Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 16, Issue 1, 2025 p: 1-13

OPEN ACCESS

Research paper

Assessment of Climate Change Impact on Groundwater Quantitative Status in the Dehgolan Aquifer Using the MODFLOW Model

Foad Naserabadi[1], Reza Ghazavi[2] and Mehdi Zakerinia[3]

1- Ph.D. in Watershed Management Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran
2- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran, (Corresponding author: ghazavi@kashanu.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 10 April 2024 Revised: 29 May 2024 Accepted: 14 July 2024

Extended Abstract

Background: Monitoring and evaluating water resources are crucial steps in increasing the knowledge of a country's water resource conditions. The results of these investigations should inform water resource management. Iran, with its arid and semi-arid climate, faces challenges due to low rainfall rates and uneven distribution. Climate change has further complicated these issues, affecting meteorological variables and the hydrological cycle. Factors such as population growth, urbanization, industrialization, and agricultural development have increased water demand. The increased use of groundwater in arid regions has led to a decrease in groundwater storage. To address the negative balance of Dehgolan groundwater resources and prevent depletion, the Regional Water Company of Kurdistan announced the development of Dehgolan groundwater resources in 2003. This research aims to investigate the quantitative effects of climate change on the Dehgolan aquifer, the largest aquifer in Kurdistan Province. Utilizing climate models to predict climate change and integrating them with hydrological models can help predict future hydrological changes.

Methods: The Dehgolan plain, the largest plain in Kurdistan Province, covers an area of 982.8 km^2. This plain is located between the longitudes 47˚10' to 47˚45' and the latitudes 35˚05' to 35˚35'. The Dehgolan aquifer and Talvar catchment areas are 779.8 km^2 and 2491 km^2, respectively. The geophysical studies determined the Dehgolan aquifer as an unconfined aquifer. The elevation in the Dehgolan aquifer ranges from 1740 to 2045 m. Various land uses cover the watershed, with dryland farming, range, irrigated agriculture, residential areas, and water bodies accounting for different percentages. Climate data, including rainfall and temperature, were collected. The average annual rainfall in the Dehgolan Plain is 319.32 mm. The average annual temperature ranges between 9.39 and 9.12 ˚C, respectively. This study utilized the IPCC Fifth Assessment Report to predict meteorological variables (minimum and maximum temperature, precipitation, and relative humidity) under different scenarios including RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 using the SDSM model.

The MODFLOW model was employed for 3D groundwater flow modeling. The conceptual model of the Dehgolan aquifer was developed in GMS software, incorporating boundary conditions, aquifer network, and other parameters. Monthly elevation of the water table was estimated under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios. Simulation and prediction were conducted for specific periods. Groundwater information from September 2008 to September 2017 was used for model calibration, and then groundwater was predicated for 10 hydrological years from September 2017 to September 2027. Model efficiency was evaluated using various coefficients such as R^2, E_{NS}, PBIAS, and MAE.

Results: The SDSM and MODFLOW models showed accuracy in simulating climate variables and groundwater flow. Maximum similarity between simulated and observed data belonged to minimum and maximum temperatures. Sensitivity analysis revealed hydraulic conductivity as the most sensitive parameter whereas the specific yield had the least effect on groundwater changes. Results from the MODFLOW model projected a negative balance in the Dehgolan aquifer under different scenarios. Under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, the average annual water table in the predicted period will be -1.60, -1.61, and -1.36 m, and the average annual groundwater storage will be -23.69, -23.85, and -20.21 mcm, respectively. The RCP2.6 and RCP4.5 scenarios indicated a more critical situation than RCP8.5.

Copyright ©2025 Naserabadi et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

Conclusion: Climate models and RCP scenarios suggest changes in climatic conditions and hydrological processes in the Talvar River basin. Increased atmospheric temperatures and decreased precipitation will impact groundwater resources. The high atmospheric temperature will increase the rate of evaporation. High evaporation should have negative impacts on both quantitative and qualitative parameters of groundwater resources. The future may see fluctuations in groundwater levels following natural patterns.

Keywords: Calibration, GMS, Meteorological Variables, Sensitivity Analysis, SDSM Model

How to Cite This Article: Naserabadi, F., Ghazavi, R., & Zakerinia, M. (2025). Assessment of Climate Change Impact on Groundwater Quantitative Status in the Dehgolan Aquifer Using the MODFLOW Model. *J Watershed Manage Res*,16(1), 1-13. DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

مقاله پژوهشی

ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر وضعیت کمی آب‌های زیرزمینی آبخوان دهگلان با استفاده از مدل MODFLOW

فواد ناصرآبادی[۱]، رضا قضاوی[۲] و مهدی ذاکری‌نیا[۳]

۱- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲- استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (نویسنده مسوول: ghazavi@kashanu.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴
صفحه ۱ تا ۱۳

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: پایش و ارزیابی منابع آب از مهم‌ترین اقداماتی هستند که برای افزایش شناخت شرایط منابع آب کشور باید انجام شوند و نتایج این‌گونه بررسی‌ها در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب مورد استفاده قرارگیرند. کشور ایران به‌دلیل کمبود ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن در زمره کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد. تغییرات اقلیمی در چند دهه اخیر و اثرات این پدیده بر پارامترهای اقلیمی و الگوی پدیده‌های هیدرولوژیکی باعث تشدید بحران خشکی شده‌است. از طرف دیگر، رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعت باعث افزایش تقاضای آب شیرین شده‌است. به‌دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش نیاز به آب، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، خصوصا در مناطق خشک، به‌شدت رو به فزونی است و این امر، افت سطح ایستابی و کاهش ذخایر آب را به‌دنبال داشته است. به‌دلیل بیلان منفی آب زیرزمینی آبخوان دهگلان و جلوگیری از تشدید افت تراز سطح ایستابی، ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی دشت دهگلان از سال ۱۳۸۲ از طرف شرکت سهامی آب منطقه‌ای کردستان اعلام شده‌است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثرات کمی تغییرات اقلیمی بر منابع آب‌های زیرزمینی آبخوان دهگلان به‌عنوان بزرگترین آبخوان استان کردستان است. در این راستا، استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی که می‌توانند تغییرات اقلیمی را پیش‌بینی کنند، ادغام آن‌ها و در نهایت استفاده از خروجی این مدل‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توانند ابزاری مفید برای پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیکی در آینده باشند.

مواد و روش‌ها: دشت دهگلان با مساحت ۹۸۲/۸ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی '۱۰ °۴۷ تا '۴۵ °۴۷ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۰۵ °۳۵ تا '۳۵ °۳۵ شمالی گسترده شده‌است. وسعت گسترش آبخوان دهگلان برابر با ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع و مساحت حوزه آبخیز دشت تا خروجی ایستگاه هیدرومتری تلوار حسن‌خان برابر با ۲۴۹۱ کیلومتر مربع هستند. حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع از سطح دریا در آبخوان دهگلان به‌ترتیب برابر با ۱۷۴۰، ۲۰۴۵ و ۱۸۵۴ متر است. کاربری‌های زراعت دیم، مرتع، زراعت آبی، مناطق مسکونی و سطوح آبی به‌ترتیب ۷۴/۸۱، ۱۴/۱۴، ۱۰/۱۲، ۰/۷۶ و ۰/۱۷ درصد از سطح حوزه آبخیز مورد مطالعه را شامل می‌شوند. مقدار بارندگی سالانه در دشت دهگلان و ارتفاعات مشرف بر آن به‌ترتیب برابر با ۳۱۹/۳۲ و ۳۶۳/۱۵ میلی‌متر و میانگین سالانه دما به‌ترتیب برابر با ۹/۳۹ و ۹/۱۲ درجه سانتی‌گراد هستند. بر اساس نتایج مطالعات ژئوفیزیک، لوگ چاه‌های اکتشافی و آزمایشات پمپاژ و با توجه به عدم تغییرات سطح ایستابی هنگام حفاری، مشخص شده‌است که آبخوان دهگلان از نوع آبخوان آزاد است. در این پژوهش، با به‌کارگیری مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و براساس سناریوهای گزارش پنجم IPCC، متغیرهای اقلیمی حداقل و حداکثر دما، بارش و رطوبت نسبی تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در طول دوره آتی پیش‌بینی شدند. برای این‌منظور، از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما، بارش و رطوبت نسبی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک قروه به‌عنوان ورودی به مدل SDSM استفاده شد. همچنین برای مدل‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی، از مدل MODFLOW در رابط گرافیکی GMS استفاده و سپس نوسانات ماهانه سطح ایستابی در آبخوان مورد مطالعه در طول دوره پیش‌بینی تحت سناریوهای اقلیمی با استفاده از مدل واسنجی شده MODFLOW برآورد شدند. در این راستا، در مرحله اول، مدل مفهومی آبخوان دهگلان در نرم‌افزار GMS تهیه شد. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرایی است به‌گونه‌ای که با استفاده از آن، سیستم موردنظر راحت‌تر مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. ساختار مدل مفهومی آبخوان دهگلان شامل شرایط مرزی، شبکه آبخوان، تعیین پارامترهای زمانی و مکانی مدل، مقادیر سطح ایستابی در چاه‌های مشاهداتی، توزیع اولیه ضرایب هیدرودینامیک آبخوان شامل قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه و عوامل تغذیه‌کننده و تخلیه‌کننده آبخوان است. کلیه اطلاعات مورد نیاز جهت ساخت مدل مفهومی، ابتدا در محیط ArcMap تهیه و سپس به‌صورت بسته‌های مختلف به مدل MODFLOW وارد شدند. سال‌های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ تا ۱۴۰۶-۱۴۰۵ به‌ترتیب برای مراحل شبیه‌سازی و پیش‌بینی در نظر گرفته شدند. ضرایب R2، ENS، PBIAS و MAE برای ارزیابی کارایی مدل‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، دقت کافی مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و رطوبت نسبی و مدل MODFLOW در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دهگلان را تایید کردند. تطابق دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهده شده با شبیه‌سازی شده بیشتر از متغیرهای اقلیمی بارش و رطوبت نسبی بود. در این پژوهش، بیشترین حساسیت مدل MODFLOW نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی و کمترین حساسیت آن نسبت به پارامتر آبدهی مخصوص بود. متوسط تغییرات سالانه تراز سطح ایستابی در دوره پیش‌بینی و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب برابر با ۱/۶۰-، ۱/۶۱- و ۱/۳۶- متر و متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان دهگلان به‌ترتیب برابر با ۲۳/۶۹-، ۲۳/۸۵- و ۲۰/۲۱- میلیون مترمکعب محاسبه شدند. به‌عبارت دیگر، آبخوان دهگلان در دوره پیش‌بینی، تحت همه سناریوهای اقلیمی بیلان منفی خواهد داشت و مقدار کاهش حجم مخزن تحت سناریو RCP8.5 در مقایسه با سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 کمتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری: نتایج بررسی مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار نشان از تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز رودخانه تلوار در دوره آتی دارند، به‌طوری‌که دمای هوا افزایش و مقدار بارش کاهش می‌یابند. افزایش دما نامطلوب‌ترین اثر تغییر اقلیم را که افزایش خشکی در منطقه است به‌همراه خواهد داشت. افزایش خشکی و به‌دنبال آن افزایش تبخیر، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بر منابع آب زیرزمینی تاثیر خواهد گذاشت. هیدروگراف آبخوان طی دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی نشان می‌دهد که مقدار افت سطح ایستابی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، به‌ترتیب به‌میزان ۰/۲۴۸، ۰/۲۵۹ و ۰/۰۱۳ متر افزایش پیدا می‌کند. تحت سناریوهای انتشار در دوره آتی، نوسانات سطح ایستابی در طول سال (در طول دوره‌های تنش خشک و تر) روند طبیعی خود را طی می‌کنند و بر اساس نوع تنش خشک یا تر تغییر محسوسی پیدا نخواهند کرد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، متغیرهای اقلیمی، مدل SDSM، واسنجی، GMS

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

مقدمه

با توجه به تغییرات اقلیمی در چند دهه اخیر و اثرات این پدیده بر پارامترهای اقلیمی، الگوی آینده پدیده‌های هیدرولوژیکی مانند گذشته نخواهد بود. از این رو، استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی که می‌توانند تغییرات اقلیمی را پیش‌بینی کنند، ادغام آن‌ها و در نهایت استفاده از خروجی این مدل‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توانند ابزاری مفید برای پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیکی در آینده باشند (Mirani Moghadam, 2021). تغییرات اقلیمی با اثر بر مدت، شدت، نوع و زمان بارش در مناطق مختلف جهان، منابع آب، دسترسی به آب و میزان تقاضای آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Sheikha-BagemGhaleh *et al*., 2023). از طرف دیگر، به دلیل رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعت تقاضای آب شیرین افزایش یافته است (Hashemi *et al*., 2018; Ostad-Ali-Askari, 2022). ترکیب افزایش تقاضای آب و کاهش دسترسی به منابع آب می‌تواند موجب افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و کاهش ذخایر آب شود (Toews & Allen, 2009). با توجه به محدودیت منابع آب قابل عرضه، سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در بخش عرضه آب‌های متعارف قادر به پاسخگویی به تقاضای در حال افزایش آب نیست. بنابر این، راه حل بحران آب را می‌توان در چگونگی توسعه و مدیریت صحیح منابع آبی جستجو نمود (Hellström *et al*., 2000; Cohen, 2006; Van der Steen, 2009; Mackay & Evan, 2010; Howe & Mitchell, 2012).

در دهه گذشته، بسیاری از مطالعات بر ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی متمرکز شده‌اند (Ficklin *et al*., 2009; Abbaspour *et al*., 2009; Zhang *et al*., 2012; Azizi *et al*., 2021; Neto *et al*., 2021). اثرات سناریوهای مدیریتی و تغییرات اقلیمی بر اندرکنش رودخانه و آبخوان در زیرحوضه لنجانات از حوضه آبریز گاوخونی با استفاده از مدل WEAP-MODFLOW مورد ارزیابی قرار گرفت (Safavi *et al*., 2022). نتایج این پژوهش نشان داد که در آینده نزدیک، افزایش دما و کاهش بارش اتفاق خواهد افتاد و همچنین به دلیل اثرات تغذیه‌ای زیاد رودخانه بر آبخوان در محدوده مورد مطالعه و از طرف دیگر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مدیریت تلفیقی منابع آب با کاهش سطوح زیر کشت و الگوی کشت مناسب، می‌تواند اثرات منفی کمبود منابع آب زیرزمینی را کاهش دهد. در پژوهشی دیگر، از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-WEAP برای پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی آینده بر عرضه و تقاضای آب در حوضه آبریز رودخانه Dee در انگلستان استفاده شد (Abbas *et al*., 2022). نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل تلفیقی مذکور در مدیریت یکپارچه منابع آب کاملا مفید و راه‌گشا بود. در پژوهشی، پایداری آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز رودخانه Khari در ایالت راجستان در کشور هند تحت سناریوهای تغییر اقلیم با رویکرد مدل‌سازی یکپارچه و استفاده از مدل‌های SWAT و MODFLOW مورد ارزیابی قرارگرفت (Nitika *et al*., 2024). نتایج نشان می‌دهند که در دوره آینده، تحت سناریوهای اقلیمی و افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، تراز سطح ایستابی به‌شدت کاهش خواهد یافت.

تاکنون مطالعات متعددی در مورد تأثیرات تغییر اقلیم بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در سطح جهان انجام شده‌اند. در میان مدل‌های مختلف موجود برای شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی، مدل MODFLOW بیشترین کاربرد را در مطالعات انجام شده در کشورهای مختلف دنیا داشته است. قابلیت بالا و داشتن زیربرنامه‌های مختلف دربرگیرنده پارامترهای گوناگون سیستم آبخوان، سازگاری مدل با سیستم هیدروژئولوژی آبخوان، بعد جریان، سهولت درک مدل، حجم اطلاعات ورودی از نظر روش حل، قابلیت دسترسی به مدل و مقبولیت بین کاربران از نقاط قوت آن هستند. به‌همین دلیل، در این مطالعه نیز جهت شبیه‌سازی و مطالعه آبخوان دهگلان، از مدل MODFLOW استفاده شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از کاربرد مدل MODFLOW در مطالعات انجام شده در کشورهای مختلف دنیا نشان می‌دهند که مقایر شبیه‌سازی شده توسط مدل، به مقادیر اندازه‌گیری‌شده نزدیک هستند و مدل MODFLOW عملکرد خوبی از خود نشان داده است. در اغلب مطالعات انجام شده، انجام عملیات واسنجی مدل باعث افزایش دقت شبیه‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی شده‌است و در نتیجه، عاملی مهم در توسعه مدل MODFLOW در جهت اهداف مدیریتی است.

در این پژوهش، اثرات کمی تغییرات اقلیمی بر سطح آب آبخوان دهگلان به‌عنوان بزرگ‌ترین آبخوان استان کردستان مورد بررسی قرارگرفت. برای این منظور، شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، به‌صورت عددی و با استفاده از مدل MODFLOW[1] در نرم‌افزار GMS[2] انجام شد. از نتایج مدل SDSM در دوره پیش‌بینی، جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب زیرزمینی آبخوان دهگلان، به‌عنوان ورودی به مدل MODFLOW استفاده شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

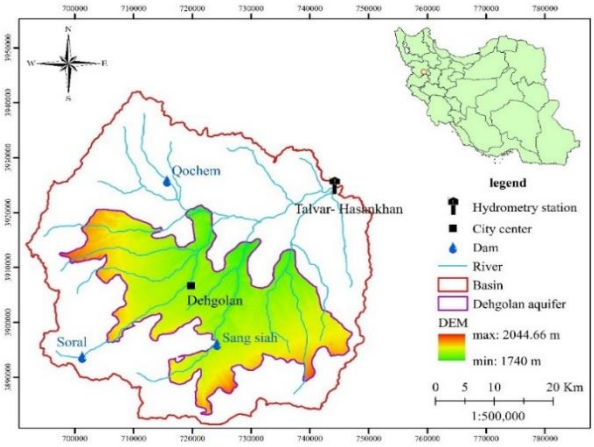
دشت دهگلان به‌عنوان بزرگترین دشت استان کردستان با مساحت ۹۸۲/۸ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی '۱۰ °۴۷ تا '۴۵ °۴۷ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۰۵ °۳۵ تا '۳۵ °۳۵ شمالی گسترده شده است (شکل ۱). وسعت گسترش آبخوان دهگلان برابر با ۷۷۹/۸ کیلومتر مربع و مساحت حوزه آبخیز دشت تا خروجی ایستگاه هیدرومتری تلوار حسن‌خان برابر با ۲۴۹۰/۵ کیلومتر مربع هستند. حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع از سطح دریا در آبخوان دهگلان به‌ترتیب برابر با ۱۷۴۰، ۲۰۴۵ و ۱۸۵۴ متر هستند. کاربری‌های زراعت دیم، مرتع، زراعت آبی، مناطق مسکونی و سطوح آبی به‌ترتیب ۷۴/۸۱، ۱۴/۱۴، ۱۰/۱۲، ۰/۷۶ و ۰/۱۷ درصد از سطح حوزه آبخیز مورد

1. Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model

2. Groundwater Modeling System

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

مطالعه را شامل می‌شوند. مقدار بارندگی سالانه در دشت دهگلان و ارتفاعات مشرف بر آن به‌ترتیب برابر با ۳۱۹/۳۲ و ۳۶۳/۱۵ میلی‌متر و میانگین سالانه دما به ترتیب برابر با ۹/۳۹ و ۹/۱۲ درجه سانتی‌گراد هستند. براساس نتایج مطالعات ژئوفیزیک، لوگ چاه‌های اکتشافی و آزمایشات پمپاژ و با توجه به عدم تغییرات سطح ایستابی هنگام حفاری، مشخص شده‌است که آبخوان دهگلان از نوع آبخوان آزاد است.



شکل۱- موقعیت ابخوان دهگلان در استان کردستان، ایران
Figure 1. Location of the Dehgolan aquifer in Kurdistan Province, Iran

روش انجام مطالعه

شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

در این مطالعه، تاثیر تغییرات اقلیمی بر میزان بارش و دمای منطقه با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM برآورد شد. به‌منظور واسنجی مدل SDSM، از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما، بارش و رطوبت نسبی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک قروه و داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی[1] استفاده شد. داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک قروه در سال‌های ۱۹۹۹–۱۹۹۰ و ۲۰۰۵–۲۰۰۰ به‌ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM استفاده شد. متغیرهای NCEP شامل ۲۶ متغیر اتمسفری است و از میان آن‌ها، متغیرهایی انتخاب می‌شوند که دارای بالاترین میزان همبستگی با پارامترهای هواشناسی و کمترین مقدار خطا باشند. این کار با محاسبه سه شاخص ضریب همبستگی کلی، ضریب همبستگی جزیی و درصد کاهش همبستگی جزیی صورت گرفت و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با بالاترین همبستگی و کمترین درصد کاهش همبستگی جزیی انتخاب شدند. درصد کاهش همبستگی جزیی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$PR=\frac{P_r-R}{R} \quad (۱)$$

در رابطه ۱، PR درصد کاهش همبستگی جزیی، P_r همبستگی جزیی و R همبستگی کلی هستند. با معرفی متغیرهای انتخابی NCEP به مدل SDSM، حداقل و حداکثر دما، بارش و رطوبت نسبی تحت سناریوهای اقلیمی جدید انتشار با خطوط سیر کلیدی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره پیش‌بینی یعنی سال‌های ۲۰۲۷–۲۰۱۷ تولید شدند و تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف انتشار نسبت به دوره پایه یعنی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ مورد بررسی قرار گرفتند. از نتایج مدل SDSM در دوره پیش‌بینی یعنی ابتدای سال آبی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ تا پایان سال آبی ۱۴۰۶–۱۴۰۵، جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب زیرزمینی آبخوان دهگلان، به‌عنوان ورودی به مدل MODFLOW استفاده شد.

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

در این پژوهش برای مدل‌سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی، از مدل MODFLOW در رابط گرافیکی GMS استفاده شد (Harbaugh *et al*., 2000). کلیه اطلاعات مورد نیاز برای ساخت مدل مفهومی، ابتدا در محیط ArcMap تهیه و سپس به‌صورت بسته‌های مختلف به مدل MODFLOW وارد شدند. برای تشکیل شبکه آبخوان در مدل MODFLOW، با در نظر گرفتن گره‌ها به‌صورت بلوک مرکزی، منطقه مورد مطالعه به‌صورت ۸۴ ردیف در ۱۱۰ ستون شبکه‌بندی شد. با توجه به وسعت آبخوان مورد مطالعه، ابعاد هر سلول ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد.

برای تهیه نقشه تراز سطح آبخوان، مدل رقومی ارتفاعی آبخوان مورد مطالعه با اندازه سلولی ۱۰ متر در ۱۰ متر با استفاده از نقشه توپوگرافی تهیه شد. در مطالعات ژئوفیزیک آبخوان دهگلان، در تعداد ۱۲۵۸ نقطه از آبخوان، عمق سنگ کف اندازه‌گیری شده است. در نرم‌افزار ArcMap با در نظر گرفتن نقاط مذکور، مقدار عمق سنگ کف برای هر سلول، میان‌یابی و نقشه هم‌تراز سنگ کف آبخوان تهیه گردید. در آبخوان دهگلان تعداد ۴۱ حلقه چاه مشاهده‌ای وجود دارد. تراز سطح آب در هر چاه مشاهده‌ای، با استفاده از تراز دهانه چاه و عمق برخورد به آب در آن، محاسبه و سپس نقشه ایزوپیز دشت با استفاده از آمار تراز سطح آب زیرزمینی ترسیم شد. برای تهیه

[1]. National centers for environmental prediction (NCEP)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

نقشه ضخامت اشباع آبخوان، دو نقشه تراز کف آبخوان و نقشه ایزوپیز در نرم‌افزار ArcMap به فرمت رستری تبدیل شدند و مقدار هر سلول در نقشه ایزوپیز از مقدار سلول متناظر در نقشه تراز کف آبخوان، کسر شد. نقشه ضخامت اشباع آبخوان برای تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان کاربرد دارد.

برای محاسبه ضریب انتقال و ترسیم نقشه مربوطه، از نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی که توسط دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای کردستان انجام شده است، استفاده شد. مقدار ضریب انتقال در محدوده آبخوان دهگلان از ۱۴۳ تا ۱۴۹۲ متر مربع در روز متغیر است. نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان، از تقسیم نقشه ضریب انتقال بر نقشه ضخامت اشباع آبخوان به‌دست آمد.

بعد از ساخت مدل مفهومی آبخوان مورد مطالعه، شرایط مدل‌سازی آبخوان برای حالت پایدار[1] فراهم شد. در حالت پایدار فرض می‌شود که سطح ایستابی در وضعیت خود ثابت می‌ماند و نسبت به زمان تغییر نمی‌کند. نتایج اولیه اجرای مدل، دارای دقت قابل قبول برای شبیه‌سازی نبود و بنابراین، آنالیز حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل برای افزایش دقت شبیه‌سازی انجام شد. با هدف تعیین حساس‌ترین پارامترهای موثر بر بار هیدرولیکی و نتایج مدل‌سازی آبخوان مورد مطالعه، مقادیر پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و آبدهی مخصوص مورد بررسی قرار گرفتند. برای این کار، در مرحله نخست برای هرکدام از پارامترهای مذکور، با استفاده از قابلیت‌هایی که در نرم‌افزار GMS وجود دارد، تعدادی نقاط نشانه[2] در محدوده آبخوان، تعریف شدند و براساس مقادیر منتج از واسنجی دستی، به هر یک از این نقاط نشانه یک مقدار اولیه اختصاص داده شد و در مرحله بعد مقدار حساسیت پارامترهای مذکور در هرکدام از نقاط نشانه با روش خودکار تعیین شد. در حالت پایدار، با توجه به تأثیر بالای هدایت هیدرولیکی و تغذیه در واسنجی مدل، مقدار این پارامترها تغییر داده شد تا برازش مناسبی بین بار هیدرولیکی محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده به‌دست آید. بعد از چندین مرتبه اجرای مدل و واسنجی پارامتر هدایت هیدرولیکی و تغذیه در حالت پایدار، مدل با حفظ شرایط فعلی برای شبیه‌سازی در حالت ناپایدار آماده شد. مهرماه سال آبی ۱۳۸۸–۱۳۸۷ به‌عنوان ماه پایه برای واسنجی مدل در حالت پایدار و آبان ماه سال آبی ۱۳۸۸–۱۳۸۷ تا پایان سال آبی ۱۳۹۴–۱۳۹۳ برای واسنجی ناپایدار انتخاب شد. در حالت ناپایدار، سطح ایستابی در طی جریان آب، نسبت به زمان متغیر در نظر گرفته شده و مقادیر جریان ورودی و خروجی معادل نیستند.

بعد از واسنجی، صحت‌سنجی مدل بر اساس داده‌های سال آبی ۱۳۹۵–۱۳۹۴ تا سال آبی ۱۳۹۶–۱۳۹۵، انجام‌شد. در مرحله صحت‌سنجی از آن‌جایی که مولفه‌های بیلان قطعیت ندارند، لذا می‌توان آن‌ها را تغییر داد، اما تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در این مرحله مجاز نیست (Anderson & Woessner, 1992). پس از انجام مرحله صحت‌سنجی، مدل MODFLOW برای استفاده در پیش‌بینی وقایع آتی آماده است. بدین ترتیب، نتایج مدل SDSM در برآورد متغیرهای اقلیمی در دوره پیش‌بینی یعنی سال آبی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ تا سال آبی ۱۴۰۶–۱۴۰۵ به‌عنوان ورودی مدل واسنجی شده MODFLOW در نظر گرفته شد و نوسانات سطح ایستابی آبخوان دهگلان در دوره پیش‌بینی، برآورد گردید.

ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها از ضرایب تبیین (رابطه ۲)، نش– ساتکلیف[3] (رابطه ۳)، میانگین خطای مطلق[4] (رابطه ۴) و درصد اریبی[5] (رابطه ۵) استفاده شد. ضریب تبیین بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن ۱ است. ضریب نش– ساتکلیف بین ∞– تا ۱ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن ۱ است. عموماً اگر ضریب نش– ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، اگر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash & Sutcliffe, 1970). هرچه مقدار خطای مطلق و درصد اریبی به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالای مدل و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم وجود خطا در برآورد مدل است (Gupta *et al.*, 1999).

$$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(S_i-S_{avg})(M_i-M_{avg})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(S_i-S_{avg})^2\sum_{i=1}^{n}(M_i-M_{avg})^2} \quad (۲)$$

$$E_{NS}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i-S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[M_i-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}M_i\right]^2} \quad (۳)$$

$$PBIAS=\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i-S_i)}{\sum_{i=1}^{n}(M_i)}\times 100 \quad (۴)$$

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}|M_i-S_i|}{n} \quad (۵)$$

در معادلات فوق، S_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، M_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، S_{avg} متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده، M_{avg} متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده و n تعداد داده‌ها هستند.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل SDSM

از میان ۲۶ متغیر مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی، پارامترهایی که همبستگی بیشتری با متغیرهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و رطوبت نسبی دارند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

بزرگ بودن مقدار عددی ضریب R نشان‌دهنده همبستگی بیشتر متغیر NCEP با متغیر اقلیمی مورد بررسی است. براساس نتایج جدول ۱، مقدار ضریب R برای داده‌های دمای حداقل و دمای حداکثر و رطوبت نسبی، از نظر عددی بسیار بزرگ‌تر از مقدار ضریب R برای داده‌های بارش، به‌دست آمد و این نشان می‌دهد که داده‌های دما همبستگی بهتری با پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب دارند. علت این امر آن است که تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر است و دما یک متغیر پیوسته است که کمتر تحت تأثیر ناهنجاری‌های زمانی قرار می‌گیرد. در حالی‌که بارش یک پارامتر گسسته است و تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد. این موضوع در کارهای

[1]. Steady state
[2]. Pilot point
[3]. Nash- Sutcliffe coefficient
[4]. Mean Absolute Error (MAE)
[5]. Percent Bias (PBIAS)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

محققان دیگر از جمله عساکره و اکبرزاده (Asakereh & Akbarzadeh, 2017) دیده می‌شود. نتایج بررسی مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار نشان از تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز رودخانه تلوار در دوره آتی دارد، به طوری که دمای هوا افزایش و مقدار بارش کاهش می‌یابد. افزایش دما نامطلوب‌ترین اثر تغییر اقلیم را که افزایش خشکی در منطقه است به‌همراه خواهد داشت. افزایش خشکی و به دنبال آن افزایش تبخیر، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بر منابع آب تأثیر خواهد گذاشت. از طرف دیگر افزایش دما می‌تواند منجر به تغییر شکل بارش زمستانی از برف به باران شود. این موضوع در کارهای محققان دیگر از جمله منصوری و همکاران (Mansouri *et al*., 2015) و صفری سوخته‌کلایی (Safari Sokhtehkolaei *et al*., 2022) گزارش شده‌است.

نتایج ضرایب ارزیابی مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی (جدول ۲) نشان دادند که مدل دقت قابل‌قبولی برای پیش‌بینی دما و بارش دارد، هر چند که دقت مدل در پیش‌بینی دما بیشتر است. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات (Karamouz *et al*., 2009; Cheema *et al*., 2011; Meenu *et al*., 2013) در این که مدل SDSM توانایی مناسب و قابل قبول در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی دارد، همسو هستند.

جدول۱- پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب جهت ریزمقیاس‌نمایی آماری متغیرهای اقلیمی

Table 1. Selected predictors for statistical downscaling of meteorological variables

PR	P value	P_r	R	متغیر مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی NCEP parameter: شرح Description	متغیر مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی NCEP parameter: عنوان Title	متغیر اقلیمی Meteorological variable
-0.374	0	0.526	0.840	Mean temperature	nceptempgl.dat	دمای حداقل Minimum temperature
-0.003	0	0.784	0.786	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	
-0.728	0	0.213	0.782	Near surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.097	0	0.661	0.732	850 hPa specific humidity	nceps850gl.dat	
-0.322	0	0.597	0.880	Mean temperature	nceptempgl.dat	دمای حداکثر Maximum temperature
0.004	0	0.820	0.817	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	
-0.725	0	0.225	0.817	Near surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.076	0	0.707	0.765	850 hPa specific humidity	nceps850gl.dat	
-0.277	0.128	0.047	0.065	850 hPa meridional velocity component	ncepp8_vgl.dat	بارش Precipitation
-0.286	0.148	0.045	0.063	850 hPa zonal velocity component	ncepp8_ugl.dat	
-0.290	0.157	0.044	0.062	850 hPa wind direction	ncepp8thgl.dat	
-0.065	0.168	-0.043	-0.046	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	
-0.421	0.406	0.022	0.038	500 hPa wind direction	ncepp5thgl.dat	
-0.475	0	-0.373	-0.710	Mean temperature	nceptempgl.dat	رطوبت نسبی Relative humidity
-0.015	0	-0.650	-0.660	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	
-0.825	0	-0.115	-0.656	Near surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.167	0	-0.509	-0.611	850 hPa specific humidity	nceps850gl.dat	

جدول۲- نتایج ضرایب ارزیابی مدل SDSM

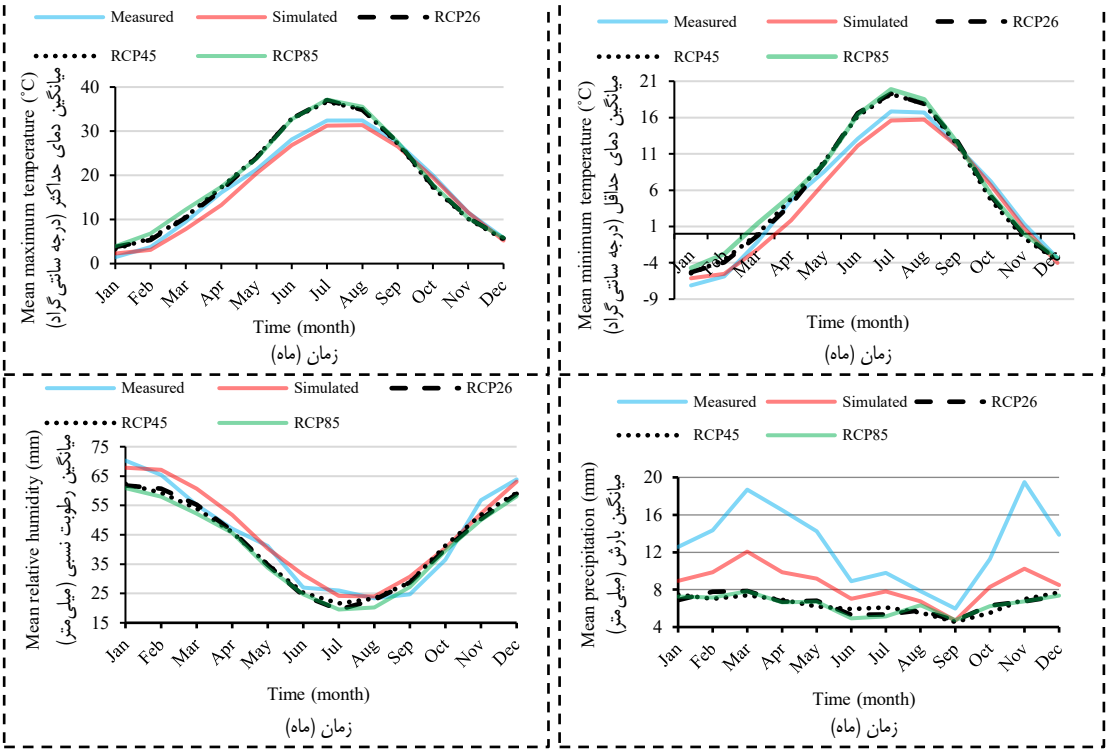
Table 2. Results of evaluation indices for the SDSM model

ضرایب ارزیابی Evaluation indices: MAE	PBIAS	E_{NS}	R^2	دوره Period	متغیر اقلیمی Meteorological variable
0.97	14.07	0.98	0.99	دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۵) Base period (1990-2005)	دمای حداقل Minimum temperature
1.03	5.07	0.99	0.99		دمای حداکثر Maximum temperature
4.20	32.82	-0.42	0.88		بارش Precipitation
3.12	-3.04	0.95	0.96		رطوبت نسبی Relative humidity

شکل ۲ تغییرات میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و رطوبت نسبی را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره پیش‌بینی نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]



شکل۲- میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی در دوره‌های پایه و پیش‌بینی

Figure 2. Monthly average of meteorological variables in base and prediction periods

تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه، میانگین ماهانه دمای حداقل و دمای حداکثر در فصول زمستان، بهار و تابستان افزایش و در فصل پاییز کاهش می‌یابد، به طوری که حداکثر افزایش مقدار دمای حداکثر طبق سناریوهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۱۵۷/۴۸، ۱۲۶/۸۸ و ۱۶۹/۴۰ درصد در ماه ژانویه و حداکثر افزایش دمای حداقل طبق سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به‌ترتیب برابر با ۷۷/۴۸ و ۱۰۰ درصد در ماه مارس و طبق سناریو RCP8.5 برابر با ۵۲/۳۲ درصد در ماه فوریه اتفاق افتاده است.

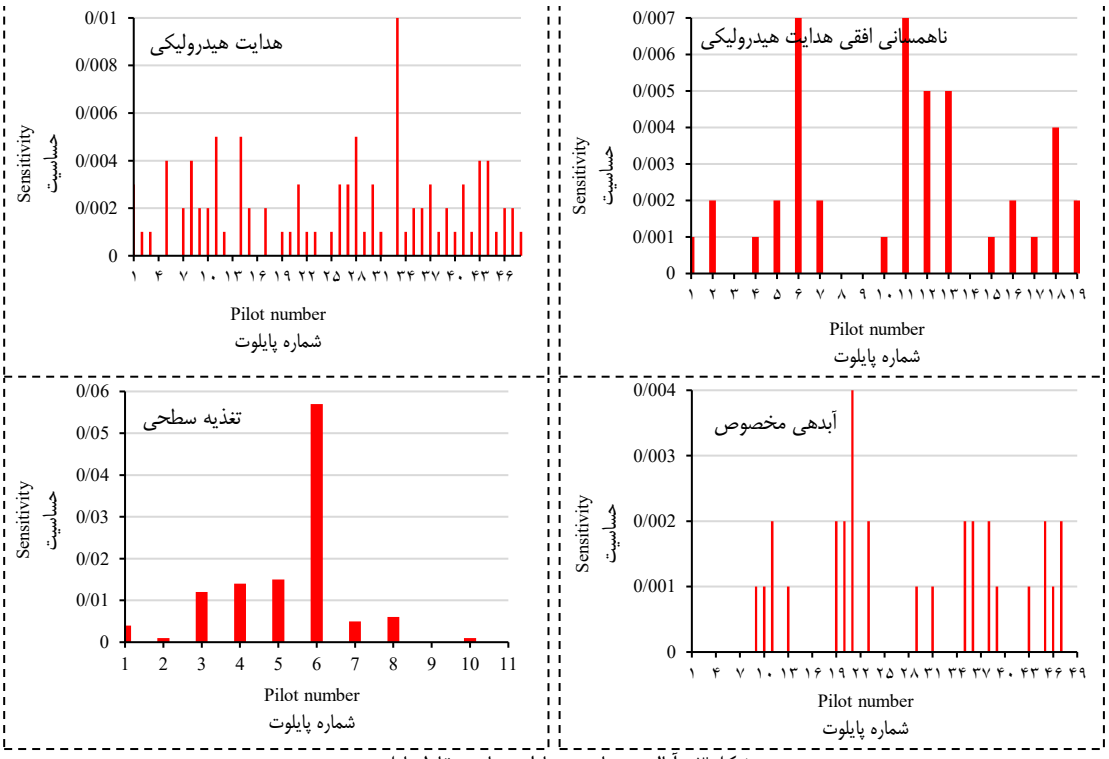
میانگین ماهانه متغیر بارش تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه، در تمام ماه‌های سال کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مقدار بارندگی طبق سناریوهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۳۵/۷۵، ۳۵ و ۳۵/۶۷ درصد در ماه نوامبر است.

تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه، میانگین ماهانه رطوبت نسبی در فصول زمستان، بهار و تابستان کاهش و در فصل پاییز افزایش می‌یابد، به‌طوری که بیشترین کاهش مقدار رطوبت نسبی طبق سناریوهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۲۵/۲۲، ۱۷/۰۹ و ۲۵/۰۷ درصد در ماه جولای است.

آنالیز حساسیت مدل MODFLOW

نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و آبدهی مخصوص در هریک از نقاط نشانه در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]



شکل۳- آنالیز حساسیت پارامترها در نقاط پایلوت
Figure 3. Sensitivity analysis in pilot numbers

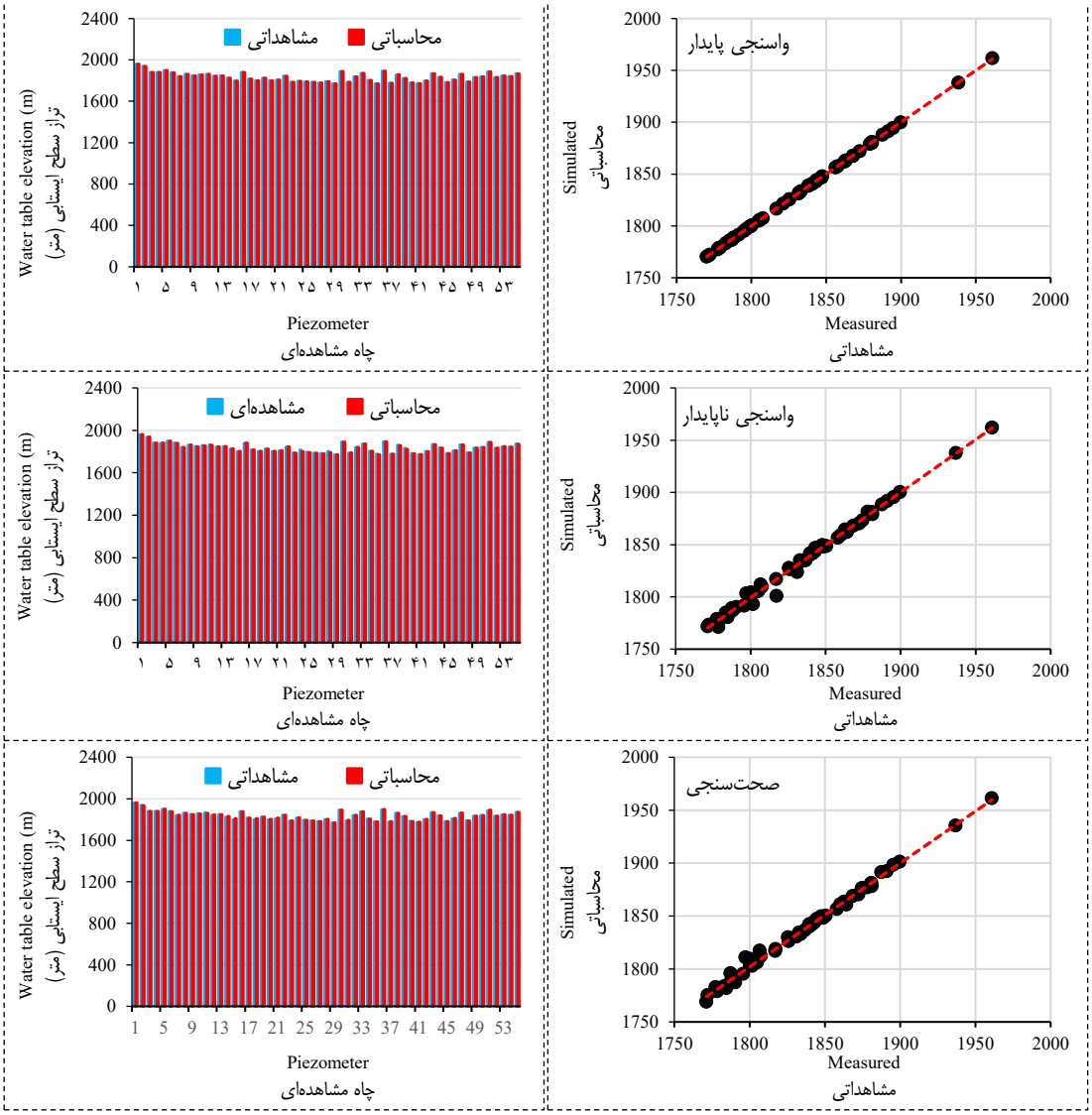
بیشترین حساسیت مدل MODFLOW نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی و کمترین حساسیت آن مربوط به آبدهی مخصوص می‌باشد. هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح به‌عنوان حساس‌ترین پارامترهای آبخوان، شناسایی شدند. در مطالعه انجام شده توسط آذری و همکاران (Azari *et al.,* 2014) پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به‌عنوان حساس‌ترین پارامترهای مدل انتخاب شدند و مطالعه انجام شده توسط کویی و همکاران (Qiu *et al.,* 2015) نشان داد که پارامتر تغذیه از سطح، حساس‌ترین پارامتر مدل می‌باشد. با استفاده از مدل واسنجی شده در شرایط ناپایدار، مقدار پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و آبدهی مخصوص، بهینه و در نهایت با میان‌یابی نقاط نشانه، مقدار پارامترهای مذکور برای آبخوان دهگلان محاسبه شد. مقدار پارامتر هدایت هیدرولیکی بین دو عدد ۰/۰۳۶ و ۱۱۲/۵۱۳ متر در روز، مقدار پارامتر ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی بین دو عدد ۰/۰۰۶ و ۴/۶۳۲، مقدار پارامتر تغذیه سطحی بین دو عدد ۰ و ۰/۰۰۴ متر در روز و مقدار پارامتر آبدهی مخصوص نیز بین دو عدد ۰/۰۰۱ و ۰/۴۲۲ متغیر است.

مقدار پارامتر هدایت هیدرولیکی در نواحی شمال غرب و شرق محدوده آبخوان مورد مطالعه بیشتر از سایر نواحی آبخوان می‌باشد. مشخصات آبخوان دهگلان در تمامی محدوده مورد مطالعه از نظر دانه‌بندی و آبدهی یکسان نیست. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در نواحی خاصی از آبخوان، تاییدکننده این موضوع می‌باشد. در بخش‌های جنوبی آبخوان، همبری سازندهای آهکی با توده‌های آذرین و مارنی، باعث فرسایش سازندهای سخت و تولید مواد دانه درشت و هوازدگی مارن‌ها باعث تشکیل مواد بسیار ریزدانه شده و این امر آبدهی ویژه و قابلیت انتقال پایین در این قسمت از آبخوان را به‌دنبال داشته است. بررسی لوگ چاه‌های اکتشافی نشان می‌دهد بخش‌های میانی آبخوان دهگلان از رسوبات ماسه و گراولی همراه با مقداری سیلت و رس تشکیل شده است. در بخش‌های شمالی آبخوان، مواد دانه‌ریز از گستردگی بیشتری برخوردار بوده که دلیل آن را می‌توان توپوگرافی نسبتا پست این مناطق و فرسایش شدید تا حد تولید سیلت و رس دانست. مقدار تغذیه از سطح در نواحی شمال شرق و شمال غرب محدوده آبخوان بیشتر از سایر نواحی آبخوان می‌باشد. از دلایل این امر می‌توان به تمرکز زیاد تعداد روستاها در این نواحی و در نتیجه آب برگشتی حاصل از مصارف شرب و کشاورزی اشاره کرد.

همبستگی تراز سطح ایستابی مشاهداتی و محاسباتی

همبستگی تراز سطح ایستابی محاسباتی در برابر مقادیر مشاهداتی در مراحل واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار و صحت‌سنجی در شکل ۴ نمایش داده شد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]



شکل۴- همبستگی تراز سطح ایستابی مشاهداتی و محاسباتی در مراحل واسنجی پایدار، واسنجی ناپایدار و صحت‌سنجی
Figure 4. Comparison of measured and simulated water table elevation for steady-state, transient, and validation conditions

حداقل اختلاف تراز سطح ایستابی محاسباتی با مشاهداتی در مراحل مذکور به‌ترتیب برابر با ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۴۷ متر و حداکثر اختلاف تراز سطح ایستابی محاسباتی با مشاهداتی به‌ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۱۶/۵۹ و ۱۳/۵۴ متر هستند. بر این اساس، در تمامی چاه‌های مشاهده‌ای مقدار تراز سطح ایستابی محاسباتی با تراز سطح ایستابی اندازه‌گیری شده اختلاف اندکی دارد. مقدار افت سطح ایستابی از سمت حواشی آبخوان واقع در بخش‌های جنوبی، شمالی، شرقی و غربی به‌سمت قسمت‌های میانی که محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری است، افزایش می‌یابد. مقادیر افت سطح ایستابی در بخش‌های جنوبی و شمال غربی آبخوان بین ۱ تا ۱۵ متر و در بخش‌های شمال شرقی آبخوان، بین ۲۰ تا ۳۰ متر هستند. حداکثر میزان افت سطح ایستابی، در بخش‌های میانی آبخوان و بین ۲۰ تا ۵۵ متر است.

نتایج ضرایب ارزیابی مدل MODFLOW در مراحل واسنجی پایدار، واسنجی ناپایدار و صحت‌سنجی در جدول ۳ ارائه شده‌اند. با توجه به این که مقدار ضرایب تبیین و نش ساتکلیف در مراحل مذکور برابر با ۰/۹۹ به‌دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل MODFLOW در مراحل مذکور به‌صورت کامل، تراز سطح ایستابی را شبیه‌سازی کرده‌است. یافته‌های این تحقیق، نتایج مطالعاتی که توانایی مدل MODFLOW را در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در مناطق مورد مطالعه، قابل قبول اعلام کردند، تأیید می‌کنند (Yaoti *et al.*, 2008; Zhang & Hiscock, 2010; Riasat *et al.*, 2012, Piri *et al.*, 2022).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

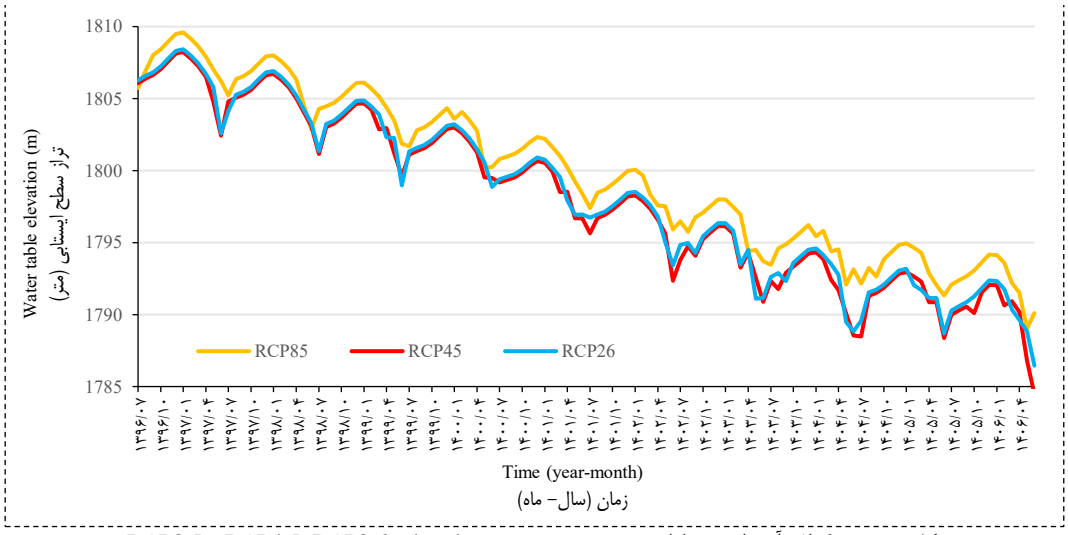
جدول۳- نتایج ضرایب ارزیابی مدل MODFLOW

Table 3. Results of evaluation indices for the MODFLOW model

دوره Period	ضرایب ارزیابی Evaluation indices			
	R^2	E_{NS}	PBIAS	MAE
واسنجی در شرایط پایدار Steady state	0.99	0.99	-0.01	0.27
واسنجی در شرایط ناپایدار Transient	0.99	0.99	0.02	2.19
صحت‌سنجی Validation	0.99	0.99	-0.07	2.18

اثر تنش‌های اقلیمی آتی بر نوسانات سطح ایستابی آبخوان

نتایج پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره پیش‌بینی در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل۵- هیدروگراف آبخوان در طول دوره پیش‌بینی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5

Figure 5. Aquifer hydrographs during forecast period under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios

براساس نتایج، متوسط تغییرات سالانه تراز سطح آب در دوره پیش‌بینی و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب برابر با ۱/۶۰-، ۱/۶۱- و ۱/۳۶- متر و متوسط تغییرات سالانه حجم مخزن آبخوان دهگلان به‌ترتیب برابر با ۲۳/۶۹-، ۲۳/۸۵- و ۲۰/۲۱- میلیون مترمکعب محاسبه شد. به‌عبارت دیگر آبخوان دهگلان در دوره پیش‌بینی، تحت همه سناریوهای اقلیمی بیلان منفی خواهد داشت و مقدار کاهش حجم مخزن تحت سناریو RCP8.5، در مقایسه با سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 کمتر خواهد بود. تحت سناریوهای انتشار در دوره آتی، نوسانات سطح ایستابی در طول سال (در طول دوره‌های تنش خشک و تر) روند طبیعی خود را طی کرده و بر اساس نوع تنش خشک یا تر، تغییر محسوسی پیدا نخواهد کرد. در این‌باره، نتایج تحقیق ساری صراف و جلیلی انصارودی (Sari Sarraf & Jalali Ansaroodi, 2019) نشان می‌دهند که در دوره آتی با وجود روند افزایش دما و کاهش بارش، از بین سه پارامتر تبخیر، تغذیه و رواناب، مقادیر تبخیر بر مقادیر دو پارامتر دیگر غالب خواهد بود. نتایج مطالعه انصاری و همکاران (Ansari *et al.*, 2014) نشان می‌دهند که تغییر اقلیم در دوره آتی به‌صورت افزایش دما به‌میزان یک درجه سانتی‌گراد و افزایش بارش به‌مقدار ۳۳ درصد خواهد بود و باعث تغذیه آبخوان خواهد شد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره پایه نشان می‌دهند که تطابق دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهده شده با شبیه‌سازی شده بیشتر از دیگر متغیرهای اقلیمی است. نتایج بررسی مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار نشان از تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز رودخانه تلوار در دوره آتی دارد به‌طوری‌که دمای هوا افزایش و مقدار بارش کاهش می‌یابد. افزایش دما نامطلوب‌ترین اثر تغییر اقلیم را که افزایش خشکی در منطقه است به‌همراه خواهد داشت. افزایش خشکی و به‌دنبال آن افزایش تبخیر، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بر منابع آب تأثیر خواهد گذاشت. از طرف دیگر افزایش دما می‌تواند منجر به تغییر شکل بارش زمستانی از برف به باران شود. نتایج این تحقیق توانایی مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی مناسب و قابل قبول متغیرهای اقلیمی را تایید می‌کنند.

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت پارامترها، هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح به‌عنوان حساس‌ترین پارامترهای آبخوان، شناسایی شدند. یافته‌های این تحقیق، نتایج مطالعاتی که توانایی مدل MODFLOW را در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در مناطق مورد مطالعه، قابل قبول اعلام کردند، تأیید

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

می‌کنند (Yaoti *et al*., 2008; Zhang & Hiscock, 2010; Riasat *et al*., 2012, Piri *et al*., 2022).

هیدروگراف آبخوان طی دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی نشان می‌دهد که مقدار افت سطح ایستابی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، به‌ترتیب به‌میزان ۰/۲۴۸، ۰/۲۵۹ و ۰/۰۱۳ متر افزایش پیدا می‌کند. تحت سناریوهای انتشار در دوره آتی، نوسانات سطح ایستابی در طول سال (در طول دوره‌های تنش خشک و تر) روند طبیعی خود را طی کرده‌اند و بر اساس نوع تنش خشک یا تر، تغییر محسوسی پیدا نخواهند کرد.

References

Abbas, S. A., Xuan, Y., & Bailey, R. T. (2022). Assessing climate change impact on water resources in water demand scenarios using SWAT-MODFLOW-WEAP. *Journal of Hydrology,* 9(10), 1-24.

Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research,* 45(10), 1-16.

Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport*. Academic Press.

Ansari, S., Massah Bavani, A. R., & Roozbahani, A. (2016). Effects of climate change on groundwater recharge (Case study: Sefid Dasht Plain). *Journal of Water and Soil,* 30(2), 416-431. [In Persian]

Asakereh, H., & Akbarzadeh, Y. (2017). Simulation of temperature and precipitation changes of Tabriz synoptic station using statistical downscaling and CanESM2 climate change model output. *Journal of Geography and Environmental Hazards,* 6(1), 153-174. [In Persian]

Azari, A., Akhoond-Ali, A. M., Radmanesh, F., & Haghighi, A. (2014). Groundwater–surface water interaction simulation in terms of integrated water resource management (Case study: Dez Plain). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering,* 38(2), 33-47. [In Persian]

Azizi, H., Ebrahimi, H., Samani, H. M. V., & Khaki, V. (2021). Evaluating the effects of climate change on groundwater level in the Varamin plain. *Water Supply,* 21(3), 1372-1384.

Cheema, S. B., Rasul, G., Ali, G., & Kazmi, D. H. (2011). A comparison of minimum temperature trends with model projections. *Pakistan Journal of Meteorology,* 8(15), 39-52.

Cohen, B. (2006). Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technology in Society,* 28(1-2), 63-80.

Ficklin, D. L., Luo, Y., Luedeling, E., & Zhang, M. (2009). Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology,* 374(1-2), 16-29.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology Engineering,* 4(2), 135-143.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: User Guide to Modularization Concepts and the Groundwater Flow Process.*

Hashemi, F., Olesen, J. E., Jabloun, M., & Hansen, A. L. (2018). Reducing uncertainty of estimated nitrogen load reductions to aquatic systems through spatially targeting agricultural mitigation measures using nitrogen reduction. *Journal of Environmental Management,* 218, 451-464.

Hellström, D., Jeppsson, U., & Kärrman, E. (2000). A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review,* 20(3), 311-321.

Howe, C., & Mitchell, C. (2011). *Water Sensitive Cities*. IWA Publishing.

Karamouz, M., Fallahi, M., Nazif, S., & Rahimi Farahani, M. (2009). Long lead rainfall prediction using statistical downscaling and artificial neural network modeling. *Scientia Iranica,* 16(1), 165-172.

Mackay, R., & Last, E. (2010). SWITCH city water balance: A scoping model for integrated urban water management. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 9*(4), 291-296.

Mansouri, B., Ahmadzadeh, H., Massah Bavani, A., Morid, S., Delavar, M., & Lotfi, S. (2015). Assessment of climate change impacts on water resources in Zarrinehrud Basin using SWAT model. *Journal of Water and Soil, 28*(6), 1203-1291. [In Persian]

Meenu, R., Rehana, S., & Mujumdar, P. P. (2013). Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Processes, 27*(11), 1572-1589.

Mirani Moghadam, H., Karami, G. H., Bagheri, R., & Barati, R. (2021). Death time estimation of water heritages in Gonabad plain, Iran. *Environmental Earth Sciences,* 80(4), 1-10.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology,* 10(3), 282-290.

Nitika, M., Devesh, S., & Aditya, S. (2024). Groundwater sustainability assessment under climate change scenarios using integrated modelling approach and multi-criteria decision method. *Ecological Modelling,* 478.

Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Investigation of meteorological variables on runoff archetypal using SWAT: Basic concepts and fundamentals. *Applied Water Science,* 12(8), 177.

Piri, H., Mobaraki, M., & Siasar, S. (2022). Temporal and spatial modeling of groundwater level in Bushehr plain using artificial intelligence and geostatistics. *Journal of Watershed Management Research,* 13(26), 58-68. https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.58. [In Persian]

Qiu, S., Liang, X., Xiao, C., Huang, H., Fang, Z., & Lv, F. (2015). Numerical simulation of groundwater flow in a river valley basin in an urban area, China. *Water,* 7(10), 5768-5787.

Riasat, A., McFarlane, D., Varma, S., Dawes, W., Emelyanova, I., Hodgson, G., & Charles, S. (2012). Potential climate change impacts on groundwater resources of south-western Australia. *Journal of Hydrology,* 475, 456-472.

Safari Sokhtehkolaei, F., NoRooz Valashedi, R., & Khoshravesh, M. (2022). Evaluation of extreme scenarios of climate change on discharge of the Shahid Rajaei Dam catchment under HBV-light model.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]

Journal of Watershed Management Research, 13(26), 93-104. https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.93. [In Persian]

Safavi, H., Alizadeh, M., & Golmohammadi, M. H. (2022). Investigating the effects of management scenarios against climate change on river-aquifer interaction, case study: Lenjanat Sub-basin. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering,* 7(3), 16-27. [In Persian]

Sari Sarraf, B., & Jalali Ansaroodi, T. (2019). The investigation of the impact of climate change on water balance caused by precipitation in Tasuj aquifer for the period of 2017-2030. *Hydrogeomorphology,* 6(19), 163-185. [In Persian]

Sheikha-BagemGhaleh, 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.

Toews, M. W., & Allen, D. M. (2009). Simulated response of groundwater to predicted recharge in a semi-arid region using a scenario of modelled climate change. *Environmental Research Letters,* 4(3), 1-19.

Van der Steen, P., & Howe, C. (2009). Managing water in the city of the future; strategic planning and science. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology,* 8(2), 115-120.

Yaoti, F. E., Mandoure, A. E., & Khattach, D. (2008). Modeling groundwater flow and advective contaminant transport in Bou-Areg unconfined aquifer. *Journal of Hydro-Environment Research,* 2, 192-209.

Zhang, A., Zhang, C., Fu, G., Wang, B., Bao, Z., & Zheng, H. (2012). Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China. *Water Resources Management,* 26(8), 2199-2217.

Zhang, H., & Hiscock, K. M. (2010). Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. *Journal of Hydrology,* 392(3-4), 136-149.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-09-01]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1281]