

Hydrological response analysis of the Golroodbar watershed (Semnan, Iran), under climate change scenarios of the IPCC sixth assessment report using the SWAT model

M. Doostmohamadi¹, Kh. Hoseini^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

Climate change, as one of the main challenges of this century, has significant impacts on the hydrological cycle and water resources management, especially in arid and semi-arid regions. Temperature changes, precipitation fluctuations, and increased occurrence of extreme events such as floods and droughts threaten the sustainability of water systems. In this context, hydrological models such as the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) serve as effective tools for simulating watershed responses to various climatic scenarios. At the same time, the new climate scenarios presented in the sixth report of the IPCC and the new generation GCM models have enabled a more accurate assessment of hydrological responses. Numerous studies conducted in regions such as China, India, Iran, and South Korea have demonstrated that climate change can significantly alter surface runoff patterns, typically increasing runoff during wet seasons and reducing flow during drier periods. Therefore, a detailed study of the hydrological response of watershed under different climate change scenarios can play a key role in developing sustainable water resources management strategies in the future.

Material and Methods:

The SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) was applied in this study to evaluate the impact of climate change on the hydrologic response of the Golroodbar watershed, Semnan Province, Iran. The input data, which were collected from authoritative sources, included digital elevation models (DEM), land use/land cover maps, soil maps, and climatic and hydrological time series. The SWAT model was calibrated and validated with observed streamflow to simulate surface runoff under the baseline climate conditions. For future climates, outputs of CanESM5 global climate models were used under the Sixth Assessment Report of the IPCC (CMIP6), including three Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5). The Statistical Downscaling Model (SDSM) was used to downscale the GCM daily precipitation and temperature to the basin scale. The downscale future climate data were used as for the input SWAT model to simulate runoff for different future time periods. Next, seasonal runoff patterns for each climate scenario were viewed and compared with the baseline. This methodological design enables a realistic and holistic hydrological analysis of basin responses to future climate, providing a foundation for adaptive water resource management can be conducted in semi-arid watersheds.

Results and Discussion:

The simulation results demonstrated that the SWAT model performed well in simulating the surface runoff in the Golarudbar watershed. The model accuracy was acceptable with Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Coefficient of Determination (R^2) values of 0.66 and 0.66 during the calibration period, and 0.55 and 0.79 during the validation period. The p-factor and r-factor values were also within satisfactory ranges in both periods. Future climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5) were simulated using the SDSM model with CanESM5 data. These scenarios showed significant changes in monthly average precipitation and temperature compared with the historical baseline. According to the results, in the warm months of the year (May to September), precipitation remains very low and almost similar to historical values; although in some months such as June, a slight increase is seen in the SSP5-8.5 scenario. After that, the precipitation trend

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* Corresponding Author: khoseini@semnan.ac.ir

Received: 2025/07/21

Accepted: 2025/08/30

increases again from October. Overall, the SSP5-8.5 scenario shows the greatest change in the precipitation pattern, which could indicate an increased likelihood of heavy rainfall and flooding in the future. Also, a decrease in runoff is observed in most months compared with the historical period. The largest decrease in runoff is in January in the SSP1-2.6 scenario, which is -64.05 percent, which indicates a significant effect of the decrease in temperature and precipitation in this scenario. In contrast, the largest percentage increase in runoff is in August, July, and November in the SSP5-8.5 scenario, which is 51.30, 33.98, and 33 percent, respectively. This trend indicates that runoff increases due to more intense short-term precipitation caused by global warming conditions.

Conclusion:

This study demonstrated that the SWAT model effectively simulates the hydrological pattern of the semi-arid Golrudbar basin, capturing runoff variation accurately. Climatic and physiographic parameter optimization and statistical index-based validation ensure maximum credibility of the results. Downscaling climate predictions from the CanESM5 model at different greenhouse gas emission scenarios demonstrates that temperature and precipitation variability has significant impacts on runoff patterns. The SSP5-8.5 high-emission scenario predicts greater peak runoff and increased variability in surface flow, suggesting a potential increase in future flood hazards. Lower-emission scenarios like SSP1-2.6 has more symmetric trends in runoff. The findings highlight the need for wise climate policies and adaptive strategies, especially in arid and semi-arid regions, to ensure sustainable water resource management and flood risk reduction under climate change.

Keywords: Climate Change, Hydrological Response, Surface Runoff, Semnan, SWAT

Citation:

Doostmohamadi, M. and Hoseini, Kh., 2026. Hydrological response analysis of the Golroodbar watershed (Semnan, Iran), under climate change scenarios of the IPCC sixth assessment report using the SWAT model. Iranian Water Research Journal, 19(59), PP: 67-82 <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15321.2700>

Copyright:

© Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



تحلیل پاسخ هیدرولوژیک حوضه گلرودبار سمنان تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم گزارش ششم IPCC با بهره‌گیری از مدل SWAT

مهسا دوست محمدی^۱، خسرو حسینی^{۲*}

چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های اصلی و مهم در مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود که می‌تواند اثرات چشمگیری بر فرآیندهای هیدرولوژیک حوضه داشته باشد. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه گلرودبار در استان سمنان، از ترکیب مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی SDSM و مدل هیدرولوژیک SWAT استفاده شده است. داده‌های اقلیمی آینده با استفاده از مدل CanESM5، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۹ تهیه و پس از ریزمقیاس‌نمایی، به مدل SWAT وارد شد. براساس نتایج به دست آمده از عملکرد مدل، مقادیر ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین در دوره واسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۶ و ۰/۶۶ و برای دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۵ و ۰/۷۹ می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی است. همچنین براساس نتایج حاصل، در سناریوی SSP5-8.5، بیشترین مقدار افزایش میانگین ماهانه رواناب نسبت به دوره تاریخی در ماه آگوست رخ داده که برابر با ۵۱/۳۰ درصد می‌باشد و در سناریوی SSP1-2.6، بیشترین کاهش رواناب (ماه ژانویه) برابر ۶۴/۰۵ درصد است. نتایج حاصل بیانگر آسیب‌پذیری زیاد حوضه گلرودبار نسبت به تغییرات اقلیمی آبی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است و لزوم بازنگری در راهبردهای مدیریت منابع آب منطقه را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: پاسخ هیدرولوژیک، تغییر اقلیم، رواناب سطحی، سمنان، SWAT

ارجاع: دوست محمدی، م. و حسینی، خ.، ۲۰۲۶. تحلیل پاسخ هیدرولوژیک حوضه گلرودبار سمنان تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم گزارش ششم IPCC با بهره‌گیری از مدل SWAT. مجله پژوهش آب ایران، ۱۹(۵۹)، صص: ۶۷-۸۲

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15321.2700>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

x نویسنده مسئول: khoseini@semnan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر، در مقابله با مدیریت منابع آب می‌باشند و تأثیرات چشمگیری بر چرخه هیدرولوژیکی، منابع آب و فرآیندهای مرتبط با آن از جمله رواناب سطحی دارد. افزایش دما، الگوهای بارش متغیر، افزایش فراوانی و شدت پدیده‌های حدی نظیر سیلاب و خشکسالی، از پیامدهای تغییر اقلیم هستند که سامانه‌های هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به منظور بررسی این تأثیرات، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند (Ho et al., 2016).

به منظور تحلیل این اثرات، مدل‌های هیدرولوژیکی نظیر ابزار مؤثر در شبیه‌سازی پاسخ حوضه‌ها به عوامل اقلیمی و مدیریتی شناخته می‌شوند. این مدل با قابلیت تفکیک مکانی و زمانی، امکان بررسی دقیق پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه از جمله رواناب سطحی را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) با ارائه سناریوهای جدید اقلیمی، چشم‌انداز دقیق‌تری از آینده تغییرات اقلیمی در اختیار محققان قرار داده و زمینه مناسبی برای تحلیل و بررسی اثرات تغییر اقلیم فراهم کرده است (Abbaszadeh, Naserabadi et al., 2020; et al., 2023).

بنا بر اهمیت موضوع در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در سطح ملی و بین‌المللی با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب از جمله رواناب سطحی و پاسخ هیدرولوژیک حوضه‌ها انجام شده است. Zuo et al. (2015) به بررسی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه رودخانه وی در چین نسبت به تغییرات اقلیمی پرداختند. در این مطالعه از مدل SWAT و مدل آماری SDSM برای ریزمقیاس نمایی سناریوهای تغییر اقلیم منطقه‌ای براساس خروجی‌های سه مدل گردش عمومی (GCMs) و دو سناریو انتشار استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین رواناب سالانه در دوره‌های ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ به ترتیب ۱۲/۴ و ۴۵ درصد نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۸ افزایش یافته‌است. Saraf and Regulwar (2018) پژوهشی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب حوضه رودخانه گوداواری هند را بررسی کردند. براساس نتایج حاصل کاهش رواناب در سال ۲۰۲۰ ممکن است به دلیل افزایش حداقل درجه حرارت صورت گیرد. Ma et al. (2023) به مطالعه پاسخ هیدرولوژیک حوضه رودخانه‌ای در چین نسبت به تغییرات اقلیم

و کاربری اراضی پرداختند. در این پژوهش از مدل‌ها و سناریوهای گزارش ششم (CMIP6) و مدل SWAT استفاده شده است. براساس نتایج حاصل در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ جریان خروجی حوضه به ترتیب به مقدار ۲۷/۱ تا ۳۰/۲ درصد، ۲۴/۷ تا ۳۹ درصد و ۳۵/۵ تا ۴۳/۵ درصد افزایش می‌یابد. Nouri et al. (2024) به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر پاسخ هیدرولوژیک دو حوضه در استان‌های تهران و زنجان پرداختند. براساس نتایج حاصل افزایش ۷ و ۱۵ درصد میانگین جریان سالانه رودخانه برای دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۳۰)، به ترتیب برای حوضه‌های گلابر و تهم پیش‌بینی می‌شود. Woo et al. (2025) به ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیک فصلی حوضه‌ای در کره جنوبی، به تغییرات اقلیمی براساس گزارش ششم (CMIP6) پرداختند. پیش‌بینی‌های آینده نشان‌دهنده افزایش بارندگی در تمام فصول است. همچنین دما در تمام فصول به طور مداوم افزایش یافته و این تغییرات، پاسخ‌های هیدرولوژیک را به ویژه در فصل زمستان تقویت کرده است. تجزیه و تحلیل‌ها نشان‌دهنده کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی تغذیه آب‌های زیرزمینی در مقایسه با شرایط تاریخی است.

Zarezade Mehrizi et al. (2018) در مطالعه‌ای به ارزیابی تغییرات جریان آینده حوضه رودخانه گاماسیاب تحت سناریوهای گزارش پنجم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که رواناب آینده در بازه بین ۴۲/۳- الی ۱۷/۸ درصد تغییر می‌کند. Houshmand Kouchi et al. (2019) به شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه سد سلمان فارسی با استفاده از گزارش پنجم تغییر اقلیم و مدل SWAT پرداختند. نتایج حاصل نشان‌دهنده افزایش بارش‌های شدیدتر در آینده نسبت به گذشته و همچنین افزایش دمای حداقل و حداکثر در حوضه مورد مطالعه می‌باشد که این تغییرات منجر به افزایش رواناب سالانه می‌شود. Jalali et al. (2020) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و بیلان حوضه سد لتیان با استفاده از مدل SWAT و مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم پرداختند. آنها بیان کردند که با در نظر گرفتن سناریو خوش بینانه بیشترین تغییرات رواناب در بازه زمانی آینده، نشان دهنده کاهش ۲/۴ متر مکعب بر ثانیه در ماه است.

Heidari et al. (2020) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوضه‌ای در خراسان رضوی پرداختند. بدین منظور از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG و مدل SWAT و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم استفاده کردند. براساس نتایج حاصل میزان رواناب در بازه زمانی ۲۰۲۰ الی ۲۰۵۰

گلرودبار سمنان، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع آب در شرایط اقلیمی آینده فراهم آورد.

حوضه آبخیز گلرودبار، واقع در اقلیم نیمه‌خشک استان سمنان، یکی از مناطق حساس و آسیب‌پذیر از نظر منابع آبی محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر با چالش‌هایی نظیر کاهش بارندگی، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش ناپایداری رواناب مواجه بوده است. این حوضه کوهستانی است و وجود شیب‌های تند موجب افزایش پتانسیل رواناب و حساسیت بیشتر آن نسبت به تغییرات اقلیمی شده است. اهمیت این حوضه از آن جهت است که تأمین آب شرب، کشاورزی و زیست‌محیطی منطقه تا حد زیادی به آن وابسته بوده و هرگونه تغییر در الگوهای هیدرولوژیکی آن می‌تواند پیامدهای جدی برای توسعه پایدار منطقه به‌همراه داشته باشد.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارزیابی پاسخ هیدرولوژیک حوضه گلرودبار تحت تأثیر تغییر اقلیم با بهره‌گیری از مدل SWAT و استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) مبتنی بر گزارش ششم IPCC (CMIP6) می‌باشد. در این مطالعه، با استفاده از مدل آماری SDSM فرآیند ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی انجام گرفته و تأثیر سناریوهای مختلف اقلیمی بر رواناب سطحی حوضه در دوره‌های آتی بررسی شد. نوآوری‌های این پژوهش شامل استفاده از سناریوهای اقلیمی جدید SSP، ترکیب دقیق مدل‌های SDSM و SWAT، تحلیل و تمرکز بر حوضه‌ای نیمه‌خشک و کم‌بارش با تنش آبی زیاد با اطلاعات هیدرولوژیک محدود، بررسی دوره‌های زمانی آینده با تمرکز بر رواناب فصلی، تحلیل دقیق تغییرات رواناب به‌عنوان شاخصی از پاسخ هیدرولوژیک حوضه در شرایط اقلیمی آینده، شناسایی حساسیت دوره‌های زمانی مختلف به تغییر اقلیم و ارائه چشم‌اندازهای مدیریتی برای انطباق با تغییر اقلیم می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌گیری آگاهانه در مدیریت پایدار منابع آب منطقه در شرایط تغییر اقلیم گردد.

مواد و روش‌ها

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، روند انجام مطالعه شامل چند مرحله اصلی است که ابتدا با گردآوری و آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز آغاز می‌شود. پس از تهیه داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک برای منطقه مورد مطالعه، فرایند مدل‌سازی به منظور شبیه‌سازی شرایط فعلی و آینده حوضه انجام می‌شود. در ادامه، با استفاده از ابزارهای مناسب، پاسخ هیدرولوژیک حوضه

کاهش یافته است که بیشترین کاهش برابر ۲۲/۱۶ درصد می‌باشد. (HajiGhasemi et al. (2021 به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی با استفاده از مدل SWAT پرداختند. در این مطالعه از سناریوهای تغییر اقلیم RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شده است. براساس نتایج حاصل از این مطالعه، میانگین بارش ماهانه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 افزایش و تحت سناریو RCP8.5 کاهش می‌یابد. در نهایت با توجه به داده‌های پیش‌بینی شده افزایش رواناب پیش‌بینی می‌شود. (Fallah Kalaki et al. (2021 به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای گزارش پنجم و ششم تغییر اقلیم پرداختند. نتایج حاصل افزایش دما و کاهش بارندگی برای تمامی مدل‌ها و سناریوها را نشان می‌دهد. همچنین تحت سناریوهای SSP کاهش رواناب در حوضه مورد مطالعه مشاهده شده است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش وابستگی به داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی موجود است. در بسیاری از مناطق ایران از جمله حوضه مورد نظر، تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری محدود بوده، داده‌ها دارای نواقص هستند و پراکندگی مکانی آن‌ها نیز ممکن است دقت کافی نداشته باشد. این موضوع می‌تواند بر فرآیند دقت مدل‌سازی اثرگذار باشد. هرچند با استفاده از پردازش‌های مختلف و روش‌های آماری تلاش می‌شود تا این کاستی‌ها کاهش یابد، اما همچنان می‌تواند یکی از منابع اصلی عدم قطعیت در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیمی محسوب شوند.

براساس مطالعات پیشین، می‌توان دریافت که اکثر پژوهش‌های گذشته در زمینه تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر رواناب و پاسخ‌های هیدرولوژیک، عمدتاً با استفاده از مدل‌های SWAT و سناریوهای اقلیمی گزارش‌های چهارم و پنجم IPCC انجام شده‌اند. با وجود ارزش علمی این تحقیقات، استفاده از داده‌ها و سناریوهای جدیدتر، از جمله خروجی مدل‌ها و سناریوهای گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6)، می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از تأثیرات اقلیمی بر سیستم‌های هیدرولوژیکی کمک کند.

از طرفی بسیاری از مطالعات پیشین در مناطق با بارش متوسط تا زیاد انجام شده و بررسی حوضه‌های کم‌بارش و دارای محدودیت منابع آب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در چنین حوضه‌هایی به دلیل محدودیت بارش و آسیب‌پذیری بیشتر نسبت به تغییرات اقلیمی، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین بررسی این اثرات در مقیاس حوضه‌ای و در مناطق کمتر مطالعه‌شده‌ای مانند حوضه

مدل SWAT

مدل (SWAT (Soil and Water Assessment Tool) یک مدل هیدرولوژیکی فیزیکی و نیمه توزیعی می‌باشد که توسط وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) توسعه یافته است. این مدل یک ابزار قدرتمند به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند جریان و رواناب سطحی، نفوذ خاک، تبخیر و تعرق، ذوب برف و ... می‌باشد. این قابلیت نرم‌افزار باعث می‌شود که محققان بتوانند تأثیرات مختلف مانند تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی را بر حوضه‌ها بررسی کنند. در مدل SWAT، تعادل آبی براساس رابطه بیلان آبی (رابطه ۱)، محاسبه می‌شود.

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

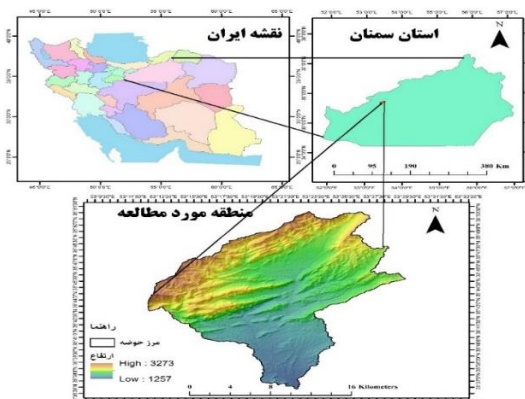
در این رابطه SW_t مقدار آب در خاک در زمان t و SW_0 مقدار اولیه آب در خاک می‌باشد و R_{day} ، Q_{surf} ، E_a ، W_{seep} و Q_{gw} نیز به ترتیب برابر مقدار بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق، آب نفوذ یافته از خاک به لایه آب غیر اشباع و آب برگشتی از آب‌های زیرزمینی در زمان t می‌باشند (Neitsch et al., 2011). از جمله فرضیات مدل SWAT تقسیم حوضه به واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) با ویژگی یکنواخت و شبیه‌سازی جداگانه فرآیندهای هیدرولوژیکی در هر HRU و جمع‌آوری نتایج برای کل حوضه و همچنین استفاده از داده‌های اقلیمی به صورت همگن و یکنواخت در سطح ایستگاه‌ها می‌باشد (Neitsch et al., 2011).

این مدل به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز، به مجموعه‌ای از داده‌های ورودی متنوع نیاز دارد که شامل اطلاعات هواشناسی و اقلیمی، داده‌های توپوگرافی (مدل ارتفاعی رقومی)، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی و همچنین نقشه خاک منطقه می‌باشد. این اطلاعات پایه، نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت شبیه‌سازی مدل داشته و برای تعریف شرایط اولیه ضروری هستند. شرح دقیق مشخصات و منابع داده‌های ورودی مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که داده‌های هواشناسی (بارش و دما) از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در محدوده و اطراف حوضه استخراج گردید که طول سری زمانی آن‌ها متناسب با دوره شبیه‌سازی می‌باشد. در موارد جزئی که داده‌های ناقص وجود داشت از روش‌هایی مانند

تحت شرایط اقلیمی مختلف تحلیل شده و تغییرات رواناب سطحی در بازه‌های زمانی آینده نسبت به دوره پایه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جزئیات روش‌های استفاده شده در این مطالعه در بخش‌های بعدی به تفصیل شرح داده شده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه گل‌رودبار با مساحت ۳۲۷ کیلومتر مربع در شمال شهر سمنان واقع شده است. شهرستان مهدیشهر در این حوضه واقع شده است که شامل شهرهای شهرهای شهمیرزاد، مهدیشهر و درجزین می‌باشد. محدوده مطالعاتی گل‌رودبار در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 18' 12''$ تا $36^{\circ} 29' 10''$ طول شرقی و $49^{\circ} 36' 35''$ تا $49^{\circ} 50' 48''$ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه بخشی از دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز است و به واسطه موقعیت کوهستانی، دارای توپوگرافی متنوع و شیب‌های تند است که از جنوب به دشت سمنان محدود می‌شود. از نظر اقلیمی، حوضه گل‌رودبار در اقلیم نیمه‌خشک تا خشک سرد قرار دارد که با بارندگی متوسط سالانه حدود ۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشخص می‌شود. رژیم بارندگی عمدتاً زمستانه و به صورت بارش‌های برف و باران است. این شرایط موجب جریان‌های متناوب و ناپایدار در رودخانه‌های حوضه شده که اغلب به صورت رودخانه‌های فصلی یا موقتی ظاهر می‌شوند. رودخانه اصلی حوضه، رود گل‌رودبار است که از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی جریان یافته و نهایتاً به دشت سمنان ختم می‌شود. جریان سطحی در این رودخانه متأثر از بارش‌های کوهستانی و ذوب برف است و نوسانات شدیدی در فصول مختلف سال دارد. این ویژگی‌ها، همراه با منابع محدود آب زیرزمینی، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد منطقه نسبت به تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی است. در شکل ۱ تصویر منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

اقلیمی گزارش ششم (CMIP6) رویکرد محاسبات بر حسب سناریوهای اقتصادی-اجتماعی (SSP) می‌باشد. در واقع سناریوهای SSP، تلفیقی از سناریوهای اقتصادی-اجتماعی با در نظر گرفتن میزان واداشت انرژی تابشی خورشیدی RCP ها هستند (Swart et al., 2019).

در این پژوهش از داده‌های گزارش ششم برای دوره تاریخی و دوره آتی تحت سناریوهای مختلف استفاده شده است. همچنین به منظور دستیابی به هدف این تحقیق از مدل اقلیمی CanESM5 استفاده شده است. این مدل توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیمی کانادا توسعه یافته که به عنوان یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی شناخته می‌شود. انتخاب مدل CanESM5 براساس مقایسه‌های انجام شده با سایر مدل‌های CMIP6 انجام گرفت، زیرا این مدل قادر به بازتولید دقیق‌تر دما و بارش بوده و عدم قطعیت کمتری در شبیه‌سازی تغییرات هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، CanESM5 تعاملات پیچیده بین جو، اقیانوس و خشکی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند و بنابراین نتایج آن برای تحلیل رواناب حوضه‌ها و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب قابل اعتمادتر است. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که این مدل نسبت به سایر مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی بر جریان رواناب و پیش‌بینی تغییرات عملکرد بهتری دارد و داده‌های آن برای سناریوهای SSP دسترسی و سازگار با اهداف این پژوهش است. در همین راستا Mohseni et al. (2023) بیان کردند که مدل CanESM5 در ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های اقلیمی دارد. (Gong et al. (2023 و Ekolu et al. (2024 نیز در پژوهش‌های خود این مدل را توصیه کردند. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی حاصل از مدل CanESM5 نیز از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM استفاده شد.

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی

مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM براساس تحلیل‌های آماری پیشرفته و رگرسیون چند متغیره بنا شده است. از این مدل به منظور تبدیل داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس (خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) به مقیاس کوچک‌تر و منطقه‌ای استفاده می‌شود. این مدل قادر است چند متغیر اقلیمی مانند دما و بارش را همزمان شبیه‌سازی کند و با استفاده از روابط آماری میان داده‌های GCM و مشاهدات تاریخی، نتایج واقع‌گرایانه‌تری ارائه دهد. علاوه بر این، SDSM امکان استفاده از سناریوهای CMIP6 و SSP را فراهم کرده و در مطالعات

میانگین متحرک وزنی و رگرسیون خطی با ایستگاه‌های مجاور برای بازسازی داده‌ها استفاده شد تا پیوستگی و دقت داده‌ها حفظ گردد. همچنین داده‌های دبی رودخانه از ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری در جزین) مورد استفاده قرار گرفت که به‌عنوان نماینده جریان خروجی کل حوضه در نظر گرفته شده است. هرچند این ایستگاه ممکن است برخی ورودی‌های فرعی را به‌طور کامل پوشش ندهد، ولی با توجه به موقعیت مکانی و سطح بالای همبستگی، بهترین گزینه موجود برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد.

جدول ۱- داده‌های ورودی مدل SWAT

اطلاعات ورودی	منبع
نقشه DEM	Aster 30 m
نقشه خاک	نقشه خاک جهانی از سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد (فائو)
نقشه کاربری اراضی	USGS - Land Cover Products - Global Land Cover Characterization (GLCC)
اطلاعات هواشناسی	سازمان هواشناسی، وزارت نیرو
اطلاعات هیدرومتری	سازمان آب منطقه‌ای سمنان

تنظیم، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه از جمله رواناب سطحی از SWAT2012، استفاده شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از نقشه‌های ورودی و مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، حوضه آبریز استخراج و سپس به زیرحوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) تقسیم شد. سپس تخصیص داده‌های هواشناسی به هر زیرحوضه صورت گرفت. پس از تنظیم پارامترهای هیدرولوژیکی و مدیریت آب، مدل اجرا و رواناب حوضه به دست آمد. برای تنظیم دقیق پارامترهای مدل، با استفاده از داده‌های بارش و رواناب، واسنجی و صحت‌سنجی انجام گرفت. این فرایند به تحلیل و تفسیر تأثیرات مدیریتی و تغییرات اقلیمی کمک می‌کند.

مدل‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم مورد استفاده

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه مورد مطالعه نیاز به داده‌های روزانه دمای حداقل و حداکثر و همچنین بارش آینده می‌باشد. بدین منظور از مدل گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) تحت سناریوهای SSP (-SSP1، SSP2-4.5، SSP5-8.5) استفاده شده است. در مدل‌های

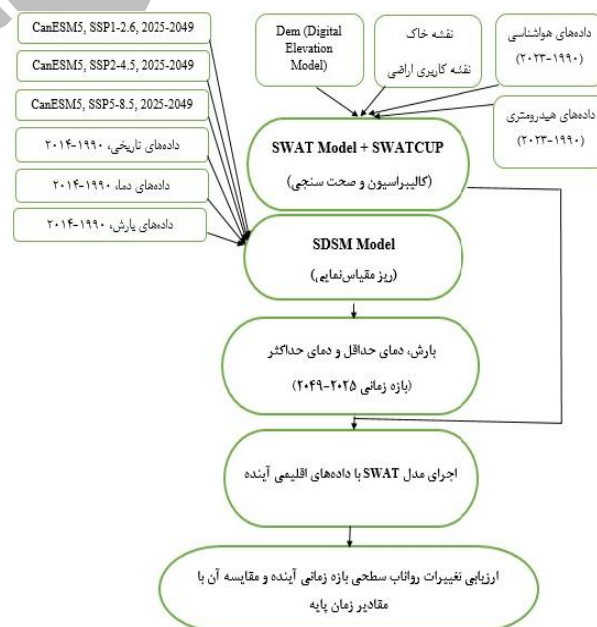
نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از مدل SWAT و برای تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبار سنجی از مدل SWATCUP استفاده شده است. واسنجی مدل برای بازه زمانی ۱۹۹۳ الی ۲۰۱۲ و صحت سنجی برای بازه زمانی ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۳ انجام شده است. از آنجایی که حوضه گل‌رودبار بیشتر شامل مناطق کوهستانی می‌باشد، به دلیل افزایش دقت شبیه‌سازی باندهای ارتفاعی تعریف شده است. این باندها اجازه می‌دهند که مدل بتواند اثر تغییر ارتفاع بر بارش، دما، ذوب برف و رواناب را به طور دقیق شبیه‌سازی کند. سپس پارامترهای PLAPS (نرخ تغییر بارش با ارتفاع) و TLAPS (نرخ تغییر دما با ارتفاع) برای بهینه‌سازی مدل و گنجاندن دقیق‌تر تغییرات متغیرهایی مانند بارش و دما، کالیبره و تنظیم شدند. این دو پارامتر به ترتیب نشان‌دهنده میزان تغییرات بارش و دما به ازای هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع می‌باشند. از آنجایی که بارش برف و ذوب آن در مناطق کوهستانی بسیار بر مقدار رواناب تاثیرگذار است، پارامترهای برف نیز برای مدل کالیبره و تنظیم شدند. در ادامه براساس تحلیل حساسیت انجام شده، ۱۶ پارامتر مؤثر رتبه‌بندی و مقادیر آن برای دوره زمانی مورد نظر تنظیم شد. مشخصات و مقادیر آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین عملکرد مدل با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی شد که در جدول ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده از تحلیل عملکرد مدل، مقادیر ضریب تعیین (R^2) در ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) و ضریب تعیین (R^2) در دوره‌های واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۶۶ و ۰/۶۶ و برای دوره صحت سنجی به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۷۹ به دست آمده است. این مقادیر نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول و رضایت‌بخش مدل در دوره زمانی مورد نظر می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل مورد استفاده از دقت و اعتبار کافی برای تحلیل و پیش‌بینی پدیده مورد نظر برخوردار می‌باشد که با نتایج بدست آمده توسط Chen et al. (2023) و waheed et al. (2024) از عملکرد مناسب SWAT برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه همخوانی دارد.

هیدرولوژیکی به طور گسترده اعتبارسنجی شده است (Naserabadi et al., 2020).

SDSM عمدتاً برای ارتباط بین مدل‌های تغییر اقلیم جهانی و داده‌های مشاهده شده در مقیاس مکانی و زمانی کوچکتر (مانند دما و بارش در یک منطقه خاص) استفاده می‌شود. عملکرد SDSM بر پایه تحلیل‌های آماری داده‌های آب و هوایی است. این مدل ابتدا با استفاده از داده‌های تاریخی مشاهده‌شده در مقیاس محلی واسنجی می‌شود و سپس با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)، که تغییرات آب و هوایی را در مقیاس بزرگتر نشان می‌دهند، اطلاعات آب و هوایی را در مقیاس معینی (مثلاً شبیه‌سازی‌های مدلی برای مناطق خاص) ارائه می‌دهد. در ادامه با استفاده از داده‌های آماری مشاهده شده در مقیاس مکانی و زمانی کوچکتر، مانند داده‌های دما و بارش در یک استان یا منطقه، روابط آماری بین داده‌های مدل شده و مشاهده شده را شبیه‌سازی می‌کند. این روابط آماری برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی در مقیاس مکانی و زمانی کوچک‌تر در آینده استفاده می‌شود (Eingrüber and Korres, 2022). در شکل ۲، فلوچارت روش مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

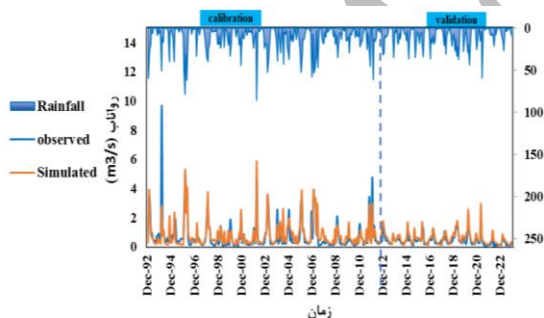


شکل ۲- فلوچارت روش کار پژوهش حاضر

جدول ۲- تحلیل حساسیت و مقادیر پارامترهای کالیبره شده

رتبه حساسیت	نام پارامتر	شرح پارامتر	مقدار حداقل	مقدار بهینه	مقدار حداکثر
۱	r_CN2.mgt	شماره منحنی رواناب SCS	۰	۰/۳۲	۰/۱۵
۲	v_ALPHA_BF.gw	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	۰	۰/۱۹	۰/۰۵
۳	v_CH_N2.rte	ضریب زبری مانینگ برای کانال اصلی رودخانه	۰	۰/۰۹	۰/۰۵
۴	v_GWQMN.gw	عمق آستانه جریان برگشتی در سفره کم عمق	۰/۲۱	۰/۳۷	۰/۲۳
۵	v_CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	۰/۰۱	۲۷/۹۰	۵/۷۳
۶	v_GW_DELAY.gw	ضریب تأخیر آب زیرزمینی	۲۱۳/۷۴	۲۷۳/۵۱	۲۶۰/۷۵
۷	v_SURLAG.bsn	زمان تأخیر رواناب سطحی	۳/۱۵	۸/۶۹	۳/۳۸
۸	v_ESCO.hru	عامل جبران تبخیر از خاک	۰/۶۱	۰/۹۸	۰/۹۷
۹	r_SOL_AWC ().sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	-۰/۲۴	-۰/۰۴	-۰/۰۵
۱۰	r_SOL_BD ().sol	چگالی توده لایه اول خاک	-۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۱۳
۱۱	v_GW_REVAP.gw	ضریب تبخیر مجدد آب زیرزمینی	۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷
۱۲	r_HRU_SLP.hru	شیب متوسط زمین	۰/۰۰۷	۰/۰۹۳	۰/۰۲۷
۱۳	v_RCHRG_DP.gw	درصد نفوذ به آبخوان عمیق	۰/۰۲	۰/۳۹	۰/۱۵
۱۴	v_REVAPMN.gw	عمق آستانه‌ای آب در آبخوان کم عمق برای شروع فرآیند تبخیر مجدد	۵۰۷/۲۲	۶۸۹/۳۲	۶۰۵/۶۴
۱۵	r_SLSUBBSN.hru	طول متوسط شیب زمین	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۰۹۹
۱۶	r_OV_N.hru	ضریب مانینگ جریان سطحی	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷۸

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل SWAT



شکل ۳- مقایسه رواناب سطحی شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

ارزیابی مدل SDSM و تغییرات اقلیمی آینده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارش و دما ایستگاه سینوپتیک سمنان و داده‌های مدل CanESM5 فرآیند ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی در مدل SDSM انجام شد. خروجی‌های مدل CanESM5 تحت سه سناریوی مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۴۹) استخراج گردید و به منظور ارزیابی تغییرات اقلیمی، با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مقایسه شدند. این مقایسه

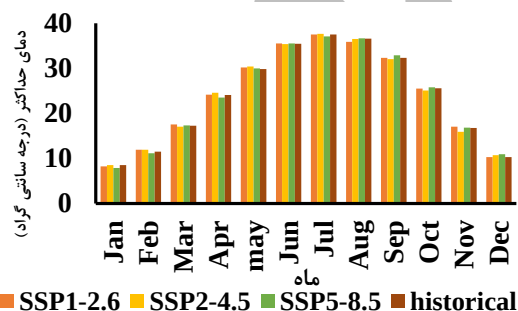
خروجی مدل	NS	R ²	p-factor	r-factor	PBIAS
واسنجی	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۸۴	۰/۸۰	-۳/۸
صحت	۰/۵۵	۰/۷۹	۰/۹۴	۱/۷۰	-۱۰/۷
سنجی					

در شکل ۳، مقایسه رواناب سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که مدل توانسته است با دقت قابل قبول و مناسبی، روند تغییرات رواناب را در طول دوره‌های مورد بررسی بازسازی کند. این دقت به‌ویژه در روند نوسانات مقادیر حداکثر و حداقل رواناب مشهود است. همچنین، با توجه به هم راستا بودن روند تغییرات زمانی رواناب و بارندگی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل به‌درستی تأثیر بارش را بر تولید رواناب شناسایی و شبیه‌سازی کرده است؛ به نحوی که مشاهده می‌شود در زمان‌هایی که بیشینه بارندگی رخ داده، رواناب هم افزایش یافته است.

جدول ۴- درصد تغییرات میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره تاریخی

درصد تغییرات			ماه
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6	
۱۳/۹۶	۱۳/۸۱	-۲۱/۶۴	ژانویه
-۹/۱۰	-۱۵/۳۸	-۱۰/۵۱	فوریه
-۱۸/۴۴	-۴/۹۰	-۱/۴۳	مارس
۷/۱۰	-۱۳/۴۴	-۱۴/۶۳	آوریل
۲۷/۲۶	-۴۲/۱۵	-۲۵	می
۳۸/۴۱	-۲۸/۷۲	-۵/۸۹	ژوئن
۱۳/۷۸	-۲۶/۸۶	-۸/۴۵	ژوئیه
۵۸/۱۲	-۶۰/۶۰	-۴۷/۳۴	آگوست
-۵۹/۹۶	-۵۳/۲۸	۱۷/۷۵	سپتامبر
-۶/۹۱	-۱۱/۸۴	-۱/۹۷	اکتبر
۱۶/۲۲	-۲۹/۵۲	-۸/۸۲	نوامبر
۴/۱۲	-۱۲/۰۱	-۸/۶۷	دسامبر

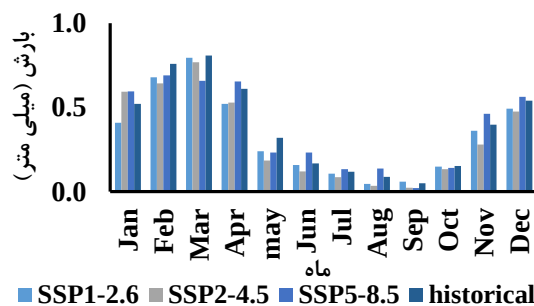
در شکل ۵، میانگین ماهانه دمای حداکثر مربوط به دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مقادیر مربوط به دوره پایه (دوره تاریخی) مقایسه شده است. براساس این شکل، روند تغییرات میانگین ماهانه دمای حداکثر در دوره آینده مشابه با دوره پایه است. بیشترین مقدار میانگین دمای بیشینه ماهانه در دوره آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب برابر با ۳۷/۵۱، ۳۷/۶۱ و ۳۷/۰۷ درجه سانتی گراد می باشد که مربوط به ماه ژوئیه است و کمترین مقدار دمای حداکثر نیز مربوط به ماه ژانویه می باشد.



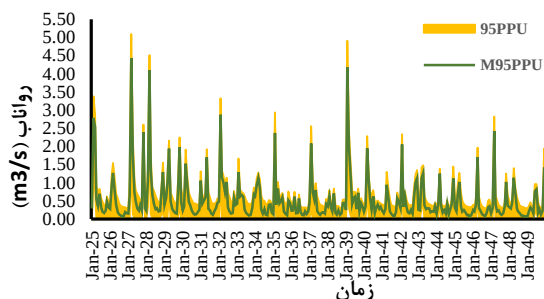
شکل ۵- مقایسه میانگین ماهانه دمای حداکثر تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برای دوره آینده و دوره تاریخی

امکان تحلیل روندهای آبی بارش و دما و تأثیر آنها بر منابع آب حوضه مورد مطالعه را فراهم می سازد.

در شکل ۴، نمودار میانگین ماهانه بارش برای دوره آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با دوره تاریخی مقایسه شده است. براساس این شکل، بیشترین مقادیر بارش در تمامی سناریوها در ماه های زمستان و اوایل بهار (ژانویه تا آوریل) مشاهده می شود. در ماه های گرم سال (می تا سپتامبر)، بارش بسیار کم و تقریباً مشابه با مقادیر تاریخی باقی مانده است، هرچند در برخی ماه ها مانند ژوئن، در سناریوی SSP5-8.5 افزایش کمی دیده می شود. پس از آن از ماه اکتبر دوباره روند بارش افزایشی می شود. به طور کلی، سناریوی SSP5-8.5 بیشترین تغییر در الگوی بارش را نشان می دهد که می تواند نشان دهنده افزایش احتمال وقوع بارش های شدید و سیلابی در آینده باشد. تحت این سناریو بیشترین مقدار میانگین ماهانه بارش در ماه فوریه رخ داده است که برابر با ۰/۶۸ میلی متر است. جدول ۴، درصد تغییرات میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نسبت به دوره تاریخی را نشان می دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، بیشترین کاهش در میانگین بارش ماهانه مربوط به سناریوی SSP2-4.5 است که در ماه آگوست رخ داده و برابر با ۶۰/۶۰- درصد می باشد. همچنین، بیشترین افزایش در میانگین ماهانه بارش نسبت به دوره تاریخی، مربوط به سناریوی SSP5-8.5 است که در ماه آگوست اتفاق افتاده و برابر با ۵۸/۱۲ درصد است.

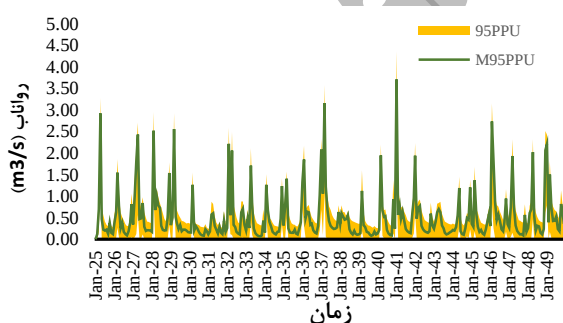


شکل ۴- مقایسه میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برای دوره آینده و دوره تاریخی



شکل ۷- رواناب ماهانه پیش‌بینی شده دوره آینده تحت سناریوی SSP1-2.6 برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹

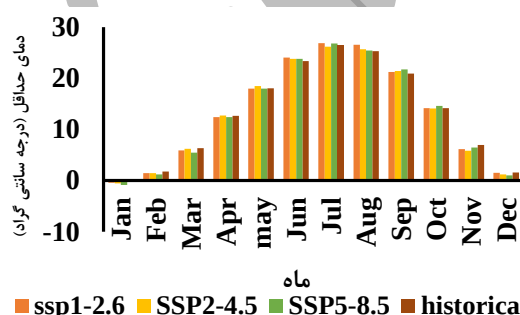
شکل ۸ نیز نشان دهنده رواناب دوره آینده (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) تحت سناریوی SSP2-4.5 و بازه اطمینان ۹۵ درصدی می‌باشد. براساس این نمودار بخش زیادی از مقادیر در این محدوده قرار گرفته‌اند که بیانگر دقت و کفایت مدل در شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. همچنین طبق این نمودار، رواناب دارای یک الگوی فصلی تکرارشونده و مشخص است؛ به‌طوری‌که در ابتدای هر سال، دبی اوج در جریان رواناب دیده می‌شود که معمولاً مرتبط با بارندگی‌های زمستان و اوایل بهار است. این مقادیر دبی اوج در برخی سال‌ها تا حدود ۳/۵ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته‌اند، اما در اغلب مواقع، حداکثر رواناب در محدوده ۲ تا ۳ مترمکعب بر ثانیه باقی مانده است. در فصل‌های خشک‌تر سال (تابستان و پاییز)، رواناب به‌طور محسوسی کاهش یافته است. میانگین رواناب (خط سبز) در بیشتر ماه‌ها بین ۰/۲ تا ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه نوسان دارد.



شکل ۸- رواناب ماهانه پیش‌بینی شده دوره آینده تحت سناریوی SSP2-4.5 برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹

در شکل ۹ مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده دوره آینده تحت سناریو SSP5-8.5 نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقادیر شبیه‌سازی شده در محدوده بازه اطمینان ۹۵ درصدی قرار گرفته‌اند. براساس این نمودار مقادیر دبی اوج رواناب در ماه‌های مختلف به ویژه در ژانویه مشاهده می‌شود که ناشی از بارندگی‌های زمستان و بهار می‌باشد. در برخی سال‌ها، مقادیر

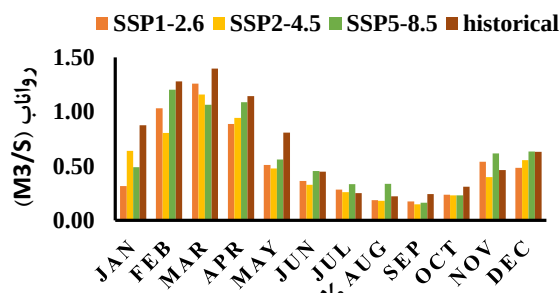
در شکل ۶، مقادیر میانگین ماهانه دمای حداقل دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۴۹) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات میانگین ماهانه دمای حداقل در هر سه سناریو مشابه است. بیشترین مقدار میانگین ماهانه دمای حداقل مربوط به ماه ژوئیه است که به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برابر با ۲۶/۸۹، ۲۶/۱۸ و ۲۶/۸۱ درجه سلسیوس است. کمترین مقدار نیز مربوط به ماه ژانویه است که به ترتیب در سناریوهای مذکور برابر با ۰/۴۲، ۰/۵۷ و ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه میانگین ماهانه دمای حداقل تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برای دوره آینده و دوره تاریخی

پاسخ هیدرولوژیک حوضه گلرودبار به تغییرات اقلیمی آینده شکل ۷، رواناب دوره آینده را تحت سناریوی SSP1-2.6 برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹ نشان می‌دهد. ناحیه نارنجی رنگ نمایانگر بازه اطمینان ۹۵ درصدی (95PPU) پیش‌بینی رواناب است، به این معنا که با احتمال ۹۵ درصد، مقادیر رواناب در این محدوده قرار می‌گیرند. میانگین رواناب این دوره با خط سبز (M95PPU) نمایش داده شده است. براساس این نمودار مشاهده می‌شود که رواناب دارای نوسانات فصلی منظم است که هر سال تکرار می‌شود. در اغلب سال‌ها، چندین رواناب با حداکثر دبی دیده می‌شود که بیشترین آن‌ها در ماه‌های اولیه سال (زمستان و بهار) است. این مقادیر در برخی ماه‌ها به بیش از ۴/۵ متر مکعب بر ثانیه می‌رسند، اما در بسیاری از موارد، مقادیر رواناب در بازه ۰ تا ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه متغیر می‌باشد. در فصول گرم سال رواناب کاهش یافته و در برخی زمان‌ها به نزدیک صفر می‌رسد. این الگو نشان‌دهنده وابستگی رواناب به الگوهای فصلی بارش و تبخیر است.

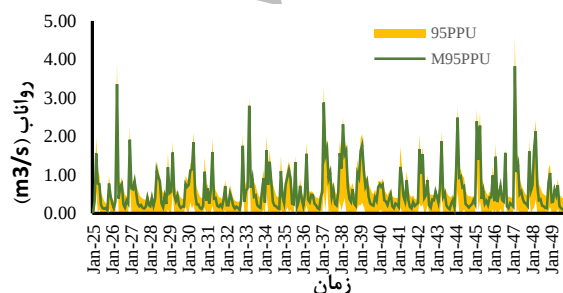
نشان می‌دهد. الگوی فصلی رواناب در تمامی سناریوها مشابه بوده و بیشترین دبی جریان در ماه‌های زمستان و اوایل بهار (فوریه تا آوریل) رخ می‌دهد که منطبق با فصل بارش در حوضه است. با این حال، تفاوت در مقدار رواناب بین سناریوها مشاهده می‌شود. سناریوی SSP5-8.5 که نشان‌دهنده بالاترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و بیشترین گرمایش جهانی است، در اغلب ماه‌ها (به‌ویژه فوریه، آوریل، آگوست، نوامبر، دسامبر) مقدار رواناب پیش‌بینی شده را بیشتر از مقادیر رواناب دیگر سناریوها برآورد کرده است. این افزایش می‌تواند ناشی از شدت بیشتر بارش‌های کوتاه‌مدت و سنگین تحت شرایط اقلیمی گرم‌تر باشد. در مقابل، سناریوی SSP1-2.6 با کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و سناریوی SSP2-4.5 با انتشار متوسط، رواناب کمتری پیش‌بینی کرده‌اند. همانطور که مشاهده شده است در اکثر ماه‌ها مقادیر پیش‌بینی شده توسط سناریوهای اقلیمی کمتر از مقادیر تاریخی است. اما در بعضی از ماه‌های سال (ژوئن، آگوست، نوامبر و دسامبر) مقادیر رواناب پیش‌بینی شده توسط سناریو SSP5-8.5 بیشتر از مقادیر تاریخی است. به‌طور کلی، نتایج این نمودار نشان می‌دهد که در صورت تداوم روند شدید گرمایش جهانی (SSP5-8.5)، احتمال افزایش وقوع رواناب‌های شدید و سیلابی در برخی ماه‌ها وجود دارد، که نیازمند بازنگری در راهبردهای مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب خواهد بود.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین ماهانه رواناب سطحی دوره آینده (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با داده‌های تاریخی

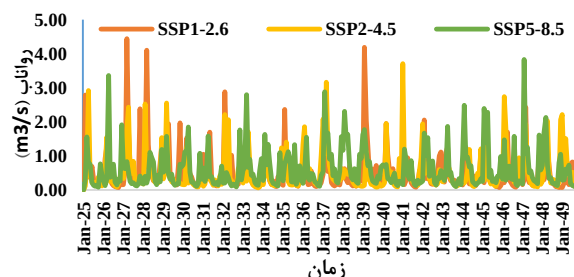
جدول ۵، درصد تغییرات رواناب پیش‌بینی شده توسط سناریوهای اقلیمی را نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهد. براساس این جدول، در بیشتر ماه‌ها کاهش رواناب نسبت به دوره تاریخی مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش رواناب مربوط به ماه ژانویه در سناریوی SSP1-2.6 برابر ۶۴/۰۵ درصد می‌باشد، که بیانگر تأثیر قابل‌توجه کاهش دما و بارش در این سناریو می‌باشد. در مقابل، بیشترین درصد افزایش رواناب

دبی اوج تا حدود ۴ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافته‌اند، در حالی که در بیشتر زمان‌ها، حداکثر رواناب در محدوده ۲ تا ۳ مترمکعب بر ثانیه باقی مانده است. طی فصول کم بارش سال، به‌ویژه تابستان و اوایل پاییز، رواناب کاهش قابل‌توجهی داشته و به مقادیر نزدیک صفر رسیده است. همچنین، میانگین رواناب (خط سبز) در اغلب ماه‌های سال بین ۰/۲ تا ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه نوسان داشته است.



شکل ۹- رواناب ماهانه پیش‌بینی شده دوره آینده تحت سناریوی SSP5-8.5 برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹

شکل ۱۰، روند تغییرات رواناب سطحی حوضه گل‌رودبار را در دوره آینده (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود، هر سه سناریو دارای الگوی فصلی مشابهی هستند و دبی اوج رواناب‌ها عمدتاً در فصل زمستان و اوایل بهار رخ داده است. با این حال، شدت دبی‌های اوج و میزان رواناب در سناریوها متفاوت است. این مقایسه نشان می‌دهد که شدت تغییرات اقلیمی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر مستقیمی بر مقدار رواناب سطحی داشته است.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات رواناب سطحی حوضه گل‌رودبار در دوره آینده (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

نمودار شکل ۱۱ مقایسه میانگین ماهانه رواناب سطحی در دوره آینده (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) را تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با داده‌های تاریخی و با یکدیگر

ریزمقیاس شده اقلیمی از مدل CanESM5 نشان داد که تحت تأثیر سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای، الگوی بارش و دما در آینده دچار تغییراتی خواهد شد که این تغییرات مستقیماً بر الگوی رواناب تأثیر می‌گذارند. نتایج حاکی از آن است که افزایش دما و تغییر در شدت و توزیع زمانی بارش، به‌ویژه در سناریوهای با انتشار زیاد گاز گلخانه‌ای، می‌تواند موجب افزایش دبی‌های اوج رواناب در برخی ماه‌ها و در عین حال کاهش جریان در دوره‌های خشک‌تر سال شود. در مقایسه بین سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مشخص شد که سناریوی SSP5-8.5 به‌عنوان سناریوی بدبینانه با بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، بیشترین تأثیر را بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه داشته است. در این سناریو، مقادیر رواناب ماهانه در بسیاری از ماه‌ها نسبت به دوره تاریخی افزایش یافته و نشانه‌هایی از تشدید وقوع رواناب‌های شدید و سیلابی در آینده دیده می‌شود. در مقابل، سناریوهای با انتشار کنترل‌شده‌تر، مانند SSP1-2.6، الگوهای رواناب متعادل‌تری ارائه کرده‌اند که شباهت بیشتری به وضعیت تاریخی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که ادامه روند گرمایش جهانی و افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به بی‌ثباتی بیشتر در جریان‌های سطحی، تشدید مخاطرات هیدرولوژیکی و کاهش قابلیت پیش‌بینی رفتار آبی حوضه‌ها شود. این اثرات در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل حساسیت بالاتر به تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع آبی، شدیدتر و پرمخاطره‌تر خواهد بود. بنابراین، اتخاذ سیاست‌های اقلیمی محتاطانه و توسعه راهکارهای سازگار با شرایط آینده، به‌ویژه برای مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب در این مناطق آسیب‌پذیر، بازنگری در سیاست‌های تخصیص منابع آب با رویکرد تاب‌آوری در برابر تغییر اقلیم، ایجاد پهنه‌های تغذیه مصنوعی برای افزایش سطح آب زیرزمینی، امری ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر این، افزایش همکاری‌های بین سازمانی و منطقه‌ای، ارتقای سطح آگاهی عمومی و مشارکت جوامع محلی در طرح‌های سازگاری می‌تواند اثربخشی اقدامات و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی را افزایش دهد. در نهایت تلفیق نتایج مطالعات اقلیمی و هیدرولوژیک در فرآیند تصمیم‌سازی، می‌تواند نقش اساسی در کاهش ریسک و بهبود مدیریت پایدار منابع آب، در شرایط اقلیمی آینده، داشته باشد.

مربوط به ماه‌های آگوست، ژوئیه و نوامبر در سناریوی SSP5-8.5 می‌باشد که به ترتیب برابر ۵۱/۳۰، ۳۳/۹۸ و ۳۳ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده شدت گرفتن رواناب در نتیجه افزایش شدت بارش‌های کوتاه‌مدت در شرایط گرمایش جهانی است. به‌طور کلی، سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سایر سناریوها کاهش کمتری در رواناب داشته و در برخی ماه‌ها حتی افزایش نیز دیده می‌شود، در حالی که SSP1-2.6 بیشترین کاهش‌ها را نشان می‌دهد. این روندها تأییدی بر نقش تعیین‌کننده شدت تغییر اقلیم و سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای بر رفتار هیدرولوژیک حوضه در آینده هستند. (Heidari et al. (2020) نیز با مطالعه حوضه نیمه خشک واقع در خراسان رضوی به نتیجه کاهش رواناب در شرایط تغییر اقلیم آینده دست یافتند.

جدول ۵- درصد تغییرات رواناب پیش‌بینی‌شده توسط سناریوهای اقلیمی نسبت به رواناب دوره تاریخی

ماه	درصد تغییرات		
	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6
ژانویه	-۴۴/۲۲	-۲۷	-۶۴/۰۵
فوریه	-۵/۹۴	-۳۷/۲۱	-۱۹/۵۱
مارس	-۲۳/۷۹	-۱۷/۰۳	-۹/۸۰
آوریل	-۵/۰۹	-۱۷/۶۲	-۲۲/۵۰
می	-۳۰/۶۶	-۴۰/۸۷	-۳۶/۸۷
ژوئن	۱/۴۵	-۲۷/۳۳	-۱۸/۷۷
ژوئیه	۳۳/۹۸	۳/۹۶	-۱۳/۷۸
آگوست	۵۱/۳۰	-۱۸/۶۸	-۱۶/۲۸
سپتامبر	-۳۲/۰۹	-۳۸/۲۳	-۲۷/۲۰
اکتبر	-۲۵/۳۹	-۲۵/۳۴	-۲۳/۸۸
نوامبر	۳۳	-۱۴/۱۰	-۱۶/۳۸
دسامبر	۰/۶۲	-۱۱/۷۹	-۲۳/۳۹

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل SWAT عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه نیمه خشک گلرودبار دارد و می‌تواند با دقت قابل قبول، تغییرات رواناب را در پاسخ به پارامترهای اقلیمی و فیزیوگرافی منطقه بازسازی کند. استفاده از باندهای ارتفاعی، بهینه‌سازی پارامترهای برف، بارش و دما و همچنین اعتبارسنجی مدل با شاخص‌های آماری معتبر، قابلیت اطمینان نتایج را تقویت کرده است. این یافته‌ها با مطالعات (Tayebzadeh, Hussainzada and Lee. (2021) و Moghadam et al. (2021) و Khosravi et al. (2025) هم‌راستا است. ترکیب مدل SWAT با خروجی‌های

تقدیر و تشکر

از همکاری سازمان هواشناسی و شرکت سهامی آب منطقه‌ای سمنان برای همکاری و در اختیار قرار دادن اطلاعات این پژوهش تشکر می‌گردد.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

بخشی از داده‌های این تحقیق مربوط به پایان نامه دکتری نویسنده اول و بخشی از وزارت نیرو و سازمان هواشناسی دریافت شد. همه نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، انجام تحقیق و نوشتن نسخه اولیه مقاله
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش، بازبینی و کنترل نتایج.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

منابع

- 4- Ekolu, J., Dieppois, B., Trambly, Y., Villarini, G., Slater, L.J., Mahé, G., et al., 2024. Variability in flood frequency in sub-Saharan Africa: The role of large-scale climate modes of variability and their future impacts. *Journal of Hydrology*, 640, p.131679.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131679>
- 5- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V. and Ramezani Etedali, H., 2021. Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*, 17(3), pp. 345-359. [In Persian]
<https://doi.org/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5>
- 6- Gong, L., Zhang, X., Pan, G., Zhao, J. and Zhao, Y., 2023. Hydrological responses to co-impacts of climate change and land use/cover change based on CMIP6 in the Ganjiang River, Poyang Lake basin. *Anthropocene*, 41, p.100368.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100368>
- 7- HajiGhasemi, S., Zakeri Niri, M. and Najafi Jilani, A., 2021. Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River), *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), pp. 121-137. [In Persian]
<http://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1>
- 8- Heidary, H. , Mousavi, M. , esmaili, K. and Golkarian, A., 2020. The Impact of Climate Change on Watershed Runoff and Sedimentation Using SWAT and WEPP Models (Case Study: Dehbar Basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(4), pp. 1027-1040. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.287152.668293>
- 9- Ho, C.H., Chen, J.L., Nobuyuki, Y., Lur, H.S. and Lu, H.J., 2016. Mitigating uncertainty and enhancing resilience to climate change in the fisheries sector in Taiwan: Policy implications for food security. *Ocean & Coastal Management*, 130, pp.355-372.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.020>
- 10- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaei Nejad, S. H. and khalili, D., 2019. Simulation of Climate Change Impacts Using Fifth Assessment Report Models under RCP Scenarios on Water Resources in the Upper Basin of Salman Farsi Dam, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), pp. 243-258. [In Persian]
<https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.2.1.9>
- 11- Hussainzada, W. and Lee, H.S., 2021. Hydrological modelling for water resource management in a semi-arid mountainous region using the soil and water assessment tool: A case study in northern Afghanistan. *Hydrology*, 8(1), p.16.
<https://doi.org/10.3390/hydrology8010016>
- 12- Jalali, M. N., Sarai Tabrizi, M. and Babazadeh, H., 2020. Investigating the Effect of Climate Change on Water Flow and Water Balance of Latyan Dam Watershed Using SWAT Model, *Journal of Ecohydrology*, 7(1), pp. 17-28. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/IJE.2019.282444.1125>
- 13- Khosravi, M., Zolfaghari, A.A., Kaboli, S.H., Raeesi, M., Abbaspour, K. and Ghafari, H., 2025. Enhanced

- 1- Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E.R. and Jamshidi, S., 2023. Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management*, 37(10), pp.4177-4194.
<https://doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6>
- 2- Chen, S., Huang, J. and Huang, J.C., 2023. Improving daily streamflow simulations for data-scarce watersheds using the coupled SWAT-LSTM approach. *Journal of Hydrology*, 622, p.129734.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129734>
- 3- Eingrüber, N. and Korres, W. 2022., Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model). *Science of The Total Environment*, 838, p.155775.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102491>

24- Zarezade Mehrizi, S. O. , Khoorani, A. , Bazrafshan, J. and Bazrafshan, O., 2018. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Gamasiab river basin. *Journal of Ecohydrology*, 5(3), pp. 777-789. [In Persian]

<https://doi.org/10.22059/IJE.2018.242453.732>

25- Zuo, D., Xu, Z., Zhao, J., Abbaspour, K.C. and Yang, H., 2015. Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 60(3), pp.508-522.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.943668>

identification of hydrologically sensitive areas via digital soil mapping and hydrological modeling in semi-arid regions. *Earth Science Informatics*, 18(3), p.285.

<https://doi.org/10.1007/s12145-025-01799-9>

14- Ma, H., Zhong, L., Fu, Y., Cheng, M., Wang, X., Cheng, M. and Chang, Y., 2023. A study on hydrological responses of the Fuhe River Basin to combined effects of land use and climate change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, p.101476.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101476>

15- Mohseni, U., Agnihotri, P.G., Pande, C.B. and Durin, B., 2023. Understanding the climate change and land use impact on streamflow in the present and future under CMIP6 climate scenarios for the Parvara Mula Basin, India. *Water* 15 (9), p.1753

<https://doi.org/10.3390/w15091753>

16- Naserabadi, F., Ghazavi, R. and Zakerinia, M., 2020. Climate change impacts on hydrological modelling of Talvar river watershed, *Iranian Water Researches Journal*, 14(2), pp. 37-49. [In Persian]

17- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. *Texas Water Resources Institute Technical Report*. No.406.

<https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009>

<theory.pdf>

18- Nouri, L., Mahtabi, G., Hosseini, S.H. and Prasad, C.V.S.R., 2024. Hydrological responses to future climate change in semi-arid region of Iran (Golabar and Taham Basins, Zanjan Province). *Results in Engineering*, 21, p.101871.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101871>

19- Saraf, V.R. and Regulwar, D.G., 2018. Impact of climate change on runoff generation in the Upper Godavari River Basin, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4), p.04018021.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.21535515.0000416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.21535515.0000416)

20- Swart, N.C., Cole, J.N., Kharin, V.V., Lazare, M., Scinocca, J.F., Gillett, N.P., et al., 2019. The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), pp.4823-4873.

<https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>

21- Tayebzadeh Moghadam, N., Abbaspour, K.C., Malekmohammadi, B., Schirmer, M. and Yavari, A.R., 2021. Spatiotemporal modelling of water balance components in response to climate and landuse changes in a heterogeneous mountainous catchment. *Water Resources Management*, 35(3), pp.793-810.

<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02735-w>

22- Waheed, A., Jamal, M.H., Javed, M.F. and Muhammad, K.I., 2024. A CMIP6 multi-model based analysis of potential climate change effects on watershed runoff using SWAT model: A case study of kunhar river basin, Pakistan. *Heliyon*, 10(8).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28951>

23- Woo, S., Kim, W., Chang, S.W. and Chung, I.M., 2025. Seasonal hydrologic responses to climate change based on a CMIP6 multi-model ensemble: A case study of An-Seong watershed in South Korea. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60, p.102491.

نسخه پیش از چاپ