده‌های ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی ۱۸ چاه مشاهداتی (پیزومتر) در یک دوره ۲۰ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵) استفاده شد. بدین منظور، مدل‌های داده‌محور شامل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)، شبکه تابع پایه شعاعی (RBF) و سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) توسعه یافتند. برای تضمین استحکام مدل‌ها و جلوگیری از بیش‌برازش، روش اعتبارسنجی متقاطع-K (K-fold) با $k=5$ به کار گرفته شد. متغیرهای ورودی مدل شامل پارامترهای اقلیمی تبخیر، حداکثر و حداقل دما، بارندگی کل، میانگین رطوبت نسبی، گام زمانی (ماه) و تراز آب زیرزمینی با تأخیر زمانی (ماه قبل) و متغیر خروجی، تراز فعلی سطح آب تعیین شد.

یافته‌های پژوهش نشان داد که هر سه مدل هوشمند از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی نوسانات برخوردارند؛ با این حال، الگوریتم عصبی-فازی (ANFIS) عملکرد برتری در تخمین تراز ماهانه آب زیرزمینی دارد. میزان میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل‌های MLP، RBF و ANFIS به ترتیب ۰/۰۲۶، ۰/۰۶۲ و ۰/۰۰۳ متر به دست آمد. نتایج این پژوهش کارایی بالای مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی، به‌ویژه سامانه ANFIS را در تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیکی پیچیده و غیرخطی تأیید می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

کلیدواژه‌ها:

هوش مصنوعی، مدل‌های داده‌محور، تراز آب زیرزمینی، آبخوان زاوه - تربت حیدریه.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین ارکان تأمین آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند و نقش اساسی در تأمین آب شرب، کشاورزی و توسعه اقتصادی جوامع ایفا می‌کنند. در بسیاری از دشت‌های ایران، به‌ویژه در مناطق شرقی کشور، وابستگی به منابع آب زیرزمینی به دلیل محدودیت منابع آب سطحی بسیار زیاد است. افزایش تقاضای آب ناشی از رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و همچنین وقوع خشکسالی‌های متوالی سبب شده است که بسیاری از آبخوان‌های کشور با افت مستمر سطح آب زیرزمینی، کاهش ذخیره آبخوان، خشک‌شدن قنات و چاه‌ها و بروز پدیده‌هایی نظیر فرونشست زمین مواجه شوند. ازاین‌رو، شناخت رفتار دینامیکی آبخوان‌ها و پیش‌بینی دقیق تغییرات تراز آب زیرزمینی، یکی از الزامات اساسی مدیریت پایدار منابع آب به شمار می‌رود. رفتار آبخوان‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل هیدرولوژیکی، اقلیمی و انسانی قرار دارد که روابط میان آن‌ها غالباً غیرخطی، پیچیده و همراه با عدم قطعیت است. به همین دلیل، استفاده از مدل‌های فیزیکی و عددی سنتی مستلزم دسترسی به حجم وسیعی از داده‌های هیدروژئولوژیکی و تعیین دقیق شرایط مرزی و اولیه بوده و در بسیاری از آبخوان‌ها با محدودیت‌های جدی مواجه است. در مقابل، مدل‌های داده‌محور مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، به دلیل توانایی در استخراج روابط پنهان میان متغیرهای ورودی و خروجی، طی دو دهه اخیر مورد توجه گسترده پژوهشگران حوزه منابع آب قرار گرفته‌اند.

در سال‌های اخیر، شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی، مدل‌های هیبریدی و سایر روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی از جمله

بارش، رواناب، تبخیر و تراز آب زیرزمینی به‌کار گرفته شده‌اند.

Nohani و همکاران (۲۰۲۵) پارامترهای تغییر اقلیم بر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در کوهدشت لرستان مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهشی دیگر Nohani و همکاران (۲۰۲۶) از مدل‌های فراابتکاری در تحلیل سطح آب زیرزمینی دشت لفان لرستان استفاده نمودند.

Dastuorani و همکاران (۲۰۲۶) دقت مدل ترکیبی موجک-عصبی فازی در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت بیرجند را نشان دادند. Khayyat و همکاران (۲۰۲۱) دقت شبکه فازی در تخمین دبی قنات‌های شهرستان بیرجند مورد ارزیابی قرار دادند. Edalat و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در آبخوان علی‌آباد قم، قابلیت این روش‌ها را در شبیه‌سازی رفتار آبخوان نشان دادند. Adeli Sardooei و همکاران (۲۰۲۱) نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت جیرفت را مدل‌سازی کرده و ارتباط آن را با توسعه کشاورزی منطقه بررسی نمودند.

Nikbakht (۲۰۱۶) نیز کارایی مدل‌های عصبی و عصبی-فازی را در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی تأیید کردند. همچنین در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و ساختارهای هیبریدی در مطالعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی روندی روبه‌رشد داشته است. در دهه‌های اخیر، پارادایم مدل‌سازی هیدرولوژیک از مدل‌های مبتنی بر فیزیک متمرکز بر معادلات دیفرانسیل جزئی مانند MODFLOW، به سمت مدل‌های داده‌محور، تغییر جهت یافته است. این تغییر ناشی از دشواری کالیبراسیون دقیق مدل‌های فیزیکی در شرایط کمبود داده‌های ساختار زمین‌شناسی و نفوذپذیری است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه در نسل‌های جدید خود، با بهره‌گیری از توابع فعال‌ساز غیرخطی و

زاوه- تربت‌حیدریه، با وجود اهمیت راهبردی آن در تأمین آب کشاورزی و قرارگیری در یکی از مهم‌ترین قطب‌های تولید زعفران کشور، تاکنون از منظر مقایسه عملکرد مدل‌های هوشمند پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی به‌صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است؛ لذا نوآوری اصلی پژوهش حاضر در چند محور قابل بیان است:

(۱) استفاده از بانک اطلاعاتی بلندمدت شامل ۲۰ سال داده ماهانه ۱۸ چاه پیرومتری منتخب در سطح آبخوان زاوه- تربت‌حیدریه؛

(۲) تلفیق هم‌زمان پارامترهای اقلیمی و هیدرولیکی در قالب یک چارچوب داده‌محور واحد؛

(۳) ارزیابی و مقایسه سه ساختار پرکاربرد هوش مصنوعی شامل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)، شبکه تابع پایه شعاعی (RBF) و سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی

و (۴) بهره‌گیری از روش اعتبارسنجی متقاطع پنج‌تایی به‌منظور افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری و کاهش احتمال بیش‌برازش مدل‌ها.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش توسعه و ارزیابی مدل‌های هوشمند داده‌محور برای پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان زاوه - تربت‌حیدریه و تعیین مناسب‌ترین ساختار برای شبیه‌سازی رفتار آبخوان است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار در مدیریت منابع آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از آبخوان و تدوین راهبردهای سازگاری با کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

درنهایت لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت کل‌نگر این پژوهش که با هدف درک رفتار کلی آبخوان زاوه انجام شده است، داده‌های اقلیمی به‌عنوان محرک‌های عمومی برای تمامی نقاط پیرومتری در نظر گرفته شدند. این انتخاب ساختاری، امکان شناسایی الگوهای فصلی پاسخ سامانه را در مقیاس آبخوان فراهم می‌کند، اگرچه ماهیت

ساختارهای عصبی پویا، قادرند پیچیدگی‌های زمانی - مکانی آبخوان را با دقت بالایی بازسازی کنند. با این حال، با وجود گستردگی مطالعات، نقدهای جدی بر برخی پژوهش‌های اخیر وارد است؛ از جمله عدم استفاده از ساختارهای اعتبارسنجی قوی مانند K-Fold Cross Validation که منجر به بیش‌برازش (Overfitting) در بسیاری از گزارش‌های علمی شده است. همچنین، بسیاری از مطالعات تنها به یک ساختار هوش مصنوعی بسنده کرده‌اند و به مقایسه ساختاری بین شبکه‌های عصبی و سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی^۱ (ANFIS) که دارای ماهیت یادگیری متفاوتی هستند، پرداخته‌اند (Zabbah, 2023).

این مطالعه با تمرکز بر دو محور اصلی، یعنی ۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های هوشمند در یک چارچوب اعتبارسنجی مقاوم و ۲- تحلیل تطبیقی میان مدل‌های کلاسیک و عصبی - فازی در یکی از دشت‌های راهبردی تولید محصولات کشاورزی (زاوه - تربت‌حیدریه)، تلاش می‌کند خلأ موجود در دقت پیش‌بینی رفتارهای غیرخطی آبخوان را پوشش دهد.

با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که دو خلأ اساسی در مطالعات پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی وجود دارد که پژوهش حاضر بر آن‌ها تمرکز دارد. نخست آن‌که در اغلب پژوهش‌ها، مقایسه ساختاری جامع بین شبکه‌های عصبی کلاسیک مانند MLP^۲ و RBF^۳ و سیستم‌های استنتاج عصبی - فازی (ANFIS) بر پایه چارچوب‌های اعتبارسنجی مقاوم (Robust Cross-Validation) انجام نشده است که این امر منجر به عدم قطعیت در انتخاب مدل بهینه برای ساختارهای غیرخطی آبخوان شده است. دوم آن‌که آبخوان

^۱ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

^۲ Multi-Layer Perceptron

^۳ Radial Basis Function

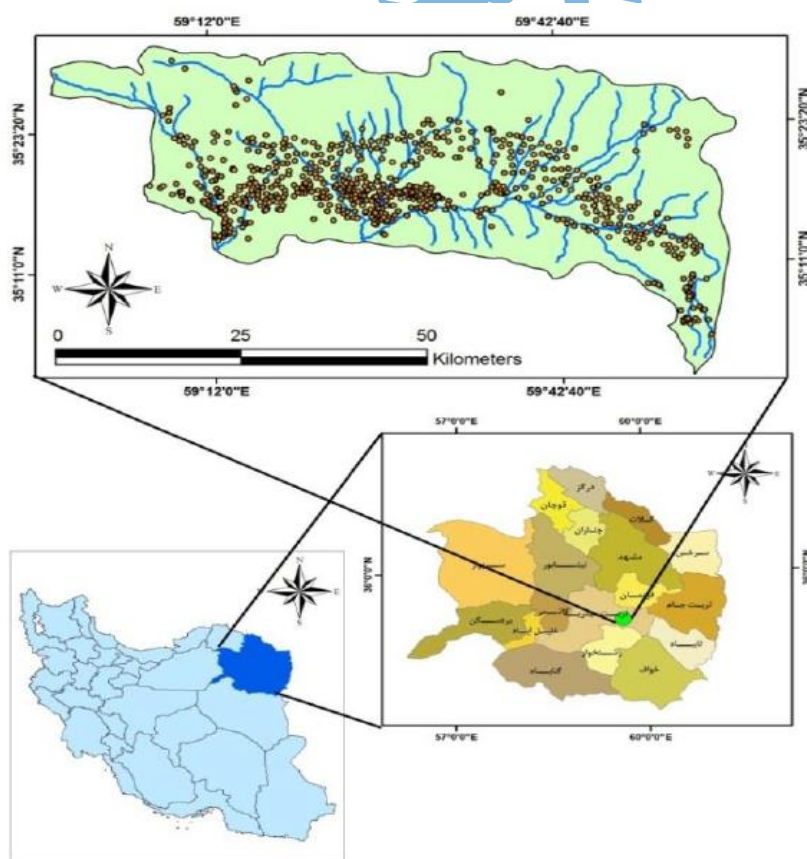
میانگین بارندگی سالانه در این دشت ۲۷۵ میلی‌متر گزارش شده که تقریباً معادل یک‌سوم (۳/۱) میانگین بارندگی جهانی است. اصلی‌ترین منابع تغذیه‌کننده این آبخوان آبرفتی، جریان‌های سطحی و رودخانه‌های فصلی کال سالار و شصت‌دره هستند. در سال‌های اخیر، تحت تأثیر پدیده‌های تغییر اقلیم و استمرار خشکسالی‌ها از یک سو و برداشت‌های بی‌رویه و جائزانه از چاه‌های کشاورزی از سوی دیگر، این آبخوان با بیلان منفی و افت شدید تراز ایستایی مواجه شده است؛ به‌طوری که کاهش ۳۵ درصدی نزولات جوی در دوره‌های اخیر، منجر به افت تراز آب زیرزمینی در بازه‌ای بین ۶۱ تا ۱۵۲ سانتی‌متر در نقاط مختلف دشت شده است. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی و توزیع فضایی ۱۸ چاه مشاهداتی (پیزومتر) مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۱ نشان داده شده است.

هیدروژئولوژیکی بسیار محلی چاه‌های منفرد را هموار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی زاوه - تربت حیدریه با گستره‌ای در حدود ۲۵۰۴ کیلومتر مربع (شامل ۱۲۶۰ کیلومتر مربع دشت و ۱۲۴۴ کیلومتر مربع ارتفاعات پیرامونی) در حوضه آبریز کویر نمک و در جنوب کلان‌شهر مشهد واقع شده است. این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین طول‌های ۵۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۰۸ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۵ درجه و ۰۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه برابر با ۱۶۵۰ متر از سطح دریا است و از نظر اقلیمی، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود.



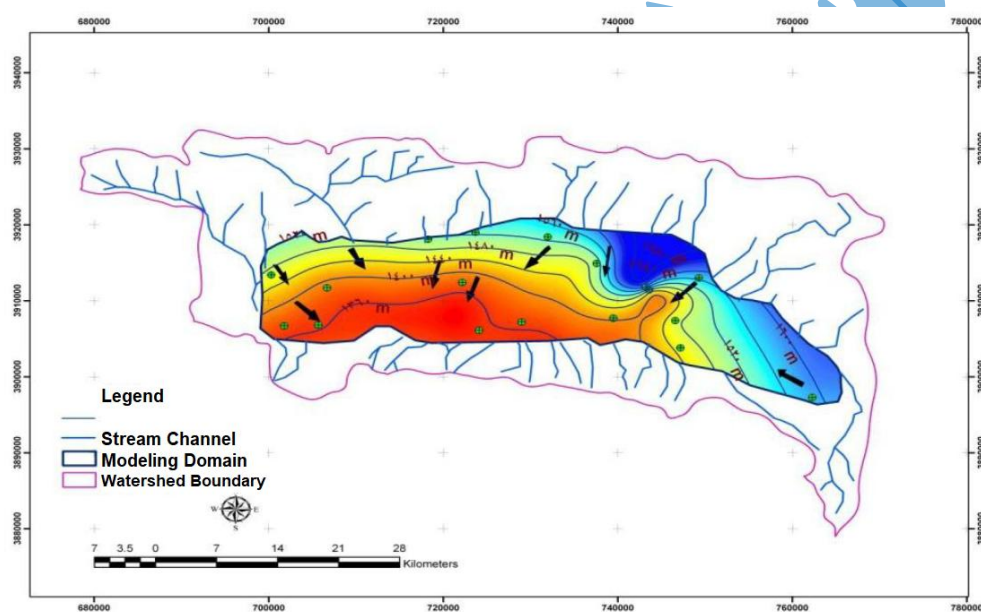
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی چاه‌های پیزومتری و کشاورزی محدوده مطالعاتی دشت زاوه تربت حیدریه

Fig 1. Geographical location of the study area and distribution of observation wells

آمار و اطلاعات چاه های مشاهداتی (پیزومترها)

به منظور تحلیل و ارزیابی نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان زاوه - تربت حیدریه، از آمارهای دیده بانی شده مربوط به تغییرات ماهانه سطح ایستابی در ۲۱ حلقه چاه مشاهداتی استفاده شد. پس از پایش اولیه و کنترل کیفی آمارها، ۱۸ حلقه چاه پیزومتری که دارای بانک اطلاعاتی منسجم، مستمر و بدون افتادگی داده در یک دوره آماری ۲۰ ساله (از مهرماه ۱۳۷۵ تا شهریورماه ۱۳۹۵) بودند،

به عنوان مبنای مدل سازی هوشمند در این پژوهش انتخاب شدند. دوره آماری انتخاب شده به دلیل تکمیل بودن آمار و اطلاعات در تمامی ایستگاه ها انتخاب شده است. توزیع فضایی پیزومترهای موجود در سطح دشت و پیزومترهای منتخب مینا در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، مشخصات هیدروژئولوژیکی و موقعیت پیزومترهای ۱۸ گانه مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است.



شکل ۲. نمایش پیزومترهای موجود و پیزومترهای منتخب در سطح آبخوان

Fig 2. Location of existing piezometers and selected observation wells across the aquifer

پیش پردازش داده ها و ساختار مدل سازی

رویکرد حاکم بر این پژوهش، مبتنی بر مدل سازی داده محور پیش بین و تحلیل سری های زمانی است که در آن با اتکا به متغیرهای ورودی هیدروکلیماتی و تأخیرهای زمانی، تراز سطح ایستابی در هر یک از چاه های مشاهداتی و در نهایت وضعیت عمومی آبخوان پیش بینی می شود. با توجه به اینکه ثبت و گردآوری آمارهای مربوط به پیزومترهای مختلف در بازه های زمانی متفاوتی صورت گرفته بود، بانک اطلاعاتی اولیه دارای مقادیری از داده های

مفقود^۱ یا نقص آماری بود. به منظور یکسان سازی و آماده سازی داده ها برای سیستم های یادگیر هوشمند، فرایند پیش پردازش و بازسازی داده های مفقود با استفاده از روش های درونیابی آماری استاندارد انجام شد. پس از اصلاح و همگام سازی سری های زمانی، در نهایت برای هر یک از چاه های مشاهداتی پیزومتری، تعداد ۲۴۰ گام زمانی ماهانه (معادل ۲۰ سال آمار مستمر) تثبیت گردید که مبنای آموزش ۲ و ارزیابی مدل ها قرار گرفت.

¹ Missing Data

² Learning

به‌عنوان نمونه، ساختار و بخشی از داده‌های جمع‌آوری شده و ترکیب متغیرهای اقلیمی و هیدرولیکی مربوط به ۱۰ گام زمانی در یکی از چاه‌های مشاهداتی شاخص منطقه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات جمع‌آوری شده یکی از چاه‌های مشاهداتی به‌عنوان نمونه

Table 1. A sample of preprocessed hydroclimatic and hydraulic data in one of the selected observation wells

Water Year	Month	Total Evaporation (mm)	Total Rainfall (mm)	Maximum Temperature	Minimum Temperature	Average Relative Humidity (%)	Piezometer Level-Input
1375-76	1	136.9	31.5	12.68	3.71	38.81	45.65
1375-76	2	173.9	90	18.13	7.52	46.45	45.65
1375-76	2	166.8	53	20.79	8.4	51.39	45.7
1375-76	3	257.4	43.5	25.97	14.45	28.32	45.7
1375-76	3	240.6	31	26.35	14.27	44.29	45.9
1375-76	4	376.1	0	28.24	17	44	45.9
1375-76	4	403.8	0	29.84	19.68	18.87	45.93
1375-76	5	529	0	32.31	18.87	35.94	45.93
1375-76	5	389	0	30.84	17.97	33.58	46.06

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum (-\bar{Y})^2} \quad (3)$$

در این رابطه Y نتایج مشاهداتی، $\hat{Y}_i$ نتایج محاسباتی و N تعداد کل مشاهدات است.

RMSE اختلاف این دو مقدار را نشان می‌دهد که کمترین مقدار آن، بالاترین صحت پیشگویی را نشان می‌دهد؛ لذا هرچه این مقدار به صفر و R^2 به یک نزدیک‌تر شود، مدل ارائه‌شده به واقعیت نزدیک‌تر است.

در این مطالعه، به‌منظور آماده‌سازی داده‌ها، گام‌های مهندسی ویژگی شامل نرمال‌سازی داده‌ها و تعیین تأخیرهای زمانی مناسب برای بازتاب حافظه هیدرولوژیکی آبخوان انجام شد. همچنین، از میان پارامترهای مختلف اقلیمی و هیدرولیکی، متغیرهای مؤثر با استفاده از روش‌های ارزیابی هم‌بستگی انتخاب شدند تا بهترین

نرمال‌سازی داده‌ها و معیارهای ارزیابی عملکرد

مدل‌ها

به‌منظور هم‌مقیاس‌سازی پارامترها، افزایش سرعت همگرایی و ارتقای دقت فرایند آموزش الگوریتم‌های هوشمند، داده‌های ورودی و خروجی با استفاده از روش کمینه - بیشینه (Min-Max) در بازه $[0, 1]$ نرمال‌سازی شدند (Navale & Mhaske, 2022) این فرایند بر اساس رابطه ۱ انجام گرفته است:

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

جهت ارزیابی صحت، کارایی و توانایی مدل‌های توسعه‌یافته در پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی، از دو معیار ارزیابی عملکرد استاندارد شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین R^2 استفاده شد که مطابق با روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند (Navale & Mhaske, 2022):

الگوریتم یادگیری پس‌انتشار خطا^۳ است که به دلیل قابلیت تقریب‌زنی عمومی در توابع غیرخطی انتخاب گردید.

مدل دوم، شبکه عصبی تابع شعاعی^۴ است که بر اساس توابع پایه شعاعی در لایه پنهان عمل می‌کند و سرعت همگرایی بالایی دارد. برای هر دو مدل، معماری‌های ساختاری متنوعی (از نظر تعداد نرون‌های لایه پنهان و توابع محرک) مورد آزمون قرار گرفتند.

ساختار عمومی، تعداد لایه‌ها و نحوه اتصال نرون‌ها در مدل‌های توسعه‌یافته‌ی پرسپترون چندلایه و تابع شعاعی در قالب شکل ۳ نشان داده شده است. در هر دو ساختار، ماتریس متغیرهای ورودی شامل ۷ پارامتر هیدروکلیماتی و تأخیری (ماه، تبخیر کل، بارندگی کل، دمای حداکثر، دمای حداقل، میانگین رطوبت نسبی و تراز پیزومتر در ماه قبل) و لایه خروجی شامل یک نرون هدف (تراز سطح پیزومتر در ماه جاری) است. تفاوت اصلی این دو توپولوژی در لایه پنهان است؛ جایی که شبکه MLP از توابع محرک سیگموئیدی با الگوریتم پس‌انتشار خطا بهره می‌گیرد، در حالی که شبکه RBF مبتنی بر توابع گوسی و انتقال بر اساس مراکز شعاعی عمل می‌کند.

مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی با سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS)

سیستم‌های فازی به دلیل ساختار قانون‌محور خود، ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در شرایط عدم قطعیت و پیچیدگی‌های حاکم بر ذات داده‌های پیزومتری به شمار می‌روند.

مجموعه داده‌های ورودی برای ساختارهای مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه فراهم گردد.

تفکیک داده‌ها به روش اعتبارسنجی متقاطع^۱

به‌منظور تضمین استحکام مدل‌های هوشمند، جلوگیری از پدیده بیش‌برازش و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری، از روش اعتبارسنجی متقاطع با انتخاب $k = 5$ استفاده شد.

در این پژوهش، روش k -fold تنها یک ابزار برای ارزیابی عملکرد نهایی نیست؛ بلکه به‌عنوان یک چارچوب استاندارد جهت تنظیم پارامترهای بهینه برای هر یک از مدل‌های MLP، RBF و ANFIS به کار گرفته شده است. بدین منظور، کل بانک داده‌ها شامل ۸۱۳۵ رکورد ماهانه به ۵ بخش (Fold) هم‌اندازه تقسیم شد. در هر چرخه تکرار، از طریق یک فرایند جستجوی سامان‌مند، ساختار بهینه مدل (مانند تعداد نرون‌های لایه پنهان و نرخ یادگیری) در ۴ بخش داده‌های آموزش شناسایی و مدل حاصل، بر روی بخش پنجم (داده‌های تست) ارزیابی گردید. تمامی مراحل مدل‌سازی، در محیط نرم‌افزاری MATLAB و با بهره‌گیری از جعبه‌ابزارهای تخصصی یادگیری ماشین و منطق فازی Fuzzy Logic Toolbox پیاده‌سازی شده است تا بهینه‌ترین ساختار برای مدل‌های MLP، RBF و ANFIS استخراج گردد. در نهایت، میانگین معیارهای آماری حاصل از ۵ مرحله تکرار چرخشی، به‌عنوان شاخص کارایی نهایی مدل گزارش شده است.

مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی با شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP و RBF

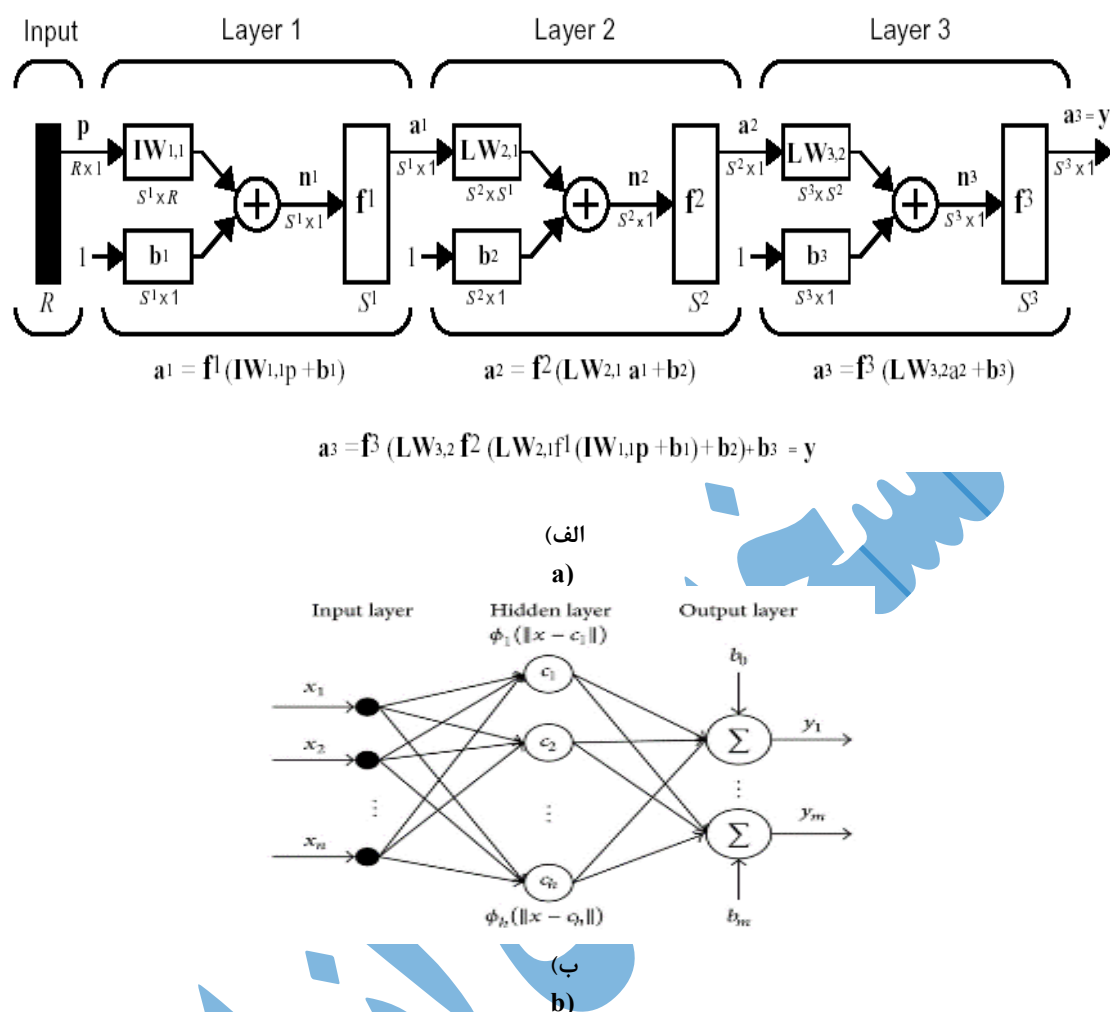
در این پژوهش، از دو ساختار متداول شبکه‌های عصبی مصنوعی با رویکردهای یادگیری متفاوت استفاده شد. مدل اول، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۲ مجهز به

^۳ Backpropagation Learning Algorithm

^۴ Radial Basis Function Neural Network

^۱ K-fold Cross Validation

^۲ multilayer perceptron



شکل ۳. توپولوژی و معماری شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی؛ الف) ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)، ب) ساختار شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF)

Fig 3. Topology and architecture of artificial neural networks used in groundwater level prediction; a) Multilayer Perceptron (MLP) network structure, b) Radial Basis Function (RBF) network structure

برای طراحی و پیکربندی این شبکه، ۷ متغیر ورودی هیدروکلیماتی و هیدرولیکی مندرج در جدول ۲ به‌عنوان لایه ورودی و تراز سطح پیزومتر در ماه جاری به‌عنوان متغیر خروجی و هدف سامانه انتخاب شدند. در فاز اولیه، فرایند فازی‌سازی متغیرهای ورودی از طریق تعریف توابع عضویت^۱ و تعیین تابع تعلق صورت گرفت. ساختار انفیسی توسعه‌یافته در این مطالعه مبتنی بر تابع

تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی با منطق فازی منجر به پیدایش سیستم‌های عصبی-فازی منسجمی می‌شود که توانایی هم‌زمان یادگیری ساختاریافته و استدلال شبه‌انسانی را دارا هستند. در این پژوهش، از سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۱ بر پایه ساختار استنتاج فازی سوگنو^۲ جهت شبیه‌سازی تغییرات تراز آب بهره گرفته شد.

³ MFs

¹ ANFIS

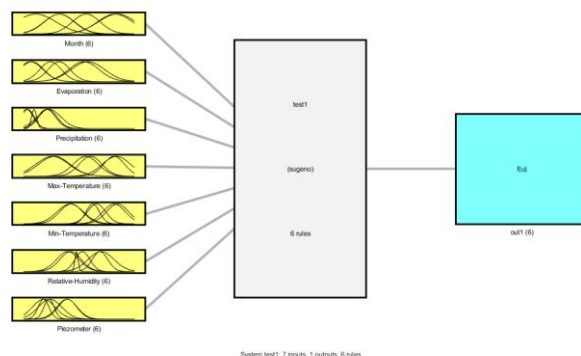
² Sugeno

همچنین، تابع عضویت لایه خروجی از نوع خطی تنظیم گردید که معرف سامانه فازی سوگنو مرتبه اول است. فرایند آموزش شبکه ANFIS به صورت یادگیری با ناظر و با به کارگیری الگوریتم آموزش ترکیبی انجام شد. این الگوریتم در لایه پیشین از روش بهینه سازی نزول گرادیان جهت تنظیم پارامترهای غیرخطی توابع عضویت، و در لایه پسین از روش حداقل مربعات خطا (LSE) برای محاسبه پارامترهای خطی خروجی استفاده می‌کند. ساختار لایه‌ای و گراف جریان اطلاعات در سامانه انفیس طراحی شده برای آبخوان مورد مطالعه، در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است.

عضویت گوسی در لایه ورودی است که رفتار غیرخطی پارامترها را به خوبی پوشش می‌دهد. تابع عضویت گوسی بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$f(x, \sigma, c) = \exp\left(\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

در این رابطه، x متغیر ورودی، c نشان‌دهنده مرکز تابع عضویت و σ تعیین‌کننده پهنا یا انحراف معیار تابع گوسی هستند که شکل هندسی تابع را در لایه ورودی مشخص می‌کنند.



شکل ۴. ساختار لایه‌ای و معماری سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی
Fig 4. Layered structure and architecture of the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) in groundwater level prediction

نسبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، پارامترهای شکل‌دهنده توابع عضویت (مرکز و پهنا گوسی) در طول فرایند یادگیری ترکیبی (Hybrid) بهینه شده‌اند تا کمترین خطای ممکن در پیش‌بینی خروجی حاصل شود.

چارچوب مفهومی و الگوریتم اجرایی پژوهش

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی نوسانات ماهانه تراز آب زیرزمینی در آبخوان زاوه-تربت حیدریه، یک ساختار داده‌محور بر پایه تلفیق پارامترهای اقلیمی و هیدرولیکی طراحی گردید. فرایند گام‌به‌گام و جریان‌نمای (Flowchart) اجرایی مراحل این پژوهش در شکل ۶ به

به منظور فازی‌سازی دقیق فضای ورودی، برای هر یک از پارامترهای هیدروکلیماتی یک متغیر زبانی^۱ با اختصاص ۲ تا ۶ تابع عضویت متغیر در نظر گرفته شد. تعداد و دامنه این توابع عضویت به گونه‌ای تنظیم شده است که پیچیدگی‌ها و الگوهای غیرخطی جریان را به بهترین شکل پوشش دهد. به عنوان نمونه، شکل ۵ ساختار، تراکم و نحوه توزیع توابع عضویت گوسی آموزش‌دیده را در بازه نرمال‌سازی شده [0,1] برای ۴ متغیر ورودی شاخص شامل تبخیر کل، بارندگی کل، دمای حداکثر و میانگین رطوبت

¹ Linguistic Variable

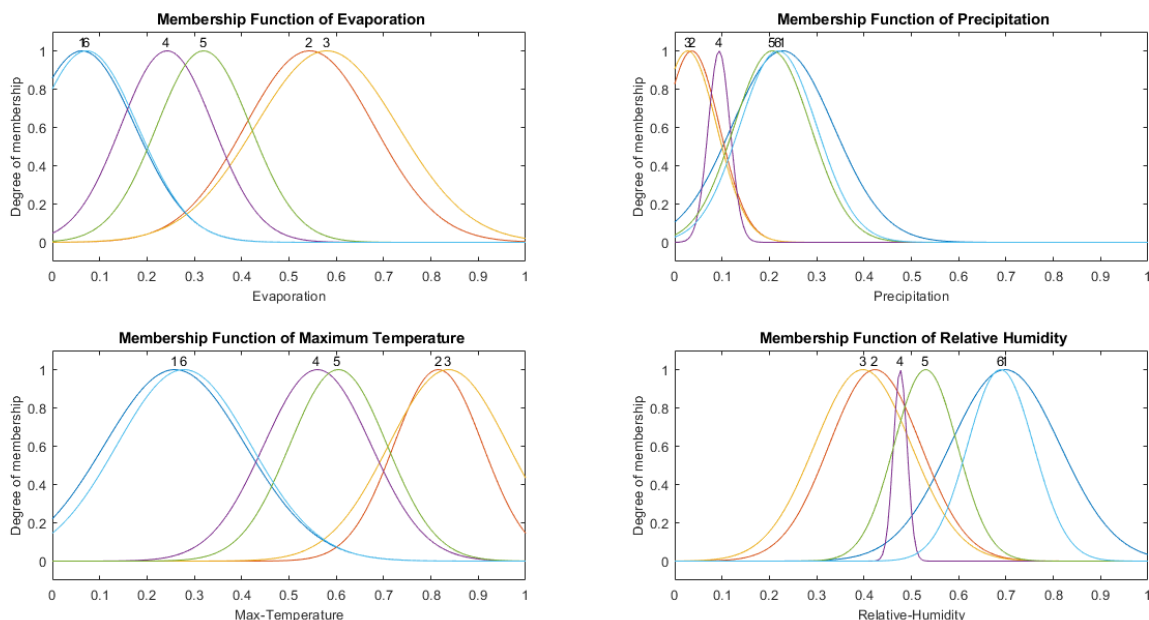
هدف اساسی این پژوهش، توسعه و ارزیابی ساختارهای بهینه هوش مصنوعی MLP، RBF و ANFIS برای برآورد دقیق تراز ماهانه سطح آب زیرزمینی است.

پیش از فرایند مدل سازی، ویژگی های آماری سری زمانی شامل آزمون های نرمال بودن و مانایی بررسی شد تا اطمینان حاصل شود که داده های آموزشی و آزمایشی از ساختار آماری همگن پیروی می کنند.

فرایند آموزش، آزمون و اعتبارسنجی متقاطع (k-fold) در محیط نرم افزاری MATLAB با استفاده از جعبه ابزارهای اختصاصی Statistics and Machine Learning و Fuzzy Logic پیاده سازی گردید.

تصویر کشیده شده است. همچنین، جهت اجرای محاسبات و پردازش ماتریس های داده ای بزرگ، از یک سامانه سخت افزاری مجهز به پردازنده Intel Core i7 (نسل ۱۱) و ۳۲ گیگابایت حافظه رم (RAM) استفاده گردید.

ماتریس متغیرهای مستقل شامل مؤلفه های اقلیمی (دما، بارش، تبخیر و رطوبت نسبی) و همچنین متغیر هیدرولیکی (تراز ایستابی در ماه پیشین) در یک دوره آماری ۲۰ ساله مبنای تحلیل قرار گرفت.



شکل ۵. نمودار توابع عضویت گوسی بهینه شده در لایه ورودی سامانه ANFIS برای پارامترهای: الف) تبخیر کل، ب) بارندگی کل، ج) دمای حداکثر، د) میانگین رطوبت نسبی

Fig 5. Optimized Gaussian membership functions in the input layer of the ANFIS model for parameters: a) Total evaporation, b) Total rainfall, c) Maximum temperature, d) Average relative humidity

پیاده سازی رویکرد 5-fold بر روی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در فازهای آموزش و آزمون برای چاه های مشاهداتی در جدول ۲ خلاصه شده است. همچنین، نتایج معیارهای خطاسنجی برای شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و سامانه استنتاج عصبی-فازی تطبیقی به ترتیب در جدول های ۳ و ۴ ارائه شده است.

فرایند گام به گام و بلوک دیاگرام اجرایی مراحل این پژوهش در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است.

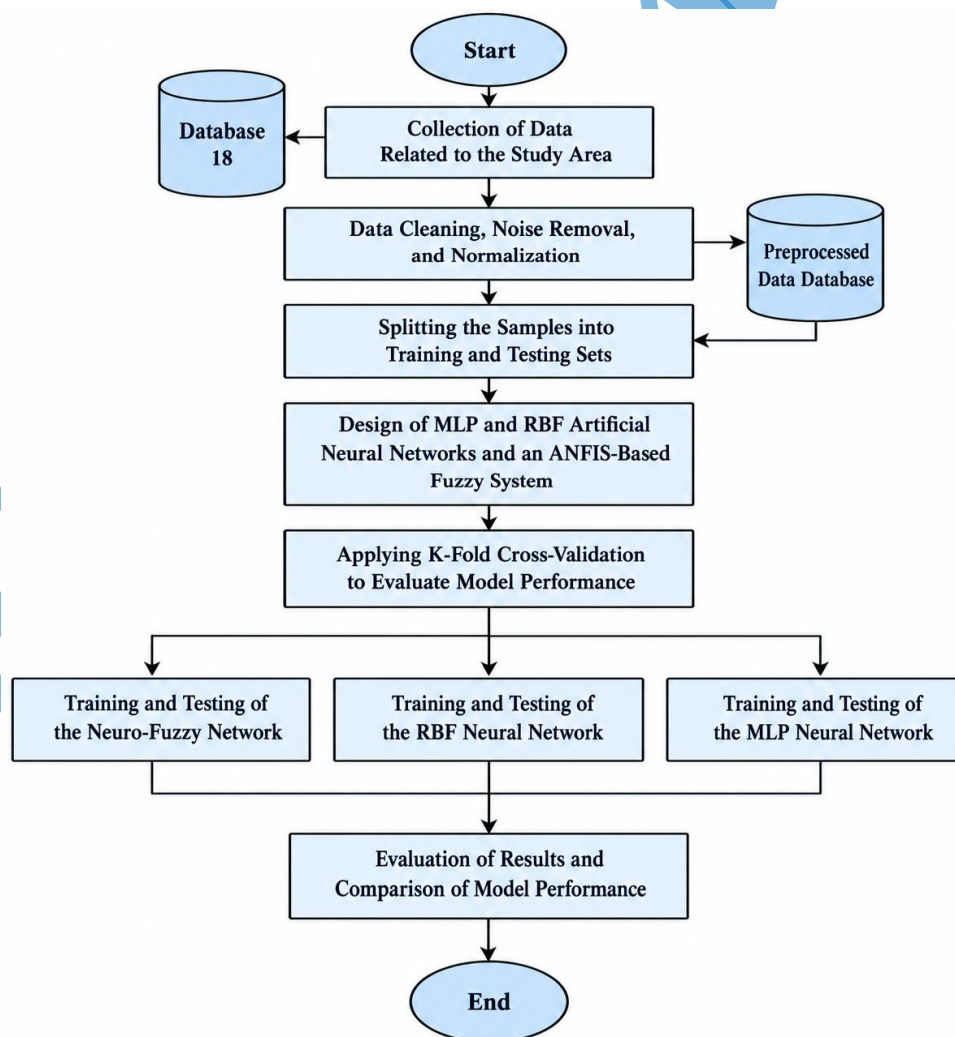
نتایج و بحث

پس از اعمال فرایند پیش پردازش و تنظیم ساختار الگوریتم های هوشمند بر پایه روش اعتبارسنجی متقاطع، شبیه سازی تراز ایستابی آبخوان انجام شد. نتایج حاصل از

۰/۰۲ تا ۰/۰۵ متر قرار گرفته است. این امر نشان می دهد که الگوریتم پس انتشار خطا با تنظیم بهینه وزن ها، الگوهای غیرخطی بین پارامترهای اقلیمی (مانند بارش و تبخیر) و تراز آب را تا حد زیادی شناسایی کرده است. از سوی دیگر، نتایج عملکرد شبکه عصبی تابع پایه شعاعی که در جدول ۴ خلاصه شده است، نشان دهنده افت نسبی دقت در مقایسه با مدل MLP است. اگرچه مدل RBF به دلیل ساختار تک لایه ای خود در لایه پنهان، سرعت آموزش بسیار بالاتری را ثبت نمود، اما میانگین خطای RMSE آن در فاز آزمون افزایش یافته و به بازه ۰/۰۵ تا ۰/۰۸ متر رسید.

پس از پیاده سازی ساختارهای مختلف هوش مصنوعی بر روی ماتریس داده های ۱۸ چاه مشاهداتی دشت زاوه - تربت حیدریه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع ۵ تایی، خروجی معیارهای عملکردی عملکرد متفاوتی را در فازهای آموزش و آزمون نشان می دهند.

با ارزیابی داده های مندرج در جدول ۳، مشخص می شود که شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) با الگوریتم آموزش لوببرگ - مارکوارت، توانایی بالایی در ردیابی روند کلی نوسانات تراز ایستابی دارد. میانگین ضریب تبیین R^2 این مدل در فاز آزمون برای چاه های مختلف در بازه ۰/۸۸ تا ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطا، آن در محدوده



شکل ۶. فلوچارت و الگوریتم گام به گام مراحل شبیه سازی و پیش بینی تراز آب زیرزمینی در این پژوهش

Fig 6. Flowchart and step-by-step algorithm of simulation and prediction stages of groundwater level in this study

جدول ۲. نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی به روش K-fold با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

Table 2. Performance Metrics of k-Fold Cross-Validation for Multilayer Perceptron (MLP) Neural Network in Groundwater Table Elevation Prediction

	Error 5	Error 4	Error 3	Error 2	Error 1	Average Error
First Iteration	0.023	0.027	0.008	0.029	0.028	0.023
Second Iteration	0.028	0.026	0.026	0.022	0.025	0.023
Third Iteration	0.029	0.025	0.012	0.021	0.025	0.033
Fourth Iteration	0.008	0.021	0.027	0.022	0.026	0.026
Fifth Iteration	0.027	0.022	0.026	0.017	0.032	0.025

Average RMSE of a Two-Layer Perceptron Neural Network with 10 Neurons in the First Layer and 2 Neurons in the Second Layer over 25 Runs: 0.026

جدول ۳. نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی به روش Kfold بر روی شبکه عصبی RBF

Table 3. Performance Metrics of k-Fold Cross-Validation for Radial Basis Function (RBF) Neural Network in Groundwater Table Elevation Prediction

	Error 5	Error 4	Error 3	Error 2	Error 1	Average Error
First Iteration	0.0632	0.0580	0.0632	0.0638	0.0616	0.0620
Second Iteration	0.0602	0.0623	0.0617	0.0644	0.0607	0.0619
Third Iteration	0.0585	0.0637	0.0629	0.0622	0.0622	0.0619
Fourth Iteration	0.0629	0.0621	0.0608	0.0638	0.0603	0.0620
Fifth Iteration	0.0587	0.0620	0.0627	0.0605	0.0655	0.0619

Average RMSE of the RBF Neural Network with 10 Hidden-Layer Neurons over 25 Test Runs: 0.062

جدول ۴. نتایج پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی به روش Kfold با استفاده از شبکه فازی عصبی

Table 4. Performance Metrics of k-Fold Cross-Validation for Fuzzy Neural Network (ANFIS) in Groundwater Table Elevation Prediction

	Error 5	Error 4	Error 3	Error 2	Error 1	Average Error
First Iteration	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
Second Iteration	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
Third Iteration	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004
Iteration Fourth	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002
Fifth Iteration	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002

Average RMSE of the Neuro-Fuzzy Network with 6 Membership Functions per Feature: 0.003

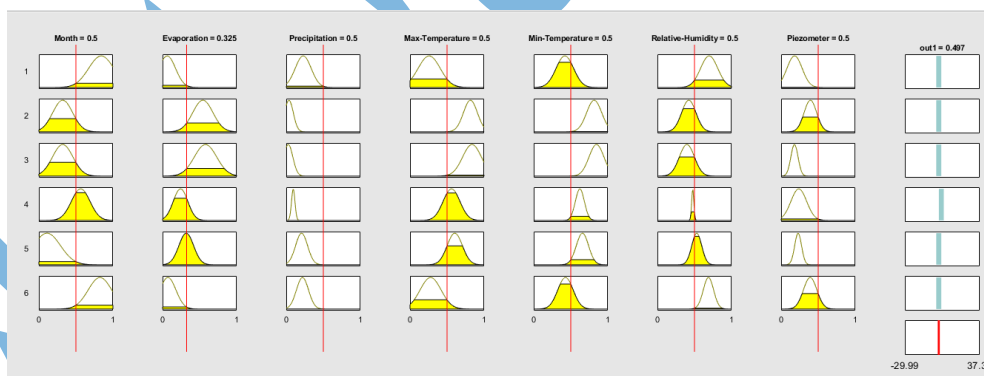
دلیل تلفیق هم‌زمان قواعد فازی و قدرت یادگیری شبکه‌های عصبی، توانسته است خطا را به شکل چشمگیری کاهش دهد؛ به‌طوری که میانگین خطای RMSE آزمون در این مدل به کمترین میزان خود یعنی ۰/۰۰۳ متر تقلیل یافته و ضریب تبیین R^2 در تمامی پی‌زومترها به عدد ایده‌آل ۱ نزدیک شده است.

تحلیل تطبیقی معیارهای ارزیابی در میان سه مدل پیاده‌سازی شده نشان می‌دهد که تفاوت معناداری در نحوه

علت این امر را می‌توان به توابع محرک گوسی در این شبکه نسبت داد که در مواجهه با عدم قطعیت‌های شدید هیدروکلیماتی و نوسانات ناگهانی تراز ایستابی ناشی از برداشت‌های جائزانه، انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به ساختار چندلایه پرسپترون دارند. تحلیل نهایی بر روی یافته‌های جدول ۵ که منعکس‌کننده نتایج سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی است، برتری قاطع و معنی‌دار این رویکرد هیبریدی را به اثبات می‌رساند. مدل انفیس به

وزن‌ها و پارامترهای توابع عضویت را به‌گونه‌ای تنظیم کند که مدل در برابر نوسانات تصادفی و خطاهای اندازه‌گیری پیزومترها پایداری فوق‌العاده‌ای از خود نشان دهد. این پدیده دلیل اصلی افت چشمگیر مقدار RMSE و نزدیک شدن ضریب تبیین به حد ایده‌آل در مدل ANFIS است. برتری مدل ANFIS (جدول ۵) در مقایسه با مدل‌های عصبی خالص (جدول ۳ و ۴) برخاسته از این واقعیت هیدروژئولوژیکی است که پارامترهای ورودی (مانند رطوبت نسبی، بارندگی و تبخیر) همواره با عدم قطعیت‌های سامان‌مند و پدیده‌های تصادفی اقلیمی همراه‌اند. منطق فازی با تعریف توابع عضویت گوسی بهینه‌شده، این ابهامات و نقاط فازی را در فضای ورودی به طور کامل پوشش داده و مانع از گمراهی شبکه در فاز آزمون می‌شود. در نتیجه، این مدل ترکیبی به‌عنوان مدلی معتبر برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت تراز پیزومتری آبخوان زاوه معرفی می‌گردد.

پاسخگویی ساختارهای مختلف به نوسانات غیرخطی آبخوان وجود دارد. مدل MLP به دلیل برخورداری از چندین لایه پنهان و توابع فعال‌ساز سیموئید، توانسته است برهم‌کنش‌های پیچیده میان پارامترهای اقلیمی و هیدرولیکی را تا حد زیادی ردیابی کند؛ با این حال، در مواجهه با نوسانات شدید و ناگهانی ناشی از پمپاژهای سنگین کشاورزی (به‌ویژه در ماه‌های اوج مصرف زعفران در دشت زاوه)، با محدودیت مواجه شده است. از سوی دیگر، شبکه RBF به دلیل ماهیت محلی توابع پایه گوسی، سرعت همگرایی بالایی داشته؛ اما در مدل‌سازی روندهای بلندمدت و پوشش طیف وسیعی از تغییرات داده‌ها با افت دقت روبه‌رو شده است. در مقابل، توانایی مدل هیبریدی ANFIS ناشی از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و توانایی منطق فازی در مدیریت عدم قطعیت‌های زبانی و محیطی است. ساختار سامانه استنتاج فازی به کار رفته در ANFIS قادر است فضای ورودی را به زیرفضاهای منطقی افزایش کرده و با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی،



شکل ۷. نمودار پراکنش و خط برازش مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر محاسباتی تراز سطح آب زیرزمینی در مدل ANFIS

Fig 7. Scatter plot and regression line of observed vs. predicted groundwater level values in the ANFIS model

جدول ۵. مقایسه صحت عملکرد شبکه‌های عصبی و فازی عصبی با استفاده از روش K-FOLD

Table 5. Performance Comparison of Neural Network and Fuzzy Neural Network Models using k-Fold Cross-Validation

خطا Error (RMSE)	نوع شبکه Network Type
0/026	MLP
0/062	RBF
0/003	ANFIS

برهم‌کنش پیچیده عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی است. عملکرد مناسب هر سه مدل هوشمند بیانگر آن است که متغیرهای اقلیمی منتخب شامل بارش، تبخیر، دما و رطوبت نسبی در کنار مؤلفه تأخیری تراز آب زیرزمینی، اطلاعات کافی برای بازسازی رفتار زمانی آبخوان را در اختیار مدل قرار داده‌اند.

وجود متغیر «تراز آب ماه قبل» در میان ورودی‌ها و دقت بالای مدل‌ها نشان می‌دهد که آبخوان دارای حافظه هیدرولوژیکی قابل توجهی است؛ به این معنا که شرایط هیدرولیکی هر ماه تا حد زیادی تحت تأثیر وضعیت ذخیره آبخوان در دوره قبل قرار دارد. این رفتار در بسیاری از آبخوان‌های آبرفتی مناطق خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شود که در آن‌ها فرایندهای تغذیه و تخلیه به‌صورت تدریجی انجام شده و پاسخ آبخوان نسبت به تغییرات اقلیمی دارای تأخیر زمانی است.

همچنین نتایج بیانگر آن است که تغییرات اقلیمی به تنهایی قادر به توضیح تمامی نوسانات سطح آب زیرزمینی نیستند و احتمالاً عوامل انسانی به‌ویژه برداشت گسترده آب برای مصارف کشاورزی نیز در شکل‌گیری روند افت سطح آب نقش مؤثری ایفا می‌کنند. توانایی بالای مدل ANFIS در بازسازی این رفتار پیچیده نشان می‌دهد که روابط میان متغیرهای اقلیمی و پاسخ هیدرولوژیکی آبخوان ماهیتی غیرخطی داشته و نمی‌توان آن‌ها را صرفاً با روابط کلاسیک خطی توصیف نمود.

از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، برتری مدل ANFIS نسبت به MLP و RBF حاکی از آن است که تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان زاوه با عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرپذیری اقلیمی، نوسانات زمانی تغذیه آبخوان و الگوی برداشت از منابع آب همراه است. استفاده از قواعد فازی در ساختار ANFIS امکان مدل‌سازی بهتر این عدم قطعیت‌ها را فراهم نموده و سبب شده است مدل بتواند رفتار واقعی آبخوان را با دقت بیشتری بازتولید نماید.

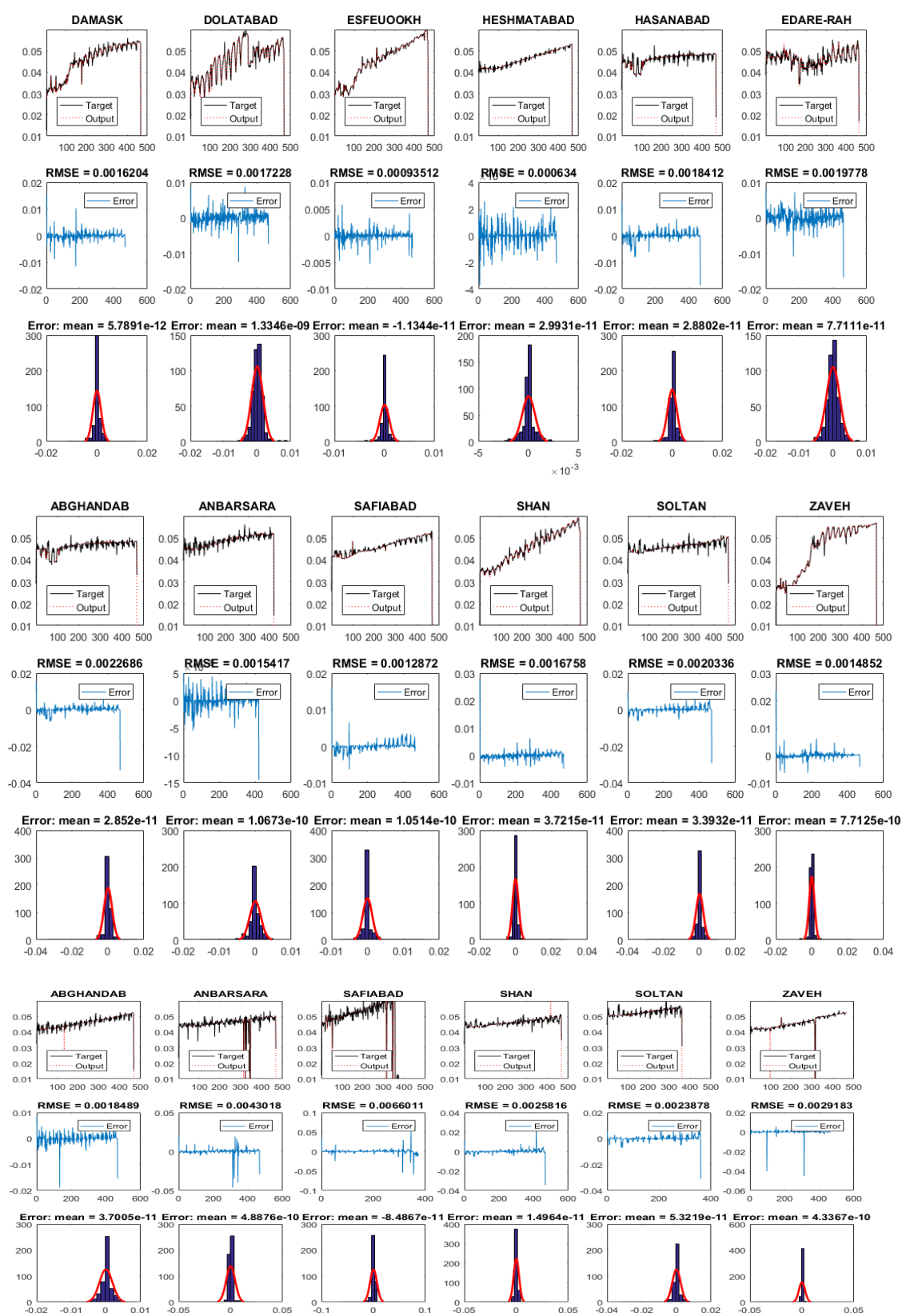
لازم به ذکر است که تمامی معیارهای خطای گزارش‌شده در این مطالعه مانند RMSE بر اساس داده‌های نرمال‌سازی شده در بازه $[0, 1]$ محاسبه شده‌اند. در مقیاس فیزیکی واقعی (متر)، می‌باشد. این دقت بالا، نشان‌دهنده ظرفیت بالای مدل در شناسایی الگوهای تکرارشونده در سری‌های زمانی سطح آب زیرزمینی در منطقه زاوه است؛ با این حال، با توجه به وابستگی مدل به مقدار با وقفه $(t-1)$ ، این دقت باید در چارچوب مدل‌های خودبازگشتی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های نشت داده، تفسیر گردد.

جهت تصویرسازی و سنجش دقیق‌تر توانایی مدل برتر در ردیابی گام‌های زمانی نوسانات هیدرولیکی، نمودار مقایسه‌ای تراز سطح آب زیرزمینی پیش‌بینی‌شده توسط سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) در مقابل مقادیر دیده‌بانی‌شده (واقعی) برای تمامی ۴۷۸ رکورد آماری در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

همان‌طور که در این منحنی‌ها مشخص است، مدل انفیس با انعطاف‌پذیری بسیار بالا توانسته است نه تنها روند کلی و سرازیری‌های تراز آب زیرزمینی ناشی از افت پیرومتری دشت زاوه را ردیابی کند، بلکه در تخمین نقاط حدی، نوسانات فصلی و پیک‌های صعودی و نزولی آبخوان نیز کمترین انحراف فاز را نشان می‌دهد. انطباق نزدیک به کامل خط‌چین پیش‌بینی بر روی منحنی واقعیت، گویای این است که مدل فازی - عصبی به دلیل بهره‌گیری از الگوریتم آموزش ترکیبی پایداری بالایی در تعمیم‌پذیری الگوها داشته و گزینه‌ای کاملاً قابل‌اعتماد برای مدیریت پیش‌بین و صیانت از منابع آب زیرزمینی منطقه در مواجهه با بحران‌های اقلیمی به شمار می‌رود.

تحلیل هیدروژئولوژیکی نتایج

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان زاوه - تربت حیدریه تابعی از



شکل ۸. منحنی مقایسه‌ای روند تغییرات گام‌های زمانی مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده تراز سطح آب زیرزمینی توسط مدل ANFIS

Fig 8. Comparative curves of observed vs. predicted groundwater level time-steps using the ANFIS model

بودن شبکه به سطح آب با وقفه (h_t-1) را افزایش می‌دهد. ما در این پژوهش با تکیه بر داده‌های هیدرواقليمی تلاش کردیم رفتارهای کلی سامانه را شبیه‌سازی کنیم، اما اذعان داریم که برای دستیابی به مدل‌های هیدرولوژیکی با پایه فیزیکی دقیق‌تر، فراهم‌سازی زیرساخت‌های لازم برای ثبت و پایش میزان برداشت آب توسط نهادهای مسئول در منطقه، یک ضرورت انکارناپذیر برای پژوهش‌های آتی است.

همچنین، در خصوص یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی، لازم به ذکر است که ترکیب رکوردهای پیژومتری از ۱۸ حلقه چاه در یک مدل واحد، با هدف دستیابی به یک الگوی رفتاری کل‌نگر از کل آبخوان منطقه زاوه انجام شده است. هرچند این رویکرد به مدل اجازه می‌دهد تا رفتار کلی سامانه آبخوان را در برابر ورودی‌های اقلیمی شبیه‌سازی کند، اما محدودیت نادیده گرفتن ناهمگونی‌های مکانی را در بر دارد. پژوهش‌های آتی می‌توانند با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی مکانی یا مدل‌های ترکیبی مکانی-زمانی، رفتار انفرادی هر پیژومتر را با دقت بیشتری تفکیک کرده و همبستگی‌های بین‌چاهی را در ساختار مدل لحاظ کنند.

نتیجه‌گیری

از دیدگاه مدل‌سازی، متغیر سطح آب با وقفه (h_t-1) در این مطالعه صرفاً یک داده‌ی عددی نیست، بلکه به‌عنوان یک متغیر جایگزین عمل می‌کند که اثرات ثابت هیدروژئولوژیکی منطقه (نظیر نفوذپذیری محلی و ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان) را به‌صورت ضمنی در خود رمزگذاری کرده است. از آنجایی که این ویژگی‌های فیزیکی در طول دوره مطالعه ثابت هستند، تراز آب با وقفه به‌عنوان یک آینه، رفتارهای پیچیده و محلی آبخوان را در مدل منعکس می‌کند. این رویکرد، به مدل اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به داده‌های تفکیک‌شده‌ی پمپاژ،

در مجموع، نتایج این پژوهش مؤید آن است که آبخوان زاوه - تربت‌حیدریه یک سامانه هیدروژئولوژیکی با رفتار غیرخطی و وابستگی زمانی قابل توجه است و مدل‌های هوشمند به‌ویژه سامانه استنتاج عصبی - فازی می‌توانند ابزار مناسبی برای پایش و پیش‌بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی در این آبخوان باشند.

محدودیت‌ها و ملاحظات روش‌شناختی

مطالعه حاضر نخستین تلاش برای استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در منطقه زاوه است. اگرچه مدل توسعه‌یافته عملکرد پایداری نشان می‌دهد، ذکر برخی محدودیت‌های روش‌شناختی ضروری است. استفاده از اعتبارسنجی متقابل ۵ لایه استاندارد که برای ایجاد یک مدل پایه در این منطقه با کمبود داده انتخاب شد، ممکن است به دلیل ماهیت سری زمانی داده‌های پیژومتریک، پتانسیل نشت داده‌های زمانی و مکانی را داشته باشد. از آنجایی که این مطالعه به‌عنوان تلاشی پیشگامانه برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های اولیه ۱۸ حلقه چاه پیژومتریک انجام شده است، هدف اصلی ما اثبات امکان‌سنجی استفاده از مدل ANFIS در این زمینه بود. پژوهش‌های آتی که بر اساس پایگاه داده‌های طولی ایجاد شده در این کار بنا می‌شوند، باید پروتکل‌های اعتبارسنجی سخت‌گیرانه‌تری مانند اعتبارسنجی پنجره غلتان را به کار بگیرند تا دقت پیش‌بینی را بیش از پیش ارتقا داده و از حذف کامل هم‌پوشانی‌های زمانی اطمینان حاصل کنند.

علاوه بر ملاحظات روش‌شناختی، یکی دیگر از محدودیت‌های مهم این پژوهش، فقدان دسترسی به داده‌های دقیق و ثبت‌شده از میزان برداشت (پمپاژ) از چاه‌های منطقه زاوه است. پمپاژ آب زیرزمینی به‌عنوان عامل مسلط در بیلان منفی آبخوان‌های این منطقه، متغیری حیاتی است که نبود آن در مدل‌سازی، متکی

امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی نوسانات تراز سفره را در کل دشت زاوه - تربت حیدریه فراهم می‌سازد. با توجه به بیان منفی آبخوان در سال‌های اخیر و استمرار افت سطح آب، خروجی‌های این مدل پیش‌بین می‌تواند به‌عنوان یک سامانه پشتیبان تصمیم‌گیر در اختیار متولیان و برنامه‌ریزان بخش آب و کشاورزی منطقه قرار گیرد. این مدل با ترسیم چشم‌انداز تراز هیدرولیکی دشت، نقشی کلیدی در تغییر الگوی کشت، کنترل برداشت‌های جائزانه و به‌ویژه تعیین زون‌های بهینه و پتانسیل‌سنجی اراضی برای توسعه کشت محصولات راهبردی، کم‌آبر و با ارزش اقتصادی بالا نظیر زعفران (که قطب تولید آن در این محدوده مطالعاتی است) ایفا خواهد نمود.

به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی، توصیه می‌شود کارایی سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی با الگوریتم‌های فراابتکاری نوین و پیشرفته (نظیر الگوریتم‌های تکاملی جدید، بهینه‌سازی‌های مبتنی بر ازدحام پیشرفته و یادگیری تقویتی) جهت تنظیم بهینه‌تر پارامترهای توابع عضویت مقایسه شود. همچنین، توسعه مدل در مقیاس‌های زمانی میان‌مدت و بلندمدت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم می‌تواند افق‌های دقیق‌تری را برای صیانت و مدیریت پایدار از این آبخوان راهبردی ترسیم نماید.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد UTH:1402/09/28208 از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تربت حیدریه می‌باشد که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین نویسندگان بر خود لازم دانسته از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی بابت در اختیار دادن آمار و اطلاعات محدوده مطالعاتی قدردانی نمایند.

دینامیک‌های حاکم بر آبخوان را با دقت بالایی فراخوانی کند.

پیش‌بینی دقیق نوسانات تراز ایستابی در آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، ابزاری حیاتی در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی‌های کلان کشاورزی به شمار می‌رود.

در پژوهش حاضر، کارایی سه رویکرد هوشمند داده‌محور شامل شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه، تابع پایه شعاعی و سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی مبتنی بر روش اعتبارسنجی متقاطع ۵ تایی (5-fold Cross_V Validation)، جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی در ۱۸ چاه مشاهداتی دشت زاوه- تربت حیدریه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

یافته‌های حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم‌های هوش مصنوعی با برقراری نگاشت‌های غیرخطی بین پارامترهای هیدروکلیماتی ورودی (بارندگی، تبخیر، رطوبت نسبی، دماهای حد آستانه) و مؤلفه هیدرولیکی تأخیری، توانایی بالایی در ردیابی رفتار هیدرودینامیکی آبخوان دارند.

ارزیابی‌های مقایسه‌ای بر پایه معیارهای آماری خطاسنجی نشان داد که سامانه ANFIS مجهز به توابع عضویت گوسی در لایه ورودی و الگوریتم آموزش ترکیبی (Hybrid)، با کاهش چشمگیر ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0.003$) و ثبت بالاترین ضریب تبیین ($R^2 = 0.9934$)، برتری قاطعی نسبت به مدل‌های عصبی خالص MLP و RBF دارد. این برتری برخاسته از ماهیت قانون‌محور منطق فازی در مواجهه با عدم قطعیت‌های حاکم بر پدیده‌های اتمسفری و تصادفی هیدرولوژیکی است.

از منظر کاربردی و مدیریت هیدروژئولوژیکی، مدل هوشمند ارائه‌شده در این مطالعه نه تنها تراز سطح ایستابی را در مقیاس تک‌چاه‌ها با دقت بالا تخمین می‌زند، بلکه

Zabbah, I., Heydaran, Z., Behzadiyan, B. and Rezaie, R. (2023). Fuzzy evaluation of the appearance characteristics of saffron using methods based on artificial intelligence. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 24(85), 75-90.

<https://doi.org/10.22092/amsr.2024.364271.14711>

منابع

- Nohani, E., Babaali, H., and Dehghani, R. (2025). The Impact of Climate Change Parameters on Groundwater Level Decline (Case Study: Kuhdasht-Lorestan). *Journal of Aquifer and Qanat*, 6(1), 87-106. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9841.1119> [In Persian]
- Nohani, Babaali, H., and Dehghani. (2026). Evaluation of metaheuristic models in groundwater level analysis of Delfan Plain, Lorestan. *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 79-98. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8834.1096> [In Persian]
- Dastuorani, M., Khayat, A., and Akhondi, Z. (2026). Evaluation of the Accuracy of Wavelet-Neuro-Fuzzy, Neuro-Fuzzy, and Wavelet Hybrid Models in Groundwater Level Prediction (Case Study: Birjand Plain). *Journal of Aquifer and Qanat*, 5(2), 139-154. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.9046.1105> [In Persian]
- Edalat, A., Rajabi, A. M., & Khodaparast, M. (2022). Numerical modeling of groundwater flow in Ali Abad Plain of Qom to predict fluctuations of the water table and hydraulic conductivity. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(2), 49-67.
- Adeli Sardooei, M., Asadi, A., Kalantari, K., Barati, A. A., & Khosravi, H. (2021). Predicting groundwater level changes in Jiroft plain and its relationship with developing cropping pattern of horticultural crops. *Irrigation and Water Engineering*, 11(4), 175-194. <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.133758> [In Persian]
- Khayyat, A., Amirabadizadeh, M., Pourreza Bilondi, M., and Khozaymehnezhad. (2021). Prediction of groundwater level in Birjand Plain using the Fuzzy Artificial Neural Network under the effects of climate change. *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(1), 38-51. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2021.1863> [In Persian]
- Nikbakht, J. (2016). Groundwater level forecasting using Wavelet-Artificial Neural networks (Case study: Maragheh Plain, East Azerbaijan). *Hydrogeology*, 1(1), 29-43. <https://doi.org/10.22034/hydro.2016.4681>
- Navale, V., & Mhaske, S. (2023). Artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for Forecasting groundwater level in the Pravara River Basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2663-2676. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01639-5>