



Investigating The Impact of Implementing Management Plans on Water Resources and Demand in The Khorramabad River Basin Under Climate Change Conditions

Roghayeh Amiri¹ | Seyed Yahya Mirzaee² | Manuchehr Chitsazan³

1. Ph.D. Student of Hydrogeology, Faculty of Geosciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.
2. Associate Professor of Hydrology, Faculty of Geosciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.
3. Professor of Hydrogeology, Faculty of Geosciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran.

✉Corresponding Author: Yahya2010@yahoo.com

Received:
03 March 2025

Accepted:
01 June 2025

Published:
22 September 2025

Keywords:

*Climate change,
SSP scenarios,
Integrated management,
ANFIS,
MODFLOW model.*

Extended abstract

Introduction

In arid and semi-arid regions, water resources are scarce due to low rainfall and consequently the seasonality of river streams. On the other hand, due to urbanization, industrialization, rapid population growth, and climate change, surface water and groundwater shortages have become a common problem in these regions. The reduction of surface water resources leads to increased exploitation of groundwater resources and consequently decreased aquifer storage (Hssaisoune et al., 2020; Hardi et al., 2022). Therefore, planning, analyzing, and optimally managing water resources at the basin, regional, or national level is logical and necessary to balance water supply and demand (Haddad et al., 2013). Accurate assessment of water resource performance plays an important role in the sustainability and exploitation of water resources. In this context, the development of hydrological modeling in recent years has improved the accuracy and usefulness of these techniques in integrated water resources management (Chuma et al., 2024).

Cite this article: Amiri, R., Mirzaee, S.Y. & Chitsazan3, M. (2025). Investigating The Impact of Implementing Management Plans on Water Resources and Demand in The Khorramabad River Basin Under Climate Change Conditions. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (1), 1-20. DOI: <http://10.22077/jaaq.2025.9326.1112>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The main objective of this study is to conduct an integrated assessment of the effects of climate change on surface and groundwater resources in the central plain of Khorramabad, and then to investigate the impact of implementing management plans on the status of groundwater resources in the agricultural sector under climate change scenarios using a combination of ANFIS and MODFLOW models.

Materials and Methods

The MODFLOW code in the GMS software was used to assess the effects of climate change on groundwater resources in the central plain of Khorramabad. The modeling steps using MODFLOW include preparing a conceptual model, selecting a numerical model, designing a model, calibrating in two stable and unstable states, sensitivity analysis, and validating. The ANFIS model was used to simulate precipitation-runoff. ANFIS modeling includes training and testing steps. To simulate climate change, first, historical data from 6 GCM models based on the Sixth Intergovernmental Panel on Climate Change (CMIP6) were downloaded and compared with observational data. After selecting the best GCM model, the LARS-WG model was used to downscale the data. In the next stage, the effects of climate change on water resources were examined under different management scenarios. Then, the performance of all models was evaluated by the ME, MAE, and RMSE criteria for the MODFLOW model and NSE, RMSE, and R2 for the other models. Finally, the implementation scenario of the new irrigation plan was defined, and the effects of its implementation on groundwater resources were examined under SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5).

Results and Discussion

After proving the efficiency of the models used in this study (Table 1), the effects of climate change on surface and groundwater resources were examined. Based on the results of the climate change simulation, in the SSP scenarios, in the future, rainfall will decrease, and minimum and maximum temperatures will increase. Also, according to the results obtained from the ANFIS model, the average river discharge under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios will decrease by 1.89, 1.9, and 4.88 million cubic meters per second, respectively, compared to the base period average (63.9 mcm/s). According to the results obtained from the MODFLOW model, the groundwater level and aquifer storage in all three SSP scenarios decrease compared to the modeling period. Accordingly, the average water level in all three scenarios, SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, decreases by 13.65, 25.54, and 28.24 meters compared to the average water level of the base period (1187 m), respectively. Also, the average annual aquifer storage decreases in all three climate scenarios. The average aquifer storage in all three scenarios, SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, decreases by 82.88, 143.11, and 171.58 million cubic meters compared to the average aquifer storage in the base period (480 mcm), respectively.

Table 1. Performance Evaluation Criteria of MRI-ESM2, LARS-WG7, and ANFIS Models

Model		R ²	RMSE	NSE
MRI-ESM2	Precipitation	0.32	0.505	0.26
	Minimum Temperature	0.54	3.94	0.49
	Maximum Temperature	0.501	6.43	0.44
	Average Monthly Precipitation	0.983	1.13	0.986
LARS-WG7	Average Monthly Minimum Temperature	0.999	0.064	0.999
	Average Monthly Maximum Temperature	0.999	0.070	0.999
	Average Monthly Sunshine	0.998	0.089	0.999
ANFIS	Train Period	0.96	1.07	0.98
	Test Period	0.94	3.26	0.86

Implementation of the irrigation plan: In this scenario, irrigation efficiency increases by 30 percent. According to the results of this study, if the irrigation plan is implemented, the average groundwater level in SSP1-2.6, SSP 2-4.5, and SSP 5-8.5 scenarios will decrease by about 3.8, 14.7, and 18.0.5 meters compared to the average of the base period in the mentioned scenarios, respectively. The average groundwater storage in SSP1-2.6, SSP 2-4.5, and SSP 5-8.5 scenarios is about 478.4, 427, and 389.5 mcm, respectively, which is a decrease of about 1.6, 53, and 90.4 mcm compared to the average of the base period groundwater storage in the above scenarios, respectively.

Conclusion

The findings of this study show that climate change, with increasing temperature and decreasing rainfall, will significantly affect the Khorramabad watershed. Based on the results, the effects of climate change will reduce surface and groundwater resources in the future. Implementing the new irrigation plan scenario in the agricultural sector will reduce groundwater level decline and increase aquifer storage in the future under the SSP scenarios.



بررسی تأثیر اجرای طرح آبیاری نوین بر منابع آب دشت مرکزی خرم آباد تحت شرایط تغییر اقلیم

رقیه امیری^۱ | سید یحیی میرزایی^۲ | منوچهر چیت سازان^۳

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران.

۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران.

۳. استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، خوزستان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Yahya2010@yahoo.com

چکیده

رشد سریع جمعیت توأم با توسعه اجتماعی-اقتصادی و تغییرات اقلیمی باعث بروز مشکلات بزرگی در سراسر جهان شده است. کاهش منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک نمونه‌ای از این مشکلات است زیرا در سال‌های اخیر بارندگی کاهش و فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی افزایش یافته است. این وضعیت منجر به تنش آبی و نیاز به مدیریت منابع آب در حوضه آبریز خرم آباد شده است. بنابراین در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در سناریوهای مختلف با استفاده از مدل‌های ANFIS و MODFLOW بررسی شد. ابتدا شرایط فعلی منابع سطحی و زیرزمینی موجود به صورت ماهانه با استفاده از مدل‌های ANFIS و MODFLOW شبیه‌سازی شد. سپس مدل‌های تغییر اقلیم، ANFIS و MODFLOW با هم تلفیق شدند. بعد از تلفیق مدل‌ها وضعیت منابع آب سطحی و زیرزمینی در آینده (۲۰۶۰-۲۰۲۵) با استفاده از نتایج سناریوهای SSP (SSP1-2.6، SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5) مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوهای SSP میانگین سالانه بارش کاهش و میانگین سالانه دماهای حداقل و حداکثر افزایش می‌یابد. براساس نتایج حاصل از تلفیق سناریوهای SSP با مدل‌های ANFIS و MODFLOW میانگین سالانه دبی رودخانه، سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان تحت سناریوهای SSP نسبت به میانگین دوره پایه کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد، در اثر تغییر اقلیم و در سناریوهای SSP تأمین آب کشاورزی دچار مشکل خواهد شد. با اجرای طرح آبیاری بخش زیادی از نیاز آبی کشاورزی تحت شرایط تغییر اقلیم تأمین خواهد شد. همچنین در سناریوهای SSP نسبت به روش آبیاری فعلی، افت سطح آب زیرزمینی کاهش و ذخیره آبخوان افزایش خواهد یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:

تغییر اقلیم،

سناریوهای SSP،

مدیریت یکپارچه،

ANFIS

مدل MODFLOW

مقدمه

آب یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی برای حیات انسان بر روی زمین است. همچنین میراثی است که باید برای نسل‌های آینده محافظت شود و به طور پایدار توسعه یابد. در دهه‌های اخیر، خشک‌سالی و کمبود آب در سراسر جهان به دلیل رشد سریع جمعیت، آبیاری، تغییرات آب و هوایی و مدیریت ناپایدار آب در سراسر جهان افزایش یافته است (Bao and Fang, 2007; Larsen and Kørnø, 2009; Pinarlik and Selek, 2024). تغییرات اقلیمی منابع آبی در دسترس را به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو آب‌های سطحی در دسترس به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Marchane et al. 2017; Caloiero et al. 2018). کاهش منابع آب سطحی موجب افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش ذخیره آبخوان می‌شود (Hssaisoune, et al. 2022). بنابراین برنامه‌های مدیریت پایدار برای اطمینان از در دسترس بودن طولانی مدت منابع آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضروری هستند (Morote et al. 2019; Abd-Elaty and Straface, 2022). بخش کشاورزی بیشترین مصرف آب را دارد. بنابراین، شیوه‌های مدیریت آبیاری موفق باید استفاده منطقی از آب را در کنار حداکثر راندمان مصرف آب، عملکرد بالای محصولات و بازگشت سود در نظر بگیرد (Ward and Pulido-Velazquez, 2008; Levidow, 2014).

در حال حاضر، مدیریت منابع آب بر استفاده ترکیبی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأکید دارد. استفاده مشترک به معنای بهره‌گیری از آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق تعامل آنها توسط فرآیندهای مختلف است (Sabale et al., 2022). استفاده مشترک از منابع آب ابزاری قدرتمند برای مقابله با کمبود آب در شرایط خشک‌سالی و رسیدن به اهداف توسعه پایدار است (Sabale et al., 2022). در این زمینه به منظور بررسی اثرات شرایط آینده (اقلیم، کاربری زمین، تقاضای آب، سازگاری، و غیره) بر سیستم‌های منابع آب و مدیریت بهینه این سیستم‌ها، باید از تلفیق فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی استفاده کرد. به این منظور می‌توان از مدل‌سازی‌های

یکپارچه منابع آب جهت رسیدن به نتایج سازگارتر با واقعیت استفاده کرد.

توسعه مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی توسط مدل‌های هوش مصنوعی در سال‌های اخیر، دقت و سودمندی این تکنیک‌ها را در مدیریت منابع آب بهبود بخشیده است (Chang et al., 2020; Chuma et al., 2024). قابلیت شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی آینده و اثرات آن‌ها بر منابع آب با پیشرفت‌هایی در جفت کردن مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی امکان‌پذیر شده است (Bañares et al., 2024). از طریق این ترکیب، روش‌های مؤثری برای مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی توسعه یافته است (Dankers et al., 2013). اجرای هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، اکولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی که در مدل‌های جفت شده ترکیب شده‌اند، یک روش جامع مدیریت منابع آب را ارائه می‌دهند. اخیراً مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که چگونه مدل‌های جفت شده و روش‌های هوش مصنوعی ابزار مفیدی برای کمک به مدیریت یکپارچه منابع آب هستند. به عنوان مثال ناظری تهرودی و همکاران (Nazeri-Tahroudi et al., 2017)، در یک مطالعه از سه مدل $ANFIS^1$ (سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی)، SVM^2 (ماشین بردار پشتیبان) و GP^3 (برنامه‌ریزی ژنتیک) برای مدلسازی دبی ماهانه رودخانه نازلوچای در محل ایستگاه هیدرومتری تپیک واقع در غرب دریاچه ارومیه تحت تأثیر بارش حوضه استفاده کردند. در همه روش‌های یاد شده الگوهای M1 تا M5 داده‌های دبی جریان با تأخیر یک تا پنج و الگوهای M6 تا M10 الگوی ترکیبی با داده‌های بارش و دبی و با تأخیرهای یک تا پنج ماه بررسی شدند. نتایج بررسی دقت و میزان خطای مدل‌ها نشان داد الگوی ترکیبی فقط در مدل SVM بهترین نتیجه را داده است و در دو مدل ANFIS و GP الگوهای تک سری بهترین نتیجه را ارائه کردند. به طور کلی نتایج نشان داد با به‌کارگیری مدل ANFIS در مدلسازی دبی جریان ماهانه رودخانه نازلوچای، خطای مدل نسبت به دو مدل GP و SVM به ترتیب حدود ۲۳ و ۳ درصد (در واحد دبی

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

² Support Vector Machine

³ Genetic Programming

سپس بررسی اثرات روش‌های نوین آبیاری بر سطح و ذخیره آبخوان با استفاده از تلفیق مدل‌های ANFIS و MODFLOW است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز خرم‌آباد بخشی از حوضه رودخانه دائمی خرم‌آباد است که یکی از زیرحوضه‌های رودخانه کرخه می‌باشد. این حوضه شامل یک دشت اصلی (دشت مرکزی) و تعدادی دشت کوچک از جمله دشت ده‌پیر، کمالوند و خرم‌آباد است. دشت مرکزی خرم‌آباد بیضی شکل بوده و به طول حدود ۲۵ کیلومتر در جهت شمال غرب- جنوب شرق با مختصات طول شرقی $48^{\circ}21'$ تا $49^{\circ}08'$ و عرض شمالی $33^{\circ}13'$ تا $33^{\circ}44'$ در محدوده‌ی جنوب و جنوب غرب شهرستان خرم‌آباد واقع شده است (شکل ۱). خروجی حوضه آبریز خرم‌آباد رودخانه چمانجیر است. متوسط بارش سالانه محدوده مطالعاتی خرم‌آباد ۵۰۸ میلی‌متر و متوسط دمای آن $17/2^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد است (آمار ۵۰ ساله، ۲۰۲۰-۱۹۷۱). متوسط ارتفاع منطقه ۱۹۰۳ متر، مساحت محدوده حوضه آبریز ۲۵۰۳ کیلومترمربع و مساحت آبخوان مرکزی دشت خرم‌آباد حدود ۱۰۴ کیلومترمربع می‌باشد (Mirzaee et al., 2023). آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد به طور کلی از لایه‌های آبرفتی با دانه‌بندی‌های مختلف و در حاشیه‌ها از واریزه‌های ناشی از فرسایش سازندهای زمین‌شناسی به ویژه سازندهای سروک، کشکان و آسماری تشکیل شده است. ساختگاه سد مخزنی مخمل‌کوه در ۷ کیلومتری شمال شهر خرم‌آباد و در ضلع شرقی مخمل‌کوه قرار دارد. دسترسی به محدوده ساختگاه از طریق خروجی واقع در ابتدای جاده خرم‌آباد-بروجرد با طی ۱۵ کیلومتر جاده آسفالت و ۲ کیلومتر جاده خاکی میسر است.

مواد و روش

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در این پژوهش از نرم‌افزار GMS 10.8 و کد MODFLOW استفاده شده است. MODFLOW یک مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی با تفاضل محدود است. جریان آب زیرزمینی درون آبخوان در MODFLOW با استفاده از رویکرد

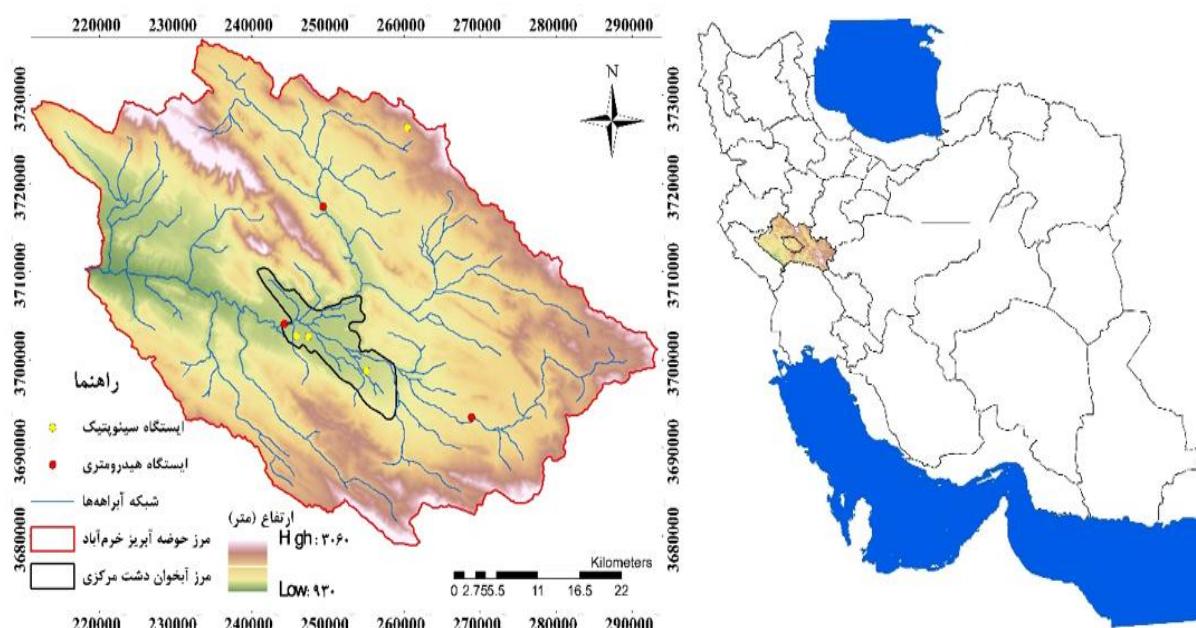
جریان) کاهش و دقت مدل نیز نسبت به دو مدل GP و SVM به ترتیب حدود ۱۰ و ۴ درصد افزایش می‌یابد. از دیگر مطالعات که در زمینه مدل‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی انجام شده است، می‌توان به چگونگی تأثیر عرضه و تقاضای آب در آینده را بر منابع آب سطحی و زیرزمینی تحت تغییر اقلیم در زیرحوضه مهم قروه- دهگلان با استفاده از مدل‌سازی ترکیبی WEAP-MODFLOW-ML بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، سطح آب آبخوان‌ها در دوره آتی نسبت به دوره پایه حدود $1/2$ متر در سال کاهش می‌یابد. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی باعث کاهش ورودی مخزن تا حدود ۲۵ درصد می‌شود که در پایان سال ۲۰۴۵ آب منطقه را به ۶۵ میلیون متر مکعب کاهش می‌دهد (Rahimi Jamnani et al., 2024). در مطالعه دیگری ترکیب مدل‌های MODFLOW و LSTM برای مدیریت پیشرفته آب‌های زیرزمینی در دشت‌های ساحلی استان لاذقیه مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی سطح آب‌های زیرزمینی و ارزیابی قابلیت‌های پیش‌بینی شبکه‌های LSTM¹ (حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت) برای پیش‌بینی تغییرات زمانی در سطح آب‌های زیرزمینی بود. یافته‌ها نشان داد که MODFLOW به طور مؤثر فرآیندهای فیزیکی آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که LSTM دینامیک غیرخطی و زمانی را ثبت می‌کند. ادغام این مدل‌ها، خطاهای پیش‌بینی را تا ۲۰٪ در مقایسه با رویکردهای مستقل کاهش داده و دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی را افزایش می‌دهد (Motawej, 2025).

با توجه به کاهش منابع آب سطحی در حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد و استفاده از منابع آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف و همچنین افت تراز آب زیرزمینی در دشت‌های موجود به دلیل برداشت بی‌رویه از آبخوان لازم است اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب این حوضه بررسی شود. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت مرکزی خرم‌آباد و

¹ Long short-term memory

شبکه توصیف می‌کند.

تفاضل محدود بلوک محور شبیه‌سازی شده است. معادله دیفرانسیل جزئی (رابطه ۱) جریان آب زیرزمینی را در هر



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

Fig 1. Geographical Location of The Study Area.

جرم در ماژول مرزهای بخش ورودی تخصیص داده شده و ویرایش می‌شود. در بسیاری از موارد، پس از ساخت و طراحی مدل، اصلاحاتی در پارامترهای ورودی به منظور بهبود دقت نتایج مدل ضروری است. این اصلاحات به مدل امکان می‌دهند تا ارتباط بهتری میان مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده برقرار کند. این فرآیند به عنوان واسنجی شناخته می‌شود (Patil et al., 2020). پس از تکمیل مرحله واسنجی، مدل باید تحت فرآیند صحت‌سنجی قرار گیرد تا عملکرد آن ارزیابی شود. در صورتی که صحت و قابلیت پیش‌بینی مدل در آزمون‌های مستقل از داده‌ها در محدوده‌های قابل قبول تأیید شود، صحت‌سنجی مدل با موفقیت به پایان می‌رسد. در مرحله بعد، تحلیل حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها انجام می‌گیرد. در نهایت، برای ارزیابی و سنجش دقت مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده، از سه شاخص میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده می‌شود. این شاخص‌ها عملکرد مدل را در تخمین متغیرهای شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای ارزیابی می‌کنند.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه ۱، h بار هیدرولیکی (m) و یک متغیر مستقل است. K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} هدایت هیدرولیکی (m.day^{-1}) را به ترتیب در جهت‌های x ، y و z نشان می‌دهند، S_s ضریب ذخیره ویژه را نشان می‌دهد که یک کمیت بدون بعد است و حرف W نشان دهنده منبع تغذیه یا تخلیه و واحد آن بر روز ($1/\text{day}$) است.

نخستین گام در مدل‌سازی آب زیرزمینی، ایجاد یک مدل مفهومی است که شامل تعیین مرزهای مدل، تعریف واحدهای هیدرواستراتیگرافی، سیستم جریان و تهیه بیان می‌باشد (Mirzaee et al., 2023). مرحله بعدی در فرآیند مدل‌سازی، تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی است. در این مرحله، داده‌های مختلف به صورت ورودی‌هایی سازمان‌یافته به یک مدل عددی مبتنی بر شبکه MODFLOW تبدیل می‌شوند. شرایط مرزی بخش مهمی در راه اندازی مدل MODFLOW است. برای نشان دادن رابطه سیستم با سیستم اطراف، مجموعه‌ای از شرایط مرزی مناسب مورد نیاز است. در Visual MODFLOW، شرایط مرزی برای مدل‌های جریان آب زیرزمینی و انتقال

Rule2:

(۶)

If x is A_2 and B_2 , then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

در روابط بالا A_i و B_i مجموعه‌های فازی هستند (توابع عضویت (MFs) برای ورودی‌های x و y). μ_i ، q_i و r_i پارامترهای طراحی (پارامترهای تابع خروجی / پارامترهای متعاقب) هستند که در طول فرآیند آموزش تخمین زده می‌شوند. خروجی به دست آمده در هر قانون، ترکیب خطی متغیرهای ورودی به اضافه یک جمله ثابت است. در این مطالعه از مکانیسم استدلال فازی مدل Sugeno برای استخراج تابع خروجی (f) از متغیرهای ورودی معین (x و y) استفاده شده است (شکل ۲).

لایه ۱: جهت یافتن راه حل برای هر مسأله از اتوابع عضویت (MF) مختلف استفاده می‌شود. MF ممکن است هر تابع مناسب (پیوسته و تکه تکه متمایز) مانند توابع گاوسی، دوزنقه‌ای، زنگوله‌ای تعمیم یافته و مثلثی شکل باشد.

برای تابع زنگوله‌ای تعمیم یافته، خروجی لایه اول (گره i th) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + |(x - c_i)/a_i|^{2b_i}} \quad (۶)$$

که در آن (c_i, b_i, a_i) مجموعه پارامترهای مقدماتی است و با تغییر این پارامتر مقدماتی، شکل MF می‌تواند تغییر کند. برای یک تابع گاوسی، خروجی اولین لایه (گره i th) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x - c_i}{\sigma_i})^2} \quad (۷)$$

که در آن (c_i, σ_i) مجموعه پارامترهای مقدماتی است و با تغییر این پارامتر شکل MF می‌تواند تغییر کند. مرکز MF با c نشان داده می‌شود در حالی که عرض MF با σ نمایش داده می‌شود.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (h_0 - h_s)_i}{n} \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |(h_0 - h_s)_i|}{n} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((h_0 - h_s)_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

در روابط بالا: h_s مقدار بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار، h_0 مقدار بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهداتی دشت و n تعداد پیزومترها می‌باشد (Mirzaee et al., 2023).

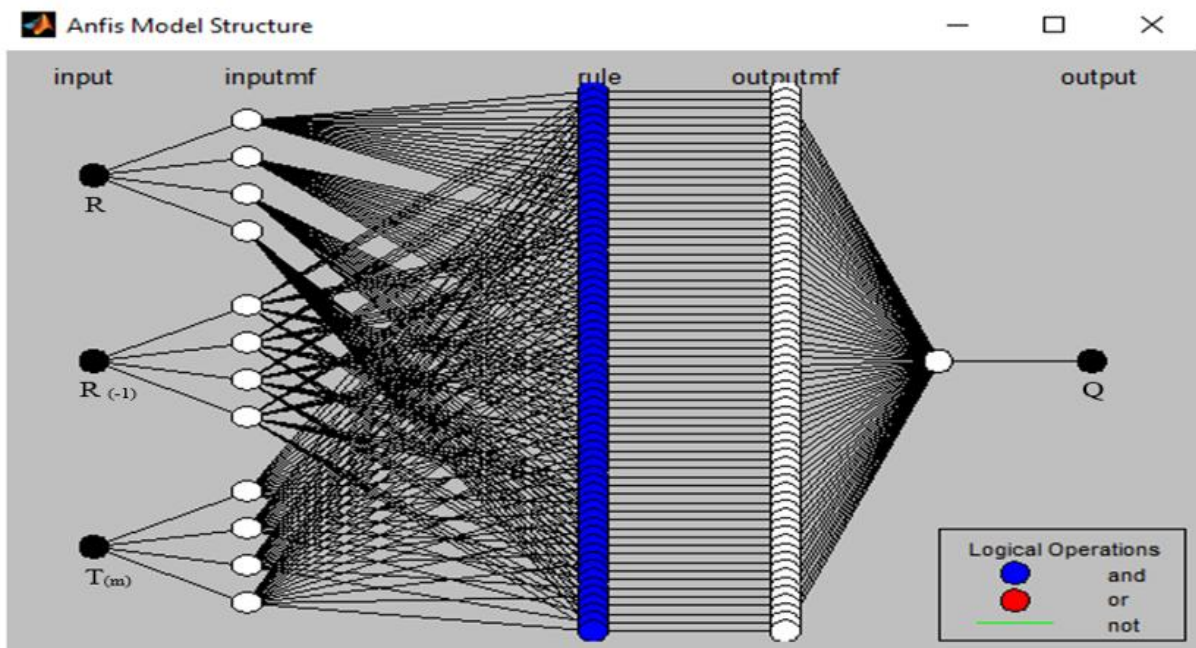
شبیه‌سازی جریان هیدرولوژیکی

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) استفاده شده است. ساختار ANFIS از گره‌های زیادی تشکیل شده است که از طریق لینک‌های جهت‌دار به هم متصل می‌شوند. هر گره عملکرد خاصی را با پارامترهای ثابت یا قابل تنظیم خود انجام می‌دهد (Kisi 2015). سیستم فازی Takagi-Sugeno یک سیستم فازی ضروری است. قوانین If-Then را در پلتفرم قانون خود ذخیره می‌کند (Ebtahaj and Bonakdari 2014; Seo et al. 2015). Takagi-Sugeno FIS دقیق‌ترین و پرکاربردترین FIS مدل‌سازی فازی است (Jang 1993). برای سیستم واسط فازی Takagi-Sugeno مرتبه اول با دو ورودی (x و y) و یک خروجی (f)، با در نظر گرفتن دو قانون فازی If-Then در پایه قانون، دو قانون معمولی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

Rule1:

(۵)

If x is A_1 and B_1 , then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$



شکل ۲. ساختار مدل ANFIS مورد استفاده در این مطالعه

Fig 2. Structure of The ANFIS Model Used in This Study

$$O_i^5 = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (12)$$

گره ثابت، لایه خروجی نهایی را با اضافه کردن کل سیگنال دریافتی محاسبه می‌کند. به این ترتیب، بردار ورودی را می‌توان لایه به لایه وارد ساختار ANFIS کرد. از یک الگوریتم ترکیبی به عنوان الگوریتم یادگیری برای آموزش استفاده می‌کند که روش نزول حداقل مربع و گرادیان را ترکیب می‌کند. پارامترهای متعاقب $\{r_i, q_i, p_i\}$ و پارامترهای مقدماتی $\{c_i, b_i, a_i\}$ باید بهینه شوند. پارامترهای متعاقب با استفاده از روش حداقل مربعات در طول گذر رو به جلو رویکرد یادگیری ترکیبی، زمانی که خروجی‌های گره به جلو حرکت می‌کنند، شناسایی می‌شوند. سیگنال‌های خطا در طول گذر به عقب رو به عقب منتشر می‌شوند. پارامترهای مقدماتی با استفاده از روش گرادیان کاهشی تنظیم می‌شوند (Seo et al. 2015).

خوشه‌بندی تفریقی: خوشه‌بندی داده شامل گروه‌بندی نقاط داده مشابه است. در خوشه‌بندی تفریقی، تعداد مراکز خوشه و قوانین فازی یکسان است. چگالی نقاط داده نقش حیاتی در انتخاب مرکز خوشه ایفا می‌کند. به عنوان مثال اگر n نقطه داده $(S_1, \dots, S_n)$ را در نظر بگیریم. فرض

لایه ۲: هر گره در این لایه یک گره ثابت با برچسب II است که خروجی آن همه سیگنال‌های دریافتی را ضرب می‌کند. خروجی O_{i2} قدرت شلیک یک قانون را نشان می‌دهد و می‌توان آن را به صورت زیر تعیین کرد.

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(x) \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

لایه ۳: هر گره در این لایه یک گره ثابت با برچسب N است. گره i th در این لایه قدرت شلیک نرمال شده را به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{(W_1 + W_2)} \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

لایه ۴: هر گره i در این لایه یک گره مربع همراه با تابع گره است:

$$O_i^4 = \bar{W}_i W f_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (11)$$

که در آن $\bar{W}_i$ یک قدرت شلیک نرمال شده به دست آمده در لایه سه است و $\{r_i, q_i, p_i\}$ مجموعه پارامترهای این گره (پارامترهای متعاقب) است.

لایه ۵: گره منفرد در این لایه یک گره ثابت با برچسب سیگما است که خروجی کلی را به عنوان مجموع تمام سیگنال‌های دریافتی محاسبه می‌کند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (17)$$

در روابط بالا P_i , O_i , $\bar{P}$, $\bar{O}$ و n به ترتیب داده‌های مشاهداتی، داده‌های محاسباتی، میانگین داده‌های مشاهداتی، میانگین داده‌های محاسباتی و تعداد داده‌ها می‌باشند (Nassery et al., 2021).

پس از انتخاب بهترین مدل، داده‌های بارش و دمای آینده برای بازه زمانی ۱۴۴۰-۱۴۰۴ بر اساس سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شدند. برای تحلیل تغییرات اقلیمی، از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد به دلیل دارا بودن سری زمانی مناسب استفاده شد. در مرحله بعد به منظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده، ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها با استفاده از مدل LARS-WG² (مولد آب و هوای ایستگاه تحقیقاتی لانگ اشتون) و روش عامل تغییر (دلتا) انجام گرفت. مراحل شبیه‌سازی توسط مدل LARS-WG شامل سه مرحله واسنجی مدل، ارزیابی مدل و تولید داده‌های اقلیمی برای دوره آینده است. همچنین روش عامل تغییر امکان محاسبه تغییرات متغیر اقلیمی مورد نظر را در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه فراهم می‌کند و بر این اساس می‌توان سناریوی تغییر اقلیم برای آن متغیر را استخراج کرد (Diaz-Nieto and Wilby 2005). در این روش، تغییرات دما با استفاده از اختلاف مقادیر و تغییرات بارندگی با استفاده از نسبت مقادیر محاسبه می‌شوند (Lipczynska-Kochany 2018).

$$\Delta P = \frac{P_{future} - P_{base}}{P_{base}} \quad (18)$$

$$\Delta T = T_{future} - T_{base} \quad (19)$$

بر این است که هر نقطه داده در ابتدا مرکز خوشه را نشان می‌دهد. در هر نقطه، شاخص چگالی (S_i) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^n e^{\left(-\frac{\|S_i - S_j\|^2}{(r_b/2)^2}\right)} \quad (13)$$

که در آن r_b شعاع همسایگی هر مرکز خوشه است ($r_b > 0$). اول، مرکز خوشه S_{c1} به عنوان اولین مرکز خوشه‌ای عمل می‌کند که توسط شاخص چگالی S_{ci} تعیین می‌شود. شاخص چگالی S_{i+1} با استفاده از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i = S_{i+1} - S_{ci} e^{\left(-\frac{\|S_i - S_j\|^2}{(r_b/2)^2}\right)} \quad (14)$$

که در آن r_c یک شعاع همسایگی و نشان دهنده کاهش قابل اندازه‌گیری چگالی است ($r_c > 0$). پس از اندازه‌گیری چگالی، S_{c2} به عنوان مرکز خوشه بعدی، انتخاب می‌شود. این فرآیند تکرار می‌شود تا زمانی که به تعداد کافی مراکز خوشه به دست آید.

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی

برای شبیه‌سازی تغییر اقلیم، ابتدا داده‌های تاریخی مربوط به ۶ مدل GCM¹ (مدل گردش عمومی جو) بر اساس سری ششم گزارشات تغییر اقلیم (CMIP6) دانلود و با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. در مرحله نخست، متغیرهای اقلیمی شامل دما و بارش برای دوره تاریخی از هر یک از ۶ مدل GCM انتخابی (جدول ۱)، از پایگاه داده ESGF استخراج گردیدند.

سپس، این داده‌ها با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. برای انجام این مقایسه و انتخاب بهترین مدل GCM، از شاخص‌های ضریب نش ساتکلایف (NSE)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (15)$$

² Long Ashton Research Station Weather Generator

¹ Global Circulation Model

جدول ۱. نام مدل‌ها ارزیابی شده و خصوصیات آن‌ها.

Table 1. Names of The Evaluated Models and Their Characteristics.

ردیف	نام مدل	کشور	مؤسسه
Row	Model Name	Country	Institute
1	ACCESS-CM2	استرالیا Australia	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع، شورای عالی تحقیقات استرالیا برای علم سیستم اقلیم Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Research Council for Climate System Science
2	CanESM5	کانادا Canada	مرکز کانادایی برای مدل‌سازی و تحلیل اقلیم Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
3	EC-Earth3	اروپا Europe	EC-Earth کنسرسیوم EC-Earth Consortium
4	HadGEM3-GC31-LL	اوکراین Ukraine	مرکز Met Office Hadley Met Office Hadley Centre
5	MIROC6	ژاپن Japan	آژانس ژاپنی علوم و فناوری زمین و دریا، مؤسسه تحقیقات جو و اقیانوس (دانشگاه توکیو)، مؤسسه ملی مطالعات محیطی، مرکز علوم محاسباتی RIKEN Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Institute for Atmospheric and Oceanic Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, RIKEN Computational Science Center
6	MRI-ESM2-0	ژاپن Japan	پژوهشکده هواشناسی Meteorological Research Institute

در روابط ۱۸ و ۱۹، ΔP و ΔT به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم بارندگی و دما در دوره بعدی در هر ماه هستند. T_{future} میانگین دمای ۲۰ ساله آینده شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره بعدی برای هر ماه، T_{bases} میانگین دمای ۲۰ ساله شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشاهده‌ای در هر ماه است. P_{base} و P_{future} نیز به ترتیب میانگین ۲۰ سال بارش شبیه‌سازی شده در آینده و خط پایه مشاهده شده را نشان می‌دهند (Simin, Sheikha-BagemGhaleh1 et al., 2023).

در نهایت عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی با استفاده از معیارهای R^2 ، RMSE و NSE (روابط ۱۵، ۱۶ و ۱۷) مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد از کد MODFLOW موجود در نرم‌افزار GMS 10.8 استفاده شد. در ابتدا مدل مفهومی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد به لحاظ مکانی و زمانی شبکه‌بندی شد. در این راستا از نظر مکانی شبکه‌ای سه

بعدی شامل ۱۲۲ ردیف (بعد x) و ۱۱۴ ستون (بعد y) و با اندازه سلولی ۱۵۰×۱۵۰ متر تهیه شد. از نظر زمانی مدل مفهومی به ۱۲۰ گام زمانی در مقیاس ماهانه تفکیک شد. سپس اطلاعات سه پارامتر توپوگرافی، سنگ کف و بارهیدرولیکی اولیه به مدل مفهومی داده شد. سایر اطلاعات از طریق بسته‌های مناسب به مدل مفهومی اعمال شد. مدل آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد برای دو حالت پایدار و ناپایدار واسنجی شد. در حالت پایدار مهر ۱۳۸۹ به عنوان ماه پایدار در نظر گرفته شد. در حالت ناپایدار مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی برای یک دوره ۱۲۰ ماهه (۱۰ ساله) از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۹ انجام شد. پس از واسنجی مدل در حالت پایدار، مدل برای حالت ناپایدار اجرا شد. در شرایط ناپایدار تمامی ورودی‌ها به مدل که وابسته به زمان هستند شامل اطلاعات سطح ایستابی، چاه‌های مشاهداتی، تغذیه، پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری، سطح آب بسته مرزی GHB و کنداکتانس رودخانه برای ۱۲۰ ماه آماده و به مدل ناپایدار اعمال شد. واسنجی مدل به دو صورت دستی و خودکار (PEST)

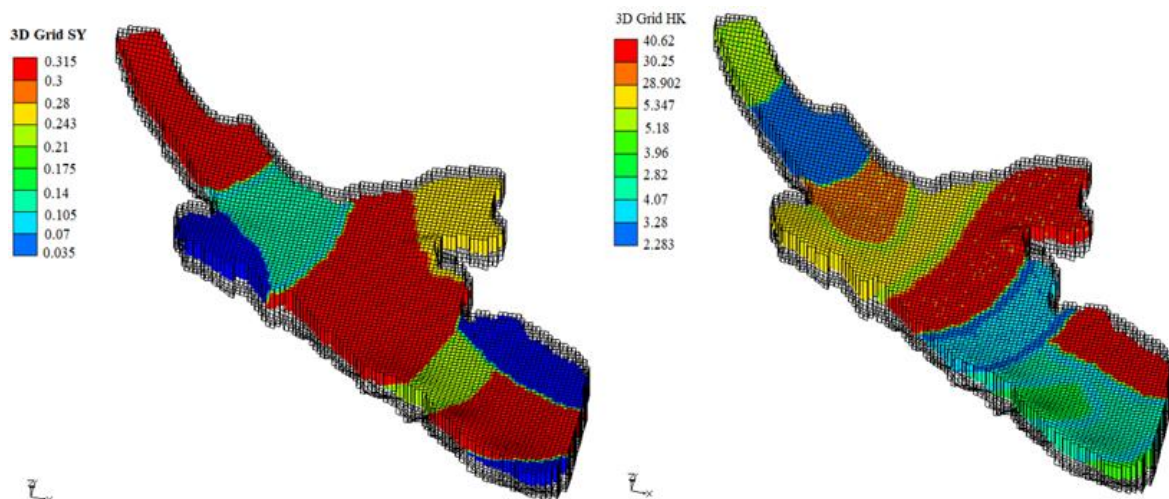
انجام گرفت. در هر دو روش مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه (شکل ۳) و جریان‌های ورودی و خروجی به مدل تصحیح شد. مقادیر انواع خطا بعد از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار در جدول ۱ آورده شده است. پس از انجام واسنجی به منظور تأیید کارایی مدل جهت

انجام گرفت. در هر دو روش مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه (شکل ۳) و جریان‌های ورودی و خروجی به مدل تصحیح شد. مقادیر انواع خطا بعد از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار در جدول ۱ آورده شده است. پس از انجام واسنجی به منظور تأیید کارایی مدل جهت

جدول ۲. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل MODFLOW.

Table 2. Performance Evaluation Criteria of The MODFLOW Model.

معیارهای عملکرد مدل			مراحل مدلسازی	مدل
Performance evaluation criteria			Modeling Steps	Model
RMSE	MAE	ME	واسنجی حالت پایدار	MODFLOW
0.53	0.47	0.015	Steady state calibration	
0.57	0.48	-0.04	واسنجی حالت ناپایدار	
0.96	0.81	-0.03	Transient state calibration	
			صحت‌سنجی	
			Verifyfatio	



شکل ۳. منطقه‌بندی و مقادیر K و Sy آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد پس از دوره واسنجی.

Fig 3. Zoning and K and Sy Values of The Central Plain Aquifer of Khorramabad After The Calibration Period.

متغیرها بر اساس فرمول زیر نرمال و سپس به شبکه معرفی گردید.

$$x_n = 0.8 \times \left(\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) + 0.1 \quad (20)$$

در رابطه فوق x_i مقدار واقعی داده نام، x_{max} حداکثر مقدار داده‌ها، x_{min} حداقل مقدار داده‌ها و x_n مقدار داده نرمال شده است (Rashidi et al. 2016).

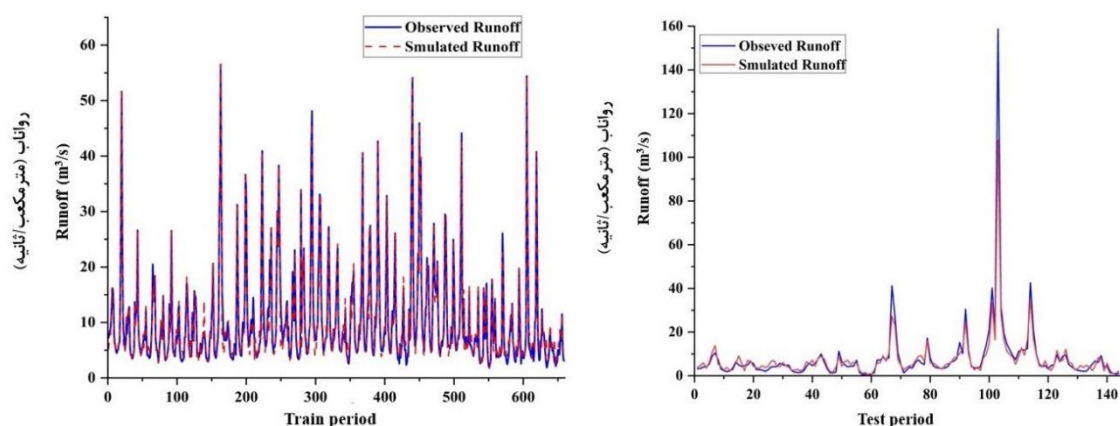
انتخاب بهترین ترکیب متغیرهای ورودی یکی از مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی است به این منظور از مجموع کل

شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از الگوریتم ANFIS

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در محیط نرم‌افزار MATLAB الگوریتم ANFIS با بهره‌گیری از سیستم سوگنو کد نویسی شد. جهت شبیه‌سازی از داده‌های ماهانه بارش و دماهای حداقل، حداکثر و میانگین ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد (مهر ۱۳۳۴ تا شهریور ۱۴۰۲) استفاده شده است. ابتدا به منظور حذف تأثیر مقیاس (اندازه) داده‌ها در یادگیری مدل تمامی

گوسی نوع ۲ بود. تعداد توابع عضویت در لایه اول ۵، تابع عضویت لایه خروجی از نوع خطی و روش بهینه‌سازی از نوع الگوریتم یادگیری هیبرید انتخاب شد. جهت ایجاد FIS پایه نیز از رویکرد مبتنی بر شبکه‌بندی استفاده شد. عملکرد مدل‌ها نیز با استفاده از پارامترهای R^2 ، RMSE و NSE مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴ برازش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های آموزش (مهر ۱۳۳۴ تا شهریور ۱۳۸۹) و آزمایش (مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۴۰۲) و جدول ۳ مقادیر معیارهای عملکرد مدل را در مراحل آموزش و آزمایش نشان می‌دهد.

داده‌های موجود ۸۰ درصد برای فرآیند آموزش و ۲۰ درصد برای فرآیند آزمایش انتخاب شدند. سپس با توجه به در نظر گرفتن ترکیب ورودی‌های مختلف بهترین ترکیب ورودی که کمترین خطا را در مراحل آموزش و آزمایش نشان داد، با استفاده از روش سعی و خطا انتخاب شد. بر این اساس بهترین ترکیب ورودی شامل دمای میانگین، بارش و بارش یک ماه قبل ($T(m)$, R , $R(-1)$) به دست آمد. در مدل ANFIS از توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی و گوسی نوع ۲ استفاده شد. بهترین تابع در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب تابع



شکل ۴. برازش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره‌های آزمایش و آموزش.

Fig 4. Fitting of Observed and Simulated Runoff in The Test and Training Periods.

مدل LARS-WG از داده‌های مشاهداتی ۴۵ ساله ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد (۱۹۷۱-۲۰۱۶) به عنوان دوره پایه استفاده شد. معیارهای ارزیابی حاصل از مقایسه متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌باشد (جدول ۳). میانگین ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده طی دوره پایه در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از اثبات کارایی مدل LARS-WG متغیرهای اقلیمی برای یک دوره ۳۵ ساله (۲۰۲۶-۲۰۶۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد. طبق نتایج در هر سه سناریوی مورد بررسی میزان بارندگی در دوره آینده در فصل پاییز و ماه‌های بهمن و اسفند کاهش و در فصل بهار افزایش می‌یابد.

شبیه‌سازی تغییر اقلیم

به منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم ابتدا داده‌های تاریخی مربوط به دو متغیر بارش و دما برای ۶ مدل GCM بر اساس گزارشات سری ششم تغییر اقلیم (CMIP6) از سایت ESGF دانلود شد. در مرحله بعد داده‌های دانلود شده از فایل‌های NC از طریق نرم‌افزار GIS استخراج شد. سپس میانگین بلند مدت ماهانه متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های GCM با مقادیر متناظر داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. در نهایت از بین مدل‌های GCM، مدل MRI-ESM2 به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. جدول (۳) مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل MRI-ESM2 را نشان می‌دهد. پس از انتخاب بهترین مدل GCM، به دلیل بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی این مدل از نظر مکانی نتایج حاصل به ریزمقیاس‌نمایی نیاز دارند. در این مطالعه جهت ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های اقلیمی در آینده از مدل LARS-WG7 استفاده شد. جهت واسنجی

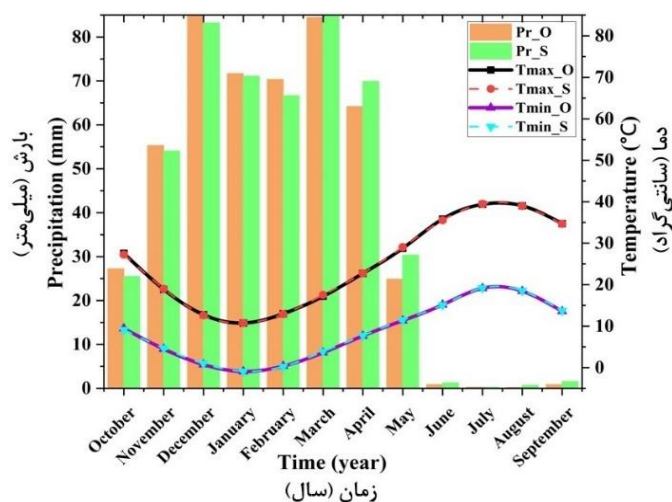
جدول ۳. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌های MRI-ESM2، LARS-WG7 و ANFIS.

Table 3. Performance Evaluation Criteria of MRI-ESM2, LARS-WG7, and ANFIS Models.

مدل Model	NSE	RMSE	R ²
MRI-ESM2	0.26	0.505	0.32
	Precipitation		
	0.49	3.94	0.54
	Minimum temperature		
LARS-WG7	0.44	6.43	0.501
	Maximum temperature		
	0.986	1.13	0.983
	Average monthly precipitation		
ANFIS	0.999	0.064	0.999
	Average monthly minimum temperature		
	0.999	0.070	0.999
	Average monthly maximum temperature		
ANFIS	0.999	0.089	0.998
	Average monthly sunshine		
	0.98	1.07	0.96
	Training period		
ANFIS	0.86	3.26	0.94
	Testing period		

در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند افزایشی نشان می‌دهد. در سناریوهای فوق به ترتیب میانگین دمای حداقل ۱/۹، ۲ و ۲/۴ درجه افزایش نشان می‌دهد. مقدار میانگین دمای حداکثر سالانه نیز در سناریوهای ذکر شده به ترتیب ۱/۸، ۱/۹ و ۲/۳ درجه افزایش خواهد یافت.

روند کلی میانگین بارش سالانه در هر سه سناریو در دوره آینده نسبت به دوره پایه (۵۰۸/۸ میلی‌متر) کاهش نشان می‌دهد. مقدار میانگین بارش سالانه طی دوره آینده در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴۶۶/۲، ۴۵۱/۱ و ۴۴۶/۹ به دست آمد. مقدار میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه و سالانه نیز طی دوره آتی

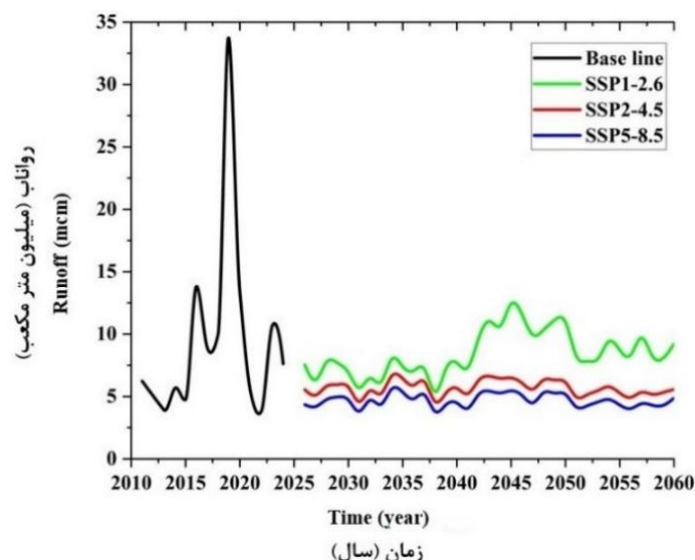


شکل ۵. میانگین ماهانه بارش (Pr)، دمای حداقل (Tmin) و دمای حداکثر (Tmax) مشاهداتی (O) و شبیه‌سازی شده (S) در دوره پایه.

Fig 5. Monthly Average Precipitation (Pr), Minimum Temperature (Tmin), and Maximum Temperature (Tmax) Observed (O) and Simulated (S) in Base Baseline Period.

سناریوهای تغییر اقلیم به طور جداگانه به مدل MODFLOW اعمال شد و رواناب دوره آینده پیش‌بینی شد. شکل ۶ نمودار میانگین سالانه دبی رودخانه را در سناریوهای SSP نشان می‌دهد.

تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی
با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییر اقلیم تغییرات رواناب سطحی، افت سطح ایستابی آبخوان و ذخیره آبخوان در سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی شد. به این منظور نتایج حاصل از هر کدام از

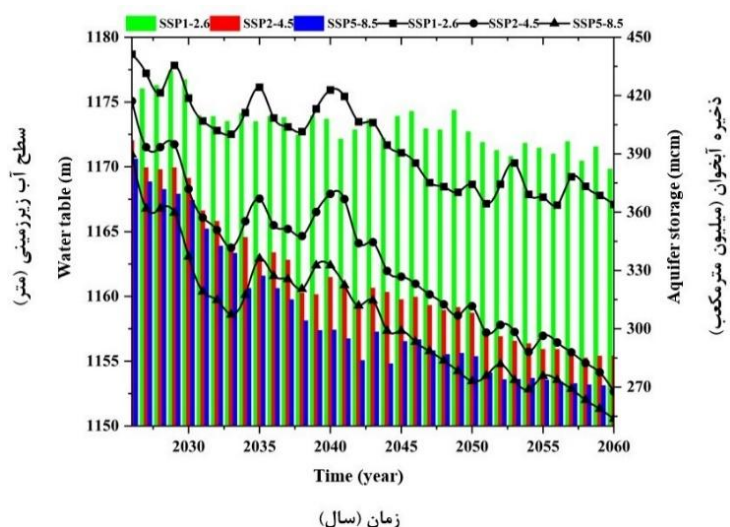


شکل ۶. نمودار میانگین سالانه دبی رودخانه در دوره آینده در سناریوهای SSP.

Fig 6. Graph of Average Annual River Discharge in The Future Period in The SSP Scenarios.

آمده از بررسی شرایط آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد تحت اثرات تغییر اقلیم، سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان در هر سه سناریوی SSP نسبت به دوره مدل‌سازی کاهش می‌یابد (شکل ۷). بر این اساس میانگین سطح آب در هر سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به میانگین سطح آب دوره پایه (۱۱۸۷م) به ترتیب ۱۳/۶۵، ۲۵/۵۴ و ۲۸/۲۴ متر کاهش می‌یابد. علاوه بر این بیشترین کاهش سطح آب در ماه‌های سپتامبر و اکتبر اتفاق می‌افتد. دلیل این امر (علاوه بر تأثیر تغییر اقلیم) ناشی از افزایش تقاضای آب به ویژه در بخش کشاورزی به منظور تأمین نیاز آبی محصول پاییزه گندم است. همچنین میانگین سالانه ذخیره آبخوان نیز در هر سه سناریوی اقلیمی کاهش می‌یابد. میانگین ذخیره آبخوان در هر سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به میانگین ذخیره آبخوان در دوره پایه (۴۸۰ میلیون متر مکعب) به ترتیب ۸۲/۸۸، ۱۴۳/۱۱ و ۱۷۱/۵۸ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد.

طبق نتایج میانگین سالانه دبی رودخانه در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۷/۷۴، ۵/۷۳ و ۴/۷۵ میلیون متر مکعب بر ثانیه خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهد که میزان میانگین دبی رودخانه تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده نسبت به میانگین دوره پایه ۹/۶۳ میلیون متر مکعب بر ثانیه (به ترتیب ۱/۸۹، ۱/۹ و ۴/۸۸ میلیون متر مکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت. در هر سه سناریوی اقلیمی مورد استفاده بیشترین تغییرات میانگین دبی ماهانه در دوره آبی نسبت به دوره پایه در فصل پاییز و ماه‌های ژانویه و ژوئن رخ می‌دهد که با نتایج مطالعات آشفته و همکاران (Ashofteh et al., 2024) و مقدم و همکاران (Moghaddam et al., 2019) مطابقت دارد. پس از پیش‌بینی بارش در سناریوهای SSP و رواناب توسط مدل ANFIS میزان تغذیه ناشی از بارش و کنداکتناس رودخانه برای دوره آبی در هر سه سناریو محاسبه و به مدل MODFLOW اعمال شد. با توجه به نتایج به دست



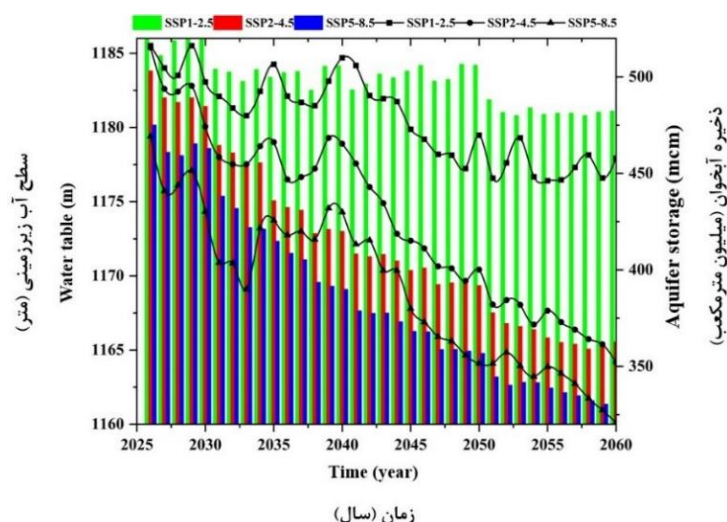
شکل ۷. میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان در سناریوهای SSP.

Fig 7. Annual Average Groundwater Level and Aquifer Storage in SSP Scenarios.

در منطقه مورد مطالعه بیشترین میزان مصرف آب در حوضه آبریز خرم‌آباد، مربوط به بخش کشاورزی است و مقدار زیادی از آب مورد نیاز آبیاری توسط آب زیرزمینی تأمین می‌شود. بنابراین در این پژوهش اثرات اجرای طرح‌های نوین آبیاری در سناریوهای SSP در دوره آینده بر سطح و ذخیره آب زیرزمینی بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش در صورت اجرای طرح آبیاری میانگین سطح آب زیرزمینی در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۱۱۸۳/۲، ۱۱۷۲/۳ و ۱۱۶۸/۵ متر است که نسبت به میانگین دوره پایه در سناریوهای ذکر شده به ترتیب حدود ۳/۸، ۴/۷ و ۱۸/۰۵ متر کاهش نشان می‌دهد. میانگین ذخیره آب زیرزمینی نیز در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۴۷۸/۴، ۴۲۷ و ۳۸۹/۵ میلیون متر مکعب است که نسبت به میانگین میانگین ذخیره آب زیرزمینی دوره پایه در سناریوهای بالا به ترتیب حدود ۱/۶، ۵۳ و ۹۰/۴ میلیون متر مکعب کاهش نشان می‌دهد. شکل ۸ میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان در سناریوهای مختلف SSP را بعد از اجرای طرح آبیاری نشان می‌دهد.

مدیریت بهینه منابع آب در دوره آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی

با توجه به تغییر اقلیم، افزایش دما و کاهش بارندگی و تأثیر آن بر منابع آبی در حوضه آبریز خرم‌آباد، باید جهت تأمین آب آبیاری بلندمدت و پایدار در شهر خرم‌آباد اقدامات مناسبی صورت گیرد. در حال حاضر یکی از برنامه‌های جهاد کشاورزی شهرستان خرم‌آباد جهت صرفه‌جویی و استفاده مناسب از منابع آب در سال‌های زراعی پیش رو استفاده از طرح‌های آبیاری نوین در اراضی کشاورزی به روش نوار تیپ است. اجرای این روش سبب افزایش راندمان آبیاری در مزارع و صرفه جویی ۵۰ تا ۷۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی می‌شود. این سناریو تأثیر افزایش ۳۰ درصدی راندمان آبیاری را همراه با رشد جمعیت مورد انتظار و تغییرات اقلیمی تعیین می‌کند و به عنوان سناریوی افزایش راندمان آبیاری شناخته می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط تغییر اقلیم و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تأمین آب آبیاری با کمبود مواجه می‌شود.



شکل ۸. میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان در سناریوهای SSP بعد از اجرای طرح آبیاری.

Fig 8. Annual Average Groundwater Level and Aquifer Storage in SSP Scenarios After Implementation of The Irrigation Plan.

بر این اساس میانگین سطح آب زیرزمینی در کل دوره آبی در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به میانگین سطح آب زیرزمینی دوره پایه به ترتیب ۱۳/۶۵، ۲۵/۵۴ و ۲۸/۲۴ متر و میانگین ذخیره آبخوان در هر سه سناریو به ترتیب ۸۲/۸۸، ۱۴۳/۱۱ و ۱۴۳/۵۸ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش اجرای طرح آبیاری نوین به روش تیپ در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه باعث کاهش تقاضای آب در بخش کشاورزی، افت کمتر سطح آب در آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد و در نتیجه کاهش کم شدن ذخیره آبخوان در سناریوهای SSP نسبت به روش آبیاری کنونی، می‌شود. بر این اساس، میانگین سطح آب زیرزمینی در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۱۱۸۳/۲، ۱۱۷۲/۳ و ۱۱۶۸/۵ متر است که نسبت به میانگین دوره پایه در سناریوهای ذکر شده به ترتیب حدود ۳/۸، ۱۴/۷ و ۱۸/۰۵ متر کاهش نشان می‌دهد. میانگین ذخیره آب زیرزمینی نیز در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۴۷۸/۴، ۴۲۷ و ۳۸۹/۵ میلیون متر مکعب است که نسبت به میانگین میانگین ذخیره آب زیرزمینی دوره پایه در سناریوهای بالا به ترتیب حدود ۱/۶، ۵۳ و ۹۰/۴ میلیون متر مکعب کاهش نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی طبق نتایج به دست آمده می‌توان گفت تغییر اقلیم در آینده به طور قابل توجهی منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز خرم‌آباد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای SSP نشان‌دهنده کاهش بارندگی و افزایش دماهای حداقل و حداکثر در ۳۵ سال آینده نسبت به دوره پایه است (مطابق با نتایج ایران‌شاهی و همکاران (Iranshahi et al. 2022)). بر این اساس با توجه به میزان درصد تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره آبی نسبت به دوره پایه شاهد کاهش میزان بارش در فصول پاییز و زمستان و افزایش آن در فصل بهار هستیم. درصد تغییرات دمای حداقل و حداکثر نیز نشان‌دهنده افزایش دما در تمامی فصول است. نتایج به دست آمده از تلفیق سناریوهای انتشار با مدل ANFIS نشان می‌دهد میانگین دبی سالانه در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد به طوری که میزان میانگین دبی رودخانه تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱/۸۹، ۳/۹ و ۴/۸۸ میلیون متر مکعب بر ثانیه کاهش خواهد یافت. کاهش آب‌های سطحی و نیز افزایش تقاضا برای تأمین آب در بخش‌های مختلف در دوره آینده باعث افزایش برداشت آب از آبخوان خواهد شد. بنابراین طبق نتایج حاصل از این پژوهش طی دوره آینده در سناریوهای SSP سطح آب زیرزمینی و ذخیره آبخوان کاهش می‌یابد.

منابع

- Ebtehaj, I. & Bonakdari, H. (2014). Performance Evaluation of Adaptive Neural Fuzzy Inference System for Sediment Transport in Sewers. *Water Resources Management*, 28:4765–4779. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0774-0>
- Hadri, A., El Mehdi, S., El Khalki, E.M., Aachrine, B., Saouabe, T. & Ait Elmaki, A. (2022). Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. *Journal of Water and Climate Change*, 13 (6): 2414–2442. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.039>
- Hssaisoune, M., Bouchaou, L. & Sifeddine, A. (2020). Moroccan Groundwater Resources and Evaluation with Global Climate Change. *Innovative Infrastructure Solutions*. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00992-9>
- Jang, J-R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 23:665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
- Kisi, O. (2015). Streamflow forecasting and estimation using least square support vector regression and adaptive neuro-fuzzy embedded fuzzy c-means clustering. *Water Resources Management*, 29(14):5109–5127
- Larsen, S.V. & Kørnøv, L. (2009). SEA of river basin management plans: incorporating climate change, Impact Assessment. *Project appraisal*, vol. 27, no. 4, pp. 291–299. <https://doi.org/10.3152/146155109X480367>
- Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M. & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural water management*, 146, 84–94.
- Lipczynska-Kochany, E. (2018). Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: a review. *Science of the Total Environment*, 640:1548–1565
- Marchane, A., Tramblay, Y., Hanich, L., Ruelland, D & Jarlan, L. (2017). Climate change impacts on surface water resources in the Rheraya catchment (High-Atlas, Morocco). *Hydrological Sciences Journal*, 62 (6), 979-995. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1283042>
- Mirzaee, S.Y., Amiri, R. & Chitsazan, M. (2023). Numerical investigation of groundwater fluctuations affected by climate changes in the Khorramabad River basin. *Journal of Engineering Geology*, 17 (4):506-528. URL: <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3091-fa.html>
- Motawej, H. (2025). Integrating MODFLOW and LSTM models for enhanced groundwater management in the coastal plains of Lattakia Governorate. *Water Practice & Technology*, Vol 20 No 2, 413. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.016>
- Abd-Elaty, I., Kushwaha, N., Grismer, M.E., Elbeltagi, A. & Kuriqi, A. (2022). Cost-effective management measures for coastal aquifers affected by saltwater intrusion and climate change. *Science of the Total Environment*, 2022, 836, 155656.
- Ashofteha, P.S., Kalhori, M., & Singh, VP. (2024). Water resources management considering groundwater instability affected by climate change scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth*, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103606>
- Bañares, E.N.; Mehboob; M.S., Khan, A.R. & Cacal., J.C. (2024). Projecting hydrological response to climate change and urbanization using WEAP model: A case study for the main watersheds of Bicol River Basin, Philippines. *Journal of Hydrology*, 2024, 54, 101846. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101846>
- Bao, C. & Fang, C. (2007). Water resources constraint forces urbanization in water-deficient regions: a case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China, *Ecological Economics Journal*, 2007, vol. 62, pp. 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.013>
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P. & Frustaci, F. (2018). Drought Analysis in Europe and the Mediterranean Basin Using the Standardized Precipitation Index. *Water*, 10 (8), 1043. <https://doi.org/10.3390/w10081043>
- Chang, I.S., Zhao, M., Chen, Y., Guo, X., Zhu, Y., Wu, J. & Yuan, T. (2020). Evaluation of the integrated water resources management in China's major cities—Based on City Blueprint® Approach. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262, 121410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121410>
- Chuma, G.B., Mondo, J.M., Wellens, J., Majaliwa, J.M., Egeru, A., Bagula, E.M., Lucungu, P.B., Kahindo, C., Mushagalusa, G.N. & Karume et al. 2024. Effectiveness of wetlands as reservoirs for integrated water resource management in the Ruzizi plain based on water evaluation and planning (WEAP) approach for a climate-resilient future in eastern D.R. Congo. *Scientific Reports*, 2024, 14, 21577. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72021-x>
- Dankers, R., Arnell, N.W., Clark, D.B., Falloon, P.D., Fekete, B.M., Gosling, S.N., Heinke, J., Kim, H., Masaki Y. & Satoh et al. (2013). First Look at Changes in Flood Hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy, Science. USA*. 2013, 111, 3257–3261. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>
- Diaz-Nieto, J. & Wilby, R.L. (2005). A comparison of statistical down-scaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, 69(2):245–268

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.050>.

Sheikha-Bagem Ghaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H. & Sarai-Tabrizi, M. (2023). The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP-MODFLOW models. *Applied Water Science*, 13:121. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01923-4>

Ward, F.A. & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences, Sci. USA* 2008, 105, 18215–18220.

Mirzaee, S.Y., Amiri, R., Chitsazan, M. & Nadri, A. (2023). Evaluation of Maydavood-Dallan Aquifer in Various Management Scenarios Using a Mathematical Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 52(4):308-328. URL: <https://doi.org/10.22125/IWE.2023.173303>

Morote, A.-F., Olcina, J. & Hernández, M. (2019). The Use of Non-Conventional Water Resources as a Means of Adaptation to Drought and Climate Change in Semi-Arid Regions: South-Eastern Spain. *Water*, 2019, 11, 93.

Nassery, H.R., Zeydalinjad, N., Alijani, F. & Shakiba, A. (2021). A proposed modelling towards the potential impacts of climate change on a semi-arid, small-scaled aquifer: a case study of Iran. *Environ Monit Assess* (2021) 193:182. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08955-w>.

Nazeri Tahroudi, M., Hashemi, S.R., Ahmadi, F. & Nazeri Tahroudi, Z. (2017). Examining the accuracy of ANFIS, SVM, and GP models in modeling river flow discharge values. *Journal of Ecohydrology*, Volume 3, Issue 3, Pages 347-361. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60024>

Patil, N.S., Chetan, N.L., Nataraja, M. & Suthar, S. (2020). Climate change scenarios and their effect on groundwater level in the Hiranyakeshi watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100323>

Pinarlika, M. & Selek, Z. (2024). Evaluating Operational Performance and Sustainability of Water Supply Reservoirs in the Yesilirmak Basin, Turkey. *Water Resources*, 2024, Vol. 51, No. 4, pp. 449–461.

<https://doi.org/10.1134/S0097807823601632>

Rahimi Jamnani, M., Kayhomayoon, Z., Arya Azar, N., Ghordoyee Milan, S., Najafi Marghmaleki, S. & Berndtsson, R. (2024) Large discrepancy between future demand and supply of agricultural water in northwestern Iran; evidence from WEAP-MODFLOW-machine learning under the CMIP6 scenario. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216 108505.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108505>

Rashidi, S., Vafakhah, M., Lafdani, E.K. & Javadi, M.R. (2016). Evaluating the support vector machine for suspended sediment load forecasting based on the gamma test. *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 583.

Sabale, R., Venkatesh, B. & Jose, M. (2022). Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8:17 <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00992-9>

Seo, Y., Kim, S., Kisi, O. & Singh, V.P. (2015). Daily water level forecasting using wavelet decomposition and artificial intelligence techniques. *Journal of Hydrology*, 520:224-243.

