Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 108- 124

OPEN ACCESS

Research Paper

Climate Change Impacts on Water Resources: A Case Study of the Damghanroud Basin

Mahin Khosravi[1], Mohammad Reza Yazdani[2] and Ali Asghar Zolfaghari[3]

1- Postdoctoral Researcher, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran
2- Associate Professor, Department of Combating Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran, (Corresponding author: m_yazdani@semnan.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Arid Areas Management, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 20 August, 2025 Revised: 12 November, 2025 Accepted: 08 December, 2025

Extended Abstract

Background: In recent decades, climate change has emerged as one of the most serious threats to the sustainability of freshwater resources worldwide. This challenge is particularly severe in semi-arid regions, where rapid population growth, economic development, and unsustainable resource exploitation have increasingly disrupted the balance between water supply and demand. Changes in precipitation patterns, rising temperatures, and increased evapotranspiration have significantly affected hydrological processes, especially groundwater recharge. In addition, land use changes and poor water management practices have further exacerbated these impacts. Numerous studies have emphasized that both climate change and human pressures drive the decline in Iran's water resources. In this context, the use of General Circulation Models (GCMs) under various Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), particularly SSP5-8.5, provides a more accurate projection of future water resource conditions. This study investigates the long-term impacts of climate change on groundwater resources in the Damghanroud watershed using climate projections from CMIP6 models and the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model. The research offers valuable insights into the annual interactions between surface runoff, drought, and aquifer recharge, contributing to improved water resource management in semi-arid environments.

Methods: The SWAT model was applied in a semi-arid watershed in central Iran to assess the future impacts of climate change on surface runoff and groundwater recharge. Model setup involved the preparation of spatial and climatic input data, including topography, land use, soil characteristics, and daily meteorological records. Following data preparation, the model was calibrated and validated to ensure reliable simulation performance. Daily climate projections for the 2030–2060 period were obtained from selected CMIP6 climate models. Bias correction techniques, including quantile mapping for precipitation and normalization for temperature data, were applied to improve the accuracy of these projections. All input data were processed using ArcSWAT, and the model was executed to simulate monthly surface runoff and groundwater recharge, which were subsequently aggregated to an annual time scale. To identify trends in the hydrological and meteorological time series, the non-parametric Mann-Kendall test was employed to assess statistical significance, while Sen's slope estimator was used to measure the rate of change. Furthermore, two drought indices—the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Runoff Index (SRI)—were calculated to analyze the frequency, intensity, and duration of meteorological and hydrological droughts under future climate scenarios. All spatial modeling and analyses were conducted using ArcGIS, while statistical analyses were performed using R and Excel software.

Results: The simulation results under the SSP5-8.5 scenario revealed a significant upward trend in the mean annual temperature for the period 2030–2060. Specifically, temperature increases were estimated at approximately 0.4 °C per decade during dry years and 0.2 °C per decade during wet years. Annual precipitation showed a noticeable decline, with reductions of up to 36% and 28% projected for dry and wet years, respectively. Surface runoff also followed a declining trend, with an estimated average annual reduction of 0.15 mm, and particularly in dry years, the reduction exceeded 40%. Groundwater recharge is

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

Copyright ©2026. Khosravi 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 properly.

expected to experience a substantial decrease, especially during drought periods, with annual reductions reaching up to 90% above the long-term average. On average, the annual decline in recharge was projected to be around 0.9 mm. Analysis of drought indices (SPI and SRI) indicates that, although drought intensity may slightly decrease compared to the baseline period, the frequency of drought events is projected to increase. These changes suggest growing instability in groundwater resources due to sharp fluctuations between wet and dry periods in the future.

Conclusion: This study demonstrates that future climate changes, under moderate and severe scenarios, will have significant negative impacts on surface and groundwater resources in semi-arid regions. The findings indicate a considerable reduction in precipitation, runoff, and groundwater recharge, accompanied by increasing temperature and consecutive drought events. These changes will severely disrupt the hydrological balance of the region and have profound impacts on agriculture, potable water supply, and sustainable development. Although the overall trend of climate change points to increased climatic stress, the variability in drought intensity over the years suggests that adaptive measures must be dynamic, region-specific, and based on continuous monitoring. One key practical implication of this study is the need to integrate climate change scenarios into regional water resource policies, enhance artificial groundwater recharge measures, and reconsider irrigation and water consumption patterns. Furthermore, the uncertainty in climate model outputs and the spatial heterogeneity of hydrological responses are key challenges in decision-making that require further in-depth studies. Overall, this research emphasizes the necessity of adopting resilient and climate-adaptive strategies for water resource management, particularly in water-stressed regions. It provides a significant step toward developing science-based policies for sustainable water governance in the face of changing climatic conditions and offers valuable guidance for decision-makers and planners.

Keywords: Climate Change, SWAT model, Groundwater Recharge, Runoff, Drought Index, SSP Scenarios

How to Cite This Article: Khosravi, M., Yazdani, M.R., & Zolfaghari, A.A. (2026). Climate Change Impacts on Water Resources: A Case Study of the Damghanroud Basin. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 108-124. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

تأثیرات تغییر اقلیم بروی منابع آب: مطالعه موردی حوضه دامغان‌رود

مهین خسروی[۱]، محمد رضا یزدانی[۲] و علی اصغر ذوالفقاری[۳]

۱- پژوهش‌گر پسا دکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، (نویسنده مسوول: m_yazdani@semnan.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷
صفحه: ۱۰۸ تا ۱۲۴

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: در دهه‌های اخیر، تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات برای پایداری منابع آب شیرین در سطح جهان مطرح شده است. این چالش در مناطق نیمه‌خشک، جایی‌که رشد سریع جمعیت، توسعه اقتصادی و بهره‌برداری ناپایدار از منابع، تعادل بین عرضه و تقاضای آب را بیش‌ازپیش مختل کرده است، شدت بیشتری دارد. تغییرات در الگوهای بارش، افزایش دما و افزایش تبخیر و تعرق، تأثیرات قابل‌توجهی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه تغذیه آب زیرزمینی داشته‌اند. علاوه بر این، تغییرات کاربری زمین و شیوه‌های ضعیف مدیریت آب، این اثرات را تشدید کرده‌اند. مطالعات متعدد تأکید دارند که کاهش منابع آب در ایران ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی است. در این راستا، استفاده از مدل‌های گردش عمومی (GCMs) تحت سناریوهای مختلف مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs)، به ویژه SSP5-8.5، پیش‌بینی دقیق‌تری از شرایط آینده منابع آب ارائه می‌دهد. این مطالعه تأثیرات بلندمدت تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز دامغان‌رود را با استفاده از پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6 و مدل هیدرولوژیکی SWAT (ابزار ارزیابی خاک و آب) بررسی می‌کند. این پژوهش بینش‌های ارزشمندی را در مورد تعاملات سالانه بین رواناب، خشکسالی و تغذیه آبخوان ارائه می‌دهد و به بهبود مدیریت منابع آب در محیط‌های نیمه‌خشک کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها: مدل SWAT در یک حوضه آبریز نیمه‌خشک در مرکز ایران برای ارزیابی تأثیرات آینده تغییر اقلیم بر رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی به‌کار گرفته شد. تنظیم مدل شامل آماده‌سازی داده‌های ورودی مکانی و اقلیمی مانند توپوگرافی، کاربری زمین، خصوصیات خاک و داده‌های روزانه هواشناسی بود. پس از آماده‌سازی داده‌ها، مدل کالیبره و اعتبارسنجی شد تا عملکرد شبیه‌سازی قابل‌اعتمادی را فراهم کند. پیش‌بینی‌های روزانه اقلیمی برای دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ از مدل‌های منتخب CMIP6 به دست آمد. برای بهبود دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی، تکنیک‌های تصحیح سوگیری شامل روش نگاشت چندکی برای تصحیح بارش و نرمال‌سازی برای داده‌های دما اعمال شد. تمام داده‌های ورودی در ArcSWAT پردازش شدند، مدل برای شبیه‌سازی مقادیر رواناب ماهانه و تغذیه آب‌زیرزمینی اجرا شد و سپس به مقیاس زمانی سالانه تجمیع شد. برای شناسایی روندها در سری‌های زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی، آزمون ناپارامتریک من-کندال برای ارزیابی اهمیت آماری روندها و تخمین‌گر شیب سن برای اندازه‌گیری شدت تغییرات استفاده شد. همچنین، دو شاخص خشکسالی- شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) - برای تحلیل فراوانی، شدت و مدت‌زمان خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در شرایط اقلیمی آینده محاسبه شدند. تمام مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های مکانی در ArcGIS انجام شد، درحالی‌که تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای R و اکسل صورت گرفت.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی‌ها تحت سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهند که میانگین سالانه دما در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ روند افزایشی قابل‌توجهی دارد، به‌طوری‌که در سال‌های خشک افزایش دما حدود ۰/۴ درجه سانتی‌گراد در هر دهه و در سال‌های تر حدود ۰/۲ درجه سانتی‌گراد در هر دهه برآورد شده است. بارندگی سالانه در این دوره به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در سال‌های خشک تا ۳۶ درصد و در سال‌های تر تا ۲۸ درصد کاهش پیش‌بینی شده است. رواناب سطحی نیز روند کاهشی دارد و کاهش سالانه آن حدود ۰/۱۵ میلی‌متر برآورد شده است که در سال‌های خشک تا ۴۰ درصد بالاتر از میانگین کاهش داشته است. تغذیه سالانه آبخوان به‌ویژه در سال‌های خشک، کاهش شدیدی را تجربه خواهد کرد، به‌طوری که در خشکسالی‌ها تا ۹۰ درصد بالاتر از میانگین کاهش و به‌طور متوسط کاهش سالانه حدود ۰/۹ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. بررسی شاخص‌های خشکسالی (SPI و SRI) نشان می‌دهد که اگرچه شدت خشکسالی‌ها نسبت به دوره پایه کاهش جزئی خواهد داشت، اما فراوانی وقوع آن‌ها افزایش می‌یابد. این تغییرات بیانگر ناپایداری منابع آب زیرزمینی در اثر نوسانات شدید بین دوره‌های خشک و تر در آینده هستند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی آینده، تحت سناریوی شدید، تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر منابع آب در مناطق نیمه‌خشک خواهد داشت. یافته‌ها نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه در بارش، رواناب و تغذیه آب زیرزمینی، همراه با افزایش دما و رویدادهای خشکسالی متوالی هستند. این تغییرات تعادل هیدرولوژیکی منطقه را به‌شدت مختل خواهند کرد و تأثیرات عمیقی بر کشاورزی، تأمین آب آشامیدنی و توسعه پایدار خواهند داشت. اگرچه روند کلی تغییر اقلیم به افزایش تنش اقلیمی اشاره دارد، اما تنوع در شدت خشکسالی در طول سال‌ها نشان می‌دهد که اقدامات سازگار باید پویا، منطقه‌محور و مبتنی بر پایش مداوم باشند. یکی از پیامدهای عملی کلیدی این مطالعه، نیاز به یکپارچه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم در سیاست‌های منابع آب منطقه‌ای، تقویت اقدامات تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی و بازنگری در الگوهای آبیاری و مصرف آب است. علاوه بر این، عدم قطعیت در خروجی‌های مدل اقلیمی و ناهمگنی مکانی پاسخ‌های هیدرولوژیکی، چالش‌های کلیدی در تصمیم‌گیری هستند که نیازمند مطالعات عمیق‌تر است. به‌طور کلی، این پژوهش بر ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مقاوم و سازگار با اقلیم برای مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق با تنش‌های آبی تأکید دارد. این مطالعه گامی مهم را در جهت توسعه سیاست‌های مبتنی بر علم برای حاکمیت پایدار آب در مواجهه با شرایط اقلیمی در حال تغییر ارائه می‌دهد و راهنمایی ارزشمندی را برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان فراهم می‌کند.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، مدلSWAT ، تغذیه آب زیرزمینی، رواناب، شاخص خشکسالی، سناریوهایSSP

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که منابع آب را با تهدید جدی مواجه کرده است (Shi *et al*., 2024; Wojkowski *et al*., 2023). ترکیب این عامل با رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و فعالیت‌های انسانی، فشار مضاعفی را بر منابع آب شیرین وارد کرده است و پایداری تأمین آب را در بسیاری از مناطق جهان با اختلال مواجه ساخته است (Huang *et al*., 2021). در این میان، تغییرات اقلیمی باعث دگرگونی‌های چشم‌گیری در فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای شده‌اند که این تغییرات

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

عمدتاً ناشی از نوسانات در متغیرهای کلیدی اقلیمی مانند بارش و دما هستند (Zhu *et al*., 2024؛ Khosravi & Yazdani, 2025؛ Gao *et al*., 2024). تغییر در الگوی بارندگی و افزایش تبخیر– تعرق از مهم‌ترین عواملی هستند که مستقیماً بر تغذیه آب‌زیرزمینی تأثیر گذاشته‌اند. در عین حال، بهره‌برداری‌های انسانی، تغییرات کاربری زمین و توسعه ناپایدار، این اثرات را تشدید کرده‌اند (Huo *et al*., 2024؛ Zarei & Destouni, 2024). پژوهش‌های اخیر نیز تأکید دارند که نوسانات اقلیمی نقش برجسته‌ای در تغییر الگوهای تغذیه آب‌زیرزمینی دارند (Li & Ma, 2024). این در حالی است که فعالیت‌های انسانی و شیوه‌های مدیریتی نامناسب می‌توانند این اثرات را به‌طور فزاینده‌ای تشدید کنند (Geng *et al*., 2023). به‌عنوان نمونه، مطالعه گنگ و همکاران (Geng *et al*., 2023) نشان داد که تغییرات سریع در کاربری زمین، که عمدتاً ناشی از رشد جمعیت و توسعه اقتصادی هستند، عامل اصلی کاهش منابع آبی است. این ارتباطات پیچیده منجر به بروز اثرات زمانی و مکانی چندگانه بر چرخه هیدرولوژیکی شده است (Li *et al*., 2024؛ Zhang *et al*., 2019). مطالعات جعفرزاده و همکاران (Jafarzadeh *et al*., 2019) و کریمیان و همکاران (Karimian *et al*., 2019) نشان داده‌اند که در مناطق نیمه‌خشک ایران، کاهش و تغییر الگوی بارش و فعالیت‌های انسانی به‌عنوان تهدیدی جدی برای مدیریت منابع آبی محسوب می‌شوند. بنابر این، در این مناطق تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به عنوان عوامل کلیدی کاهش منابع آب مطرح هستند. در این راستا، چالش‌های پیچیده‌ای در مدیریت پایدار منابع آب ایجاد می‌کنند که نیاز به رویکردهای جامع و چندبعدی در سیاست‌گذاری‌های مدیریتی رو به آینده را نشان می‌دهد. برای پیش‌بینی شرایط آینده منابع آب، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) بر پایه سناریوهای مسیرهای اجتماعی–اقتصادی مشترک (SSPs) ابزار مؤثری محسوب می‌شود. به ویژه سناریوی SSP5-8.5 که با تمرکز بر سیاست‌های منطقه‌ای طراحی شده است، تصویر واقع‌بینانه‌تری از اثرات آینده اقلیم بر منابع آب را ارائه می‌دهد (Davamani *et al*., 2024). ارزیابی اثرات اقلیمی به مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی دقیق نیاز دارد. مدل SWAT (ابزار ارزیابی آب و خاک) به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، امکان بررسی تغییرات منابع آب را بر اساس داده‌های اقلیمی، فیزیوگرافی، و کاربری زمین فراهم می‌سازد (Mengistu *et al*., 2022؛ Said *et al*., 2021؛ Feyissa *et al*., 2024). از سوی دیگر، پایش اثرات تغییرات اقلیمی امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی پایدار را فراهم می‌کند که شاخص‌های اقلیمی از طریق کمی‌سازی خشکسالی‌ها، این امکان را فراهم می‌کنند (Ndayiragije & Li, 2022). شاخص بارش استاندارد شده[1] (SPI) و شاخص رواناب استاندارد شده[2] (SRI) از کاربردی‌ترین شاخص‌ها برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی به‌ویژه در مقیاس منطقه‌ای هستند که در مطالعات مختلفی برای پایش اثرات خشکسالی استفاده شده‌اند (Tareke & Awoke, 2022; Muleta *et al*., 2022). همچنین، بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند SPI و SRI در بازه‌های زمانی مختلف، نشان داده است که این شاخص‌ها قابلیت مناسبی برای تحلیل شدت، مدت و گستره خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای دارند (Janbozorgi *et al*., 2021). مطالعات مختلفی در ایران به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، غزنوی و ابراهیمی (Ghazavi & Ebrahimi, 2019) رفتار آب زیرزمینی در آبخوان گلپایگان را شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها، سطح آب زیرزمینی حتی در دوره‌های نرمال یا پربارش نیز به کاهش خود ادامه می‌دهد و این روند بیشتر به‌دلیل خشکسالی و برداشت بیش از حد آب بوده است. در مطالعه‌ای دیگر (Teimoori *et al*., 2019)، اثرات احتمالی تغییرات اقلیم بر منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بررسی شد. طبق یافته‌ها، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، کاهش بارندگی و افزایش دما منجر به کاهش تغذیه آبخوان خواهد شد. اکثر مطالعات پیشین تمرکز خود را بر بررسی اثرات تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، مانند بازه‌های ماهانه یا فصلی، معطوف کرده‌اند. این در حالی است که آثار تجمعی و روندهای بلندمدت تغییراقلیم که در بازه‌های زمانی سالانه و چندساله نمایان می‌شوند، به‌ویژه با در نظر گرفتن سیاست‌های مدیریت منطقه‌ای، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بنابر این، تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های سالانه و بلندمدت برای درک عمیق‌تری از پایداری منابع آب در مواجهه با تغییراقلیم ضروری هستند. برای ارزیابی دقیق روند تغییرات اقلیمی بر منابع آب و بررسی اثرات آن برخشکسالی هیدرولوژیکی، از روش‌های آماری ناپارامتری مانند آزمون من–کندال[3] و تخمین‌گر شیب سن[4] استفاده شد. کارایی این روش‌ها در تحلیل روند داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی در مطالعات متعددی تایید شده است . برای مثال کروگولک و همکاران (Krogulec *et al*., 2021) با به‌کارگیری آزمون من—کندال و تخمین‌گر شیب سن، روند سطح آب‌زیرزمینی را در آبخوان‌های کارستی اروپا ارزیابی نمودند. نتایج آنها نشان‌دهنده‌ی روند معنی‌دار افت سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی اروپای مرکزی بودند. در مطالعه دیگری، گودرزی و همکاران (Goodarzi *et al*., 2024) با تحلیل داده‌های طولانی‌مدت آبخوان‌های زاگرس، کارایی روش من—کندال/شیب سن را در شناسایی روند خشک شدن منابع آب‌زیرزمینی ایران تأیید نمودند. آرفاسا و همکاران (Arfasa *et al*., 2024) نیز در حوزه آبریز رودبار اتیوپی، تغییرات بارش، دما و رواناب را با آزمون من–کندال و تخمین‌گر سن بررسی کردند و روند خشکسالی‌های اخیر را کمی‌سازی نمودند. با این‌حال، تعداد معدودی از مطالعات، از ترکیب این ابزارها برای پایش بلندمدت اثرات تغییراقلیم بر منابع آب بهره گرفته‌اند. در

1 Standardized precipitation indices
2 Effective drought index
3 Mann-Kendall
4 Sen's Slope

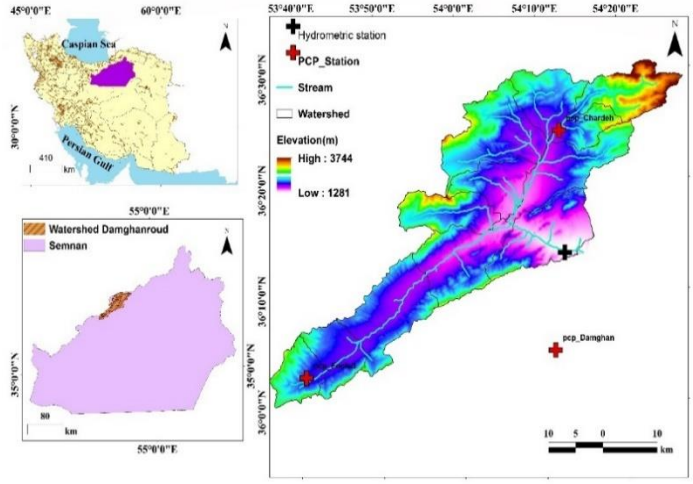
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

این راستا، مطالعه حاضر با هدف بررسی بلندمدت اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب در حوضه دامغان‌رود، واقع در منطقه‌ای نیمه‌خشک از ایران، طراحی شد. نوآوری این پژوهش در یک رویکرد تلفیقی است که سه مؤلفه کلیدی را به‌صورت هم‌زمان در تحلیل‌ها دخیل می‌کند: نخست، استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی؛ دوم، به‌کارگیری داده‌های اقلیمی بروز و آینده‌نگر از مدل CMIP6 تحت سناریوی SSP5-8.5 برای تحلیل اثرات اقلیم؛ و سوم، بهره‌گیری از روش‌های آماری پیشرفته نظیر آزمون من–کندال و تخمین‌گر شیب سن به‌منظور تحلیل روندهای بلندمدت متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی است. همچنین، با استفاده از شاخص خشکسالی SRI، رابطه پیچیده میان کاهش بارندگی، رواناب و تغذیه آبخوان در بازه‌های زمانی سالانه بررسی شده است. این رویکرد نوآورانه می‌تواند الگویی مؤثر برای ارزیابی اثرات اقلیم بر منابع آب در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و منطقه ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دامغان‌رود با مساحتی حدود ۱۳۰،۰۰۰ هکتار، در منطقه‌ای نیمه‌خشک در استان سمنان واقع شده است. این حوضه به‌دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و محیطی از تنوع قابل‌توجهی در ارتفاع و اقلیم برخوردار است و در محدوده جغرافیایی بین عرض‌های جغرافیایی ″۳۶°۴۸′۲۱ تا ″۳۶°۲۱′۳۶ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″۴۸°۲۱′۵۸ تا ″۴۹°۱۸′۳۶ شرقی واقع شده است (شکل ۲). میانگین سالانه بارش در بخش‌های مختلف حوضه بین ۱۶۰ تا ۴۴۶ میلی‌متر متغیر است. میانگین دمای سالانه آن نیز بین ۱۶ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد نوسان دارد. دامنه ارتفاعی حوضه از ۱۰۵۰ متر تا ۳۹۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. بر اساس شاخص اقلیمی دومارتن، این حوضه دارای آب‌وهوایی بین سرد و خشک تا نیمه‌مرطوب است. کاربری اراضی در این حوضه شامل جنگل‌های تنک، بوته‌زارها، مراتع با تراکم‌های مختلف (زیاد، متوسط و کم)، اراضی کشاورزی (زراعی و باغی) و زمین‌های بایر و صخره‌ای بدون پوشش گیاهی است. بررسی ویژگی‌های خاک‌شناسی نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه عمدتاً روی رسوبات آبرفتی دوره کواترنر شکل گرفته‌اند. این خاک‌ها از سازندهای زمین‌شناسی غنی از سنگ‌آهک سرچشمه گرفته‌اند که لایه‌هایی از سنگ‌آهک و مارن را در بر می‌گیرند (Khosravi *et al.*, 2025). موقعیت جغرافیایی حوضه دامغان‌رود در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱– موقعیت جغرافیایی حوضه دامغان‌رود در ایران، سمنان
Figure 1. The geographical location of the Damghanroud Watershed in Iran, Semnan

روش تحقیق

۱– اجرای مدل SWAT و فرآیند کالیبراسیون؛ در گام نخست، مدل هیدرولوژیکی SWAT با استفاده از داده‌های اقلیمی تاریخی برای دوره پایه اجرا شد. سپس، فرآیند کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل انجام گرفت. در ادامه، داده‌های اقلیمی آینده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوی SSP5-8.5 استخراج شدند. سپس، مدل SWAT با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی‌شده مجدداً اجرا شد تا اثرات بلندمدت تغییراقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود.

۲– استخراج شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی؛ در گام دوم، براساس خروجی‌های مدل SWAT، مقادیر بارش، دما و رواناب برای دوره‌های پایه و آینده استخراج شدند. سپس، به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی شرایط خشکسالی، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیکی (SRI) برای هر دو دوره محاسبه شدند.

۳– تحلیل روند متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی؛ برای تحلیل روندهای زمانی در داده‌های بارش، دما و رواناب در دوره‌های پایه و آینده، از روش‌های آماری ناپارامتری آزمون من–کندال و تخمین‌گر شیب سن استفاده شد. این تحلیل‌ها دیدگاه روشنی در خصوص جهت، شدت و معنی‌داری تغییرات

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

بلندمدت اقلیمی و هیدرولوژیکی تحت سناریوی SSP5-8.5 فراهم می‌سازند. فلوچارت تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.

مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT)[1] یک مدل پیوسته و نیمه توزیعی است که قادر است با استفاده از طیف وسیعی از اطلاعات فیزیکی حوضه (خاک، کاربری اراضی و شیب) و اطلاعات هواشناسی (بارندگی، درجه حرارت، باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی) فرایندهای هیدرولوژیکی را در حوضه‌های آبریز شبیه‌سازی کند (Arnold *et al*., 1998). نقشه خاک منطقه براساس نقشه خاک فائو و مطالعات میدانی و اطلاعات از اداره کل منابع طبیعی استان سمنان تهیه شد و خاک‌های منطقه بر اساس رده‌بندی جهانی فائو (FAO) در چهار رده اصلی، مالی‌سول[2]، انتی سول[3]، آردیسول[4] و اینسپتی سول[5] قرار گرفتند (شکل ۲). کاربری‌های اراضی حوضه در چهار کاربری اصلی شامل، جنگل‌های تنک و بوته‌زارها، مراتع با تراکم (کم، متوسط و زیاد)، اراضی کشاورزی و باغی و اراضی بایر و سنگلاخی قرار گرفتند (شکل ۲).

در این مطالعه، از ArcSWAT2012 برای مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی استفاده شد. برای ترسیم حوضه، آبراهه‌ها و شیب حوضه از DEM با وضوح ۳۰ متر استفاده شد. ترسیم واحدهای هیدرولوژیکی حوضه (HRU)[6] با کمک نقشه‌های شیب، کاربری اراضی و خاک بر اساس مطالعات میدانی انجام گرفت. این واحدها اساس محاسبات دقیق تعادل آب و رسوب را در حوضه تشکیل می‌دهند (Tigabu *et al*., 2020). محاسبه فرآیندهای هیدروژئولوژیکی بر اساس درصدی هر HRU در حوضه انجام می‌شوند. فرآیند هیدروژئولوژیکی شبیه‌سازی شده در مدل SWAT بر اساس معادله تعادل آب تعیین می‌شود، که در رابطه (۱) معادله تعادل آب ارائه شده است (Wu *et al*., 2015).

$$SW_t = (SW_0 + \sum_{i=1}^{t} R_{day}(i) - Q_{surf}(i) - E_{sub}(i) - W_{seep}(i) - Q_{gw}(i)) \qquad (1)$$

که در آن، SW_t و SW_0 محتوای آب نهایی و اولیه خاک و R_{day}، Q_{surf}، E_{sub}، W_{seep} و Q_{gw} به‌ترتیب میزان بارندگی، رواناب، ET، نشت آب به لایه بالایی خاک و جریان برگشتی به‌ترتیب بر حسب میلی‌متردر روز i هستند. نمایی از وضعیت کلی حوضه دامغان‌رود شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و نقشه شیب حوضه در شکل ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل ساختار رفتاری آبخوان‌ها و بررسی اثر متقابل آن با متغیرهای اقلیمی، از اجزای بیلان آبی شبیه‌سازی‌شده، به‌ویژه نفوذ عمقی و جریان جانبی استفاده شد. این دو پارامتر، بیانگر بخشی از بارش مؤثر هستند که از ناحیه ریشه گیاه عبور و به لایه‌های زیرین خاک یا نواحی آبخوانی نفوذ می‌کنند. در مطالعات بسیاری از مدل SWAT برای برآورد تغذیه سفره آب زیرزمینی به‌صورت غیرمستقیم استفاده شده است (Khosravi & Yazdani, 2025؛ Neitsch *et al*., 2011). پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، داده‌های مرتبط با این دو پارامتر برای تحلیل تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آبخوان استخراج شدند. اندازه‌های تغذیهٔ آبخوان با استفاده از معادلات (۲) و (۳) محاسبه شدند (Hersi *et al*., 2023؛ Khosravi & Yazdani, 2025).

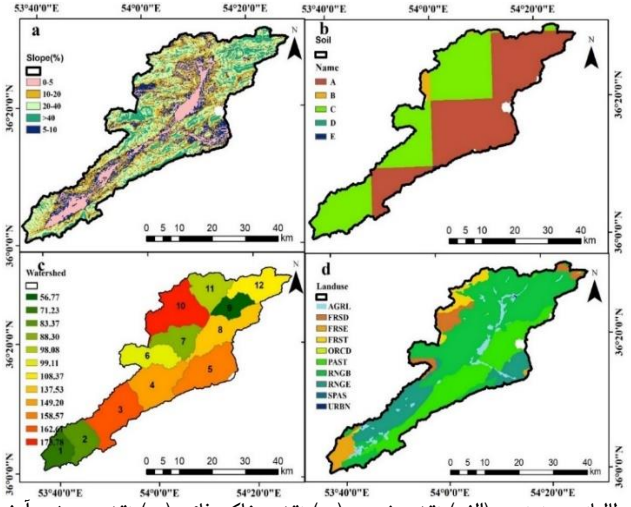
$$wrchrg.i = \left(1 - e^{\left(-1/\delta_{gw}\right)}\right) wseep + \left(e^{\left(-1/\delta_{gw}\right)}.wrchrg.i - 1\right) \qquad (2)$$

$$wrchrg.i = wrchrg.sh + wdeep \qquad (3)$$

در این رابطه Wrchrg: اندازهٔ تغذیه ورودی به سفره‌های زیرزمینی در روز i (میلی‌متر)، δgw: زمان تأخیر (روز)، wseep: اندازهٔ کل آب خروجی از کف نیمرخ خاک در روز i (میلی‌متر)، $Wrchrg._{i-1}$: اندازهٔ تغذیه ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی در روز قبل از روز $Wrchrg._i$ (میلی‌متر)، Sh: اندازهٔ تغذیه آبخوان کم‌ژرفا در روز i (میلی‌متر)، و wdeep: اندازهٔ تغذیهٔ آبخوان ژرف در روز i (میلی‌متر) هستند.

1 Soil Water Assessment Tool
2 Molisoil
3 Entisoil
4 Ardisoil
5 Inceptisoil
6. Hydrologic response unit

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]



شکل ۲- نقشه‌های حوضه مطالعاتی به‌ترتیب (الف) نقشه شیب، (ب) نقشه خاک فائو، (ث) نقشه حوضه آبخیز و (د) نقشه کاربری اراضی
Figure 2. Maps of the study basin, respectively: (a) Slope map, (b) Soil map, (c) Watershed map, and (d) Land use map

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های اقلیمی آینده

در این مطالعه، برای بررسی اثرات تغییراقلیم از مدل اقلیمی جهانی NorESM2-LM [1] تحت سناریوی SSP5-8.5 استفاده شد. داده‌های اقلیمی از پورتال Earth System Grid Federation (ESGF) (https://esgfnde.llnl.gov/projects/esgf-llnl) دریافت شدند. داده‌های روزانه دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش مرتبط با مدل اقلیمی برای دوره زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۶۰ استخراج شدند.

تصحیح سوگیری مدل‌های اقلیمی

مدل‌های GCMs ابزارهای ضروری برای پیش‌بینی الگوهای اقلیمی آینده هستند و در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی عملکرد موفقی داشته‌اند (Manski *et al*., 2021). با این‌حال، برای ارزیابی‌های منطقه‌ای و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، داده‌های GCM باید کوچک‌مقیاس شوند تا دقت مکانی بالاتری داشته باشند (Dessu & Melesse, 2013). این داده‌ها به دلیل وضوح مکانی محدود و نمایش ناقص فرآیندهای اقلیمی محلی، سوگیری‌هایی را در پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مانند دما و بارش ایجاد می‌کنند که دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی را کاهش می‌دهند. به‌منظور بهبود پیش‌بینی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی، تکنیک‌های تصحیح سوگیری مورد نیاز هستند تا این داده‌ها برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و مدل‌سازی‌های منطقه‌ای، قابل استفاده باشند (Hosseinzadehtalaei *et al*., 2021). خصوصاً در مناطقی مانند حوضه دامغان‌رود که عوامل اقلیمی و محلی تأثیرات متقابل و قابل توجهی بر منابع آبی دارند.

در این مطالعه، برای تصحیح سوگیری داده‌های بارش، از روش نگاشت چنداکی [2] (QM) استفاده شد. این روش آماری، توزیع احتمالات داده‌های شبیه‌سازی‌شده را با داده‌های مشاهداتی هماهنگ می‌کند و موجب کاهش اختلافات در پیش‌بینی‌های بارش می‌شود (Her *et al*., 2019). برای تصحیح خطاهای دمایی، از روش مبتنی بر توزیع نرمال استفاده شد. در این روش، داده‌های شبیه‌سازی‌شده دما با توزیع داده‌های مشاهداتی هم‌راستا می‌شوند و انحرافات سیستماتیک را کاهش می‌دهند (Her *et al*., 2019).

پس از سوگیری، داده‌های تاریخی (داده‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۰) با داده‌های مشاهداتی تاریخی مقایسه شدند و از شاخص‌های آماری شامل جذر میانگین مربعات خطا [3] (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون [4] (r) برای ارزیابی عملکرد روش‌های تصحیح خطا استفاده شد. این شاخص‌ها میزان تطابق خروجی‌های مدل تصحیح‌شده با داده‌های مشاهداتی را محاسبه می‌کند و شاخص‌هایی کلیدی در ارزیابی عملکرد تکنیک‌های تصحیح خطا هستند. معادلات مربوط به RMSE و r در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در مرحله بعد، داده‌های اقلیمی تصحیح‌شده به منظور پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی در حوضه دامغان‌رود در مقیاس سالانه مورد استفاده قرار گرفتند. این تحلیل‌ها برای سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۰-۲۰۵۰)، و آینده دور (۲۰۵۰-۲۰۶۰) انجام شدند.

شاخص‌های خشکسالی

رخدادهای خشکسالی به‌عنوان یکی از پیامدهای تغییرات دما و بارش، بازتابی از اثرات تغییراقلیم بر بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، تأمین آب شرب، صنعت، محیط‌زیست و جوامع انسانی هستند (Zamanirad *et al*., 2018؛ Rad *et al*., 2021). برای پایش دقیق خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شوند (Ndayiragije & Li, 2022). در این پژوهش، از شاخص‌های SPI و SRI برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده شد. شاخص SPI به‌دلیل

1 Norwegian Earth System Model version 2 - Low resolution with Medium complexity
2 Quantile Mapping (QM)
3 Root Mean Square Error (RMSE)
4 Pearson Correlation Coefficient (r)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

ساختار ساده، دسترسی گسترده به داده‌های بارش، و قابلیت تفکیک شدت و فراوانی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در سطح جهانی به شمار می‌رود (McKee *et al*., 1993). همچنین، مطالعات انجام‌شده در مناطق نیمه‌خشک ایران کارایی بالای این شاخص را در شناسایی روندهای خشکسالی فصلی و سالانه تأیید نموده‌اند. در مقابل، شاخص SRI که بر پایه داده‌های رواناب طراحی شده است، ابزار مؤثری برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود (Afsari *et al*., 2024). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، استفاده از شاخص SPI برای بررسی نوسانات کوتاه‌مدت بارندگی و شاخص SRI برای تأثیرات تجمعی خشکسالی بر رواناب و تغذیه آبخوان، نتایج دقیقی را ارائه می‌دهند (Ghabelnezam *et al*., 2023؛ Zarei, 2019). از این‌رو، استفاده ترکیبی از این دو شاخص در پژوهش حاضر، می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری را از پویایی خشکسالی اقلیمی و اثرات آن بر منابع آب‌زیرزمینی فراهم آورد. همچنین، مقادیر شاخص‌های SPI و SRI برای دوره‌ی پایه و آینده محاسبه شد تا امکان ارزیابی و پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیم بر خشکسالی و منابع آب‌زیرزمینی فراهم گردد. معادلات مرتبط به این شاخص‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. کلاسه‌بندی این شاخص‌ها بر اساس معیارهای مک‌کی و همکاران (McKee *et al*., 1993) در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- معیارهای آماری ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی

Table 2. Statistical metrics to assess the performance of climate models

Reference منابع	Statistic metrics آماره‌های ارزیابی	Equation معادلات	Unit واحد
(Jeferson de Medeiros *et al*., 2022)	Pearson Correlation Coefficient	$r = \frac{\sum(P_i - P)(m_i - m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(m_i - m)}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - P)}}$ (4)	-
(Liemohn *et al*., 2021)	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - P_i)^2}$ (5)	mm

جدول ۳- معادلات شاخص‌های خشکسالی

Table 3. equations drought indicates

Index شاخص	Equation معادلات	Description of the variables in the equations توضیح متغیرهای هر معادله	Reference منبع
Standardized Precipitation Index	$SPI = \left(\frac{X_i - X_m}{\sigma}\right)$ (4)	X_m,Mean monthly, seasonal, or annual precipitation σ Standard deviation of recorded precipitation, Xi, Precipitation month, season, or year	(McKee *et al*., 1993)
Standardized Runoff Index	$SRI = \frac{Q_n - Q_m}{\sigma}$ (5)	Q_m: Monthly, seasonal, or annual runoff, Q_n: Mean monthly, seasonal, or yearly runoff σ Standard deviation of recorded runoff	(Boudad *et al*., 2018)

جدول ۴- طبقه‌بندی شاخص‌های SPI و SRI براساس مطالعات مک‌کی و همکاران (McKee *et al*., 1993)

Table 4. Climate Classification Based on SPI and SRI Values (McKee *et al*., 1993)

شاخص SRI (SRI Values)	کلاس خشکسالی (Drought Classification)
< 2	ترسالی شدید (Extreme Wet)
1.50 to 1.99	ترسالی متوسط (Moderate Wet)
1.00 to 1.49	ترسالی ملایم (Mild Wet)
-0.99 to 0.99	نرمال (Normal)
-1.00 to -1.49	خشکسالی ملایم (Mild Drought)
-1.50 to -1.99	خشکسالی متوسط (Moderate Drought)
< -2	خشکسالی شدید (Extreme Drought)

ارتباط متغیرهای اقلیمی با منابع آبی

به‌منظور شناسایی اثرات تغییراقلیم بر منابع آبی، ارتباط میان متغیرهای اقلیمی شامل بارش، دما، رواناب، تبخیر-تعرق و مقادیر تغذیه آبخوان در دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت. برای این‌منظور، از ضریب همبستگی پیرسون جهت تعیین میزان تأثیرگذاری هریک از متغیرهای اقلیمی منابع آبی استفاده شد و میزان تاثیرگذاری متغیرهای اقلیمی بر منابع آب مشخص شد. سپس، مدل SWAT با استفاده از داده‌های اقلیمی آینده اجرا شد تا منابع آبی را در دوره آینده پیش‌بینی کند.

تحلیل روند متغیرهای اقلیمی و خشکسالی‌ها

الف- آزمون من-کندال

برای تحلیل تغییرات الگوهای بارندگی و جریان‌های آبی، از روش‌های گوناگون آماری و آزمون‌های غیرپارامتری مبتنی بر رتبه بهره گرفته می‌شود (Pingale *et al*., 2016). در این میان، روش‌هایی نظیر رگرسیون خطی حداقل مربعات، آزمون‌های شیب‌محور مانند تخمین‌گر سن و آزمون‌های رتبه‌ای نظیر آزمون من-کندال (Pingale *et al*., 2016؛ Mann, 1945) از پرکاربردترین ابزارهای بررسی روند هستند. در این پژوهش، آزمون من-کندال برای بررسی روند تغییرات اقلیمی در مؤلفه‌های بارش، دما، تبخیر-تعرق و همچنین تحلیل روند جریان‌های سطحی و زیرزمینی استفاده شد. همچنین، شاخص‌های استاندارد شده SRI و SPI به‌منظور ارزیابی روند زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد به‌کار گرفته شدند.

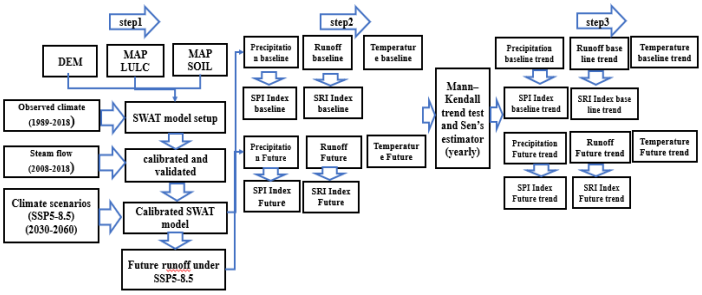
ب-تخمین‌گر سن

به‌طور کلی، تخمین‌گر Theil-Sen (SS) در مقایسه با روش‌های سنتی رگرسیون خطی، ارزیابی دقیق‌تر و مقاوم‌تری را از شدت روندها ارائه می‌دهد، چرا که نسبت به داده‌های پرت و مقادیر حدی حساسیت کمتری دارد (Sen, 1968). در این مطالعه، از روش تخمین‌گرسن برای شناسایی شدت روندهای موجود در متغیرهای اقلیمی از جمله بارش، دما و تبخیر-تعرق و جریان‌های سطحی و زیرزمینی استفاده شد. علاوه بر این،

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

شاخص‌های استانداردشده SPI و SRI به‌منظور تحلیل شدت روند زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد به کار گرفته شدند.

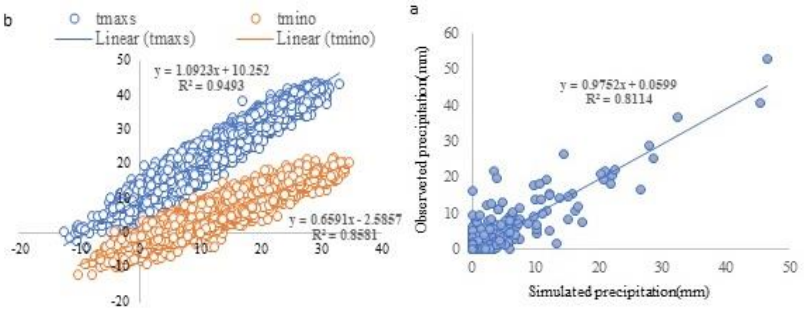


شکل ۳- چارچوب کلی تحقیق
Figure 3. The research flowchart

نتایج و بحث

عملکرد مدل‌های اقلیم جهانی

عملکرد مدل‌های اقلیمی جهانی (GCM) با استفاده از داده‌های ماهانه بارش، دمای بیشینه (T_{max}) و دمای کمینه (T_{min}) برای دوره پایه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ ارزیابی شد. معیارهایی مانند ضریب همبستگی (r) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سنجش دقت مدل‌ها به کار رفتند. تحلیل نتایج نشان داد که شبیه‌سازی دما (بیشینه و کمینه) از همبستگی بالاتری نسبت به بارش برخوردار بود. همچنین، روش تصحیح سوگیری نگاشت چندکی (QM) برای بارش و روش توزیع نرمال برای دما دقت بالاتری را در تطبیق با داده‌های مشاهداتی ارائه دادند (شکل ۴). این نتایج بر اساس تحلیل داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن‌ها با مقادیر مشاهداتی به‌دست آمده‌اند که در شکل ۴ ارائه شده‌اند.



شکل ۴- الف: نمودار پراکنش نقطه؛ توزیع داده‌های مشاهده‌شده/شبیه‌سازی‌شده بارش پس از اصلاح خطا با استفاده از روش نگاشت چندکی ب: داده‌های دمای بیشینه و کمینه روزانه پس از اصلاح خطا با استفاده از روش نرمال‌سازی، داده‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده دمای بیشینه روزانه هستند و داده‌های قرمزرنگ دمای کمینه روزانه را نشان می‌دهند.
Figure 4. (a) The scatter plot showing the distribution of observed/simulated precipitation data after bias correction using the quantile mapping method; (b) Daily maximum and minimum temperature data after bias correction using the normalization method. Blue and red points represent daily maximum and minimum temperatures, respectively.

ارزیابی عملکرد مدل اقلیمی NorESM2-LM در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان داد که پس از اعمال روش تصحیح سوگیری، همخوانی داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهداتی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. به‌طور مشخص، ضریب همبستگی برای بارش به ۰/۸۱ و مقدار RMSE به ۰/۶۵ میلی‌متر کاهش یافت. برای دمای بیشینه و کمینه نیز به‌ترتیب RMSE برابر با ۱/۲ و ۱/۵ درجه سلسیوس و ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۴ و ۰/۸۵ به دست آمد (جدول ۵). در مطالعه‌ای، ارشادفتح و همکاران (Ershadfath *et al*., 2024) گزارش دادند که پس از تصحیح سوگیری، خروجی مدل اقلیمی در مدل SWAT تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشت. نتایج معیارهای ارزیابی عملکرد مدل اقلیمی CMIP6 در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵- نتایج معیارهای ارزیابی برای مدل اقلیمی CMIP6
Table 5. Results of evaluation metrics for the CMIP6 climate model

	Global Climate Models (GCMs) مدل جهانی اقلیمی	Precipitation(mm) بارش (میلی‌متر)	Precipitation(mm) بارش (میلی‌متر)	T_{max} (°c) دمای ماکزیمم (سانتی‌گراد)	T_{max} (°c) دمای ماکزیمم (سانتی‌گراد)	T_{min} (°c) دمای مینیمم (سانتی‌گراد)	T_{min} (°c) دمای مینیمم (سانتی‌گراد)
		R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Before Bias قبل از سوگیری	NorESM2-LM	0.73	0.89	0.48	2.3	0.39	2.7
After Bias بعد از سوگیری	NorESM2-LM	0.81	0.65	0.94	1.2	0.85	1.5

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی رواناب

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای CN2، SOL_K و ALPHA_BF بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی رواناب دارند. پارامترهای حساس برای شبیه‌سازی جریان سطحی در حوضه دامغان‌رود در جدول ۶ ارائه شده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که ویژگی‌های فیزیکی حوضه، شامل خصوصیات خاک و الگوهای کاربری زمین به‌طور قابل‌توجهی بر تولید رواناب و تعاملات منابع آبی تأثیر می‌گذارند، که با یافته‌های پیشین (Hersi *et al*., 2023) مطابقت دارد. مطالعات آنها نقش حیاتی CN2، SOL_K و ALPHA_BF را در شبیه‌سازی رواناب و جریان پایه در مدل‌های هیدرولوژیکی تأیید نمودند. حساسیت این پارامترها نشان می‌دهد که تغییرات کاربری زمین یا روش‌های مدیریت خاک که CN2 یا SOL_K را تغییر می‌دهند، می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر دینامیک منابع آبی داشته باشند و بینش‌های ارزشمندی را برای مدیریت پایدار منابع آب در حوضه دامغان‌رود ارائه دهند.

جدول ۶- حساس‌ترین پارامترهای استفاده‌شده برای شبیه‌سازی جریان سطحی

Table 6. The Most Sensitive Parameters for Runoff Simulation

Row ردیف	Parameter متغیر	Abbreviation مخفف	t-state	*p-value*
1	Groundwater evaporation coefficient ضریب تبخیر از آب زیرزمینی	GW_REVAP. gw	0.16	0.62
2	Available soil moisture رطوبت قابل دسترس خاک	SOL_AWC. sol	0.24	0.57
3	Baseflow alpha factor ضریب آلفای جریان پایه	CH_N2.rte	0.31	0.46
4	Deep groundwater recharge fraction جزیان بزگشتی به آبخوان عمیق	RCHRG_DP. gw	-0.4	0.39
5	Soil evaporation compensation factor ضریب جبرانی تبخیر از خاک	EPCO.hru	-0.51	0.26
6	Manning's roughness coefficient for runoff ضریب زبری مانینگ برای رواناب	✳ALPHA_BF	−1.44	0.03
127	Runoff curve number parameters پارامترهای عدد منحنی رواناب	✳CN2.mgt	1.48	0.01
138	Soil depth عمق خاک	✳SOL_Z	-2.2	0

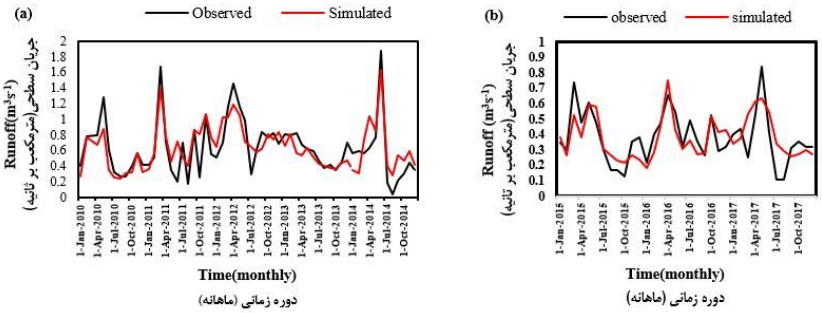
✳حساس‌ترین پارامترها در جدول پررنگ (هایلات) شده‌اند.

در مرحله کالیبراسیون، مدل SWAT با R^2 معادل ۰/۷۴ و NSE برابر ۰/۷۱ عملکرد رضایت‌بخشی داشت. در مرحله اعتبارسنجی نیز مقادیر R^2 و NSE به‌ترتیب ۰/۷۹و ۰/۷۷ بودند که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌های هیدرولوژیکی است (جدول ۷). این معیارها نشان می‌دهند که مدل به‌طور مؤثری دینامیک هیدرولوژیکی حوضه را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۵). نتایج ارزیابی عملکرد در دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل SWAT در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ۷- آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل SWAT در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 7. Statistical metrics for evaluating the performance of the SWAT model during calibration and validation periods

Statistical metrics شاخص‌های آماری	Calibration کالیبراسیون	Validation واسنجی
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ضریب نش- ساتکلیف	0.71	0.77
Coefficient of Determination ضریب تبیین	0.74	0.79
Mean precipitation (yearly) متوسط بارش سالانه	150	140



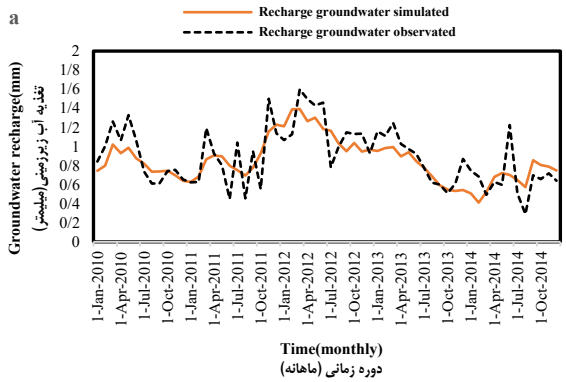
شکل ۵- نمودار خطی (الف) رواناب ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره کالیبراسیون، (ب) در دوره اعتبارسنجی

Figure 5. Line graphs of observed and simulated monthly runoff: (a) calibration period, (b) validation period

مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده تغذیه آب‌زیرزمینی نشان می‌دهد که همخوانی قابل‌قبولی بین مجموعه داده‌ها، قابل مشاهده است و مدل با موفقیت تغییرات زمانی تغذیه آب‌زیرزمینی را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۶)،

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

با اختلافات جزئی که به ناهمگنی مکانی در خصوصیات خاک و محدودیت‌های داده‌ای نسبت داده می‌شود. این نتایج استحکام مدل SWAT را در شبیه‌سازی دینامیک آب‌زیرزمینی در حوضه دامغان‌رود تأیید می‌کنند. مقادیر $R2 > 0.5$ و $NSE < 0.5$ نشان می‌دهند که مدل کالیبره‌شده SWAT ابزاری قابل‌اعتماد برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی در منطقه مورد مطالعه است. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مانند (Abbaspour 2022) که اثربخشی SWAT را در شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی در حوضه‌های نیمه‌خشک نشان داده‌اند، همخوانی دارند.



شکل ۶- نمودار خطی مقادیرمشاهداتی و شبیه‌سازی تغذیه آب زیرزمینی ماهانه در دوره واسنجی
Figure 6. The linear graph of observed and simulated monthly groundwater recharge during calibration

ارتباط بین متغیرهای اقلیمی با منابع آبی

برای تحلیل رابطه میان متغیرهای اقلیمی و با منابع آبی (تغذیه آبخوان)، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهند که رواناب سطحی با ضریب همبستگی حدود ۰/۵۰ ($P < 0.01$) بیشترین ارتباط مثبت را با تغذیه آبخوان دارد و به‌عنوان مهم‌ترین منبع نفوذ مستقیم آب به آبخوان شناخته می‌شود. همچنین، تبخیر–تعرق با ضریب ۰/۳۰ ($P < 0.05$) همبستگی متوسطی نشان داد که احتمالاً به نقش آن در کاهش رطوبت خاک و محدودیت نفوذ مؤثر مرتبط است. در مقابل، دما و بارش با ضرایب همبستگی کمتر از ۰/۲۰ ($P > 0.05$) ارتباط آماری معناداری نداشتند. این نتایج با مطالعاتی مانند کاستیلو و همکاران (Castillo *et al.*, 2021) و تایلور و همکاران (Taylor *et al.*, 2013) هم‌راستا هستند که بر نقش رواناب و تبخیر–تعرق در تغذیه آب‌های زیرزمینی تأکید دارند، درحالی‌که نقش دما و بارش به‌دلیل اثرات غیرمستقیم و پیچیدگی‌های فرایند تغذیه، کمتر مشخص است. مطالعاتی نظیر وو و همکاران (Wu *et al.*, 2025) نیز نشان می‌دهند که در بازه‌های زمانی طولانی‌تر، نقش دما در کاهش تغذیه از طریق افزایش تبخیر–تعرق پررنگ‌تر می‌شود.

الگوی زمانی متغیرهای اقلیمی در دوره پایه

برای تحلیل روند متغیرهای اقلیمی (بارش، دما و رواناب)، از آزمون من–کندال و تخمین‌گر شیب سن استفاده شد. نتایج نشان دادند که بارش سالانه نسبت به میانگین بلندمدت روند کاهشی داشت (شکل ۷). بیشترین کاهش بارش در سال ۲۰۱۳ با افت حدود ۵۰٪ نسبت به میانگین بلندمدت مشاهده شد، که با شدیدترین خشکسالی در دوره مورد بررسی هم‌زمان بود. دما نیز نسبت به میانگین بلندمدت روند افزایشی را نشان داد. بیشترین افزایش دما در سال ۲۰۱۴ (۰/۰۲ درجه) و کمترین آن در سال ۲۰۱۲ (۰/۰۱ درجه) مشاهده شد. رواناب سالانه نیز نسبت به میانگین بلندمدت روند کاهشی داشت. بیشترین کاهش رواناب در سال ۲۰۱۳ با حدود ۴۰٪ کاهش نسبت به میانگین بلندمدت مشاهده شد (شکل ۷).

کاهش بارش نسبت به میانگین بلندمدت و افت شدید ۵۰٪ در سال ۲۰۱۳، رابطه مستقیمی بین کاهش بارش و تشدید خشکسالی را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج دای (Dai, 2011) و تایلور و همکاران (Taylor *et al.*, 2013) هم‌خوانی دارد که کاهش بارش را عامل اصلی تشدید خشکسالی و افت سطح آب‌های زیرزمینی معرفی کردند. همچنین، غلامی و همکاران (Gholami *et al.*, 2021) گزارش کردند که کاهش ۷۵/۳ میلی‌متری میانگین بارش سالانه در بازه ۱۹۹۳–۲۰۱۴ منجر به افت ۵۳ سانتی‌متری سطح آب‌زیرزمینی شد، که با نتایج این مطالعه هم‌راستا است. این کاهش بارش، به‌ویژه در سال‌های خشک مانند ۲۰۱۳، می‌تواند نفوذ آب به آبخوان‌ها را محدود کند و منابع آب زیرزمینی را تحت فشار قرار دهد.

افزایش میانگین سالانه دما با نرخ ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد در هر دهه (شکل ۷)، به‌ویژه در سال ۲۰۱۴، نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی بر تشدید تبخیر– تعرق است. این افزایش دما، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند منجر به کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی شود. زهابیون و همکاران (Zahabiyoun *et al.*, 2013) و بای و همکاران (Bai *et al.*, 2024) تأیید می‌کنند که در چنین مناطقی، افزایش دما با تقویت فرآیند تبخیر– تعرق، منابع آب سطحی را کاهش می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که دما به‌صورت غیرمستقیم از طریق افزایش تبخیر–تعرق، بر کاهش منابع آب تأثیر می‌گذارد، به‌ویژه در سال‌های خشک که تقاضای آبی افزایش می‌یابد.

روند کاهشی رواناب سالانه (شکل ۷)، با افت شدید ۴۰٪ در سال ۲۰۱۳، می‌تواند تحت تأثیر کاهش بارش و تغییر در الگوهای بارش (مانند نوع و زمان‌بندی) باشد. این یافته‌ها با مطالعات سماواتی و همکاران (Samavati *et al.*, 2023) و بای و همکاران (Bai *et al.*, 2024) هم‌راستا هستند که نشان

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

دادند تغییرات در مقدار، نوع و توزیع زمانی بارش، همراه با ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه، نقش مهمی در کاهش رواناب دارند. همچنین، کاهش رواناب، به‌عنوان منبعی مستقیم برای تغذیه آبخوان‌ها، می‌تواند اثرات منفی بر شارژ آب‌های زیرزمینی داشته باشد و مدیریت منابع آب را با چالش مواجه کند. در کل نتایج نشان می‌دهند که کاهش بارش و رواناب، همراه با افزایش دما، به تشدید خشکسالی و کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی منجر شده است.

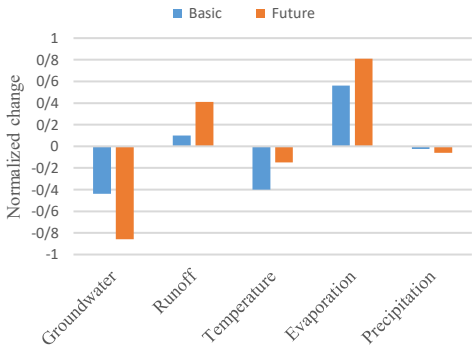
الگوی زمانی متغیرهای اقلیمی در زمان آینده

تحلیل روند متغیرهای اقلیمی (بارش، دما، رواناب و تبخیر–تعرق) تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ با استفاده از آزمون من–کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که بارش سالانه با شیب حدود ۳۶٪ در دوره‌های خشکسالی و ۲۸٪ در دوره‌های ترسالی کاهش خواهد یافت. دما در هر دهه از دوره‌های خشکسالی روند افزایشی ۰/۴ درجه سانتی‌گراد و در دوره‌های ترسالی ۰/۲ درجه سانتی‌گراد نشان خواهند داد. تبخیر–تعرق نیز با میانگین افزایش ۰/۸ میلی‌متر در سال روند صعودی خواهد داشت. رواناب سطحی شیب نزولی معنادار ۰/۱۵– در سال مواجه خواهد بود که در دوره‌های خشکسالی تا ۴۰٪ نسبت به میانگین افزایش می‌یابد (شکل ۷).

کاهش شدیدتر (۳۶٪) بارش در دوره‌های خشکسالی، نشان‌دهنده تشدید فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در آینده است (شکل۷). این یافته‌ها با نتایج سماواتی و همکاران (Samavati *et al.*, 2023) و وو و همکاران (Wu *et al.*, 2025) هم‌راستا هستند که تغییرپذیری بالای بارش را عامل کلیدی در نوسانات منابع آبی و چالش‌های مدیریت آب معرفی کردند. کاهش بارش، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، می‌تواند نفوذ آب به آبخوان‌ها را محدود و پایداری منابع آب‌زیرزمینی را تهدید کند.

افزایش دما به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی (۰/۴ درجه سانتی‌گراد)، با گزارش IPCC AR6 (2021) هم‌خوانی دارد که گرمایش بالاتر از میانگین جهانی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه پیش‌بینی کرده است. در مطالعه‌ای، وو و همکاران (Wu *et al.*, 2025) نیز در منطقه‌ای نیمه‌خشک در چین، افزایش دما با نرخ ۰/۳۲درجه سانتی‌گراد در هر دهه ($P < 0.01$) را گزارش کردند که با نتایج این مطالعه سازگار است. این گرمایش می‌تواند با تشدید تبخیر– تعرق، تقاضای آبی را افزایش داده و منابع آب سطحی و زیرزمینی را کاهش دهد.

افزایش تبخیر–تعرق، ناشی از گرمایش و نوسانات بارش، با یافته‌های هان و سینگ (Han & Singh, 2023) هم‌راستا است که افزایش دما بدون جبران بارش را عامل تشدید خشکسالی معرفی کردند. این روند می‌تواند رطوبت خاک را کاهش دهد و نفوذ آب به آبخوان‌ها را محدود کند. کاهش رواناب سطحی، با شیب نزولی معنادار، به تغییرات بارش (مقدار، نوع و الگو) نسبت داده می‌شود. این نتایج با مطالعات قبلی (Soltani *et al.*, 2023 ؛Patil *et al.*, 2020) هم‌خوانی دارند که کاهش رواناب را عامل افت ۱۰٪ تا ۲۰٪ تغذیه آب‌زیرزمینی معرفی کردند (Soltani *et al.*, 2023). پیش‌بینی می‌شود که در مناطق نیمه‌خشک ایران، رواناب تا ۶۹٪ کاهش یابد و سطح آب‌زیرزمینی بین ۲۰۱۰ تا ۲۰۶۰ حدود ۱۵/۱ متر افت کند، که با نتایج این مطالعه هم‌راستا است. در کل نتایج نشان دادند که تغییرات اقلیمی تحت سناریوی SSP5-8.5 در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاهش شدید بارش و رواناب، افزایش دما و تبخیر–تعرق، و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی مواجه خواهد شد.



شکل ۷– مقادیر SS برای متغیرهای بارش، رواناب، تبخیرتعرق، دما و آب زیرزمینی در زمان پایه و آینده

Figure 7. Sen's Slope estimates for precipitation, runoff, evapotranspiration, temperature, and groundwater in the baseline and projected future periods

روندیابی تغذیه آبخوان‌ها در زمان آینده

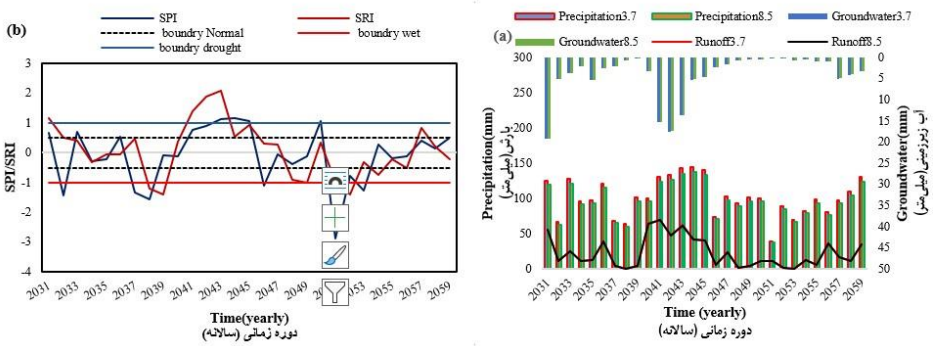
تحلیل روند تغذیه منابع آبی تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 با استفاده از آزمون من–کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام شد. در دوره پایه، تغذیه سالانه آبخوان کاهش معنی‌داری حدود ۰/۴ میلی‌متر نسبت به میانگین بلندمدت نشان داد. در دوره آینده (۲۰۳۰–۲۰۶۰)، نرخ تغذیه آبخوان با کاهش ۰/۹ میلی‌متر در سال مواجه است (شکل ۷). در دوره‌های خشک، افت تغذیه آبخوان تا ۹۰٪ و در دوره‌های ترسالی تا ۲۰٪ پیش‌بینی شد. شکل ۷ نتایج آماری آزمون من–کندال مقادیر (Z) و شیب روند (SS) برای متغیرهای بارش و اقلیمی را نشان می‌دهد که روند کاهشی معنی‌داری را، به‌ویژه در بازه زمانی آینده، تأیید می‌کند. کاهش ۰/۴ میلی‌متر تغذیه سالانه آبخوان در دوره پایه می‌تواند ناشی از کاهش بارش و رواناب، همراه با افزایش دما و تبخیر– تعرق باشد که با یافته‌های فو و همکاران (Fu *et al.*, 2019) هم‌راستا است که کاهش نرخ تغذیه را به افزایش

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

تبخیر–تعرق و تغییر الگوی بارش نسبت دادند. تایلور و همکاران (Taylor *et al*., 2013) و وو و همکاران (Wu *et al*., 2025) نیز آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک را در برابر تغییرات اقلیمی تأیید کردند. پیش‌بینی کاهش ۰/۹ میلی‌متر در سال تغذیه آبخوان در دوره آینده (۲۰۳۰–۲۰۶۰) نشان‌دهنده تأثیر عمیق تغییرات اقلیمی بر آبخوان‌ها است. این نتایج با مطالعه برسینسکی و همکاران (Bresinsky *et al*., 2023) هم‌خوانی دارند. آنها کاهش ۳۰٪ بارش را عامل افت ۵ تا ۱۰ درصدی تغذیه آب‌زیرزمینی معرفی کردند. افت شدید ۹۰٪ شارژ آبخوان در دوره‌های خشک، به تأثیر ترکیبی کاهش بارش و افزایش دما و تبخیر–تعرق نسبت داده می‌شود که کمبود آب قابل نفوذ را تشدید می‌کند. در دوره‌های ترسالی، کاهش ۲۰٪ شارژ آبخوان، با وجود افزایش بارش، به کاهش نفوذ آب به زیر ناحیه ریشه و ناکافی بودن بارش‌های سبک برای تغذیه آبخوان مرتبط است، که با یافته‌های اولیویرا و همکاران (Oliveira *et al*., 2017) هم‌راستا است. این نتایج نشان می‌دهند که حتی در دوره‌های ترسالی، الگوهای بارش (مانند بارش‌های کوتاه‌مدت و سبک) نمی‌توانند به‌طور مؤثر آبخوان‌ها را تغذیه کنند.

ارزیابی تأثیر سناریوهای اقلیمی بر روی خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و پویایی منابع آبی در بازه زمانی ۲۰۶۰–۲۰۳۰

برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آبی، شاخص‌های خشکسالی SPI و SRI در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۳۰–۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۰–۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۵۰–۲۰۶۰) تحت سناریوهای SSP5-8.5 تحلیل شدند. نتایج شاخص SPI نشان می‌دهند که خشکسالی‌های خفیف تا شدید (SPI < -1) در سال‌های ۲۰۳۲، ۲۰۳۷، ۲۰۳۸، ۲۰۴۶، ۲۰۵۱، ۲۰۵۲، ۲۰۵۳، ۲۰۵۴ و ۲۰۵۶ و ترسالی‌های خفیف تا متوسط (SPI > 1) در سال‌های ۲۰۳۱، ۲۰۴۲، ۲۰۴۳، ۲۰۴۴، ۲۰۴۵ و ۲۰۵۰ رخ خواهند داد (شکل ۸). به‌طور کلی، فراوانی خشکسالی‌های شدید هواشناسی با افزایش بازه زمانی (۲۰۳۰–۲۰۶۰) افزایش می‌یابد، اما شدت آن‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۸) و فراوانی خشکسالی‌های شدید هیدرولوژیکی با افزایش بازه زمانی کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های Vicente-Serrano *et al*. (2010) هم‌راستا هستند که افزایش دما و تغییر الگوی بارش را عامل تشدید خشکسالی‌های هواشناسی معرفی کردند. Swain *et al*. (2022) نیز گزارش کردند که بارش‌های سنگین و دوره‌های خشکسالی طولانی، تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. کاهش شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در آینده، با وجود افزایش فراوانی آن‌ها، احتمالاً به محدود شدن دامنه نوسانات بارش و تأثیر فزاینده دما نسبت داده می‌شود. این روند با چرخش سریع بین خشکسالی و ترسالی، پایداری منابع آب زیرزمینی را تهدید می‌کند. در دوره‌های خشکسالی، شدت تغییرات SPI و SRI بیشتر از ترسالی‌ها است، که به دلیل کاهش رطوبت خاک و نفوذ مؤثر آب، افت شارژ آبخوان‌ها را تشدید می‌کند. این یافته با (Arfasa *et al*., 2024) هم‌خوانی دارد که تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی را بر منابع آب‌زیرزمینی تأیید کردند. این نتایج نشان‌دهنده چالش‌های فزاینده در مدیریت منابع آب‌زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک هستند. در کل، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش بازه زمانی از آینده نزدیک به آینده دور، فراوانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی افزایش می‌یابد، اما تغییرات شدت آن‌ها بر اساس نوع خشکسالی متغیر است. این روند، همراه با چرخش سریع بین خشکسالی و ترسالی، خطراتی را برای پایداری منابع آب‌زیرزمینی ایجاد می‌کند. این یافته‌ها بر ضرورت اجرای سیاست‌های سازگار با اقلیم، مانند بهبود مدیریت حوضه‌های آبخیز، استفاده از روش‌های مصنوعی تغذیه آبخوان و توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام، تأکید می‌کنند. نتایج این پژوهش می‌توانند مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های پایدار مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک در مواجهه با تغییرات اقلیمی آینده باشند.



شکل ۸– (الف) الگوی زمانی تغییرات متغیرهای بارش، رواناب، وآب زیرزمینی در دوره زمانی آینده (ب) الگوی زمانی شاخص‌های SPI و SRI تحت پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده

Figure 8. (a) Temporal variation patterns of precipitation, runoff, and evapotranspiration in the future period; (b) Temporal trends of drought indices (SPI and SRI) under future climate projections

با وجود دقت در تحلیل رابطه بین شاخص‌های خشکسالی و تغذیه آبخوان، این مطالعه با برخی محدودیت‌های ساختاری و داده‌ای مواجه بوده است که می‌توانند بر دقت مدل‌سازی و تعمیم نتایج تأثیرگذار باشند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، محدودیت در دسترسی به داده‌های بلندمدت و با کیفیت در سطح برخی زیرحوضه‌ها بود. به‌طور خاص، پوشش ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه مطالعه‌شده نسبتاً پراکنده و ناکامل بود و به‌طور میانگین تنها یک ایستگاه در هر ۲۶۰۰ کیلومترمربع را پوشش می‌دهد، که این موضوع می‌تواند موجب افزایش خطای مکانی در تخمین متغیرهای اقلیمی مانند بارش و دما شود. علاوه بر آن، داده‌های موجود برای برخی ایستگاه‌ها دارای ناپیوستگی یا بازه‌های زمانی کوتاه بودند، که این موضوع احتمال افزایش عدم قطعیت در کالیبراسیون مدل را به‌دنبال دارد. اگرچه تصحیح سوگیری مدل‌های اقلیمی و استفاده از الگوریتم SUFI2 در SWAT-CUP بخشی از این خطاها را کاهش داده است، اما عدم قطعیت مکانی ناشی از پراکندگی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

ایستگاه‌ها همچنان در مقیاس زیرحوضه‌ای می‌تواند باعث افت دقت در برآورد رواناب و تغذیه آبخوان شود. از سوی دیگر، در این پژوهش تأثیر مستقیم عوامل انسانی مانند برداشت بیش از حد از منابع آب‌زیرزمینی، توسعه اراضی کشاورزی، و تغییر کاربری زمین، به‌دلیل فقدان داده‌های مکانی دقیق و بروز، در مدل لحاظ نشده است. این در حالی است که مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این عوامل می‌توانند به‌طور معناداری بر چرخه تغذیه آبخوان تأثیر بگذارند. عدم لحاظ این مؤلفه‌ها ممکن است منجر به کم‌برآوردی شدت اثرات ترکیبی اقلیم و انسان بر منابع آب در مدل شده باشد. بنابر این، در پژوهش‌های آینده، ترکیب داده‌های پایش انسانی، سنجش از دور و افزایش چگالی شبکه ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری می‌تواند به کاهش عدم‌قطعیت و افزایش دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی کمک نماید. از سوی دیگر، با وجود کاربرد مؤثر شاخص‌های SPI و SRI در تحلیل خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی، استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند SPEI که نقش هم‌زمان دما و بارش را بررسی می‌کند، می‌تواند درک جامع‌تری از شدت و گستره خشکسالی فراهم کند. همچنین تحلیل تطبیقی با حوضه‌هایی دارای شرایط مشابه در سایر مناطق نیمه‌خشک جهان، می‌تواند به تعمیم‌پذیری نتایج و تقویت کاربردهای بین‌المللی این پژوهش کمک نماید.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی بر منابع آبی در یک حوضه نیمه‌خشک ایران (دامغان‌رود) انجام شد. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی، از مدل SWAT و داده‌های اقلیمی مدل جهانی NorESM2-LM تحت سناریوهای SSP5-8.5 استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی موجب افزایش دما، کاهش بارش، کاهش رواناب و افت چشمگیر در تغذیه آبخوان‌ها در دوره آینده (۲۰۳۰–۲۰۶۰) خواهند شد. نوآوری این پژوهش در ادغام مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی با شاخص‌های اقلیمی (SRI ,SPI) و تحلیل‌های آماری دقیق است، که الگویی قابل اعتمادی را برای پایش بلندمدت منابع آبی در شرایط تغییر اقلیم فراهم می‌سازد. الگوی به‌کار رفته در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب کاربردی برای سنجش تاب‌آوری منابع آبی و توسعه راهبردهای مدیریتی سازگار با اقلیم در سایر حوضه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادات کاربردی و پژوهشی

۱- در سیاست‌گذاری منابع آب، تلفیق نتایج مدل‌سازی‌های اقلیمی با ارزیابی خطر خشکسالی ضروری است تا برنامه‌ریزی بر پایه آینده‌نگری صورت گیرد. ۲- استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند SPEI می‌تواند تحلیل‌های جامع‌تری ارائه دهد. ۳- توصیه می‌شود تا مطالعات آتی با به‌کارگیری چند مدل اقلیمی، داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، عدم‌قطعیت را کاهش و دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند. ۴- انجام مطالعات تطبیقی در حوضه‌های نیمه‌خشک مشابه در سایر کشورها می‌تواند به گسترش کاربرد بین‌المللی نتایج کمک نماید.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۲۰۹۰۵ است که از همکاری و مساعدت دانشگاه قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهند گرفت.

مشارکت نویسندگان

۱: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله
۲: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
۳: مشاوره، بازبینی متن مقاله

References

Abbaspour, K. C. (2022). The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling. *Science of the Total Environment*, *802*, 149713. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149713

Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 Multi-Model Analysis of the Impact of Climate Change on Severe Meteorological Droughts through Multiple Drought Indices—Case Study of Iran’s Metropolises. *Water (Switzerland)*, *16*(5). https://doi.org/10.3390/w16050711

Allen, D. M., Whitfield, P. H., & Werner, A. (2010). Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: Regime classification, and linkages to climate and streamflow. *Hydrological Processes*, *24*(23). https://doi.org/10.1002/hyp.7757

Arfasa, G. F., Owusu-Sekyere, E., & Doke, D. A. (2024). Climate Change Projections and Impacts on Future Temperature, Precipitation, and Stream flow in the Vea Catchment, Ghana. *Environmental Challenges*, *14*(December 2023), 100813. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100813

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams2, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, *34*(1), 73–89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961

Bai, Y., Guo, Y., Wang, H., Wang, N., Wei, X., Zhou, M., & Lu, T. (2024). The Impact of Groundwater Burial Depth on the Vegetation of the Dariyabui Oasis in the Central Desert. *Annual Achievements Report Available Now (MDPI)*, *16*(1), 378–393. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16010378

Boudad, N., Faizi, R., Oulad Haj Thami, R., & Chiheb, R. (2018). Sentiment analysis in Arabic: A review of the literature. In *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 25–45.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.04.007
Bresinsky, L., Kordilla, J., Hector, T., Engelhardt, I., Livshitz, Y., & Sauter, M. (2023). Managing climate change impacts on the Western Mountain Aquifer: Implications for Mediterranean karst groundwater resources. *Journal of Hydrology X*, *20*(June), 100153. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100153
Castillo, J. L. U., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Cervantes Martínez, A., & Marín Celestino, A. E. (2021). Identification of the dominant factors in groundwater recharge process, using multivariate statistical approaches in a semi-arid region. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(20), 11543. https://doi.org/10.3390/SU132011543/S1
Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(1), 45–65. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wcc.81
Davamani, V., John, J. E., Poornachandhra, C., Gopalakrishnan, B., Arulmani, S., Parameswari, E., Santhosh, A., Srinivasulu, A., Lal, A., & Naidu, R. (2024). A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*, *15*(1), 122. https://doi.org/10.3390/atmos15010122
Dessu, S. B., & Melesse, A. M. (2013). Impact and uncertainties of climate change on the hydrology of the Mara River basin, Kenya/Tanzania. *Hydrological Processes*, *27*(20). https://doi.org/10.1002/hyp.9434
Ershadfath, F., Shahnazari, A., Sarjaz, M. R., Andaryani, S., Trolle, D., & Olesen, J. E. (2024). Blue and green water availability under climate change in arid and semi-arid regions. *Ecological Informatics*, *82*(11), 102743. https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2024.102743
Feyissa, T. A., Demissie, T. A., Saathoff, F., & Gebissa, A. (2024). Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia. *Results in Engineering*, *23*(August), 102708. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102708
Fu, G., Crosbie, R. S., Barron, O., Charles, S. P., Dawes, W., Shi, X., Van Niel, T., & Li, C. (2019). Attributing variations of temporal and spatial groundwater recharge: A statistical analysis of climatic and non-climatic factors. *Journal of Hydrology*, *568*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.022
Gao, Z., Zhou, Y., Cui, Y., Dong, J., Lu, S., Cao, M., & Xiao, X. (2024). Drastic water volume changes in mega lakes can pose considerable impacts on regional water storage. *Ecological Indicators*, *164*, 112150. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.112150
Geng, M., Li, X., Mu, H., Yu, G., Chai, L., Yang, Z., Liu, H., Huang, J., Liu, H., & Ju, Z. (2023). Human footprints in the Global South accelerate biomass carbon loss in ecologically sensitive regions. *Global Change Biology*, *29*(20), 5881–5895. https://doi.org/10.1111/GCB.16900
Ghabelnezam, E., Mostafazadeh, R., Hazbavi, Z., & Huang, G. (2023). Hydrological Drought Severity in Different Return Periods in Rivers of Ardabil Province, Iran. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(3), 1–16. https://doi.org/10.3390/su15031993
Ghazavi, R., & Ebrahimi, H. (2019). Predicting the impacts of climate change on groundwater recharge in an arid environment using modeling approach. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *11*(1), 88–99. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2017-0085
Gholami, F., Zarei, H., & Maroufi, S. (2021). Trend Analysis of Groundwater Quantity and Quality Parameters (Case Study : Tuyserkan Plain). *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, *44*(1), 127–140. https://doi.org/10.22055/jise.2021.20618.1487
Goodarzi, M. R., Heydaripour, M., Jamali, V., Sabaghzadeh, M., & Niazkar, M. (2024). Investigating Uncertainty of Future Predictions of Temperature and Precipitation in The Kerman Plain under Climate Change Impacts. *Hydrology*, *11*(1), 2. https://doi.org/10.3390/hydrology11010002
Han, J., & Singh, V. P. (2023). A review of widely used drought indices and the challenges of drought assessment under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(12), 1–25. https://doi.org/10.1007/S10661-023-12062-3/METRICS
Her, Y., Yoo, S. H., Cho, J., Hwang, S., Jeong, J., & Seong, C. (2019). Uncertainty in hydrological analysis of climate change: multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions. *Scientific Reports*, *9*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-41334-7
Hersi, N. A. M., Mulungu, D. M. M., & Nobert, J. (2023). Groundwater recharge estimation under changing climate and land use scenarios in a data-scarce Bahi (Manyoni) catchment in Internal Drainage Basin (IDB), Tanzania using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Groundwater for Sustainable Development*, *22*(January), 100957. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100957
Hosseinzadehtalaei, P., Ishadi, N. K., Tabari, H., & Willems, P. (2021). Climate change impact assessment on pluvial flooding using a distribution-based bias correction of regional climate model simulations. *Journal of Hydrology*, *598*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126239
Huang, W., Duan, W., & Chen, Y. (2021). Rapidly declining surface and terrestrial water resources in Central Asia driven by socio-economic and climatic changes. *Science of The Total Environment*, *784*, 147193. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147193
Huo, F., Xu, L., Li, Z., Li, Y., Famiglietti, J. S., & Chandanpurkar, H. A. (2024). Can climate change signals be detected from the terrestrial water storage at daily timescale? *Npj Climate and Atmospheric Science 2024*, *7*(1), 1–12. https://doi.org/10.1038/s41612-024-00646-w
Jafarzadeh, A., Khashei-Siuki, A., & Shahidi, A. (2019). Impact assessment of climate change on groundwater table using of balance conceptual model (Case study: Birjand Plain). *Water Resources*

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

Engineering, *12*(41), 1–16.

Janbozorgi, M., Pour, M. H., & Khosravi, H. (2021). Temporal changes in meteorological-hydrological drought. *Water and Soil Management and Modelling*, *1*(2), 1–13. https://doi.org/10.22098/MMWS.2021.1215

Jeferson de Medeiros, F., Prestrelo de Oliveira, C., & Avila-Diaz, A. (2022). Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather and Climate Extremes*, *38*, 100511. https://doi.org/10.1016/J.WACE.2022.100511

Karimian, K., Amini, A., & Ghaiumi Mohammadi, H. (2019). The Impact of Land Use/Land Cover Changes on Groundwater Resources Using Remote Sensing & GIS (Case Study: Khan-Mirza Plain). *Desert*, *24*(2), 319–330. https://jdesert.ut.ac.ir/article_76388.html

Khosravi, M., & Yazdani, M. R. (2025). Evaluating the Effect of Drought on the Temporal Recharge Pattern of Aquifers in the Damghanroud Watershed. *Watershed Management Research*, *38*(1), 38–60. https://doi.org/10.22092/WMRJ.2024.365662.1585

Khosravi, M., Zolfaghari, A. A., Kaboli, S. H., Raeesi, M., Abbaspour, K., & Ghafari, H. (2025). Enhanced identification of hydrologically sensitive areas via digital soil mapping and hydrological modeling in semi-arid regions. *Earth Science Informatics 2025 18:3*, *18*(3), 1–23. https://doi.org/10.1007/S12145-025-01799-9

Krogulec, E., Gurwin, J., & Wąsik, M. (2021). Cost of groundwater protection: major groundwater basin protection zones in Poland. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, *21*(3), 517–530. https://doi.org/10.1007/s10784-021-09525-8

Li, J., & Ma, J. (2024). Evaluating the Dynamics of Groundwater Storage and Its Sustainability in the Loess Plateau: The Integrated Impacts of Climate Change and Human Activities. *Remote Sensing 2024,* 16(23), 4375. https://doi.org/10.3390/RS16234375

Li, T., Lan, T., Zhang, H., Sun, J., Xu, C. Y., & David Chen, Y. (2024). Identifying the possible driving mechanisms in Precipitation-Runoff relationships with nonstationary and nonlinear theory approaches. *Journal of Hydrology*, *639*, 131535. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.131535

Liemohn, M. W., Shane, A. D., Azari, A. R., Petersen, A. K., Swiger, B. M., & Mukhopadhyay, A. (2021). RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *218*, 105624. https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2021.105624

Mann, H. B. (1945). Mann Nonparametric test against trend. *Econometrica*, *13*.

Manski, C. F., Sanstad, A. H., & DeCanio, S. J. (2021). Addressing partial identification in climate modeling and policy analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *118*(15). https://doi.org/10.1073/pnas.2022886118

McKee, T. B., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor, Soc.*, *January*.

Mengistu, T. D., Chung, I. M., Kim, M. G., Chang, S. W., & Lee, J. E. (2022). Impacts and Implications of Land Use Land Cover Dynamics on Groundwater Recharge and Surface Runoff in East African Watershed. *Water 2022, 14*(13), 2068. https://doi.org/10.3390/W14132068

Muleta, B., Seyoum, T., & Assefa, S. (2022). GIS-Based Assessment of Suitability Area of Rainwater Harvesting in Daro Labu District, Oromia, Ethiopia. *American Journal of Water Science and Engineering*, *8*(1), 21–35. https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20220801.13

Ndayiragije, J. M., & Li, F. (2022). Monitoring and Analysis of Drought Characteristics Based on Climate Change in Burundi Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Water (Switzerland)*, *14*(16). https://doi.org/10.3390/w14162511

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report no. 406. In *Texas Water Resources Institute, TR-406*.

Oliveira, P. T. S., Leite, M. B., Mattos, T., Nearing, M. A., Scott, R. L., de Oliveira Xavier, R., da Silva Matos, D. M., & Wendland, E. (2017). Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology*, *10*(1). https://doi.org/10.1002/eco.1759

Patil, N. S., Chetan, N. L., Nataraja, M., & Suthar, S. (2020). Climate change scenarios and its effect on groundwater level in the Hiranyakeshi watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, *10*. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100323

Pingale, S. M., Khare, D., Jat, M. K., & Adamowski, J. (2016). Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*, *28*(1). https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0001

Rad, A. M., AghaKouchak, A., Navari, M., & Sadegh, M. (2021). *Progress, Challenges, and Opportunities in Remote Sensing of Drought*. https://doi.org/10.1002/9781119427339.ch1

Said, M., Hyandye, C., Mjemah, I. C., Komakech, H. C., & Munishi, L. K. (2021). Evaluation and Prediction of the Impacts of Land Cover Changes on Hydrological Processes in Data Constrained Southern Slopes of Kilimanjaro, Tanzania. *Earth (Switzerland)*, *2*(2). https://doi.org/10.3390/earth2020014

Samavati, A., Babamiri, O., Rezai, Y., & Heidarimozaffar, M. (2023). Investigating the effects of climate

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]

change on future hydrological drought in mountainous basins using SWAT model based on CMIP5 model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *37*(3), 849–875. https://doi.org/10.1007/s00477-022-02319-7

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324). https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Shi, X., Wang, Y., Mao, J., Thornton, P. E., Riccuito, D. M., Hoffman, F. M., & Hao, Y. (2024). Quantifying the long-term changes of terrestrial water storage and their driving factors. *Journal of Hydrology*, *635*, 131096. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.131096

Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A. R., Golmohammadi, G., Berndtsson, R., Ghordoyee Milan, S., & Maghsoudi, R. (2023). Assessing Climate Change Impact on Water Balance Components Using Integrated Groundwater–Surface Water Models (Case Study: Shazand Plain, Iran). *Water (Switzerland)*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/w15040813

Swain, S., Taloor, A. K., Dhal, L., Sahoo, S., & Al-Ansari, N. (2022). Impact of climate change on groundwater hydrology: a comprehensive review and current status of the Indian hydrogeology. *Applied Water Science*, *12*(6). https://doi.org/10.1007/s13201-022-01652-0

Tareke, K. A., & Awoke, A. G. (2022). Hydrological Drought Analysis using Streamflow Drought Index (SDI) in Ethiopia. *Advances in Meteorology*, *2022*(1), 706795. https://doi.org/10.1155/2022/7067951

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., … Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. In *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744

Teimoori, M., Mirdamadi, S. M., & Farajollah Hosseini, S. J. (2019). Modeling of Climate Change Effects on Groundwater Resources: The Application of Dynamic Systems Approach. *International Journal of Agricultural Management and Development*, *9*(2), 107–118. https://ijamad.rasht.iau.ir/article_665021.html

Tigabu, T. B., Wagner, P. D., Hörmann, G., & Fohrer, N. (2020). Modeling the spatio-temporal flow dynamics of groundwater-surface water interactions of the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology Research*, *51*(6). https://doi.org/10.2166/nh.2020.046

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate,* 23(7), 1696-1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Wojkowski, J., Wałęga, A., Młyński, D., Radecki-Pawlik, A., Lepeška, T., Piniewski, M., & Kundzewicz, Z. W. (2023). Are we losing water storage capacity mostly due to climate change – Analysis of the landscape hydric potential in selected catchments in East-Central Europe. *Ecological Indicators*, *154*, 110913. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110913

Wu, F., Zhan, J., Chen, J., He, C., & Zhang, Q. (2015). Water Yield Variation due to Forestry Change in the Head-Water Area of Heihe River Basin, Northwest China. *Advances in Meteorology*, *2015*. https://doi.org/10.1155/2015/786764

Wu, H., Ye, X., Du, X., Wang, W., Li, H., & Dong, W. (2025). Assessing groundwater level variability in response to climate change: A case study of large plain areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *57*(December 2024), 102180. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102180

Zahabiyoun, B., Goodarzi, M. R., Bavani, A. R. M., & Azamathulla, H. M. (2013). Assessment of Climate Change Impact on the Gharesou River Basin Using SWAT Hydrological Model. *Clean - Soil, Air, Water*, *41*(6). https://doi.org/10.1002/clen.201100652

Zamanirad, M., Sedghi, H., Sarraf, A., Saremi, A., & Rezaee, P. (2018). Potential impacts of climate change on groundwater levels on the Kerdi-Shirazi plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, *77*(11). https://doi.org/10.1007/s12665-018-7585-1

Zarei, A. R. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of Iran using standardized precipitation index (SPI). *SN Applied Sciences*, *1*(5), 1–14. https://doi.org/10.1007/S42452-019-0498-0/TABLES/6

Zarei, M., & Destouni, G. (2024). Research Gaps and Priorities for Terrestrial Water and Earth System Connections From Catchment to Global Scale. *Earth's Future*, *12*(1), e2023EF003792. https://doi.org/10.1029/2023EF003792

Zhang, Y., He, B., Guo, L., Liu, J., & Xie, X. (2019). The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins. *Journal of Hydrology*, *579*, 124194. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124194

Zhu, J., Yin, D., Li, X., Zhu, R., & Zheng, H. (2024). Divergent determinants on interannual variability of terrestrial water cycle across the globe. *Science of The Total Environment*, *945*, 174046. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.174046

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1320]