



Monitoring and forecasting the spatio-temporal changes of groundwater storage in the Kuhdasht aquifer

Mahdi Soleimani-Motlagh ¹ , Ali Haghizadeh ² , Tayebah Sepahvand ³ , Negar Arjmand ³

1. Assistant Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: soleimani.m@lu.ac.ir
2. Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: haghizadeh.a@lu.ac.ir
3. Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran, Email: tayebspv.1998@gmail.com, negar.arjmand87@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: <i>Research Article</i> Article history: Received 09 July 2026 Revised 05 August 2026 Accepted 25 August 2026 Available online 23 September 2026 Keywords: Groundwater Monitoring Time Series Forecasting Machine Learning Storage Deficit Kohdasht Plain	Introduction Drought and excessive extraction of groundwater in recent decades has led to a groundwater decline, and negative water balance. Kuhdasht Plain in Lorestan Province, despite having relatively suitable hydrological conditions, has not been exempt from this rule, and its groundwater resources have shown a decreasing trend. Objectives The aim of this study is to quantify and predict changes in groundwater storage in Kuhdasht Plain by analytical models, time series, and machine learning. Materials and Methods The hydrograph of the Koohdasht aquifer was plotted based on monthly water level data from 13 piezometric wells, and the annual changes in aquifer storage volume were calculated using a two-dimensional analysis method within a GIS environment. To predict fluctuations in groundwater level and storage, time series models including AR, MA, ARMA, ARIMA, and SARIMA were combined with machine learning algorithms such as Linear Regression, Random Forest, and Gradient Boosting. Results The results showed that the groundwater level of the plain has decreased by an average of 0.37 m/year and the balance deficit in dry years has reached about 15 MCM. Negative values of the SPEI-12m (≤ -1.5) better reflected the impact of drought in dry years on the status of the groundwater. However, increased withdrawal from wells in dry years are important factor of groundwater decline. Evaluation of machine learning algorithms demonstrated the high accuracy of combining linear regression with different time series models in all piezometric wells ($R^2 > 0.98$ and RMSE < 0.4 m in some wells) to predict groundwater levels. The optimal time series model for Khoshnamvand, Sari, Omur Ashayer, Zaq Zalyab, Boglan, Qaralyvand, Jadhe Keshavarzi wells and for other wells were determined as AR(2), AR(3), ARIMA(2,1,2), MA(2), SARIMA(0,1,1)(0,1,1,12), ARMA(1,1), Optimized SARIMA, and Optimized ARIMA, respectively. Final Conclusion The findings indicated a 9.5-meter drop in groundwater level over 15 years and a storage deficit of up to 15 MCM in dry years. Despite a relative recovery in wet years, the downward trend in groundwater level is still persistent, which is most likely controlled by the increase in exploitation of groundwater resources. The combination of time series models with linear regression algorithm was selected as the best model and predicted aquifer storage deficit for the water years 1404-05 and 1405-06 to be about -0.7 and -1.22 million cubic meters, respectively. In such circumstances, a fundamental revision of the exploitation pattern, installation of smart meters, and watershed management measures to implement artificial recharge plans is inevitable.

Cite this article: Soleimani-Motlagh, M., Haghizadeh, A., Sepahvand, T., Arjmand, M. (2026). Monitoring and forecasting the spatial-temporal changes of groundwater storage in the Kuhdasht aquifer. *Journal of Ecohydrology*, 13(3), 1479-1514 <https://doi.org/10.22059/ije.2026.415775.1915>



© Author(s) retain the copyright.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.415775.1915>

Introduction

Groundwater aquifers are vital freshwater sources, supplying about 40% of global drinking water, yet excessive abstraction and recurrent droughts have caused significant water table declines, land subsidence, and water supply crises worldwide. In Iran, the imbalance between extraction and recharge has led to an average annual decline of 0.5 meters across many plains over the past 15 years, with an estimated total depletion of 74 billion cubic meters between 2002 and 2015. The Koohdasht plain in Lorestan Province, despite favorable hydro-climatic conditions, has experienced a negative water balance, with a recorded 22.5-meter decline over 29 years. Previous studies have applied various methods ranging from analytical models and MODFLOW to time series (AR, MA, ARMA, ARIMA, SARIMA) and machine learning algorithms (Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, SVM, and LSTM) to monitor, simulate, and predict groundwater fluctuations and storage changes in different regions, demonstrating the superiority of hybrid and nonlinear approaches. Accordingly, the present study not only quantifies annual aquifer depletion and storage variations using a two-dimensional flow equation within a GIS framework but also integrates time series models with machine learning to predict water level and storage changes at piezometric wells, representing a novel contribution beyond previous research.

Objective

The primary objective of this research is to monitor and predict changes in groundwater storage in the Koohdasht plain through the integration of analytical models, time series analysis, and machine learning approaches. The main goal is to forecast future groundwater levels and storage deficits by combining time series models (AR, MA, ARMA, ARIMA, and SARIMA) with machine learning algorithms. Ultimately, this research seeks to develop a clear understanding of the aquifer's historical and current behavior, thereby providing a scientific basis for informed management interventions including reduced abstraction and the implementation of artificial recharge strategies to ensure the sustainable management of groundwater resources in the region.

Material and Method

This study was conducted in the Koohdasht plain, Lorestan Province, covering an area of 1,129.3 km², with groundwater level data from 13 piezometric wells over a 15-year period (2007–2022). Annual aquifer storage changes were calculated using the two-dimensional storage equation within a GIS framework. The drought impact on groundwater analysed by SPEI index. For groundwater level and storage prediction, a hybrid approach combining time series models (AR, MA, ARMA, ARIMA, SARIMA) with machine learning algorithms (Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting) was implemented in Python, using 70% of data for training and 30% for testing. Model performance was evaluated using R², NSE, RMSE, MAE, and MAPE statistical criteria to ensure accuracy and reliability of predictions.

Finding

Monitoring of the Koohdasht plain aquifer over the 15-years (2007–2022) revealed a general declining trend in groundwater levels, with a total drop of approximately 5.9 meters (average 0.37 m/year), despite temporary recovery during wet years (2017–2020). Spatial analysis indicated that the most severe declines and storage deficits occurred in the northeastern, southeastern, and central parts of the aquifer, particularly during hydrological years 2007–2008, 2009–2010, 2012–2013, 2014–2015, and 2016–2017, with annual storage losses reaching up to 15 million m³ in critical years. The SPEI-12 drought index showed a weak correlation with groundwater fluctuations ($r \approx 0.18$ at an 11-month lag), suggesting that anthropogenic over-abstraction, rather than climate variability alone, is the primary driver of aquifer depletion. Among the predictive models, hybrid AR/ARIMA with Linear Regression ($\alpha = 0.1$) consistently outperformed other combinations, achieving $R^2 > 0.98$ and $NSE > 0.98$ for most piezometric wells during testing, while Random Forest and Gradient Boosting hybrids showed comparatively lower accuracy, particularly in capturing extreme values. Forecasts for the upcoming years (2025–26 and 2026–2027) indicate near-normal conditions with slight negative storage changes (−0.7 to −1.22 million m³), suggesting a modest improvement compared to historical deficits, yet emphasizing the continued need for managed abstraction and artificial recharge strategies.

Conclusion

This study confirms that the Koohdasht plain aquifer is experiencing a sustained declining trend, reflecting the broader groundwater depletion crisis observed like most Iranian plains. Although the aquifer exhibits a notable capacity for partial recovery during wet periods evidenced by storage gains of 17–25 million m³ in 2017–2020 the overall negative balance persists, primarily driven by excessive agricultural abstraction rather than climatic variability alone, as substantiated by the weak correlation between the SPEI-12 index and groundwater fluctuations. Spatially, the most critical depletion zones are concentrated in the northeastern, southeastern, and central sectors, where high well density and intensive cropping systems exert maximum stress on the aquifer. From a methodological standpoint, the integration of time series models (AR, ARIMA, and SARIMA) with Linear Regression as a hybrid forecasting framework proved highly effective, consistently outperforming both standalone models and combinations with more complex algorithms such as Random Forest and Gradient Boosting. The superior performance of these hybrid approaches underscores their potential as reliable decision-support tools for groundwater prediction. However, future projections for 2025-26 and 2026-27 indicate only a modest attenuation of historical decline rates (−0.7 to −1.22 million m³), and these estimates should be interpreted with caution, as they do not account for exacerbating factors such as consecutive droughts, rising temperatures, or increased evapotranspiration, which could intensify actual deficits. Collectively, these findings necessitate a paradigm shift in groundwater governance, moving from reactive crisis management to proactive, science-based planning. Essential interventions include enforcing pumping regulations, promoting water-efficient cropping patterns, adopting modern irrigation technologies, implementing artificial recharge schemes, and establishing a robust monitoring network with smart metering systems. Future research should extend the hybrid modeling framework by incorporating climate change scenarios, adaptive management strategies, and spatially explicit storage coefficients, while also addressing uncertainty quantification, to enable long-term, resilient water resource planning in the region.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study were obtained from the Regional Water Company of Lorestan and the Lorestan Meteorological Organization (IMO). These datasets are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support of Lorestan University for this research under grant number 1404-7-11-1405

Ethical considerations

This study was conducted based on hydrological data with no human or animal subjects, and all sources have been properly cited to ensure intellectual honesty.

Funding

This research was supported by Lorestan University under grant number 1404-7-11-1405.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.



پایش و پیش‌بینی تغییرات مکانی - زمانی ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت

مهدی سلیمانی مطلق^{۱*}، علی حقی‌زاده^۲، طیبه سپهوند^۳، نگار ارجمند^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، رایانامه: soleimani.m@lu.ac.ir

۲. استاد، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، رایانامه: haghizadeh.a@lu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران، رایانامه: tavebspv.1998@gmail.com
negar.arjmand87@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	مقدمه: خشکسالی و افزایش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر باعث افت سطح ایستابی، کسری بیلان و بحران تأمین آب در بسیاری از مناطق ایران شده است. دشت کوهدشت در استان لرستان علی‌رغم شرایط هیدرولوژیکی نسبتاً مناسب، از این قاعده مستثنا نبوده و منابع آب زیرزمینی آن کاهش پیدا کرده است. اهداف: هدف این پژوهش، تعیین و پیش‌بینی تغییرات سطح و ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت با استفاده از تلفیق مدل‌های تحلیلی، سری‌های زمانی و یادگیری ماشین است. مواد و روش: هیدروگراف واحد آبخوان دشت کوهدشت بر اساس داده‌های تراز سطح آب ماهانه ۱۳ چاه پیرومتری ترسیم و تغییرات حجم ذخیره سالانه آبخوان با روش تحلیل دوبعدی در محیط GIS محاسبه شد. برای پیش‌بینی تغییرات سطح و ذخیره آب زیرزمینی، مدل‌های سری زمانی AR، MA، ARMA، SARIMA و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر رگرسیون خطی^۱، جنگل تصادفی^۲ و گرادیان تقویتی^۳ ترکیب شدند. یافته‌ها: نتایج نشان داد سطح آب زیرزمینی دشت به طور متوسط سالانه ۰/۳۷ متر افت داشته (درمجموع، حدود ۵/۹ متر در دوره مطالعه) و کسری بیلان در سال‌های خشک به حدود ۱۵ میلیون متر مکعب رسیده است. مقادیر منفی شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه ($-1/5 \leq$)، اثرگذاری عامل خشکسالی در سال‌های خشک را بر وضعیت منابع آب زیرزمینی آشکار کرد. علاوه بر این، تراکم و افزایش حجم برداشت چاه‌ها در سال‌های خشک عامل اصلی افت آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه است. پهنه‌بندی مکانی، بیشترین افت را در بخش‌های شمال شرقی، جنوب شرقی، مرکزی و بخش محدودی از غرب آبخوان نشان داد. ارزیابی الگوریتم‌های یادگیری ماشین مبین دقت بالای ترکیب رگرسیون خطی با مدل‌های مختلف سری زمانی در تمامی چاه‌های پیرومتری جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی بود. مدل بهینه سری زمانی برای چاه‌های خوشناموند، ساری، امور عشایر، ذق ذالیاب، بوگلان، قرعلیوند، جاده کشاورزی و برای سایر چاه‌ها به ترتیب AR(3)، AR(2)، ARIMA(2,1,2)، Optimized ARIMA و Optimized SARIMA، SARIMA(0,1,1)(0,1,1,12)، MA(2) تعیین شدند. کارایی این مدل‌های ترکیبی نشان داد ضریب تعیین در برخی چاه‌ها بالای ۰/۹۸ و خطای RMSE کمتر از ۰/۴ متر است. نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه بیانگر افت ۵/۹ متری سطح آب زیرزمینی طی ۱۵ سال و کسری ذخیره تا ۱۵ میلیون مترمکعب در سال‌های خشک است که با وجود بازایی نسبی در ترسالی‌ها، همچنان روند نزولی سطح آب زیرزمینی پابرجا است که به احتمال زیاد توسط افزایش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی کنترل می‌شود. تحلیل آماری تغییرات سطح آب زیرزمینی با مقادیر شاخص خشکسالی SPEI این موضوع را تأیید می‌کند. ترکیب مدل‌های سری زمانی با الگوریتم رگرسیون خطی در چاه‌های پیرومتری مختلف به عنوان بهترین مدل انتخاب شد و کسری ذخیره آبخوان را برای سال‌های آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ و ۱۴۰۵ - ۱۴۰۶ به ترتیب حدود ۰/۷- و ۱/۲۲- میلیون مترمکعب پیش‌بینی کرد. در چنین شرایطی، بازنگری اساسی در الگوی بهره‌برداری، نصب کنتورهای هوشمند و اقدامات آبخیزداری جهت اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی اجتناب‌ناپذیر است.

استناد: سلیمانی مطلق، مهدی؛ حقی‌زاده، علی؛ سپهوند، طیبه؛ ارجمند، نگار. (۱۴۰۵). پایش و پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت.



<https://doi.org/10.22059/ije.2026.415775.1915>

مجله اکوهیدرولوژی، ۱۳(۳)، ۱۴۷۹-۱۵۱۴

© مهدی سلیمانی مطلق، علی حقی‌زاده، طیبه سپهوند، نگار ارجمند

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

1. Linear Regression
2. Random Forest
3. Gradient Boosting

مقدمه

آبخوان‌ها به عنوان اصلی‌ترین و در دسترس‌ترین مخازن تأمین آب شیرین، سهمی معادل ۴۰ درصد از منابع آب آشامیدنی جهان را به خود اختصاص می‌دهند. با این وجود، برداشت‌های مفرط و مستمر از این منابع در سال‌های اخیر، کاهش محسوس سطح تراز آب زیرزمینی را در پی داشته که خود عاملی برای وقوع پدیده‌هایی همچون فرونشست زمین و تشدید بحران کمبود آب شده است (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۱۸). به دلیل عدم توازن بین برداشت و تغذیه، آبخوان‌های کشور دارای افت هستند، به طوری که متوسط افت سالانه ۰/۵ متری سطح آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشور در ۱۵ سال اخیر نشان‌دهنده مدیریت ناصحیح منابع آب زیرزمینی است (عزیزی و همکاران، ۲۰۲۱). روند نزولی آب زیرزمینی از مسائل مهمی است که در جهان به دلیل افزایش تقاضای آب برای مصارف مختلف و تکرار وقوع خشکسالی‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. این مسئله در ایران به علت عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی تشدید شده، به طوری که طبق تحقیق اشرف و همکاران (۲۰۲۱)، افت کل آب زیرزمینی در ایران حدود ۷۴ میلیارد مترمکعب طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ برآورد شده است. چنانچه این موضوع مورد توجه پژوهشگران، مسئولان و مدیران قرار نگیرد، پیامدهای بی‌شماری از جمله تشدید بحران منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شور شدن اراضی، فرونشست زمین، مهاجرت، نزاع‌های محلی و در نهایت تخریب سرزمین را در پی خواهد داشت. این موضوع نیز شامل دشت‌های واقع شده در استان‌های غرب کشور از جمله استان لرستان می‌شود، هرچند این استان از وضعیت هیدرواقليمی مناسبی برخوردار است. منابع آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت بر اثر تنش‌های کم‌آبی و یا برداشت زیاد از آبخوان دچار بیلان منفی شده است و وضعیت منابع آب زیرزمینی در این محدوده چندان مناسب نیست. بررسی هیدروگراف معرف آبخوان این دشت برای یک دوره ۲۹ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷) نشان داده سطح آب زیرزمینی حدود ۲۲/۵ متر (به طور متوسط ۷۷ سانتی‌متر در سال) افت کرده است (فیجانی و همکاران، ۲۰۲۱). از این رو، روند نزولی افت آب زیرزمینی و عدم تعادل بیلان از مسائل مهم این دشت محسوب می‌شود. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد افت آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های کشور مشهود است و برای کاهش یا کنترل آن‌ها از جمله دشت کوه‌دشت به شناخت عملکرد سفره آب زیرزمینی و راهکارهای عملی جهت تقویت و تغذیه آبخوان نیاز است. همچنین، پایش و پیش‌بینی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت برای مدیریت منابع آب زیرزمینی آن ضروری است.

به منظور پایش و پیش‌بینی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت توجه و بررسی تحقیقات پیشین ضروری است. به طور مثال، بایزیدی و کاکي (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات حجم ذخیره و بهره‌برداری از آبخوان‌های دشت شرق استان کردستان طی دوره ۳۱ ساله (۱۳۶۶ تا ۱۳۹۷) پرداختند و نتیجه گرفتند که مخازن این دشت ۲۲/۲ میلیون متر مکعب افت کرده است. عزیزی و همکاران (۲۰۲۱) به محاسبه بیلان آب زیرزمینی دشت ورامین پرداختند و تغییرات حجم ذخیره آبخوان‌ها را با روش تحلیلی به دست آوردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سطح ایستابی دشت روند افت و دارای بیلان منفی است. ابراهیمی خوسفی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی میزان تغییرات سطح ایستابی و حجم ذخایر آبی آبخوان‌های غربی تالاب گاوخونی در دوره آماری ۱۳۷۰ - ۱۳۹۲ پرداختند و برای محاسبه سطح تراز ایستابی از روش تیسن استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها مبین کاهش حجم ذخیره به میزان ۲۲۹ میلیون متر مکعب است. پورمحمدی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی بیلان آب زیرزمینی دشت توپسرکان همدان به کمک مدل مادفلو پرداختند که تغییرات ذخیره حجم آبخوان‌ها را از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۸ از طریق مدل تحلیلی به دست آوردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سطح ایستابی دشت توپسرکان رو به کاهش است. شیرافکن و جعفری (۲۰۱۳) به بررسی بیلان آبی دشت بهاباد استان یزد پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد میزان افت سطح ایستابی دشت در قسمت‌های شمالی ۶۰ سانتی‌متر و در قسمت‌های جنوبی ۴۰ سانتی‌متر بوده است. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر عوامل اقلیمی بر افت سطح ایستابی دشت ساوه را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد خشکسالی با یک تغییر ۵ ماهه بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت ساوه اثر می‌گذارد. الیائوتی و همکاران (۲۰۰۸) پژوهشی در آبخوانی در مصر انجام دادند که در آن به بررسی تغییرات آب دشت به کمک مدل GMS پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی به تغییرات فصلی و آبیاری وابسته است. اسلامیان و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی دوره‌های ترسالی و خشکسالی اثرات آن را بر تغییرات منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز دشت بوئین زهرا بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بین وقوع ریزش‌های جوی و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه

ارتباط معناداری وجود دارد و این موضوع در مورد بیشتر ایستگاه‌ها صادق است. مک و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات سطح آب زیرزمینی را با استفاده از روش‌های ناپارامتریک در حوضه کابل افغانستان بررسی کردند و دریافتند که سطح آب زیرزمینی حوضه در حال کاهش است. کونیکوف (۲۰۱۵) با ارزیابی آبخوان‌های ایالات متحده آمریکا دریافتند که حجم آب زیرزمینی ذخیره‌شده حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مکعب بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۸ کاهش یافته است و سه آبخوان دشت‌های مرتفع، می‌سی‌سی‌پی و دره مرکزی کالیفرنیا بیشترین سهم را در این تخلیه داشته‌اند. مایمونا و همکاران (۲۰۱۹) توزیع مکانی و زمانی ذخیره آب زیرزمینی را در حوضه‌هایی در کره طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ ارزیابی کردند و با محاسبه ذخیره آب زیرزمینی مشاهده کردند که طی ۶۵ سال سطح آبخوان ۳۳ میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

در زمینه پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی خراسانی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های تصادفی سری زمانی (ARIMA فصلی)، به پیش‌بینی نوسانات آب زیرزمینی دشت کبودرآهنگ برای ۳ سال آینده پرداختند. مدل انتخاب‌شده با ضریب همبستگی ۹۸ درصد نسبت به داده‌های اندازه‌گیری، عملکرد بسیار مطلوبی در شبیه‌سازی کوتاه‌مدت نشان داده است. میرکماندار و همکاران (۲۰۲۵) طی پژوهشی نشان دادند مدل $ARIMA(5,2,5)$ قادر به شبیه‌سازی روند کاهشی سطح آب زیرزمینی در آبخوان شمال کرمان بوده و علت اصلی آن را برداشت بیش از حد کشاورزی معرفی کرده است. در سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی تحول چشمگیری ایجاد کرده است. به عنوان مثال، حسینی و خوش‌سیمای چنار (۱۴۰۴) در تحقیقی با هدف جایگزینی روش‌های سنتی، دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی را برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ۲۰ ساله بارش، دما، تبخیر و برداشت از آبخوان را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد الگوریتم جنگل تصادفی با مقادیر R^2 برابر ۰/۸۵ در دوره آموزش و ۰/۷۱ در دوره آزمون و کاهش تعداد متغیرهای ورودی از ۶ به ۱ بدون کاهش محسوس دقت، عملکرد بهتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان داشته است. یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه جنگل تصادفی با مقاومت بالا در برابر هم‌خطی، می‌توانند جایگزینی کارآمد و قابل اعتماد برای روش‌های سنتی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی و مدیریت پایدار منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک، باشند. جورج و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد مقایسه‌ای مدل‌های مختلف یادگیری ماشین را در پیش‌بینی دقیق سطح آب‌های زیرزمینی بررسی کردند. در مطالعه یادشده از یک مدل ترکیبی جدید ARIMA و Gradient Boosting برای پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی استفاده شد و آن را با مدل‌های سنتی از جمله $ARIMA$ ، $XGBoost$ ، $LightGBM$ ، جنگل تصادفی و درخت‌های تصمیم‌گیری مقایسه کردند. مدل ترکیبی $ARIMA-XGBoost$ با تلفیق توانایی تحلیل سری‌های زمانی و یادگیری غیرخطی، دقت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی را نسبت به مدل‌های منفرد مانند جنگل تصادفی و درخت تصمیم به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. اسراد (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای عملکرد پنج مدل یادگیری ماشین نظیر رگرسیون تقویت‌کننده گرادین (GBR¹) ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، درخت تصمیم و رگرسیون خطی را برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه تمچا از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ را بر اساس متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بارندگی، دما و تبخیر و تعرق ارزیابی کردند. بین مدل‌ها، GBR با میانگین خطای مطلق ۰/۰۷ متر، راندمان نش - ساتکیل ۷۹۳۴/۰ متر و ضریب تعیین ۷۸۵۶/۰ و درصد انحراف ۴۰۸/۲ درصد، عملکرد برتر را نشان داد. نوری و همکاران (۲۰۲۵) بر اساس مطالعه داده‌های ۲۷ چاه مشاهده‌ای (۱۹۹۰ - ۲۰۲۴) دریافتند که سطح آب زیرزمینی در سیلپت واقع در شمال شرقی بنگلادش روند نزولی معناداری داشته، به طوری که با تخریب پوشش گیاهی و گسترش شهری مرتبط است. از میان مدل‌های پیش‌بینی، LSTM-RNN با بیشترین دقت در شرایط غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به $ARIMA$ و جنگل تصادفی نشان داده است.

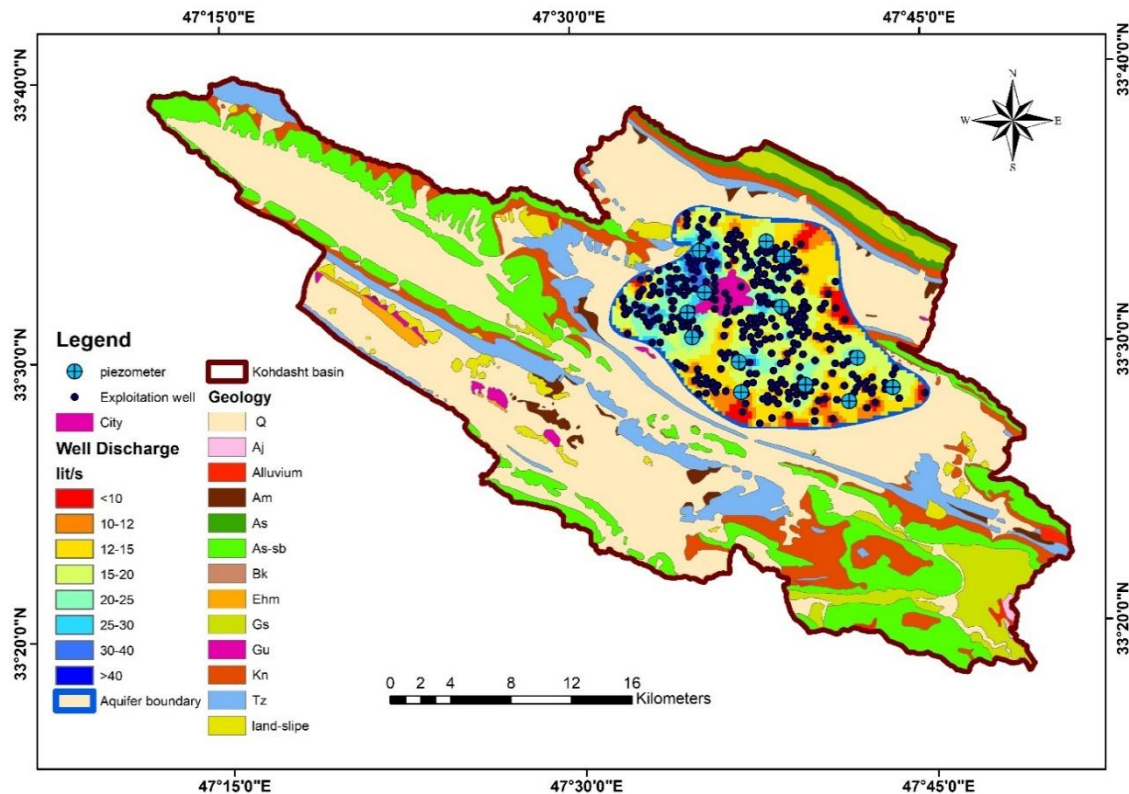
مقبول و همکاران (۲۰۲۶) با تحلیل داده‌های هیدروشمیایی و تراز آب زیرزمینی دشت چینپوت پاکستان (۲۰۱۳ - ۲۰۲۳) و استفاده از چهار مدل یادگیری ماشین از جمله $XGBoost$ ، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و جنگل تصادفی (RF) نشان دادند مدل $XGBoost$ با دقت بالایی ($R^2=0.86$) افت سطح آب را تا سال ۲۰۲۸ در دوره‌های خشک (۸/۳۵ متر) و

تر (۷/۶۵ متر) پیش‌بینی می‌کند. این پژوهش تأکید می‌کند که کاربرد مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین، به‌ویژه XGBoost، می‌تواند ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب و تغییرات کیفی آن در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی باشد. مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد اغلب مطالعات استفاده مجزای روش‌های تحلیلی، مدل‌های عددی یا الگوریتم‌های سری‌زمانی و یادگیری ماشین را مد نظر داشته‌اند و رویکردهای تلفیقی جامع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، چارچوبی نوآورانه مبتنی بر تلفیق سه‌گانه حل معادله دویعدی جریان در آبخوان، مدل‌های سری‌زمانی (AR, MA, ARMA, ARIMA, SARIMA) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین (رگرسیون خطی، جنگل تصادفی و گرادیان تقویتی) ارائه می‌دهد. از جنبه‌های جدید این مطالعه می‌توان به توسعه مدل‌های هیبریدی اختصاصی برای هر یک از چاه‌های پیژومتری و لحاظ کردن تأخیرهای فصلی، میانگین و انحراف معیار متحرک و تبدیلات سینوسی - کسینوسی، تهیه نقشه‌های سالانه کسری ذخیره آبخوان در ابعاد پیکسلی، ارزیابی کمی هم‌زمان تأثیر خشکسالی و برداشت انسانی و پیش‌بینی کسری ذخیره آبخوان برای سال‌های آتی اشاره کرد. به این ترتیب، پژوهش حاضر از حیث رویکرد ترکیبی چندبعدی، دقت مکانی در پهنه‌بندی تغییرات و ارائه مدل‌های پیش‌بینی به تفکیک هر چاه مشاهده‌ای، تمایزی آشکار با مطالعات پیشین داشته و می‌تواند الگویی کارآمد برای سایر آبخوان‌های کشور محسوب شود.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت کوهدشت بین طول‌های $47^{\circ}12'$ تا $47^{\circ}52'$ شرقی و عرض‌های $33^{\circ}17'$ تا $33^{\circ}41'$ شمالی واقع شده است. این محدوده با مساحت $1129/3$ کیلومتر مربع از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبخیز کرخه است. حدود $248/8$ کیلومتر مربع از محدوده مطالعاتی را دشت و $182/1$ کیلومتر مربع را آبخوان تشکیل می‌دهند. متوسط بارش در ارتفاعات و دشت به ترتیب 468 و $451/2$ میلی‌متر محاسبه شده است. میانگین دمای سالانه دشت 16 درجه سانتی‌گراد و در ارتفاعات $14/7$ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، میزان تبخیر در ارتفاعات و دشت به ترتیب $2030/4$ و $2124/5$ میلی‌متر در سال است (فیجانی و همکاران، ۲۰۲۱). محدوده مورد مطالعه در مرز زاگرس مرتفع و چین‌خورده واقع شده است (هادی‌پور هفشجانی و همکاران، ۲۰۱۸). در منطقه مطالعه‌شده آهک مارنی سفیدرنگ امام حسن و سازند گورپی (کرتاسه بالایی) قدیمی‌ترین واحد سنگی و جدیدترین آن نهشته‌های آبرفتی کواترنری است (فیجانی و همکاران، ۲۰۲۱). آبخوان کوهدشت در نهشته‌های آبرفتی کواترنر واقع شده و توسط رسوبات گورپی، سازند امیران، سازند آهک تله زنگ، مارن و ماسه‌سنگ کشکان، ماسه‌سنگ‌های آهکی و مارن قرمز و ژئیت‌دار گچساران و آهک آسماری - شهبازان احاطه شده است. در محدوده مورد مطالعه سازند گورپی و امیران از نظر هیدروژئولوژی نقش چندانی در تغذیه آبخوان ایفا نمی‌کنند، اما در مقابل واحد آهکی تله زنگ دارای پتانسیل خوبی برای تغذیه آبخوان کوهدشت از طریق مجاری کارستی است. واحد آواری کشکان دیگر واحد زمین‌شناسی در محدوده مطالعاتی است که پتانسیل تشکیل آبخوان‌های درزه و شکاف‌دار را دارد. مهم‌ترین واحد کارستی دیگر در محدوده مطالعاتی سری آهک شهبازان - آسماری است که از قابلیت خوبی در ذخیره و انتقال آب زیرزمینی برخوردار بوده و نقش مهمی در تغذیه آبخوان کوهدشت ایفا می‌کند. آخرین واحد سنگی رخنمون‌شده واحد تبخیری گچساران بوده که نه تنها تأثیری در تغذیه آبخوان ندارد، بلکه نقش زیادی در کاهش کیفیت آب دارد (احمدی‌پور و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز، آبخوان و سازندهای زمین‌شناسی کوهدشت همراه با پراکنش چاه‌های پیزومتری، بهره‌برداری و دبی آن‌ها

برآورد تغییرات سالانه آبخوان

تغییرات حجم مخزن نسبت به تغییرات سطح ایستابی، برای تحلیل‌های دوبعدی آبخوان از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Fitts, 2002):

$$dV = S.A.dh \quad (۱)$$

که در آن dV تغییرات حجم مخزن، S ضریب ذخیره آبخوان (ضریب ذخیره آبخوان دشت کوهدشت برابر ۳ درصد بر مبنای گزارش سال ۱۳۹۴ مهندسين مشاور آب و توسعه پایدار (۲۰۱۵) در نظر گرفته شده است)، A سطح آبخوان (km^2)، dh تغییرات سطح ایستابی آبخوان (m) است. به منظور محاسبه تغییرات سطح ایستابی سالانه آبخوان، ابتدا مساحت تحت تأثیر هر چاه مشاهداتی از روش تیسن محاسبه شده و در رقوم سطح ماهانه هر چاه ضرب می‌شود. سپس، مجموع حاصل ضرب آن‌ها برای تمام چاه‌های پیزومتری بر کل مساحت آبخوان تقسیم می‌شود و در مقیاس ماهانه هیدروگراف واحد آبخوان به دست می‌آید. در نهایت با تفاضل سطح تراز آب اولین و آخرین ماه سال آبی، تغییرات سطح ایستابی سالانه آبخوان در محیط GIS به دست می‌آید.

محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI^1)

این شاخص توسط ویسنت - سرانو و همکاران (۲۰۱۰) توسعه یافت. این شاخص میزان مازاد یا کمبود آب را برای یک زمان مشخص در نظر می‌گیرد. SPEI از توزیع لگاریتمی - لجستیک سه پارامتره برای تفاوت بین بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. طبقه‌بندی این شاخص مشابه شاخص استاندارد شده بارش (SPI^2) است (سلیمانی مطلق و همکاران، ۲۰۲۲). در این مطالعه، SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در محیط R محاسبه شد.

1. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index
2. Standardized Precipitation Index

پیش‌بینی تغییرات تراز و ذخیره آب زیرزمینی

به منظور پیش‌بینی حجم تغییرات سطح ایستابی و ذخیره آب زیرزمینی از ترکیب مدل‌های سری زمانی AR، MA، ARMA، ARIMA و SARIMA و مدل‌های یادگیری ماشین نظیر رگرسیون خطی^۱، جنگل تصادفی^۲ و Gradient Boosting با کد نویسی پایتون و اجرا در محیط Colab استفاده شد. در این پژوهش تراز آب زیرزمینی به عنوان متغیر وابسته و داده‌های بارش و دما به عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل‌سازی شدند. همچنین، ویژگی‌های تأخیری با تأخیرهای ۱ تا ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه (به منظور ثبت حافظه سری زمانی و وابستگی به مقادیر تاریخی سطح آب)، ویژگی‌های آماری متحرک شامل میانگین متحرک ۳، ۶ و ۱۲ ماهه و انحراف معیار متحرک ۳ و ۱۲ ماهه و ویژگی‌های فصلی شامل تبدیلات سینوسی و کسینوسی ماهانه برای سطح آب زیرزمینی (متغیر هدف) ایجاد شدند.

مدل‌های سری زمانی:

معادلات مربوط به چند مدل از مدل‌های سری زمانی نظیر AR، MA، ARMA در روابط ۲ تا ۴ آمده است:

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \varphi_2 Z_{t-2} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + \alpha_t \quad (2)$$

$$Z_t = \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \dots - \theta_q \alpha_{t-q} \quad (3)$$

$$Z_t = \varphi_1 Z_{t-1} + \dots + \varphi_p Z_{t-p} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \dots - \theta_q \alpha_{t-q} \quad (4)$$

که در روابط یادشده φ_1 ، φ_2 و φ_p ضرایب و پارامترهای مدل AR و θ_1 ، θ_2 و θ_q ضرایب و پارامترهای مدل MA و α_t متغیر تصادفی مستقل هستند (باکس و همکاران، ۲۰۱۶).

مدل‌های یادگیری ماشین

رگرسیون خطی:

رگرسیون خطی به عنوان ساده‌ترین مدل یادگیری ماشین، رابطه خطی بین متغیرهای ورودی (نظیر بارش و دما) و سطح آب زیرزمینی را به صورت رابطه ۵ مدل‌سازی می‌کند (احترام و بندکوک، ۲۰۲۳):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n \quad (5)$$

که در آن β_0 ، β_1 و β_n ضرایب رگرسیون و x_1 متغیر ورودی اول (بارش) و x_n متغیر ورودی n ام است.

جنگل تصادفی:

جنگل تصادفی یک روش یادگیری گروهی است که توسط بریمن (۲۰۰۱) معرفی شد، این روش در کاهش بیش‌برازش داده‌ها، مدیریت مجموعه داده‌های بزرگ و ثبت روابط غیرخطی پیچیده توانایی دارد (آدام و همکاران ۲۰۲۶). در این روش، چندین نمونه تصادفی با جایگذاری از مجموعه داده‌های آموزشی استخراج می‌کند و به ازای هر نمونه، یک درخت رگرسیون مجزا ایجاد می‌کند. هر درخت $h_i(x)$ یک پیش‌بینی انجام می‌دهد و در نهایت، خروجی نهایی جنگل تصادفی از میانگین‌گیری پیش‌بینی‌های تمام این درختان به دست می‌آید (داوری و همکاران، ۲۰۲۶).

$$\hat{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M h_i(x) \quad (6)$$

گرایان تقویتی (Gradient Boosting):

از قدرتمندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که در دسته‌بندی گروهی قرار می‌گیرد. این الگوریتم با ترکیب چند درخت تصمیم، یک مدل قوی با پیش‌بینی‌های دقیق می‌سازد. در روش گرایان تقویتی، مدل‌ها به صورت متوالی ساخته می‌شوند؛ به

طوری که هر مدل جدید روی خطاهای باقی‌مانده حاصل از پیش‌بینی گروهی مدل‌های قبلی، برازش داده می‌شود. تابع هدف تلفیقی از تابع هزینه $L(y, \hat{y})$ (مانند هزینه مربع خطا) و جمله منظم‌سازی $(\Omega(ft))$ که اولی خطای مدل و دومی پیچیدگی مدل را کنترل می‌کند (داوری و همکاران، ۲۰۲۶).

$$L^{(t)} = \sum L(y_i, \hat{y}_i^{t-1} + f_t(x_i)) + \Omega(ft) \quad (7)$$

برای مدل‌سازی سری زمانی، داده‌های سطح آب زیرزمینی ۱۸۵ ماه در مدت ۱۵ سال (۱۳۸۶ - ۱۴۰۱) استفاده شدند که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد آن‌ها برای صحت‌سنجی مدل انتخاب شدند. از این‌رو، تغییرات سطح آب زیرزمینی و سپس، بر مبنای معادله تحلیل دوبعدی آبخوان، تغییرات ذخیره آبخوان (با اعمال میانگین عدد ۰/۰۳ برای کل آبخوان) طی ۲ سال آتی پیش‌بینی شد.

به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها در بخش آموزش و آزمون از معیارهای آماری زیر استفاده شد. مقادیر بالای نش - ساتکلیف و ضریب تعیین نزدیک به عدد ۱ نشان‌دهنده دقت زیاد مدل است. علاوه بر این، میزان خطای شبیه‌سازی در دو بخش آموزش و آزمون بر اساس معیارهای RMSE، MAE و MAPE بررسی شد و هر چه میزان آن‌ها نزدیک به صفر باشد، دقت مدل بیشتر است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

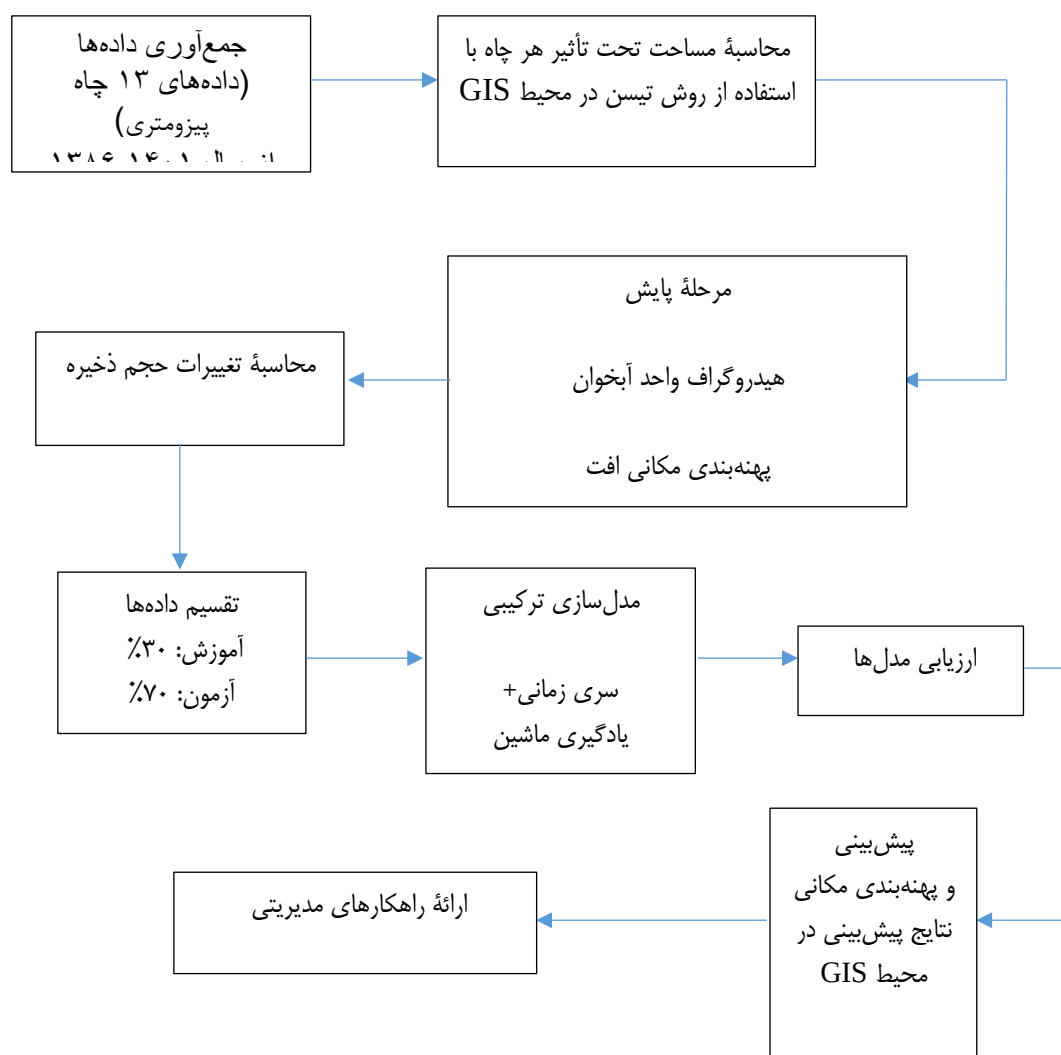
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \times 100 \quad (12)$$

در معادلات ۸ تا ۱۲ P_i و O_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح آب زیرزمینی هستند و n تعداد مشاهدات است.



شکل ۲. فلوجارت مراحل پژوهش پایش و پیش‌بینی آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت

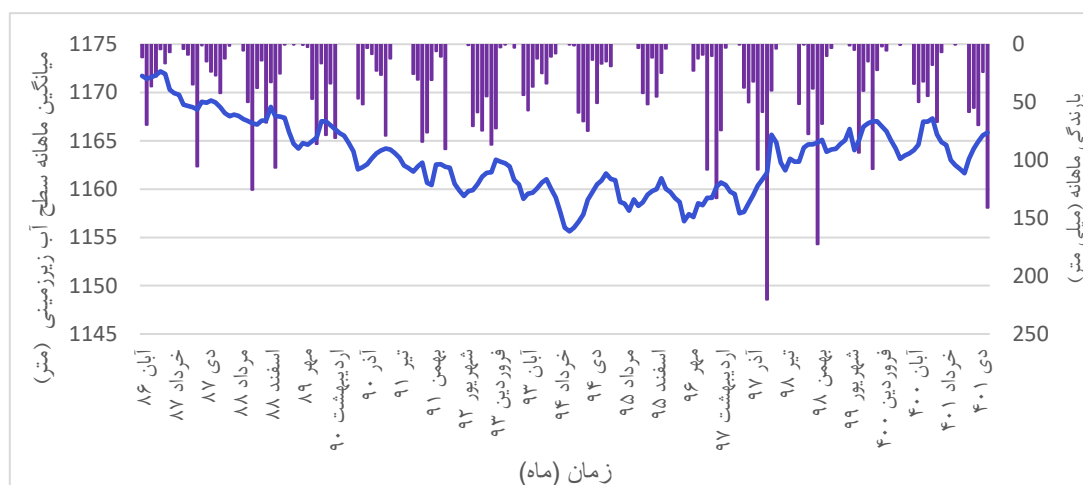
نتایج

پایش و پیش‌بینی سطح و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی از گام‌های اساسی در مدیریت منابع آب زیرزمینی است (دانداپات و همکاران، ۲۰۲۵). در این تحقیق ابتدا نتایج تغییرات و نوسانات سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت در قالب پایش و تحلیل هیدروگراف واحد آبخوان و همچنین، پهنه‌بندی مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی سالانه آبخوان ارائه شده است. در ادامه نتایج پایش و پیش‌بینی زمانی و مکانی ذخیره آب زیرزمینی آمده است.

هیدروگراف واحد آبخوان

به منظور بررسی و پایش تغییرات سطح ایستابی ماهانه و سالانه آبخوان، هیدروگراف واحد آبخوان دشت کوه‌دشت بر اساس داده‌های تراز آب ماهانه ۱۳ چاه پیزومتری ترسیم شد. مطابق نمودار شکل ۳ به طور کلی نتایج هیدروگراف واحد نشان می‌دهد روند سطح آب زیرزمینی در دوره مطالعه ۱۵ ساله از آبان ۱۳۸۶ تا آبان ۱۴۰۱ کاهشی است. گرچه به دلیل افزایش بارش افزایش قابل ملاحظه‌ای از سال ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۰ دیده می‌شود، اما در سال ۱۴۰۱ سطح آب زیرزمینی دوباره کاهش یافته است. بر اساس این نمودار تغییرات درون سالی در هر سال آبی معمولاً نمایانگر کاهش سطح آب طی دوره خشک از خرداد تا پایان مهرماه به علت بهره‌برداری آب زیرزمینی و قطع بارش و سپس افزایش سطح آب در دوره تر به علت وقوع بارش و قطع پمپاژ از آبان‌ماه تا

اردیبهشت‌ماه است. بر اساس این نمودار افت آب زیرزمینی در دوره مطالعه حدود ۵/۹ متر است که به طور متوسط معادل حدود ۰/۳۷ متر افت سالانه است.

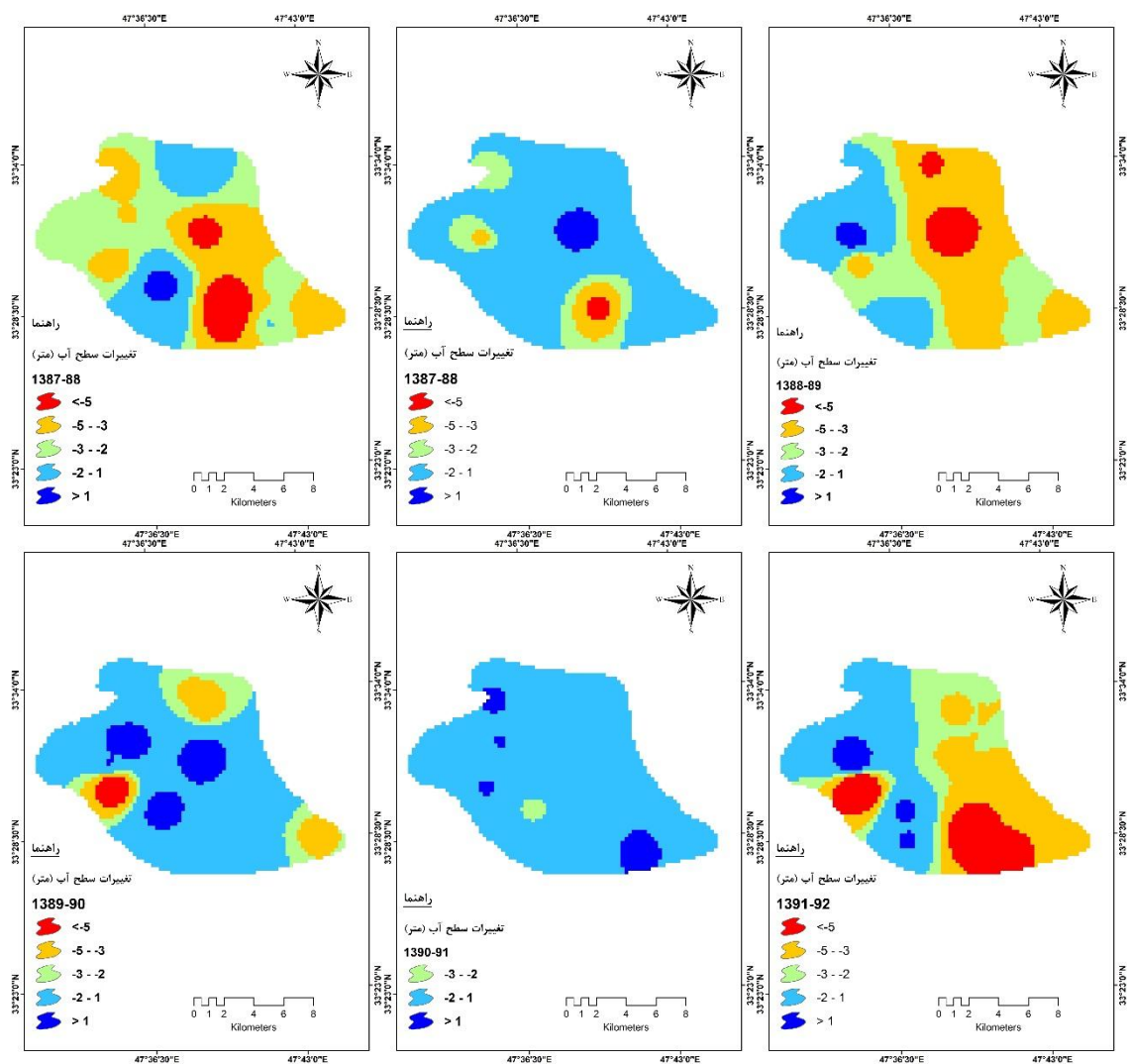


شکل ۳. هیدروگراف واحد آبخوان کوه‌دشت

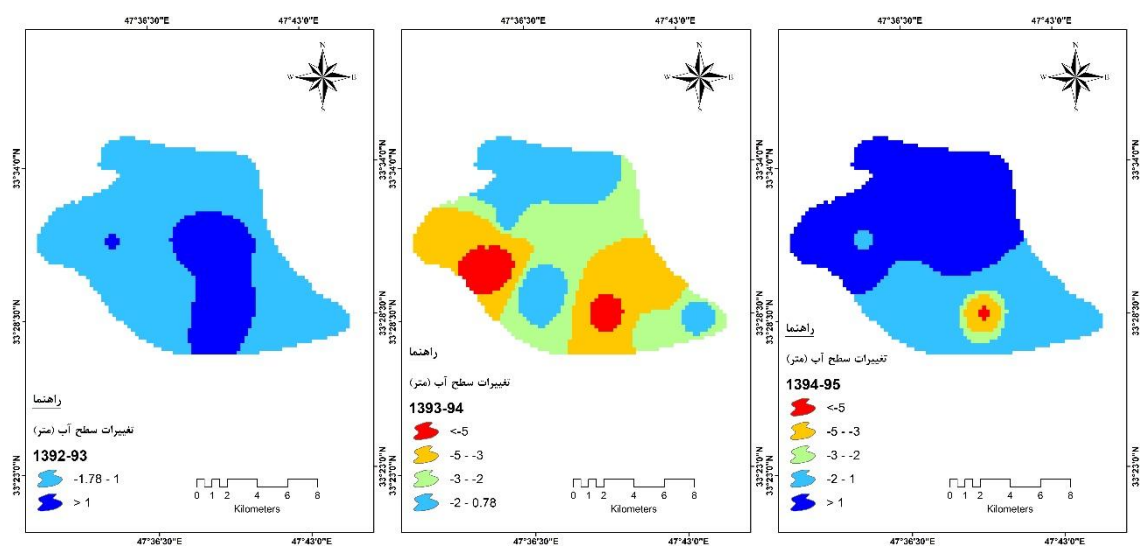
بررسی بارندگی ماهانه نشان می‌دهد نوسانات بارندگی در ماه‌های مختلف روی سطح آب زیرزمینی به صورت هم‌زمان یا با تأخیر یک یا چند ماهه تأثیر گذاشته است. به طور مثال، در اواخر سال ۱۳۹۷ و اوایل سال ۱۳۹۸ افزایش بارندگی به میزان بیش از ۲۰۰ میلی‌متر باعث افزایش حدود ۳ متری سطح آب زیرزمینی در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ شده است.

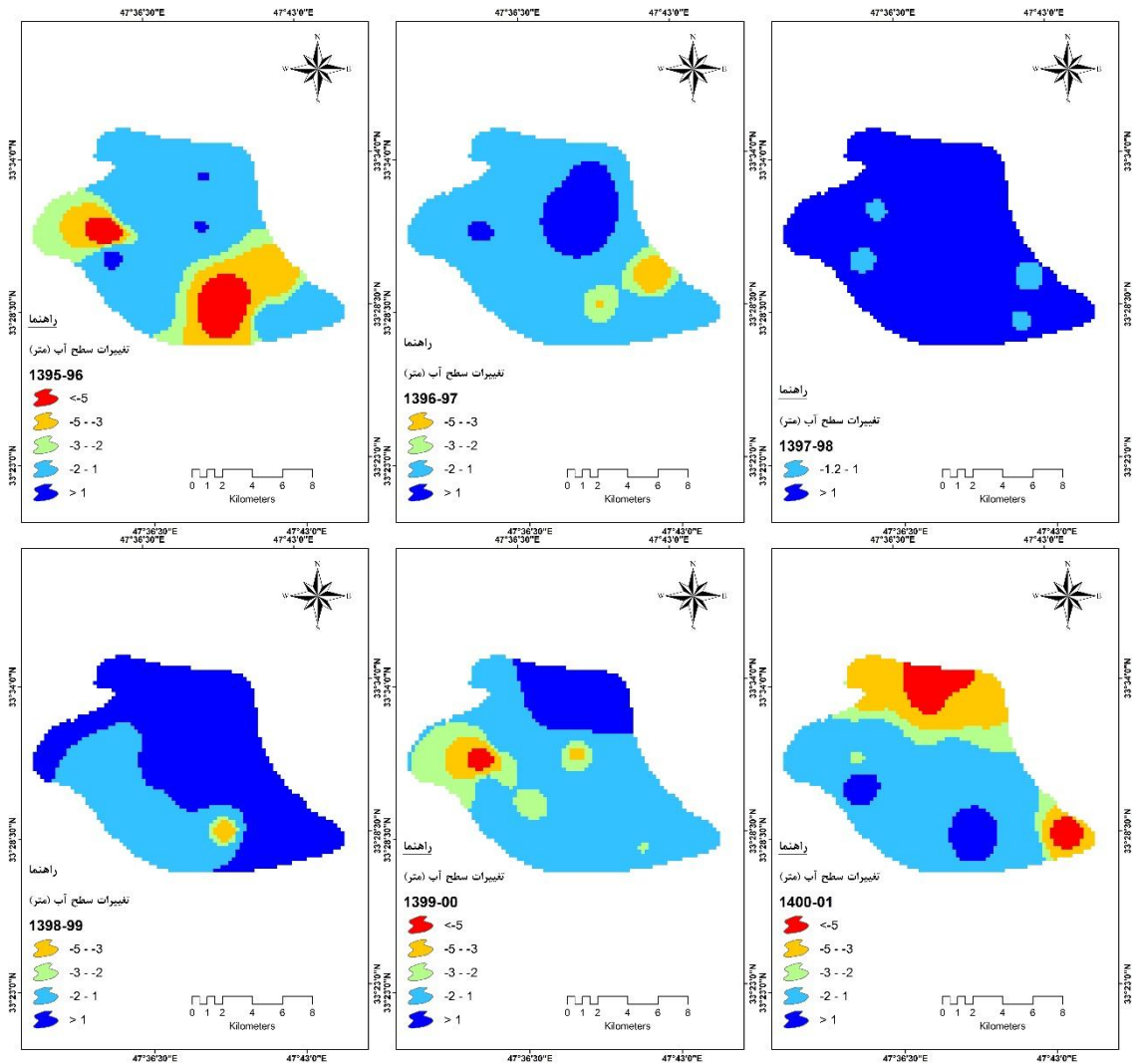
تغییرات مکانی نوسانات تراز سطح ایستابی آبخوان

شکل ۴ تغییرات مکانی نوسانات تراز سطح ایستابی طی سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد. هدف از ارائه این نقشه‌ها، ترسیم الگوی کلی نوسانات آب زیرزمینی در مقیاس سالانه است؛ هرچند که تغییرات سطح و افت آبخوان‌ها معمولاً در بازه‌های چندساله و درازمدت محاسبه می‌شود. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که آب زیرزمینی از ابتدای دوره تا سال آبی ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ عمدتاً به طور یک سال در میان احتمالاً به دلیل برداشت زیاد از آبخوان یا وقوع خشکسالی در برخی سال‌ها دارای افت قابل توجهی در گستره وسیعی از آبخوان بوده است. به طور مثال، تفاضل سطح تراز آب اولین و آخرین ماه سال آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ آبخوان دشت کوه‌دشت مبین افت بین ۱ تا بیش از ۵ متر در وسعتی بیش از ۹۵ درصد سطح آبخوان است. این مقدار افت در بخش شرق و جنوب شرقی آبخوان قابل توجه بوده است. همین‌طور وضعیت افت آب زیرزمینی در سال‌های آبی ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ در بخش شمال شرقی و جنوب شرقی دشت قابل ملاحظه بوده، به طوری که عمدتاً سطح آب زیرزمینی بالای ۳ متر افت کرده است. علاوه بر این، وضعیت بالا در سال ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ در دو بخش شرقی و غربی دشت حاکم بوده است. همچنین، پهنه افت بالای ۳ تا ۵ و بیش از ۵ متر در سال ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ در سطح وسیعی در بخش جنوبی و شرقی آبخوان قابل مشاهده است. بر اساس نقشه‌های شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود در سال‌های آبی ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ - ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ - ۱۴۰۰ افت سطح آب ناچیز و عمدتاً تراز آب زیرزمینی افزایش یافته است. در این بازه زمانی، پهنه‌های دارای افت (تراز منفی) سطح محدودتری از آبخوان را در مقایسه با سال‌های ابتدایی دوره شامل می‌شوند و در مقابل، بخش عمده‌ای از گستره آبخوان روند افزایشی تراز را نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش تراز در سال‌های آبی ۱۳۹۶ - ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ رخ داده است؛ به گونه‌ای که در بسیاری از مناطق (به‌ویژه بخش‌های مرکزی و شمالی آبخوان)، افزایش تراز بیش از ۱ متر مشاهده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده تغییر روند از افت به افزایش موقتی در سال‌های پایانی دوره است.



شکل ۴. پهنه تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی دشت کوهدشت





ادامه شکل ۴. پهنه تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی دشت کوهدشت

پایش زمانی - مکانی سالانه تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی

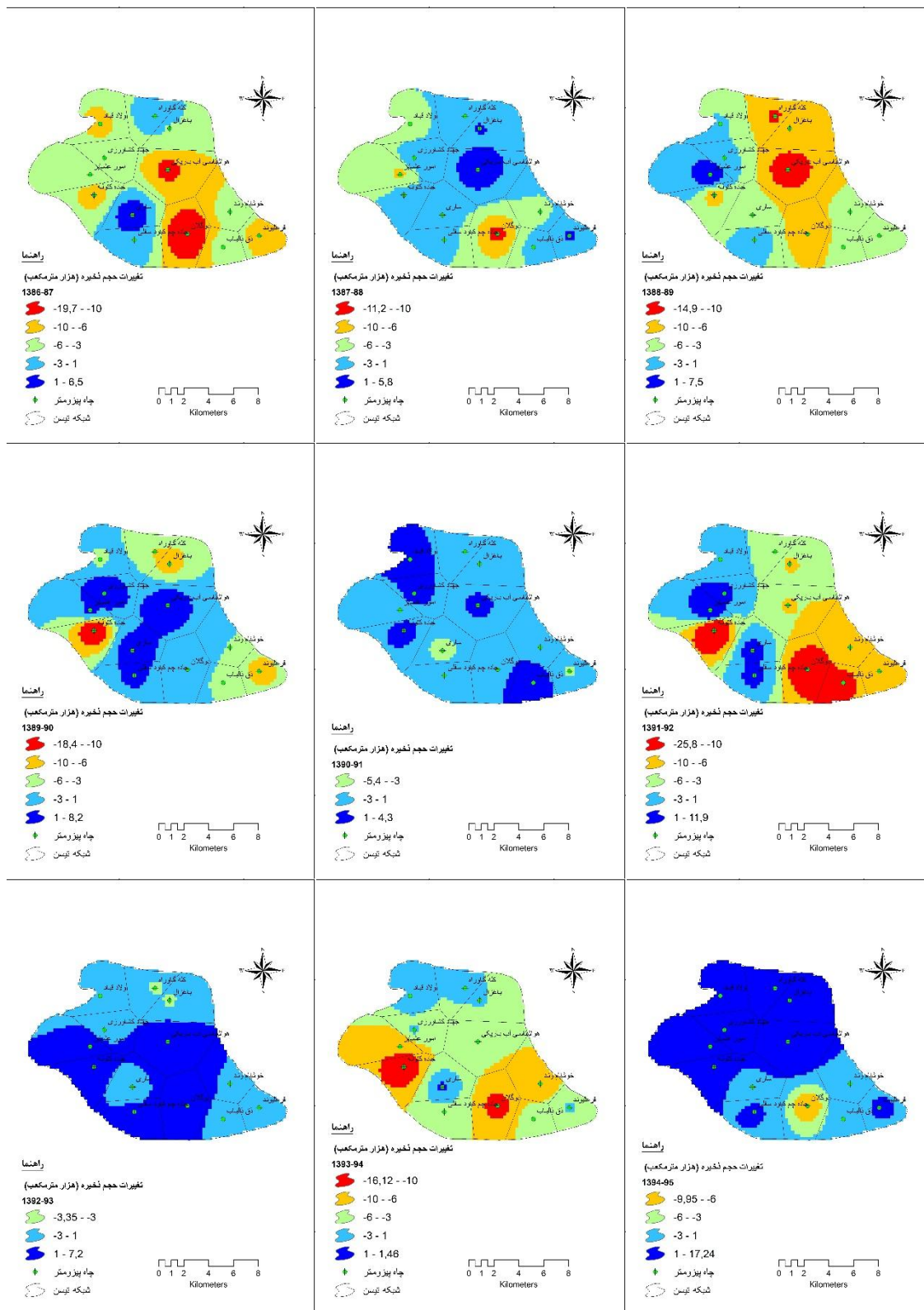
نقشه‌های تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی سالانه آبخوان دشت کوهدشت در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با این شکل، تغییرات حجم ذخیره سالانه هر پیکسل با ابعاد 250×250 متر بر مبنای روش تحلیل دوبعدی آبخوان با در نظر گرفتن مقادیر نوسانات سطح ایستابی سالانه و ضریب ذخیره ۳ درصد در محیط GIS ترسیم شد. شایان یادآوری است که به دلیل در دسترس نبودن داده‌های آزمون پمپاژ در سطح آبخوان، امکان لحاظ تغییرات مکانی ضریب ذخیره میسر نشد و مقدار ۳ درصد بر اساس میانگین تجربی مطالعات منطقه‌ای به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. اگرچه ارائه این نقشه‌ها به صورت سالانه در برخی مطالعات کمتر رایج است، اما ارزش آن‌ها در شناسایی سال‌های بحرانی، کشف الگوی تکرار خشکسالی‌ها و نشان دادن پراکندگی مکانی کسری مخزن برای مدیریت محلی و برنامه‌ریزی برداشت، قابل انکار نیست و این خروجی‌ها به عنوان داده‌های پایه برای پایش بلندمدت آبخوان نیز کاربرد دارند. نتایج نشان می‌دهد نقشه‌های تغییرات حجم ذخیره سالانه آب زیرزمینی به تبعیت از کاهش یا افزایش تراز سطح ایستابی عمدتاً به طور یک سال در میان در سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲، ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ در بخش وسیعی از آبخوان دچار کسری بیابان است. به طور مثال، در سال ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ کسری حجم ذخیره آب زیرزمینی از ۱ تا حدود ۲۰ هزار متر مکعب در هر پیکسل متغیر است. همین‌طور در سال ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹ مقدار کسری حجم آب زیرزمینی بین ۱ تا حدود ۱۵ هزار متر مکعب متغیر است. در سال ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ بیشترین میزان کسری ذخیره تا حدود ۲۶ هزار متر مکعب در پیکسل‌های واقع در محدوده اطراف چاه‌های پیرومتری بوگلان، ذق‌ذالیاب و

جاده کتوله اتفاق افتاده است. البته محدوده بسیار کوچکی در اطراف پیزومترهای ساری، جاده چم کبود سفلی، جهاد کشاورزی و امور عشایر دارای حجم مثبت ذخیره آب زیرزمینی از ۱ تا حدود ۱۲ هزار مترمکعب است. کسری بیلان آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ مشابه با سال ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ عمدتاً در بخش جنوب و غرب آبخوان رخ داده، اما شدت کسری بیلان در هر پیکسل کمتر است. کسری بیلان ذخیره آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ نیز مشابه سال آبی ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ عمدتاً در بخش جنوب و غرب آبخوان در گستره کمتر اما با شدت نسبتاً کمتر تا سقف ۲۱ هزار متر مکعب رخ داده است.

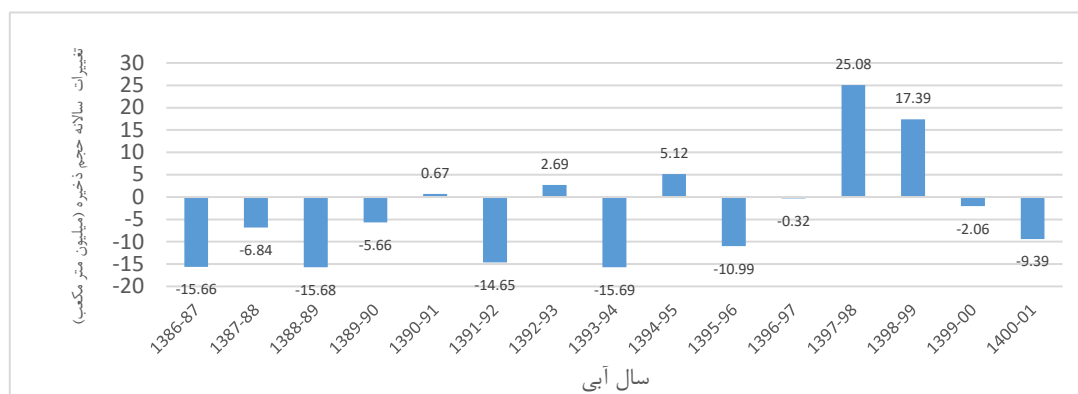
همچنین، مطابق شکل ۵ وضعیت منابع آب زیرزمینی در برخی از سال‌ها به عنوان مثال در سال‌های آبی ۱۳۹۰ - ۱۳۹۱، ۱۳۹۲ - ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵، ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸، ۱۳۹۸ - ۱۳۹۹ به علت ترسالی و یا احتمالاً به علت کاهش برداشت آب زیرزمینی در سطح وسیعی از آبخوان بهبود یافته است. سطح ایستابی و حجم آبخوان به ترتیب در سال‌های یادشده افزایشی بوده و در سال ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ به بیشترین مقدار از هزار متر مکعب تا ۲۹ هزار متر مکعب در هر پیکسل رسیده است.

به منظور بررسی دقیق وضعیت آب زیرزمینی در سال‌های گذشته، نمودار شکل ۶ تغییرات سالانه حجم ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت را نشان می‌دهد. همان‌طور که نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد تغییرات ذخیره حجم سالانه در سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ منفی و حدود ۱۵ میلیون متر مکعب بوده است. این در حالی است که در برخی سال‌ها میزان بیلان منفی آبخوان کمتر به طور مثال در سال‌های آبی ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ به ترتیب حدود ۱۱- و ۹/۳۴- میلیون مترمکعب بوده است. همچنین در سال آبی ۱۳۸۷ - ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ - ۱۳۹۰ بیلان آب زیرزمینی منفی و به ترتیب معادل ۶/۸۴ و ۵/۶۶ میلیون متر مکعب بوده است. در باقی سال‌ها تغییرات ذخیره سالانه آب زیرزمینی مثبت بوده اما قابل ملاحظه نیست. البته این در حالی است که مقدار تغییرات حجم ذخیره در سال‌های ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ و ۱۳۹۸ - ۱۳۹۹ قابل توجه و به ترتیب ۲۵ و ۱۷ میلیون متر مکعب بوده است.

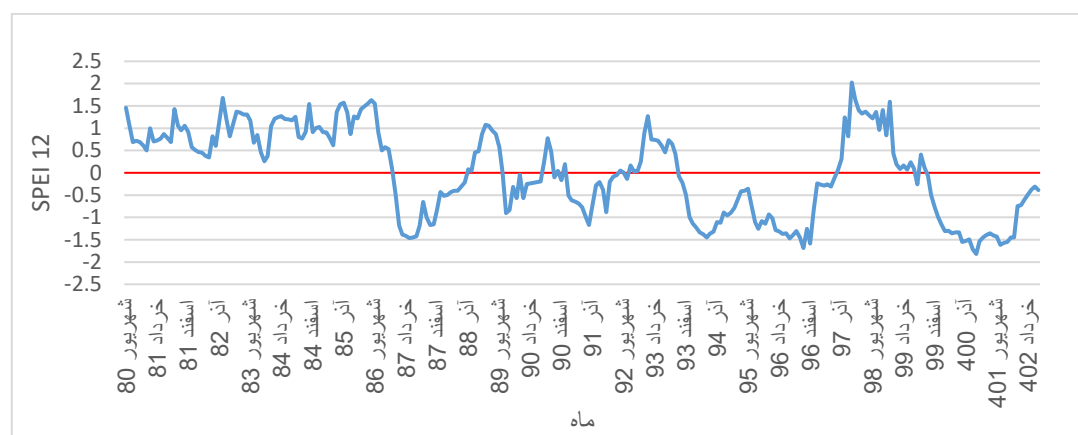
بررسی تطبیقی سری زمانی شاخص خشکسالی SPEI ۱۲ ماهه (نمودار شکل ۷) با تغییرات سالانه حجم ذخیره آب زیرزمینی (نمودار شکل ۶) دشت کوهدشت نشان‌دهنده هماهنگی نسبی در الگوی نوسانات است؛ به گونه‌ای که در اکثر سال‌های مورد مطالعه، سال‌های دارای شاخص خشکسالی شدید به طور مثال در سال آبی ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ با میانگین SPEI معادل ۱/۱۷- با کاهش ذخیره آبخوان و سال‌های ترسالی به عنوان مثال سال آبی ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ با میانگین SPEI معادل ۱/۰۵ با افزایش نسبی حجم ذخیره همراه بوده‌اند. بنابراین، می‌توان گفت که خشکسالی و تغییرات بارش تا حدودی نقش مؤثر در افت و خیز سطح آب زیرزمینی داشته‌اند؛ با این حال، در سال‌های اخیر، انحراف از این الگوی طبیعی به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی احتمالاً بیشتر ناشی از افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بوده است که سبب شده حتی در برخی سال‌های با SPEI نسبتاً مرطوب نیز بیلان منفی شود. لذا به همین علت ضریب همبستگی شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف، پایین است. با توجه به نمودار شکل ۸، در بهترین حالت، حدود ۱۸ درصد از تغییرات سطح آب زیرزمینی با شاخص SPEI ۱۲ ماهه با تأخیر زمانی ۱۱ ماهه وابسته است و به نظر می‌رسد باقی این نوسانات ناشی از میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی باشد.



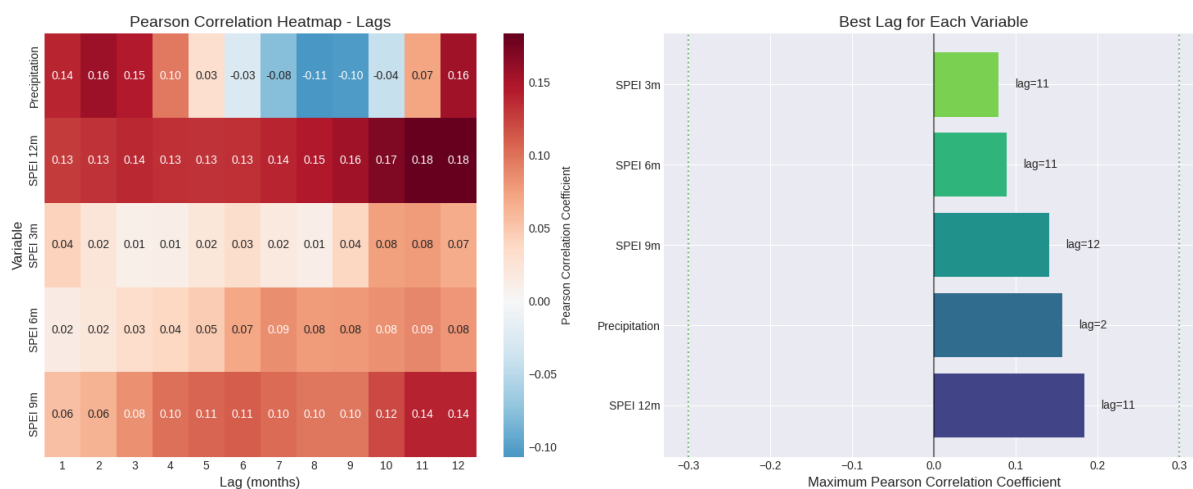
شکل ۵. تغییرات سالانه حجم ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت



شکل ۶. نمودار تغییرات سالانه حجم ذخیره آبخوان (میلیون متر مکعب)



شکل ۷. نمودار تغییرات شاخص خشکسالی SPEI ۱۲ ماهه در دشت کوهدشت



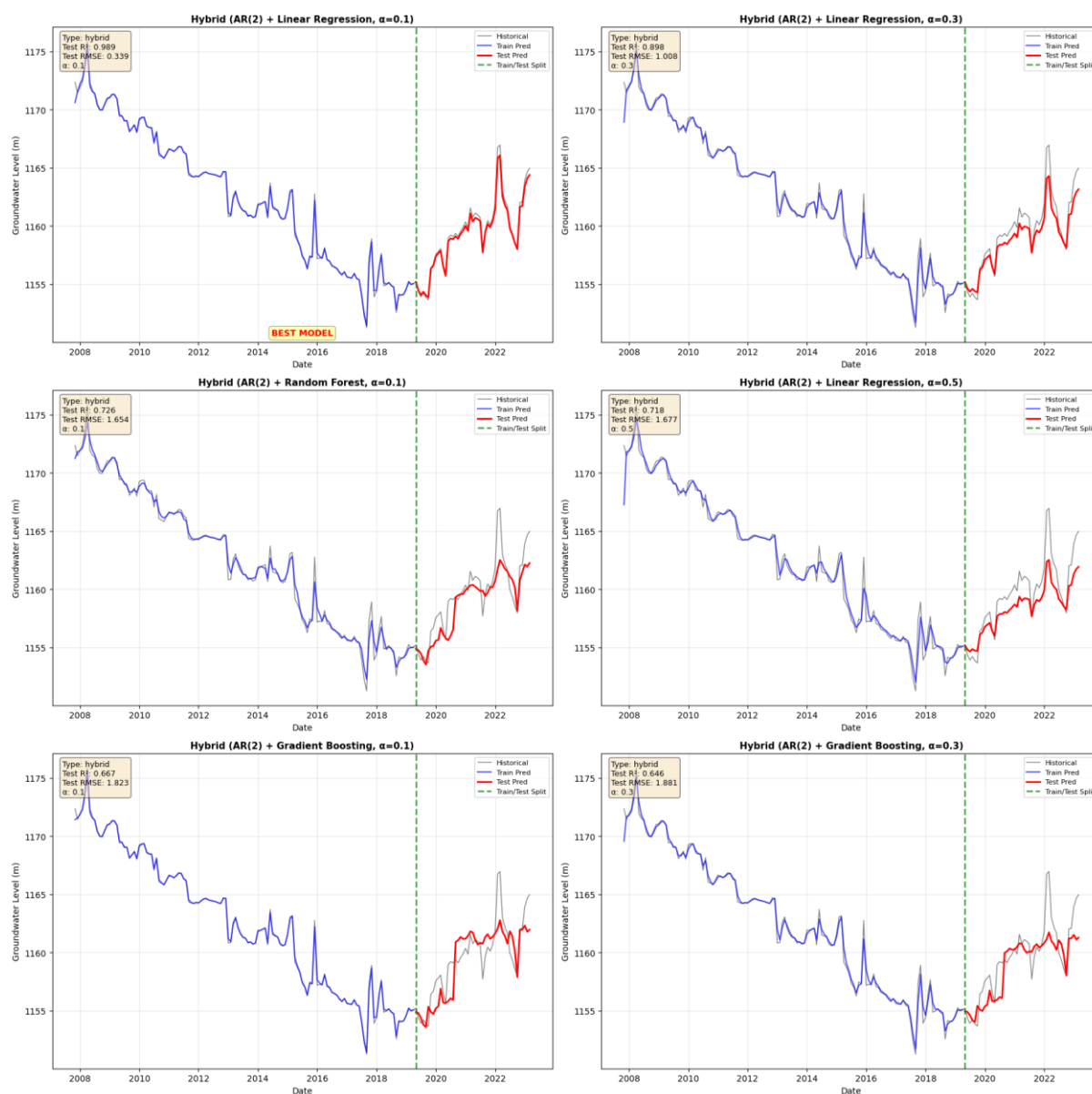
شکل ۸. نقشه حرارتی ضریب همبستگی نوسانات سطح آب زیرزمینی با بارش و شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف

پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی و حجم ذخیره آب زیرزمینی

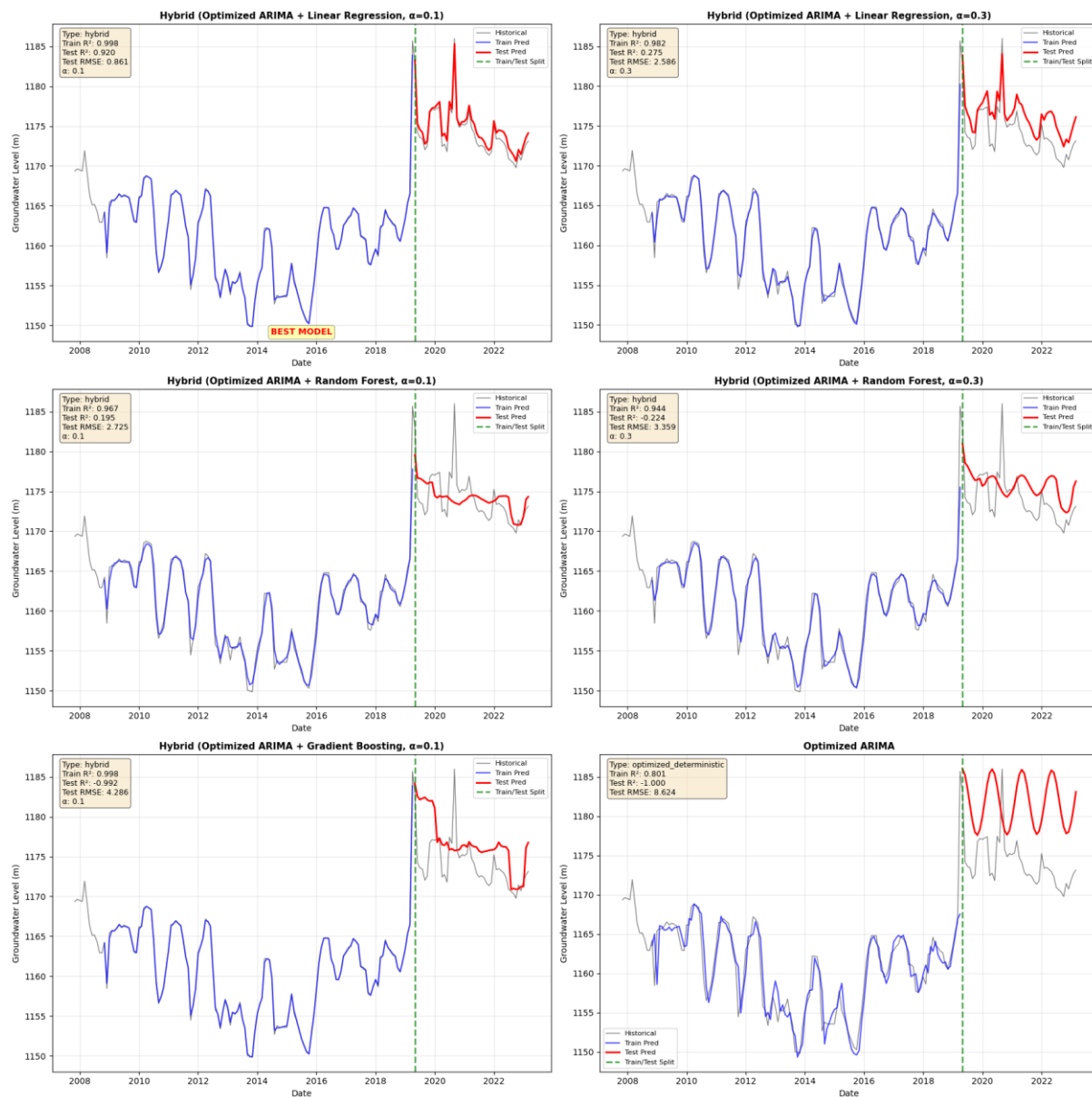
به منظور پیش‌بینی تغییرات سطح ایستابی و تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی از ترکیب مدل‌های سری زمانی MA ، AR ، $ARIMA$ ، $SARIMA$ با مدل‌های یادگیری ماشین نظیر $Linear Regression$ ، $Gradient$ و $Random Forest$ استفاده شد. در این راستا، پارامترهای مدل‌های سری زمانی شامل مرتبه خودرگرسیون (p) در محدوده صفر تا سه، مرتبه تفاضل‌گیری (d) در محدوده صفر تا یک، و مرتبه میانگین متحرک (q) در محدوده صفر تا سه برای مدل $ARIMA$ و همچنین، پارامترهای فصلی شامل مرتبه خودرگرسیون فصلی (P) در محدوده صفر تا یک، مرتبه تفاضل‌گیری فصلی (D) در محدوده صفر تا

یک و مرتبه میانگین متحرک فصلی (Q) در محدوده صفر تا یک با دوره فصلی ۱۲ ماهه برای مدل SARIMA از طریق روش جست‌وجوی شبکه‌ای بر اساس معیار اطلاعاتی آکائیکه بهینه‌سازی شدند. همچنین، با توجه به اینکه مدل‌های صرفاً مبتنی بر روند قادر به تشخیص دوره‌های صعودی در داده‌های با روند نزولی نیستند، از ویژگی‌های مهندسی‌شده شامل ۱۲ ماه تأخیر متوالی، تأخیرهای فصلی ۱۲ و ۲۴ ماهه، میانگین متحرک ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، انحراف معیار متحرک ۳ و ۱۲ ماهه، و ویژگی‌های فصلی برای شناسایی الگوهای پنهان فصلی و دوره‌ای استفاده شد؛ به گونه‌ای که این ویژگی‌ها به مدل‌های هیبریدی امکان تشخیص رفتارهای صعودی کوتاه‌مدت را حتی در دوره‌های با روند نزولی می‌دهند. در مدل‌های هیبریدی، نسبت ترکیب با مقادیر $0/1$ ، $0/3$ ، $0/5$ ، $0/7$ و $0/9$ به عنوان پارامتر تعیین‌کننده وزن مدل قطعی در ترکیب با مدل یادگیری ماشین در نظر گرفته شد و دوره گرم‌سازی ۱۲ ماهه تا ۱۸ ماهه نیز برای حذف اثر شرایط اولیه از محاسبات دقت مدل‌ها اعمال شد. به منظور مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان، نتایج مدل‌های برتر و در نهایت، انتخاب بهترین مدل در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی برای ۶ چاه پیژومتری منتخب بر مبنای معیارهای آماری مختلف نظیر R^2 ، NSE، RMSE، MAE و MAPE در شکل‌های ۹ تا ۱۳ نشان داده شده است.

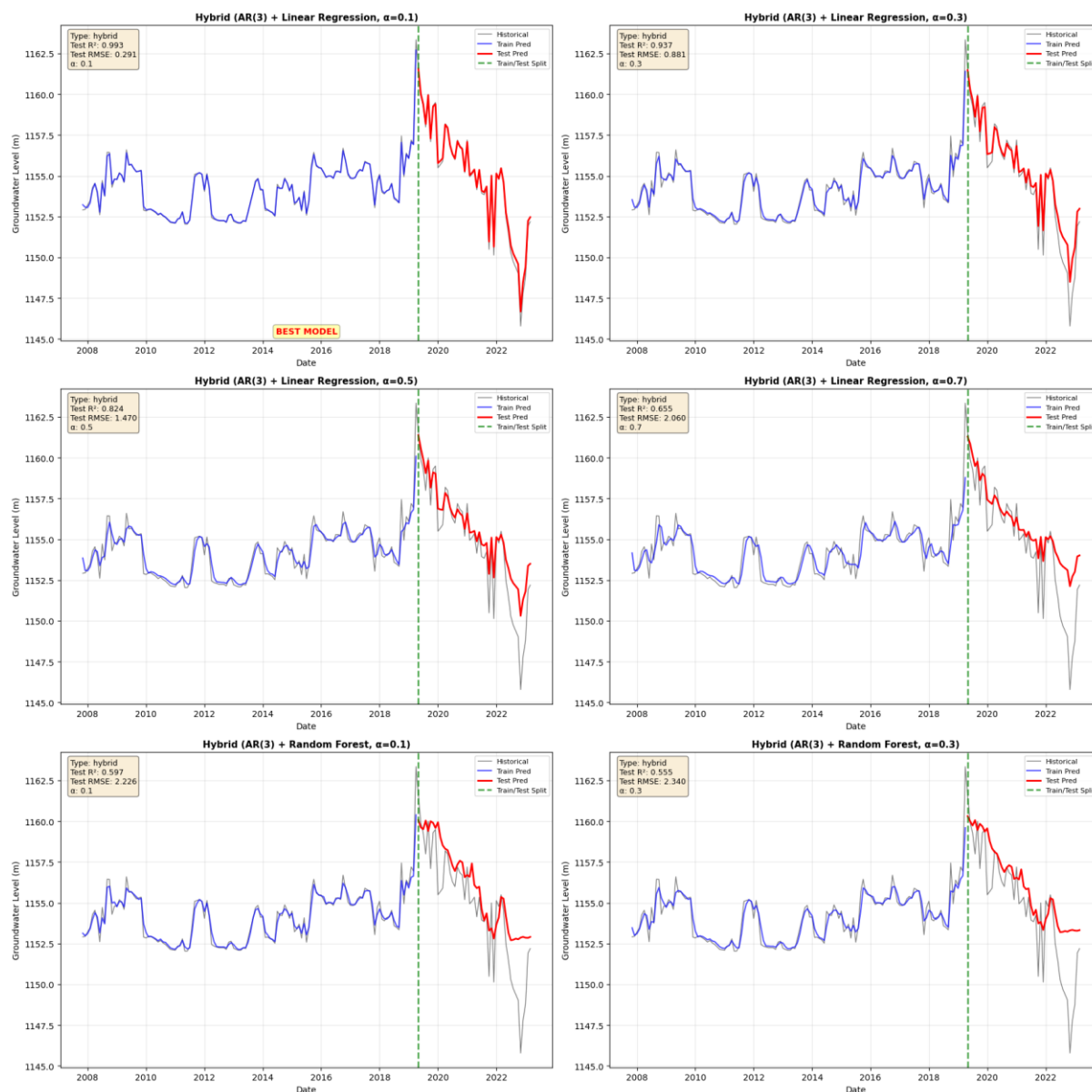
بر مبنای شکل‌های ۹ تا ۱۳ مشاهده می‌شود نوع مدل‌های منتخب برازش یافته بر مقادیر مشاهداتی چاه‌های پیژومتری متفاوت است و بسته به تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر چاه، بهترین مدل‌های ترکیبی سری زمانی و یادگیری ماشین تعیین شده است. به طور مثال، مدل $AR(2)+ \text{Linear Regression}$ ، $\alpha = 0.1$ بهترین مدل ترکیبی برای چاه خوشناموند بر مبنای $R^2=0.989$ و $RMSE=0.339$ معرفی شده است. همچنین در باقی چاه‌ها، شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی در اکثر مدل‌های منتخب برازش مناسبی با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد. بررسی دقیق مدل‌ها در چاه‌های منتخب نشان می‌دهد عمدتاً مدل‌های خودهمبستگی (AR) با مرتبه‌های ۲ و ۳ و همچنین، مدل ARIMA بهینه‌شده در ترکیب با الگوریتم رگرسیون خطی، به عنوان مدل‌های برتر با دقت زیاد شناخته می‌شوند. این مدل‌ها در هر دو مرحله آموزش و آزمون، توانسته‌اند مقادیر مشاهداتی را با دقت مطلوبی شبیه‌سازی کنند. در مقابل، ترکیب این نوع مدل‌های سری زمانی با سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر Random Forest و Gradient Boosting، از دقت نسبتاً کمتری در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی، به‌ویژه در دوره آزمون (صحت‌سنجی)، برخوردار است. بررسی عمیق‌تر نشان می‌دهد مدل‌های ترکیبی یادشده در برازش مقادیر حدی، به‌خصوص در دوره آزمون (برای نمونه، مقادیر حداکثر سطح آب زیرزمینی در سال ۲۰۲۲ برای چاه پیژومتری خوشناموند)، عملکرد ضعیف‌تری دارند. به منظور تحلیل بهتر، در جدول ۱ نتایج بهینه‌ترین نوع مدل منتخب را برای ۱۳ چاه پیژومتری در آبخوان کوهدشت ارائه شده است.



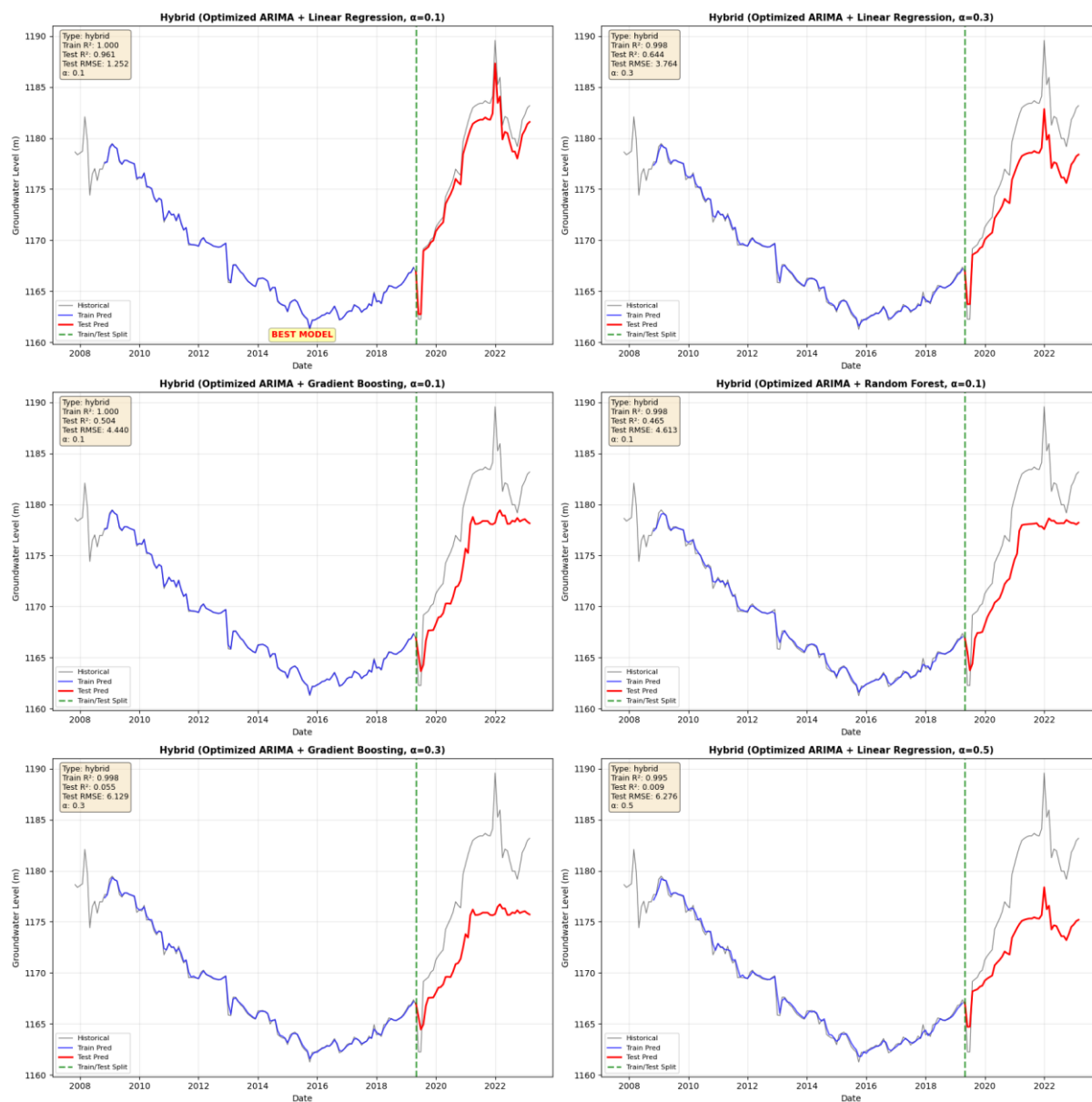
شکل ۹. برازش مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه پیزومتری خوشناموند با مدل‌های مختلف



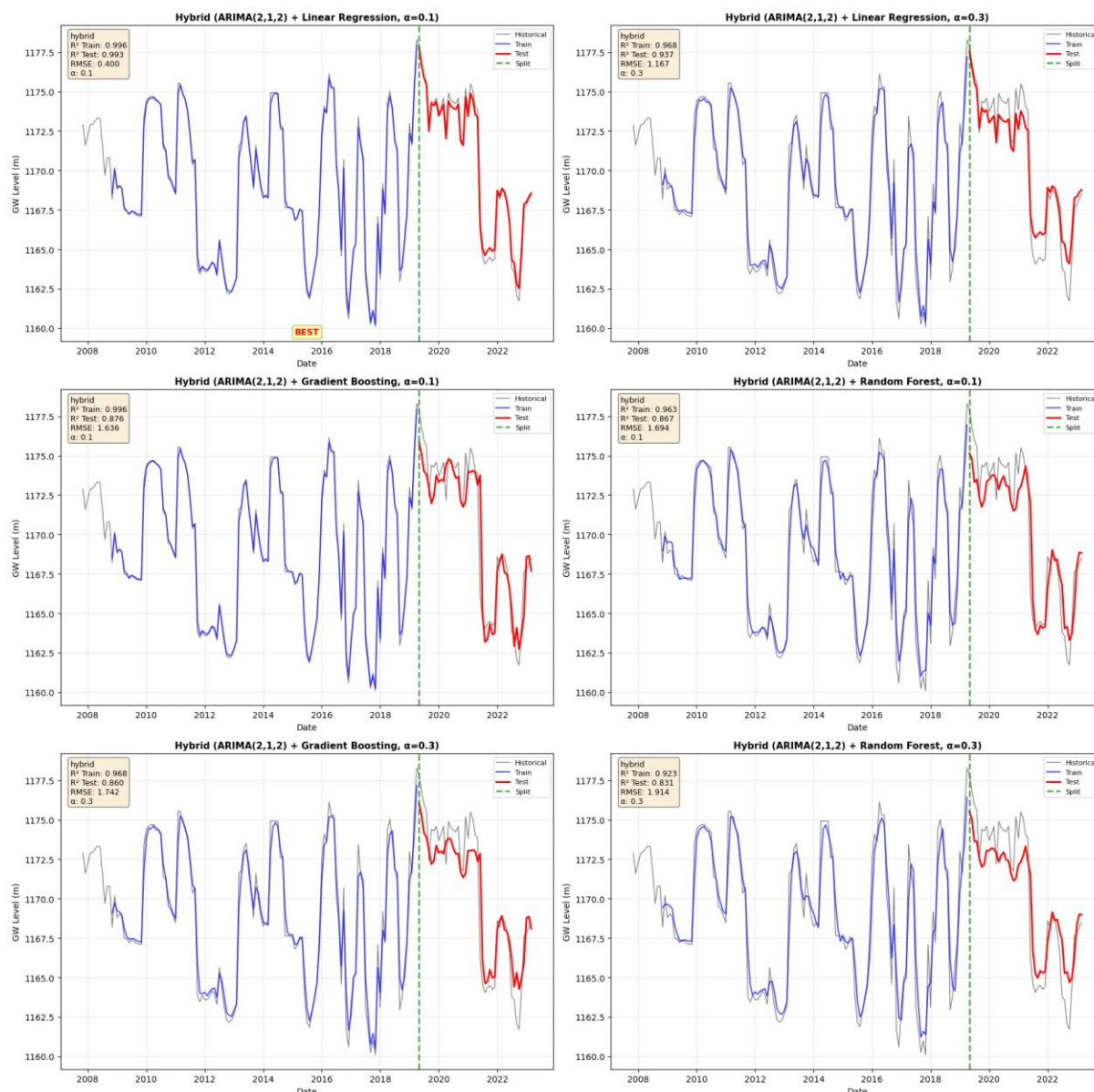
شکل ۱۰. برازش مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه پیزومتری آب باریکی با مدل‌های مختلف



شکل ۱۱. برازش مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه پیزومتري ساری با مدل‌های مختلف



شکل ۱۲. برازش مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه پیژومتری پاغزال با مدل‌های مختلف



شکل ۱۳. برازش مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی چاه پیژومتری امور عشایر با مدل‌های مختلف

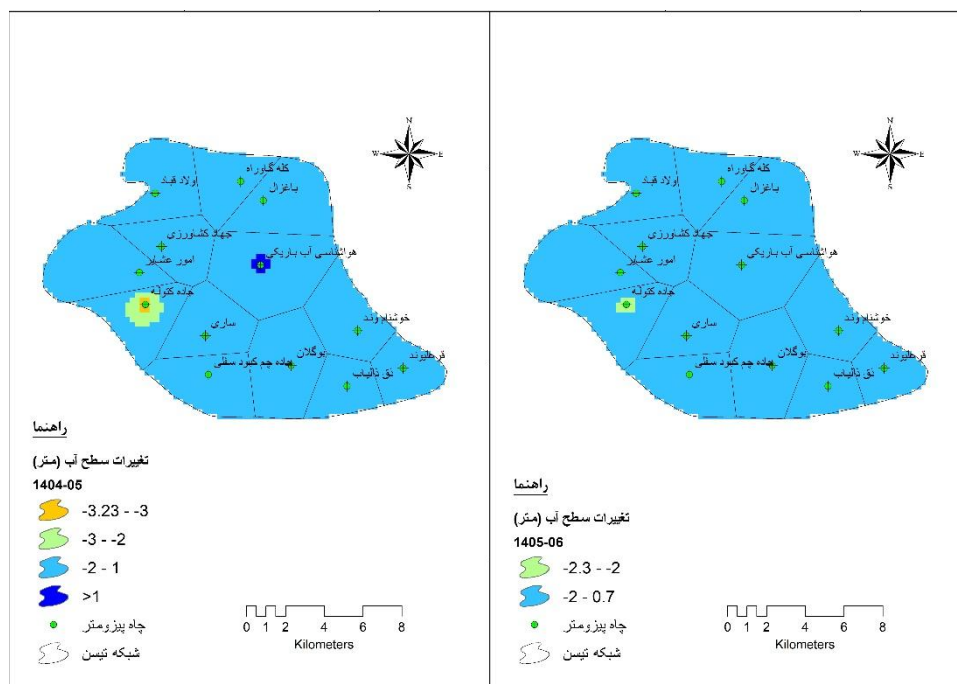
بر اساس نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که رگرسیون خطی در ترکیب با مدل‌های مختلف سری زمانی بهترین مدل یادگیری ماشین در همه چاه‌های پیژومتری است. مدل بهینه سری زمانی برای چاه‌های خوشناموند، ساری، امور عشایر، ذق ذالیاب، بوگلان، قرعلیوند، جاده کشاورزی و برای سایر چاه‌ها به ترتیب $AR(2)$ ، $AR(3)$ ، $ARIMA(2,1,2)$ ، $MA(2)$ ، $SARIMA(0,1,1)(0,1,1,12)$ ، $ARMA(1,1)$ و Optimized SARIMA و Optimized ARIMA در ترکیب با الگوریتم رگرسیون خطی است. ارزیابی عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد مقدار ضریب تعیین برای کلیه چاه‌های پیژومتری در بخش آموزش بالای ۹۹ درصد است. مقدار این معیار و همچنین، NSE در بخش آزمون برای چاه‌های خوشناموند، ساری، امور عشایر، ذق ذالیاب، بوگلان، قرعلیوند، جاده کشاورزی و کتوله بالای ۹۸ درصد است. مقدار این معیارها برای سایر چاه‌ها بالای ۹۶ و برخی بالای ۹۱ درصد است. البته کمترین دقت معیارهای فوق در بخش آزمون به چاه جاده چم کبود به مقدار ۶۰ درصد تعلق دارد. نتایج معیارهای خطا نیز نشان می‌دهد RMSE، MAE و MAPE در اکثر چاه‌ها بسیار کم و بین حدود صفر تا ۱/۲۵ برای چاه‌های مختلف متغیر است. بررسی کلی نشان می‌دهد مدل‌های بهینه شبیه‌سازی چاه‌های خوشناموند، امور عشایر، قرعلیوند، بوگلان و جاده کشاورزی دارای کارایی و دقت بسیار بالایی نسبت به سایر چاه‌ها هستند.

پایش و پیش‌بینی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت سلیمانی مطلق و همکاران							
جدول ۱. معرفی مدل بهینه و نتایج معیارهای آماری مرتبط در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مختلف							
چاه	مدل	Train R ²	Test R ²	Test NSE	Test RMSE	Test MAE	Test MAPE
خوشناموند	Hybrid (AR(2) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۸۷	۰/۹۸۸۵	۰/۹۸۸۵	۰/۳۳۸۷	۰/۲۷۶۸	٪۰/۰۲
آب باریکی	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۸۰	۰/۹۱۹۷	۰/۹۱۹۷	۰/۸۶۰۶	۰/۷۸۳۷	٪۰/۰۷
ساری	Hybrid (AR(3) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۳۱	۰/۹۹۳۱	۰/۲۹۱۵	۰/۲۰۳۷	٪۰/۰۲
پاغزال	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۹۸	۰/۹۶۰۶	۰/۹۶۰۶	۱/۲۵۳۱	۱/۱۲۴۸	٪۰/۱۰
امور عشایر	Hybrid (ARIMA(2,1,2) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۲۶	۰/۳۹۹۵	۰/۳۴۰۸	٪۰/۰۳
ذق ذالیاب	Hybrid (MA(2) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۷۸	۰/۹۸۶۶	۰/۹۸۶۶	۰/۵۷۱۸	۰/۴۷۵۱	٪۰/۰۴
بوگلان	Hybrid (SARIMA(0,1,1)(0,1,1,12) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۰۴	۰/۹۹۰۴	۰/۵۱۲۹	۰/۴۱۵۳	٪۰/۰۴
قرعلیوند	Hybrid (ARMA(1,1) + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۹۸	۰/۹۸۷۰	۰/۹۸۷۰	۰/۲۵۲۳	۰/۲۲۰۰	٪۰/۰۲
جاده چم کبود	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۵۰	۰/۶۰۳۰	۰/۶۰۳۰	۰/۵۸۵۰	۰/۵۷۶۶	٪۰/۰۵
جاده کشاورزی	Hybrid (Optimized SARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۵۴	۰/۰۳۵۴	۰/۰۲۵۱	٪۰/۰۰
کله گاواره	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۹۵	۰/۹۶۴۲	۰/۹۶۴۲	۱/۲۳۳۲	۱/۰۷۲۲	٪۰/۰۹
کتوله	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۹۷	۰/۹۸۸۲	۰/۹۸۸۲	۰/۲۶۷۲	۰/۲۱۹۸	٪۰/۰۲
اولاد قباد	Hybrid (Optimized ARIMA + Linear Regression, $\alpha=0.1$)	۰/۹۹۸۳	۰/۹۶۱۷	۰/۹۶۱۷	۰/۲۶۸۶	۰/۲۴۱۷	٪۰/۰۲

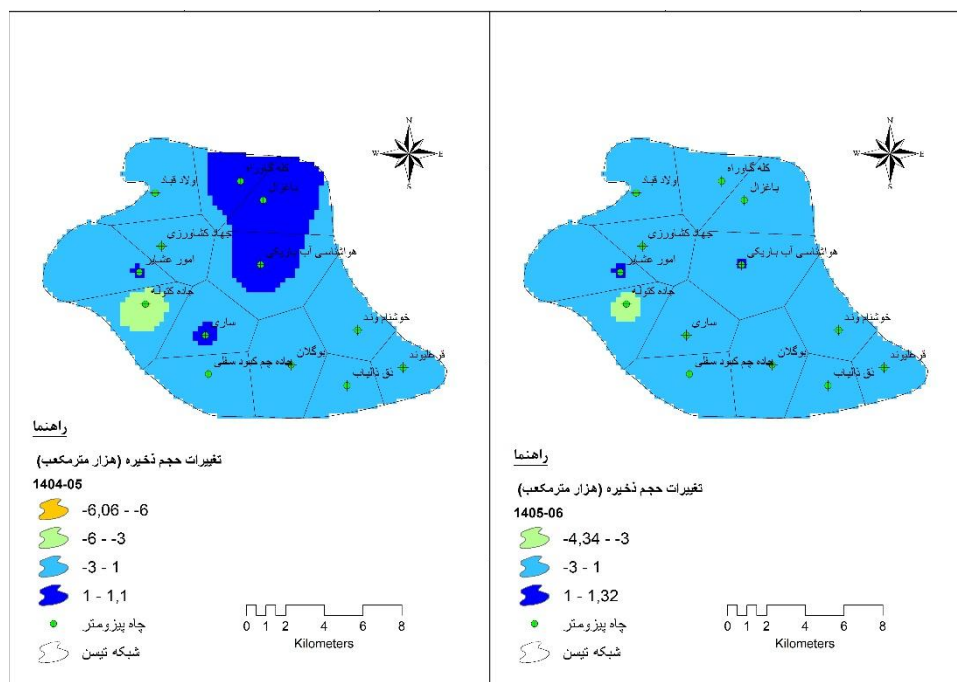
گستره مکانی تغییرات سطح ایستابی و حجم ذخیره آب زیرزمینی

شکل ۱۴ نقشه‌های مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی بر اساس مدل‌های پیش‌بینی و با درون‌یابی در محیط GIS را نشان می‌دهد. پهنه‌بندی مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی برای دو سال آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ و ۱۴۰۵ - ۱۴۰۶ مبین نوسانات عمدتاً نزدیک به شرایط نرمال و تغییرات مثبت سطح آب زیرزمینی از ۲- تا بالای ۱ متر است.

همچنین، مطابق شکل ۱۵ بررسی نقشه‌های مکانی تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی در سال‌های پیش‌بینی هم بیانگر افزایش نزدیک به نرمال یا مثبت ذخیره آب زیرزمینی در بیشتر نقاط آبخوان است. بخش وسیعی از تغییرات مثبت در سال آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ با تغییرات حجم ذخیره بیش از ۱۰۰۰ مترمکعب در هر پیکسل مختص به مناطق شمالی آبخوان و در اطراف محدوده پاغزال، آب باریکی و کله گاواره است. برآورد وضعیت ذخیره آبخوان نشان می‌دهد تغییرات حجم ذخیره سالانه آبخوان در سال آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ منفی و حدود ۰/۷ میلیون مترمکعب است که نسبت به سال‌های گذشته ناچیز و تقریباً به شرایط نرمال نزدیک‌تر است. اما پیش‌بینی تغییرات حجم ذخیره در سال آبی ۱۴۰۵ - ۱۴۰۶ مبین افزایش افت حجم آبخوان معادل ۱/۲۲ - میلیون متر مکعب خواهد بود.



شکل ۱۴. پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت کوه‌دشت



شکل ۱۵. پیش‌بینی تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی آبخوان دشت کوه‌دشت

بحث

تحلیل روند افت آب زیرزمینی در دشت کوه‌دشت

نتایج این پژوهش نشان داد سطح آب زیرزمینی دشت کوه‌دشت در دوره آماری ۱۶ ساله (۱۳۸۶ - ۱۴۰۱) به طور متوسط سالانه ۰/۳۷ متر افت داشته است که مجموع آن به حدود ۵/۹ متر می‌رسد. این مقدار اگرچه نسبت به میانگین کشوری با افت سالانه ۰/۵ متر (عزیزی و نجatian، ۲۰۲۱) کمتر است، اما از نظر روند نزولی بلندمدت کاملاً همسو با وضعیت اکثر دشت‌های ایران است.

کاردان مقدم و همکاران (۲۰۱۹) استفاده از مدل شبکه‌های بیزین پویا در دشت بیرجند به افت سالانه حدود ۰/۴۵ متر دست یافتند که قابل مقایسه با یافته این تحقیق است.

همان‌گونه که در هیدروگراف واحد آبخوان دشت کوهدشت (شکل ۳) نشان داد سطح آب زیرزمینی در سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ افت شدیدی را تجربه کرده است؛ در مقابل، در سال‌های ترسالی نظیر ۱۳۹۶ - ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ تا حدودی جبران شده است. این الگو تا حدی با تغییرات خشکسالی و ترسالی همخوانی دارد و نتایج حاصل از همبستگی نوسانات سطح آب زیرزمینی با سری زمانی بارش و شاخص SPEI نیز مؤید این ارتباط هر چند با مقدار اندک است. با این حال، به نظر می‌رسد بخش عمده این نوسانات عمدتاً ناشی از تغییرات برداشت از منابع آب زیرزمینی باشد؛ متأسفانه به دلیل در دسترس نبودن آمار سالانه بهره‌برداری، امکان انجام مقایسه آماری میسر نشد. البته نکته قابل توجه این است که بررسی آمار چاه‌ها بر اساس تاریخ اولین بهره‌برداری و افزایش تعداد چاه‌ها در سال‌های مختلف، نشان‌دهنده روند صعودی برداشت آب زیرزمینی در سال‌های اخیر است؛ به طوری که میزان پمپاژ از حدود ۳۶ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۶ به ۵۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۶ رسیده است. هرچند این آمار به دلیل عواملی مانند عدم نصب تجهیزات در برخی چاه‌ها، تغییر الگوی کشت، متروکه یا مسدود شدن چاه‌ها و همچنین، اثرات ترسالی بر کاهش برداشت با خاموش شدن چاه‌ها، ممکن است دقیق نباشد، اما نکته حائز اهمیت آن است که افزایش بهره‌برداری به دلیل افزایش تعداد چاه‌ها و سطح زیرکشت به احتمال زیاد روندی صعودی داشته و بنابراین، تشخیص تأثیر مستقل خشکسالی یا ترسالی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، به دلیل هم‌پوشانی با این عامل، به سادگی میسر نیست. این یافته با نتایج قضاوی و رضوانی سربندی (۱۳۹۶) در دشت رفسنجان نیز همخوانی دارد که نشان دادند اثر برداشت از منابع آب زیرزمینی بر کمیت و کیفیت آبخوان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و خشکسالی‌های متوالی بر بحران آن افزوده است.

در تحقیق حاضر نیز مشاهده شد که افزایش بارندگی در چند ماه آخر سال ۱۳۹۷ و فروردین‌ماه ۱۳۹۸ با بیش از ۲۰۰ میلی‌متر، به افزایش حدود ۳ متری سطح آب زیرزمینی در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ منجر شده است که مؤید وجود تأخیر زمانی حدود ۴ تا ۶ ماهه بین وقوع بارش و پاسخ آبخوان است. در بررسی تحقیقات پیشین محمدی قلعه‌نی (۱۳۹۱) در دشت ساوه نشان داد خشکسالی با یک تأخیر زمانی حدود ۵ ماه بر سطح آب زیرزمینی اثر می‌گذارد. اسلیمیان و همکاران (۲۰۰۹) نیز در دشت بوئین زهرا ارتباط معناداری بین دوره‌های ترسالی و خشکسالی با تغییرات سطح آب زیرزمینی گزارش کردند که یافته این تحقیق را تأیید می‌کند.

تحلیل مکانی افت آب زیرزمینی در دشت کوهدشت

پهنه‌بندی مکانی نوسانات سطح ایستابی مطابق شکل ۴ نشان داد بیشترین افت در سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ در بخش‌های شمال شرقی، جنوب شرقی، مرکزی و بخش اندکی در غرب آبخوان دشت کوهدشت متمرکز است. این الگو را می‌توان به تراکم چاه‌های بهره‌برداری و کاهش تغذیه طبیعی در سال‌های یادشده نسبت داد. در مرکز و بخش جنوب شرقی دشت به دلیل نزدیکی به مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی با الگوی کشت فشرده، تراکم چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است. این یافته با نتایج پژوهش بایزیدی و کاکي (۱۴۰۰) در دشت شرق استان کردستان که نشان دادند افت آب زیرزمینی در مناطقی با تراکم بالای چاه‌های کشاورزی شدیدتر است، همخوانی دارد. همچنین، جعفری و شیرافکن (۱۳۹۲) در دشت بهاباد یزد گزارش کردند که میزان افت سطح ایستابی در قسمت‌های شمالی (۶۰ سانتی‌متر) بیشتر از قسمت‌های جنوبی (۴۰ سانتی‌متر) بوده است که به الگوی توزیع چاه‌ها و میزان بهره‌برداری نسبت داده شد.

در خصوص عامل دوم همان‌طور که نمودار تغییرات شاخص خشکسالی SPEI ۱۲ ماهه کوهدشت در شکل ۷ نشان داد خشکسالی و کاهش تغذیه آبخوان نیز به احتمال زیاد نقش مؤثری در شکل‌گیری پهنه افت در سال‌های مذکور داشته است. به گونه‌ای که در شهریور ۱۳۸۷، شهریور ۱۳۹۴، شهریور ۱۳۹۶ و اسفند ۱۴۰۰ مقادیر شاخص SPEI به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۱/۴۵، ۱/۴۷ و ۱/۸۲ رسیده که مبین رخ دادن خشکسالی شدید و اثرگذاری آن بر وضعیت منابع آبی منطقه است. قابل ذکر است با توجه به مطالعه احمدی پور و همکاران (۱۳۸۱) و نیز نقشه زمین‌شناسی شکل ۱، هرچند بخش عمده مسیرهای تغذیه دشت به نواحی شمال

شرقی (مخروطافکنه‌های مشرف به واحدهای آهکی تله‌زنگ) و دامنه‌های جنوبی کوه خوشناموند اختصاص دارد، اما ترکیب تراکم و افزایش حجم برداشت از چاه‌ها همراه با وقوع خشکسالی در سال‌های یادشده، باعث افت محسوس آب زیرزمینی در مکان‌های یادشده شده است. در مقابل در سال‌های ۱۳۹۲ - ۱۳۹۳، ۱۳۹۶ - ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ که پهنه مکانی آبخوان افزایش تراز سطح آب زیرزمینی را تجربه کرده، شاخص خشکسالی SPEI مقادیر مثبتی را نشان داده که مبین وقوع ترسالی و اثر مثبت بر تراز آب زیرزمینی بوده است.

برآورد تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی و تحلیل بیلان

محاسبه تغییرات حجم ذخیره سالانه آبخوان با استفاده از روش دوبعدی ($dV = S.A.dh$) و با در نظر گرفتن متوسط ضریب ذخیره ۳ درصد برای کل آبخوان، نشان داد کسری بیلان در سال‌های ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ حدود ۱۵ میلیون متر مکعب بوده است. در سال آبی ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲، بیشترین کسری ذخیره تا حدود ۲۶ هزار متر مکعب در هر پیکسل (250×250 متر) در اطراف چاه‌های بوگلان، ذق ذالیاب و جاده کتوله اتفاق افتاده است. مقادیر منفی شاخص SPEI در سال‌های یادشده مبین تأثیر عامل خشکسالی در بروز کسری بیلان و جبران کمبود آب مورد نیاز از طریق افزایش پمپاژ آب زیرزمینی است. این یافته با نتایج پژوهش مسماریان و همکاران (۱۳۹۵) در دشت شهرکرد که نشان دادند با افزایش بهره‌برداری به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد تحت تأثیر اقلیم، ذخیره آبخوان به ترتیب ۶/۳ و ۱۰/۹۴ میلیون متر مکعب کاهش می‌یابد، همسو است. لذا این میزان کسری در مقیاس محلی بسیار قابل توجه است و نشان می‌دهد این مناطق باید در اولویت اقدامات مدیریتی قرار گیرند.

در مقابل، در سال‌های آبی ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ و ۱۳۹۸ - ۱۳۹۹ تغییرات حجم ذخیره مثبت و به ترتیب معادل ۲۵ و ۱۷ میلیون متر مکعب بوده است. این افزایش قابل توجه نشان می‌دهد آبخوان دشت کوه‌دشت علی‌رغم افت طولانی مدت، همچنان توانایی بازایی نسبی در دوره‌های ترسالی را دارد. مقادیر مثبت شاخص خشکسالی SPEI که مبین شرایط ترسالی در سال‌های یادشده است مؤید وقوع اثر افزایش سطح و کاهش برداشت آب زیرزمینی است. به بیان دیگر، در سال‌های ترسالی که نیاز آبی کشاورزی اندکی کاهش می‌یابد (به دلیل تأمین بخشی از منابع آب سطحی)، فشار بر آبخوان کمتر می‌شود و سطح ایستابی افزایش می‌یابد.

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی در دشت کوه‌دشت

در این تحقیق، از ترکیب مدل‌های سری زمانی شامل AR، MA، ARMA، ARIMA و SARIMA با رگرسیون خطی به عنوان مدل پایه یادگیری ماشین استفاده شد تا سطح آب زیرزمینی و تغییرات حجم ذخیره پیش‌بینی شود. یافته‌ها نشان داد مدل بهینه برای هر چاه پیرومتری متفاوت است که بیانگر ناهمگونی مکانی رفتار هیدرودینامیک آبخوان است. برای نمونه، در چاه خوشناموند، مدل ترکیبی $AR(2)$ و رگرسیون خطی با $R^2=0/989$ و $RMSE=0/339$ بهترین نتیجه را داشت. در چاه آب باریکی، مدل ترکیبی ARIMA بهینه‌شده و رگرسیون خطی با $R^2=0/919$ و $RMSE=0/86$ عملکرد برتری نشان داد. همچنین در چاه بوگلان، مدل SARIMA $(0,1,1)(0,1,1,12)$ و رگرسیون خطی با $R^2=0/990$ و $RMSE=0/512$ بیشترین دقت را ارائه کرد. این تفاوت در مدل بهینه در چاه‌های مختلف، گویای تغییرپذیری فضایی شرایط هیدرودینامیکی آبخوان است.

به طور کلی در تحقیق حاضر، مدل‌های سری زمانی - رگرسیون خطی عملکردی قابل قبول (NSE بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ برای اکثر چاه‌ها) داشتند. این در حالی است که در مطالعه کلارک و همکاران (۲۰۲۲) مدل‌های یادگیری عمیق جهانی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های محلی در پیش‌بینی سری‌های زمانی چندگانه آب زیرزمینی داشتند. همچنین افضل و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی کاهش سالانه آب زیرزمینی دقت بالایی دارد. علاوه بر این، سعادت‌مند و کاماسی (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای نشان دادند مدل‌های هیبرید یادگیری عمیق عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های سنتی دارند. همچنین، جونگ و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند مدل‌های ترکیبی مبتنی بر تجزیه مد تجربی می‌توانند دقت پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی را بهبود بخشند.

پیش‌بینی آب زیرزمینی

یافته‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد در صورت ادامه روند بهره‌برداری فعلی، آبخوان دشت کوهدشت در سال‌های آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ و ۱۴۰۵ - ۱۴۰۶ به ترتیب با کسری ۰/۷- و ۱/۲۲- میلیون متر مکعب مواجه خواهد شد که نسبت به افت سالانه دوره پایه (۰/۳۷ متر) شدت کمتری دارد. این یافته با نتایج پژوهش افضل و همکاران (۲۰۲۰) که پیش‌بینی کردند در صورت ادامه برداشت فعلی، ذخیره آب زیرزمینی در برخی نواحی کانادا طی ۱۰ سال ۱۵٪ کاهش می‌یابد، از نظر جهت تغییرات (منفی) همسو است؛ اما افق پیش‌بینی تحقیق حاضر کوتاه‌تر بوده و شدت کاهش نیز کمتر برآورد شده است. از سوی دیگر، شکلیا و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهش خود در شرق کرمانشاه نشان دادند خشکسالی نقش قابل توجهی در افت سطح آب زیرزمینی ایفا می‌کند. با این حال، در مدل‌سازی‌های تحقیق حاضر، اثر عواملی همچون خشکسالی‌های متوالی، افزایش دما و تشدید تبخیر (مطابق با یافته‌های لنترز و همکاران، ۲۰۱۱) در نظر گرفته نشده است. از این رو، به نظر می‌رسد که کسری واقعی آبخوان، فراتر از برآوردهای ارائه‌شده باشد و نتایج پیش‌بینی احتمالاً میزان افت را کمتر از مقدار واقعی آن نشان دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف پایش، تحلیل و پیش‌بینی تغییرات سطح و ذخیره آب زیرزمینی دشت کوهدشت طی دوره آماری ۱۵ ساله از سال آبی ۱۳۸۵ - ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ انجام شد. نتایج نشان داد آبخوان دشت کوهدشت با روند نزولی بلندمدت سطح آب زیرزمینی مواجه است؛ به گونه‌ای که افت کلی آبخوان حدود ۵/۹ متر طی ۱۵ سال معادل متوسط افت سالانه ۰/۳۷ متر بوده است. این مقدار مؤید آن است که دشت کوهدشت علی‌رغم قرارگیری در منطقه‌ای با بارش نسبتاً مناسب، از بحران کاهش آب زیرزمینی مصون نمانده است. تحلیل تغییرات سطح و ذخیره آب زیرزمینی نشان داد نوسانات سطح ایستابی عمدتاً به صورت یک سال در میان بوده و بیشترین افت در سال‌های آبی ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ - ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲، ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴، ۱۳۹۵ - ۱۳۹۶ و ۱۴۰۰ - ۱۴۰۱ رخ داده است. پهنه‌بندی مکانی بیانگر تمرکز افت در بخش‌های شمال شرقی، جنوب شرقی، مرکزی و بخش اندکی در غرب آبخوان است که با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و افزایش سطح زیرکشت در این مناطق همخوانی دارد. همچنین، برآورد تغییرات حجم ذخیره با روش تحلیل دوبعدی و ضریب ذخیره ۳ درصد نشان داد کسری بیلان در سال‌های بحرانی حدود ۱۵ میلیون مترمکعب بوده و بیشترین کسری ذخیره در هر پیکسل (۲۶ هزار مترمکعب) مربوط به اطراف چاه‌های بوگلان، ذق‌ذالیاب و جاده کتوله در سال آبی ۱۳۹۱ - ۱۳۹۲ است. بررسی تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی نشان داد که شاخص خشکسالی SPEI با تغییرات سطح آب زیرزمینی همبستگی مثبت ولی ضعیفی دارد (حدود ۱۸ درصد وابستگی با تأخیر ۱۱ ماهه) که احتمالاً حاکی از نقش پررنگ عامل برداشت آب زیرزمینی در مقایسه با نوسانات اقلیمی است. هرچند سال‌های ترسالی نظیر ۱۳۹۷ - ۱۳۹۸ و ۱۳۹۸ - ۱۳۹۹ سبب بازیابی نسبی آبخوان به میزان ۲۵ و ۱۷ میلیون مترمکعب شده است، اما به احتمال زیاد ادامه روند برداشت فعلی، اثرات مثبت اقلیمی را تا حد زیادی خنثی کرده است. ارزیابی مدل‌های ترکیبی سری زمانی - یادگیری ماشین نشان داد مدل‌های هیبریدی (AR، ARIMA، SARIMA با رگرسیون خطی) با نسبت ترکیب ۰/۱، عملکرد بسیار خوبی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی داشته‌اند (با $R^2 < 0/99$ و $RMSE < 0/9$ برای اکثر چاه‌ها). مدل بهینه برای هر چاه پیرومتری متفاوت بوده که بیانگر ناهمگونی مکانی رفتار هیدرودینامیک آبخوان است. به طور کلی، ترکیب مدل‌های خودهمبسته با رگرسیون خطی به عنوان بهترین رویکرد شناخته شد؛ در حالی که ترکیب با الگوریتم‌های جنگل تصادفی و گرادیان تقویتی از دقت کمتری برخوردار بود. پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان برای سال‌های آبی ۱۴۰۴ - ۱۴۰۵ و ۱۴۰۵ - ۱۴۰۶ نشان می‌دهد کسری ذخیره به ترتیب حدود ۰/۷- و ۱/۲۲- میلیون مترمکعب خواهد بود که نسبت به دوره پایه شدت کمتری دارد. اما با توجه به عدم لحاظ عوامل تشدیدکننده نظیر خشکسالی‌های متوالی، افزایش دما و تبخیر در پیش‌بینی‌های آتی، احتمالاً کسری واقعی آبخوان بیش از مقادیر برآوردشده خواهد بود. در مجموع، نتایج این پژوهش ضرورت بازنگری اساسی در الگوی برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت کوهدشت را آشکار می‌سازد. با وجود توانایی نسبی آبخوان در بازیابی طی دوره‌های ترسالی، ادامه روند بهره‌برداری فعلی به‌ویژه در بخش‌های شمال شرقی، جنوب شرقی، مرکزی و بخش اندکی در غرب آبخوان که بیشترین افت را تجربه کرده‌اند، به تشدید کسری مخزن

و افزایش خطرات زیست‌محیطی منجر خواهد شد. بنابراین، اتخاذ راهبردهای مدیریتی نظیر کنترل و کاهش برداشت از چاه‌های پرمصرف، اصلاح الگوی کشت، استفاده از روش‌های نوین آبیاری، تغذیه مصنوعی آبخوان و پایش مستمر کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی امری اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، مدل‌های پیش‌بینی با در نظرگیری سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی، عدم قطعیت‌ها و با استفاده از داده‌های دقیق پمپاژ (نصب کنتورهای هوشمند) و اندازه‌گیری ضریب ذخیره در نقاط مختلف آبخوان، توسعه یابند تا امکان برنامه‌ریزی بلندمدت و پایدار برای منابع آب منطقه فراهم شود.

1. Adam, M. A., Scheiber-Enslin, S. E., & Ali, K. A. (2026). Application of random forest modeling to evaluate groundwater storage changes in the Breede Water Management Area, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 1-16.
2. Afzaal, H., Farooque, A. A., Abbas, F., Acharya, B., & Esau, T. (2020). Estimation of annual groundwater depletion using machine learning algorithms in the Prince Edward Island, Canada. *Water*, 12(9), 2445.
3. Ahmadipour, M.R., Ebrahimi, B., Haghiabi, A.H., and Hashemi, P. (2002). Balance of the Kohdasht Aquifer. Lorestan University.
4. Ashraf, S., Nazemi, A. & AghaKouchak, A. 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Sci Rep* 11, 9135.
5. Asrade, T. M. (2025). Application of machine learning in python for temporal groundwater level prediction. *Solid Earth Sciences*, 10(3), 100261.
6. Azizi, H. R. and Nejatian, N. (2021). Computation of groundwater balance in Varamin plain. *Geography and Human Relationships*, 3(3), 189-204. doi: 10.22034/gahr.2021.263228.1487
7. Bayazidi, M. and Kaki, M. (2021). Storage Volume and Exploitation Changes of Aquifers in the Eastern Plains of the Kurdistan Province. *Journal of Ecohydrology*, 8(1), 57-72. doi: 10.22059/ije.2021.307139.1360.
8. Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45:5–32
9. Clark, S. R., Pagendam, D., & Ryan, L. (2022). Forecasting multiple groundwater time series with local and global deep learning networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5091. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095091>
10. Consulting Engineers for Water and Sustainable Development. (2015). Report on the Water Resources Balance of the Kohdasht Study Area (2207), 77 pages.
11. Dandapat, A. K., Panda, P. K., Sankalp, S., Kisi, O., Kraiem, H., Kucher, O. D., & Tariq, A. (2025). Ensemble deep learning framework for groundwater storage forecasting under hydrological variability. *Acta Geophysica*, 74(1), 1.
12. Davari, S., Eslamian, S., Jamali, M., & Safavi, H. R. (2025). Application of machine learning algorithms for groundwater level prediction in the Najafabad plain. *Scientific Reports*.
13. Ebrahimi khusfi, Z., Vali, A. A., Ghazavi, R. and Khosroshahi, M. (2019). An investigation of the changes in the water table and the storage of western aquifers of Gavkhouni wetland during 1981-2013. *Iranian Water Research Journal*, 13(4), 113-123.
14. Ebrahimi, E., Roozbahani, A. and Banihabib, M. E. (2018). Groundwater Level Prediction Using Dynamic Bayesian Networks Based on Sensitivity Analysis (Case Study: Birjand Plain). *Iranian Water Research Journal*, 12(2), 91-100.
15. Ehteram, M., & Banadkooki, F. B. (2023). A developed multiple linear regression (MLR) model for monthly groundwater level prediction. *Water*, 15(22), 3940.
16. El-Yaouti F, Mandour AEl, Khattach D and Kaufmann O, 2008. Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research* 2: 192- 209.
17. Eslamian, S.S., Nasri, M., and Rahimi, N. 2009. Wet and Dry Periods and its Effects on Water Resources Changes in Buin Plain Watershed. *Geography and Environmental Planning*, 33: 75-90. (In Persian)

18. Fijani, E., Alikhani Joudaki, S., & Mozafari, M. (2021). Investigating the Factors Affecting Groundwater Level Decline in Kouhdasht Aquifer, Lorestan Province. *Civil Infrastructure Researches*, 6(2), 95-105. doi: 10.22091/cer.2021.6978.1253
19. Fitts. C. R. 2002. Groundwater Science. Second Edition, UK, Academic Press. 450
20. Gaur S, Chahar B and Didier R, 2011. Graillot, Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13: 127– 139.
21. George, J., Yadav, J., Nair, A. M., MV, P., Alapatt, B. P., & Baby, R. (2024, September). Improving Groundwater Forecasting Accuracy with a Hybrid ARIMA-XGBoost Approach. In *2024 3rd International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)* (pp. 1-7). IEEE.
22. Gong, Y., Wang, Z., Xu, G., & Zhang, Z. (2018). A comparative study of groundwater level forecasting using data-driven models based on ensemble empirical mode decomposition. *Water*, 10(6), 730. <https://doi.org/10.3390/w10060730>
23. Hadipour, H. Z., Nassery, H., & Alijani, F. (2018). The Hydrogeochemical processes of Kuhdasht aquifer.
24. Hoseini, S. M. and khoshsimaie chenar, M. (2025). Application of machine learning algorithms in groundwater level prediction in the Ardabil aquifer. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(4), 1041-1057. (In Persian)
25. Kardan Moghaddam, H., Rahimzadeh Kivi, Z., Bahreinimotlagh, M., & Alizadeh, M. J. (2019). Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100237.
26. Khorasani, M., Ehteshami, M., Ghadimi, H. *et al.* Simulation and analysis of temporal changes of groundwater depth using time series modeling. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 90.
27. Konikow, L. F. (2015). Long-term groundwater depletion in the United States. *Groundwater*, 53(1), 2-9.
28. Lenters JD, Cutrell GJ, Istanbuluoglu E, Scott DT, Herrman KS and Irmak A, 2011, Eisenhauereasonal energy and water balance of a Phragmitesaustralis -dominated wetland in the Republican River basin of south-central Nebraska (USA). *Journal of Hydrology* 408: 19–34.
29. Maqbool, S., Khan, M. I., Raza, A., Saddique, N., Saddique, Q., Dong, L., ... & Buttar, N. A. (2024). Spatiotemporal Assessment and Machine Learning-Based Future Forecasting of Groundwater Hydro chemical Dynamics and Drawdown Variability.
30. Mesmarian Z, Massahbavan A, Javadipirbazari S. (2016). Climate change impact on Groundwater budgetof ShahreKord plain in the future period. *Iranian Journal of ECO Hydrology*; 3 , 233-242. (In Persian).
31. Mirkamandar, B., Rahnama, M.B. & Zounemat-Kermani, M. (2025). Spatio-temporal assessment of groundwater and agricultural land using remote sensing in a semi-arid region. *Environ Earth Sci* 84, 440.
32. Mohammadi Ghaleni, M., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2013). Evaluation impact of drought, extraction and construction of dam on the groundwater drop-case study Saveh aquifer. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(4), 189-200.
33. Nury, A. H., Taher, A., Alam, S., Afroz, R., Anti, S. D., Majumdar, S. N., & Munna, G. M. (2025). Assessment of groundwater variability using ARIMA, random forest, and LSTM-RNN in the northeastern region of Bangladesh. *H2Open Journal*, 8(5), 336-360.
34. Poormohammadi, S. , Dastorani, M. T. , Jafari, H. , Rahimian, M. O. H. , Goodarzi, M. , Mesmarian, Z. and Baqeri, F. (2015). Investigation of groundwater balance in Tuserkan plain of Hmaedan using MODFLOW. *Journal of Ecohydrology*, 2(4), 371-382. doi: 10.22059/ije.2015.58063

35. Saadatmand, E., and Komasi, M. (2024). A hybrid ensemble learning wavelet-GARCH-based artificial intelligence approach for streamflow and groundwater level forecasting at Silakhor plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(3), 1-17.
36. Shakiba, A., Mirbagheri, B., and Kheiri, A. 2010. Drought analysis using SPI index and its effects on groundwater resources in East of Kermanshah, Iran. *Geograph. J.* 25: 105-124. (In Persian)
37. Shirafkan, M., and Jafari.H. (2013). Evaluation of the hydrogeological balance of the Bahabad aquifer in Yazd province. 8th Iranian Conference on Engineering and Environmental Geology, Ferdowsi University of Mashhad.
38. Soleimani-Motlagh, M., Soleimani-Sardo, M. & Mossivand, A.M. (2022). The efficiency of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) in assessing the impact of drought on vegetation cover. *Environ Monit Assess* 194, 299. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09972-z>
39. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I . (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.