



Projecting the Impacts of Future Climate Change on Runoff in the Kashafrud River Catchment, Iran

Hossein Imanipour¹ , Mokhtar Karami² , Abdolreza Kashki³ , Morteza Esmailnejad⁴

1. Department of Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Email: h.imanipour@hsu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Email: m.karami@hsu.ac.ir

3. Department of Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Email: a.kashki@hsu.ac.ir

4. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Birjand, Iran

Email: esmailnejad.m@birjand.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

25 November 2024

Received in revised form:

27 February 2025

Accepted:

6 April 2025

Available online:

12 May 2025

Keywords:

Climate change,

Kashafrud River basin,

Runoff,

CMIP6,

SWAT.

ABSTRACT

Climate change directly impacts water resources, exacerbating risks such as floods and droughts. This study aimed to project the effects of climate change on runoff in the upper Kashafrud River basin. Downscaling was performed using the CMhyd model, and runoff projections were generated via the SWAT hydrological model. Outputs from selected CMIP6 models under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios were applied for the near-future (2025–2054) and mid-future (2055–2084) periods. After SWAT-CUP validation and calibration, the SWAT model was simulated under climate change conditions. The calibration yielded NSE, RMSE, and R^2 values of 0.73, 12.154, and 0.672 for the Dowlatabad station and 0.81, 13.25, and 0.72 for the Kartian station, respectively. Validation results showed values of 0.77, 14.205, and 0.684 for Dowlatabad and 0.76, 16.43, and 0.66 for Kartian. Analysis of climatic variables (precipitation and temperature) under climate change revealed increases in seasonal and annual maximum/minimum temperatures across all scenarios, as well as increased precipitation in all scenarios except SSP1-2.6 during the near-future period. Runoff under SSP1-2.6 is projected to decrease by 10.03% in the near future, while other periods and scenarios show increases ranging from 3.37% (SSP1-2.6, mid-future) to 15.56% (SSP5-8.5, mid-future). These shifts are primarily attributed to rising temperatures and intensified extreme precipitation events. The findings provide a critical management tool for water resource policymakers to adapt to climate change impacts.

Cite this article: Imanipour, H., Karami, M., Kashki, A., & Esmailnejad, M. (2025). Projecting the Impacts of Future Climate Change on Runoff in the Kashafrud River Catchment, Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (1), 83-99.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.388558.1007868>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended abstract

Introduction

Climate change is one of the most pressing challenges facing humanity today, directly impacting hydrological processes and water resources. It exacerbates risks such as floods and droughts, threatening both human life and ecosystems. The study area, the upper basin of the Kashafrud River, is a critical watershed in northeastern Iran and highly sensitive to climatic fluctuations. Understanding the implications of climate change on runoff and hydrological cycles in this region is essential for effective water resource management and planning. The primary objective of this research is to assess the impacts of climate change on runoff dynamics in the upper Kashafrud River basin under various future climate scenarios, using advanced hydrological and climate modelling tools. The effects of climate change on water resources are particularly pronounced in semi-arid regions like northeastern Iran, where water scarcity is already a pressing issue. The Kashafrud River basin is a vital water source for agricultural, domestic, and ecological needs in the region. As climatic variables such as temperature and precipitation shift, they directly alter the hydrological balance, influencing processes like evapotranspiration, infiltration, and runoff generation. These changes necessitate a deeper understanding of potential future scenarios to guide adaptive water management strategies. Recent studies highlight that urban and rural communities in semi-arid regions are especially vulnerable to the adverse impacts of climate change. For instance, urban heat islands exacerbate temperature rises, while rural areas face heightened risks of drought and resource depletion. The Kashafrud basin encompasses diverse topographical and climatic conditions, making it an ideal case study for understanding the broader implications of climate change in similar environments. This research not only examines projected changes in runoff patterns but also evaluates the cascading effects on local water security, agricultural productivity, and flood risks.

Methodology

To achieve the research objectives, state-of-the-art hydrological and climate modelling approaches were employed. The CMhyd model was used for downscaling and bias correction, while the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model simulated runoff.

The study incorporated output data from the CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) ensemble, specifically focusing on SSP1-2.6 (optimistic scenario) and SSP5-8.5 (pessimistic scenario) for two future periods: 2025–2054 (near future) and 2055–2084 (mid-future). Meteorological data, including precipitation and maximum/minimum temperatures, were collected from historical datasets (1991–2020) provided by the Iran Meteorological Organisation (IMO). The CMhyd model applied statistical methods, including distribution mapping and linear scaling, to correct biases in precipitation and temperature data. Validation revealed higher accuracy in temperature simulations than in precipitation data, a critical step in ensuring reliable inputs for hydrological modelling under different scenarios. The SWAT model was calibrated and validated using SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs). Key performance metrics, including Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Root Mean Square Error (RMSE), confirmed the model's reliability. After validation, the SWAT model simulated hydrological responses under future climate conditions, ensuring robust runoff projections that account for complex interactions between climate variables and hydrological processes.

Results and Discussion

The findings indicate significant alterations in the hydrological cycle due to climate change. Seasonal and annual maximum and minimum temperatures are projected to increase across all scenarios. Precipitation trends vary, with increases observed in most scenarios except for SSP1-2.6 during the near future.

Runoff Dynamics: Runoff projections show contrasting patterns depending on the scenario and period. Under SSP1-2.6, runoff is expected to decrease by approximately 10.03% in the near future due to reduced precipitation intensity and frequency. In contrast, SSP5-8.5 projects significant increases in runoff, reaching up to 15.56% in the mid-future, driven by heightened precipitation extremes and elevated temperatures. These projections highlight the dual impacts of climate change—reduced runoff under optimistic scenarios versus intensified hydrological responses under pessimistic scenarios.

Spatial and Temporal Variability: Urban areas within the basin, such as Mashhad, are likely to experience intensified runoff due to urban

heat island effects and increased impermeable surfaces. Elevated regions like Chakaneh show pronounced sensitivity to warming, with amplified runoff and reduced snowpack retention. These variations underscore the heterogeneous impacts of climate change across the basin, emphasising the need for localised adaptation measures tailored to different sub-regions. **Water Balance Components:** Hydrological component analysis reveals evaporation, infiltration, and base flow shifts. Evapotranspiration is projected to increase due to rising temperatures, further influencing soil moisture and groundwater recharge. Under SSP5-8.5, evapotranspiration values rise by approximately 4% compared to the baseline period, modifying the hydrological cycle. Reduced snowmelt under warming conditions is expected to affect water availability in mountainous regions, exacerbating challenges for downstream water users reliant on seasonal runoff.

Precipitation Patterns: The near-future period under SSP1-2.6 shows slight reductions in precipitation, adversely affecting runoff generation. Conversely, the mid-future period under SSP5-8.5 exhibits significant increases in precipitation intensity, potentially leading to more frequent and severe flood events. These changes are closely linked to atmospheric warming and shifts in regional weather patterns, which influence rainfall distribution and intensity.

Implications for Water Resource Management: Increased runoff in most scenarios highlights the potential for higher flood risks, necessitating adaptive strategies such as enhanced reservoir capacity and floodplain management. Conversely, reduced runoff under SSP1-2.6 underscores the need for water conservation measures to mitigate shortages. These findings are pivotal for designing Integrated Water Resource Management (IWRM) plans tailored to future climatic conditions. Policymakers must also consider broader implications, including

impacts on agriculture, urban water supply, and ecosystem services.

Conclusion

This study underscores the profound impacts of climate change on the Kashafrud River basin's hydrological regime. Rising temperatures and altered precipitation patterns will significantly influence runoff dynamics, posing challenges for sustainable water resource management. While increased precipitation in some scenarios may alleviate water shortages, it also escalates flood risks. Policymakers must prioritize adaptive measures to balance these dual challenges, integrating advanced climate modelling insights into regional planning.

Future research should focus on incorporating socioeconomic factors into hydrological models to better understand the interplay between human activities and climate change. Additionally, developing real-time monitoring systems and enhancing the resolution of climate projections can provide more accurate and actionable data for decision-makers. These efforts will be critical in building resilience against climate-induced hydrological risks in the Kashafrud River basin and similar regions.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر رواناب قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود

حسین ایمانی پور^۱، مختار کرمی^۲، عبدالرضا کاشکی^۳، مرتضی اسمعیل نژاد^۴۱- گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: h.imanipour@hsu.ac.ir۲- نویسنده مسئول، گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: m.karami@hsu.ac.ir۳- گروه آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: a.kashki@hsu.ac.ir۴- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه بیرجند، ایران. رایانامه: esmailnejad.m@birjand.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
تغییر اقلیم مستقیماً بر منابع آبی تأثیر گذاشته و خطراتی همچون سیلاب و خشک‌سالی را تشدید می‌کند. این پژوهش با هدف پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر رواناب قسمت علیای حوضه آبریز رودخانه کشف رود، انجام شد. ریزمقیاس نمایی توسط مدل CMhyd و پیش‌نگری رواناب به‌وسیله مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام گردید. سپس برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 تحت سناریوهای SSP1_2.6 و SSP5_8.5 برای دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۵-۵۴) و میانی (۲۰۵۵-۸۴) به کار گرفته شدند. پس از انجام مراحل اعتبارسنجی و واسنجی توسط مدل SWAT-CUP، شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی SWAT در شرایط تغییر اقلیم انجام گرفت. ضرایب R2، RMSE، NSE، به ترتیب در دوره واسنجی برای ایستگاه‌های منتخب دولت‌آباد ۰/۷۳، ۱۲/۱۵۴، ۰/۶۷۲ و کرتیان ۰/۸۱، ۱۳/۲۵، ۰/۷۲ و در دوره اعتبارسنجی برای ایستگاه دولت‌آباد ۰/۷۷، ۱۴/۲۰۵، ۰/۶۸۴ و کرتیان ۰/۷۶، ۱۶/۴۳، ۰/۶۶ به دست آمدند. بررسی وضعیت متغیرهای اقلیمی بارش و دما در شرایط تغییر اقلیم، افزایش دمای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه برای تمامی سناریوها و افزایش بارش را در همه سناریوها به‌جز SSP1_2.6 در دوره آینده نزدیک نشان می‌دهد. مقدار رواناب در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی SSP1_2.6 به میزان ۱۰/۰۳٪ کاهش می‌یابد. مقادیر رواناب در سایر دوره‌ها و سناریوها به‌صورت افزایشی بین ۳/۳۷٪ در سناریوی SSP1_2.6 دوره آینده دور تا ۱۵/۵۶٪ در سناریوی SSP5_8.5 دوره آینده دور پیش‌نگری شد. این تغییرات عمدتاً ناشی از افزایش شدت و فراوانی بارش‌های شدید و افزایش دما است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مدیریتی برای سیاست‌گذاری منابع آب در جهت سازگاری با تغییرات اقلیمی استفاده شود.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷
	تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲
	واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه آبریز رودخانه کشف رود، رواناب، CMIP6، SWAT

استناد: ایمانی پور، حسین؛ کرمی، مختار؛ کاشکی، عبدالرضا و اسمعیل نژاد، مرتضی. (۱۴۰۴). پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر رواناب قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۱)، ۹۹-۸۳.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.388558.1007868>

مقدمه

شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی به دلیل هزینه زیاد برای اندازه‌گیری و محدود بودن داده‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است (Kavian et al., 2015). هیدرولوژی هر حوضه تحت تأثیر افزایش دما و تغییر توزیع بارش قرار می‌گیرد و در نتیجه مقدار و در دسترس بودن آب تغییر می‌کند (Aryal et al., 2019). بنابراین پیش‌بینی رواناب با دقت زیاد از تغییرات آینده به‌ویژه تغییرات در رفتار هیدرولوژیکی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است تا اطلاعات دقیقی در راستای سازگاری با تغییر اقلیم ارائه گردد (Wang et al., 2020). بر اساس گزارش ویژه ۱/۵ درجه هیئت بین دولتی تغییر اقلیم میانگین دمای جهانی تا پایان قرن حاضر بایستی کمتر از ۱/۵ درجه سلسیوس باشد (آلن و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به روند افزایشی غلظت گازهای گلخانه‌ای و افزایش گرمایش جهانی، پیش‌بینی می‌شود که تغییر اقلیم بر منابع آبی و هیدرولوژی تأثیر بگذارد (Kim et al., 2021). افزایش این رخدادها در سال‌های اخیر به دغدغه اصلی اقلیم‌شناسان و سران کشورهای جهان تبدیل شده است (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۹). مشخص نمودن تغییرات رواناب، می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان را در بخش‌های مختلف آگاه نماید و تصویر دقیقی را از تغییرات و نوسانات اقلیمی در آینده پیش روی آنان قرار دهد تا تصمیم‌گیری متناسب با شرایط آب‌وهوایی پیش رو اتخاذ گردد. بارش یک ویژگی اساسی چرخه هیدرولوژیکی زمین است و می‌تواند تأثیرات زیادی بر انواع فعالیت‌های انسانی داشته باشد (Sun et al., 2006). به دلیل تغییر در الگوی بارش فواصل زمانی بارش نیز تغییر پیدا کرده و موجب بروز سیلاب در برخی نواحی شده است. تأثیر تغییر اقلیم بر تشدید خشک‌سالی، پدیده غالب‌تری در نواحی مختلف جهان به شمار می‌رود (Wang et al., 2011). انتظار می‌رود تغییرات اقلیمی، بزرگی و الگوهای مکانی و زمانی متغیرهای اقلیمی را تغییر دهد (Guo et al., 2020; Papalexizou & Montanari, 2019). به همین دلیل، ارزیابی عملکرد مدل‌های موجود و مشخص کردن عدم قطعیت‌ها و سوگیری‌های اساسی در شبیه‌سازی‌های مدل آب و هوایی برای درک ارزش و پتانسیل آن‌ها برای مطالعات ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوایی مهم است (Raghavan et al., 2018; Rivera & Arnould, 2020; Zazulie et al., 2018). برآوردهای اخیر از گرمایش جهانی حاکی از دقیق بودن داده‌های پروژه CMIP است که منجر به افزایش اعتماد به صحت پروژه مذکور شده است (Baker & Huang, 2014).

در سال‌های گذشته، دانشمندان و متخصصان علوم جغرافیایی و اقلیم‌شناسی تحقیقات گسترده‌ای در زمینه اثرات تغییر اقلیم انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال Chu & Shirmohammadi (۲۰۰۴) با به کار بردن مدل SWAT برای یک حوضه ۳۴۰ هکتاری در ناحیه کوهپایه‌ای مرلند و استفاده از آمار ۶ ساله هیدرولوژیک و غلظت کودهای موجود در آب، مدل را واسنجی نمودند. نتایج آنان نشان داد که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی بسیار مرطوب نیست. اما در مجموع SWAT یک مدل حوضه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی درازمدت اهداف مدیریتی است. Sun & Cornish (۲۰۰۵) با استفاده از مدل SWAT مطالعه‌ای را روی دبی رودخانه در دشت‌های لیورپول انجام دادند که نتایج این مطالعه نشان داد مدل SWAT می‌تواند به‌خوبی دبی رودخانه را محاسبه کرده و در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی منابع نقطه‌ای، نتایج بهتری را به دست آورد. رستمیان و همکاران (۲۰۰۹) در حوضه بهشت‌آباد (واقع در کارون شمالی) با استفاده از مدل SWAT اقدام به برآورد مقادیر دبی و بار رسوب‌کرده و دریافت که مدل SWAT در برآورد دبی رودخانه عملکرد مناسبی داشته است. همچنین مطالعه مذکور توانایی مدل در برآورد بار رسوب را در حد متوسط ارزیابی نمود. Eyring و همکاران (۲۰۱۶) به بازنگری طراحی آزمایش‌ها و ساختار مدل‌های CMIP6 پرداختند. به‌واسطه طراحی و توزیع شبیه‌سازی مدل‌های اقلیم جهانی، پروژه CMIP به یکی از ارکان پایه در دانش اقلیم تبدیل شده است. به‌عنوان مثال HoushmandKouchi D & SanaeiNejad SH (۲۰۱۹) در پژوهشی در حوزه آبریز

مند، تغییرات جریان ورودی به سد سلمان را تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی RCP2.6, RCP8.5, RCP8.5 با استفاده از سه مدل GCM شامل (NorESM1-M, IPSLCM5A-LR, HadGem2-ES) و مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد بررسی قرار دادند. نتایج پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی حاکی از افزایش تکرار بارش‌های شدیدتر و کاهش وقایع بارش با شدت کم در دوره آینده نسبت به گذشته و همچنین افزایش دمای کمینه و بیشینه در حوضه است. پس از بررسی نتایج مدل هیدرولوژیکی SWAT مشخص شد این تغییرات منجر به افزایش رواناب و آب ناشی از افزایش وقایع فرین و استعداد سیل‌خیزی حوضه و همچنین افزایش جریان آب سبز ناشی از افزایش دما و بارش در دوره آینده می‌شود. Kim و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای در حوضه رودخانه هان کره جنوبی میزان بارش در سناریوهای SSP و RCP را مقایسه نمودند. نتایج آنان نشان داده است که نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای SSP که شرایط اجتماعی و اقتصادی ضمیمه آن شده است تفاوت زیادی با سناریوهای قبلی از جمله RCP دارد. زنوزی علمداری و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییر بارش و دمای استان خراسان رضوی به کمک مدل‌های CMIP6، اثرات تغییر اقلیم بر بارش و دمای ۷ ایستگاه سینوپتیک استان خراسان رضوی را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که در تمامی سناریوها بارش سالانه افزایش ۰٫۴ تا ۶٫۸ درصد را تجربه خواهد کرد. علی‌رغم انجام مطالعات متعدد در زمینه تغییر اقلیم و تأثیرات آن در بخش‌های مختلف اقتصادی، با استفاده از مدل‌های گزارش ششم در سراسر دنیا، تاکنون مطالعات انگشت‌شماری در حوضه آبریز رودخانه کشف رود صورت پذیرفته است. که بیشتر مطالعات با گزارش پنجم توسعه صورت پذیرفته و بقیه تنها با یک یا دو ایستگاه انجام‌شده است و یا تمرکز اصلی پژوهش بر روی مسئله‌ای غیر از رواناب مانند محصولات کشاورزی، بررسی دما یا بارش حوضه و ... بوده است. مطالعه تغییر اقلیم بر اساس گزارش‌ها و مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش و استفاده از تعداد ایستگاه بیشتر می‌تواند در کنار مطالعات قبلی انجام‌شده، نتایج دقیق‌تر و جدیدی را آشکار و در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. هدف از انجام این پژوهش پیش‌نگری اثر تغییر اقلیم آینده بر رواناب در قسمت بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود است. بدین منظور در پژوهش حاضر، از نتایج آخرین گزارش موجود (CMIP6) استفاده گردید. با توجه به این که مطالعات متعددی (babaiyan et al, Rathjens et al, 2016) از عملکرد قابل‌توجه روش‌ها و مدل‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی، از جمله مدل CMhyd در پیش‌نگری الگوهای تغییر اقلیم در مقیاس محلی حکایت می‌کنند بنابراین در این پژوهش، مدل مذکور برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره آینده موردتوجه قرار گرفت.

روش پژوهش

جهت مقایسه و مشخص نمودن کیفیت پیش‌نگری مدل‌ها، داده‌های روزانه بارش و دمای ایستگاه‌های همدیدی و باران‌سنجی در دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های دبی (۱۹۹۸-۲۰۲۰) از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی و اخذ گردید. در (جدول ۱) مشخصات ایستگاه‌های حوضه نشان داده‌شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب بالادست حوضه آبریز رودخانه کشف رود

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (D.D.)	عرض جغرافیایی (D.D.)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱	اندروخ	باران‌سنجی	۵۹/۶۶	۳۶/۵۸	۱۲۰۷
۲	ارداک		۵۹/۴۰	۳۶/۷۳	۱۳۲۰
۳	دولت‌آباد		۵۹/۱۶	۳۶/۴۴	۱۵۷۵
۴	گلستان		۵۹/۵۵	۳۶/۱۷	۱۲۴۰
۵	جاقرق		۵۹/۳۲	۳۶/۳۱	۱۴۳۴
۶	کارده		۵۹/۶۷	۳۶/۶۵	۱۲۶۵
۷	اولنگ اسدی		۵۹/۸۱	۳۶/۲۵	۹۱۴
۸	رادکان		۵۹/۰۱	۳۶/۸۱	۱۲۱۴
۹	سراسیاب		۵۹/۳۳	۳۶/۳۹	۱۲۹۶
۱۰	طرق		۵۹/۲۸	۳۶/۴۸	۱۱۷۶
۱۱	مشهد	همیدی	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲
۱۲	گلمکان		۵۹/۲۸	۳۶/۴۸	۱۱۷۶
۱۳	دولت‌آباد	هیدرومتری	۵۹/۱۶	۳۶/۴۴	۱۵۷۵
۱۴	کرتیان		۵۹/۶۷	۳۶/۶۵	۱۲۶۵

داده‌های مدل SWAT: SWAT یک مدل مفهومی و نیمه توزیعی است که توسط گروهی از وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) تهیه شده است (Arnold & Fohrer, 2005). مدل SWAT در سالین اخیر به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم، مورد استفاده قرار گرفته است (Houshmand Kouchi et al., 2019; Kim et al., 2021; Rabezanahary Tanteliniaina et al., 2021). در جدول (۲) داده‌های مورد نیاز جهت به کارگیری مدل مذکور نشان داده شده است که شامل داده‌های سنجش از دور (نقشه‌های توپوگرافی، خاک و کاربری)، اقلیمی، مدیریت کشاورزی و شبکه آبی است.

جدول ۲. تشریح داده‌ها و منابع

Data type	Resolution/Characteristics	Source
DEM	30 m	Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM2), http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
Soil	1 km	Harmonized world soil database, http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/
Land use	30 m for 1990, 2000 and 2015	Iran Water research institute
Climate	12 stations	Iranian Meteorological Organization
Crop yield	Major cropping pattern	Iranian Ministry of Jahade-Agriculture (MOJA)
Agricultural management and water resources	Planting, harvesting, fertilization-blue water use	Iranian Ministry of Jahade-Agriculture (MOJA) Iran National Water Document (INWD) (Alizadeh et al., 2007) Iran Comprehensive Water Management Plan
Population and water use rate	-	Iran Comprehensive Water Management Plan
Dam characteristic and operation	-	Iran water management company

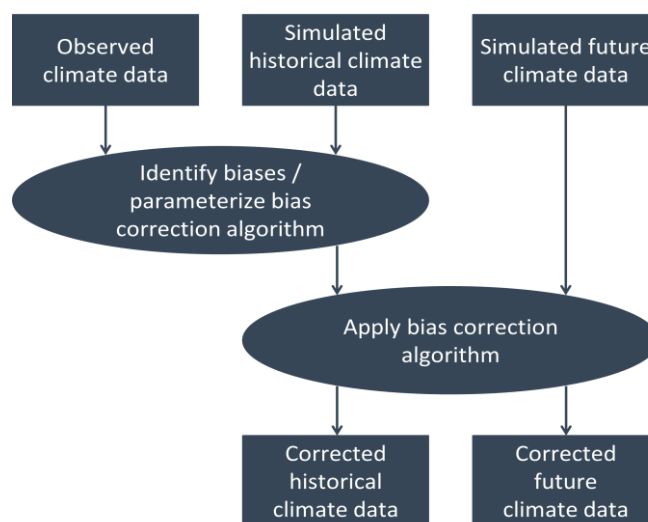
یکی از اهداف این مطالعه نزدیک شدن نتایج به دست آمده در مدل SWAT به مقادیر واقعی است. مدل SWAT یک نرم افزار قوی جهت اعتبارسنجی مدل SWAT است که برای انجام این فرایند از الگوریتم‌های بسیار قوی بهره می‌گیرد که از معروف‌ترین این الگوریتم‌ها که همه عدم قطعیت‌ها را در نظر می‌گیرد و از لحاظ زمانی مقرون به صرفه‌تر است الگوریتم SUFI2 است (Sheykh Rabiee et al., 2024). با توجه به نحوه تنظیم مدل با استفاده از

نقشه‌های کاربری در دسترس و دوره دسترسی داده‌های دبی، واسنجی مدل برای دوره ۱۳ ساله اول (۱۹۹۸-۲۰۱۱) صورت گرفت و دوره ۸ سال بعدی (۲۰۱۲-۲۰۲۰) برای اعتبارسنجی عملکرد مدل استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی به مدل در مطالعه Delavar et al (۲۰۲۰) به تفصیل ارائه شده است که خلاصه آن در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت پارامترها برای دوره واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۱۱)

ردیف	نام پارامتر	توصیف مؤلفه	t-stat	p-value	مقدار بهینه
۱	r_SOL_BD(1).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی یک	۸/۹۴	۰	۰/۴۱
۲	r_SOL_BD(2).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی دو	۱۳/۷۵	۰	۰/۵۴
۳	V_PLAPS.sub	نرخ تغییرات بارش با ارتفاع در هر زیر حوضه	۷۲/۵۹	۰	۲۹۹
۴	V_HRU_SLP.hru	متوسط تندى شیب	۲/۷۴	۰/۰۱	۰/۵۸
۵	r_SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۱) mm/mm	-۳/۵۱	۰	-۰/۰۶
۶	r_SOL_AWC(2).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۲) mm/mm	-۹/۷۶	۰	-۰/۴۲
۷	V_CN2.mgt	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	۰/۷۸	۰/۰۹	۵۲/۷۲
۸	V_ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۶/۷۱	۰	۰/۷۹
۹	V_GWQMN.gw	حد آستانه آب در آبخوان کم عمق	-۸/۱۲	۰	۲۵۳/۸۶
۱۰	V_REVAPMN.gw	ضریب Revap آب زیرزمینی	-۴/۱۵	۰/۰۴	۳۹/۷۱

در ادامه، میزان بارش و دمای ۱۲ ایستگاه منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۵-۵۴) و آینده میانی (۲۰۵۵-۸۴) توسط نرم افزار CMhyd پیش‌نگری گردیدند. بدین منظور داده‌های روزانه هر مدل برای هر ایستگاه استخراج و تصحیح اریبی گردیدند. سپس الگوریتم روی داده‌های تاریخی و سناریو اعمال شد و داده‌های آن‌ها اصلاح گردید و بیش برآوردی یا کم برآوردی متغیرهای این مدل‌ها نسبت به مقادیر دوره پایه تصحیح گردید. شکل ۲ روش انجام این مراحل را نشان می‌دهد (Rathjens et al., 2016).



شکل ۱. روش‌شناسی پژوهش (Rathjens et al., 2016)

با توجه به انجام تحقیقات مشابه در محدوده مورد مطالعه مدل‌های ACCESS-ESM1-5, MRI-ESM2-0 و MIROC6 که در پژوهش‌های سایر محققین (Babaeian et al., 2023; Nikakhtar et al., 2024; zarrin &)

(Dadashi-Roudbari, 2021) به عنوان مدل‌های با عملکرد بهتر در این محدوده معرفی و استفاده شده بودند به کارگیری گردیدند. پیش‌نگری توسط این مدل‌ها ترکیبی از مجموعه‌ای نوین از یکسری سناریوهای انتشار و کاربری اراضی حاصل شده توسط مدل‌های LAMs بر اساس خط سیر مشترک اجتماعی و اقتصادی (SSP) در دوره آینده (سن، رشد اقتصادی، شهرنشینی، تحصیلات، جمعیت و ...) و در ارتباط با سناریوهای غلظت گازهای گلخانه‌ای است (Eyring et al., 2016).

جدول ۴. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

نام مدل	قدرت تفکیک (کیلومتر)	کشور/سازمان	منبع
ACCESS-ESM1-5	192 × 144	CSIRO/Australia	(Ziehn et al., 2020)
MIROC6	256 * 128 250 km	MIROC Consortium (JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS)/Japan	(Kataoka et al., 2020)
MRI-ESM2-0	320 * 160 100 km	MRI, Meteorological Research Institute/Japan	(Yukimoto et al., 2019)

در این پژوهش، از دو سناریوی انتشار کم (SSP1-2.6) و زیاد (SSP5-8.5) برای بررسی تغییرات آینده استفاده شده است. برای بهبود دقت شبیه‌سازی بارش و دما، به ترتیب از روش‌های LS و DM برای تصحیح اریبی استفاده شده است. یک روش معمول برای کاستن از عدم قطعیت مدل‌ها گزینش مدلی با کمترین مقدار اریبی است. در این رویکرد عملکرد مدل برای دوره تاریخی با توجه به مشاهدات ایستگاهی و داده‌های باز تحلیل شده آزمون می‌شود (Lee & Wang, 2014) بالین حال، کاربری این رویکرد با مشکلاتی همراه است که می‌توان به وردایی زیاد مدل در دوره تاریخی اشاره کرد (Yan et al., 2019). در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد نتایج مدل‌های CMIP6 و SWAT از شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف ((NSH ضریب تعیین (R2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب KGE استفاده شده است. روابط این شاخص‌ها در روابط (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sigma_s * \sigma_o} \right]^2 \quad (1)$$

که در آن: o_i : داده‌های دوره پایه، s_i : داده‌های برآورد شده و σ واریانس است. R^2 بیانگر ارتباط داده‌های دوره پایه و برآورد شده است. دامنه این پارامتر بین صفر تا یک است هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است (Moriasi et al., 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

که در آن: O_i : داده‌های دوره پایه، M_i : داده‌های برآورد شده است. مقادیر RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالای مدل و مقدار صفر، نشان‌دهنده عدم وجود خطا در برآورد مدل است (Moriasi et al., 2007).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2} + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

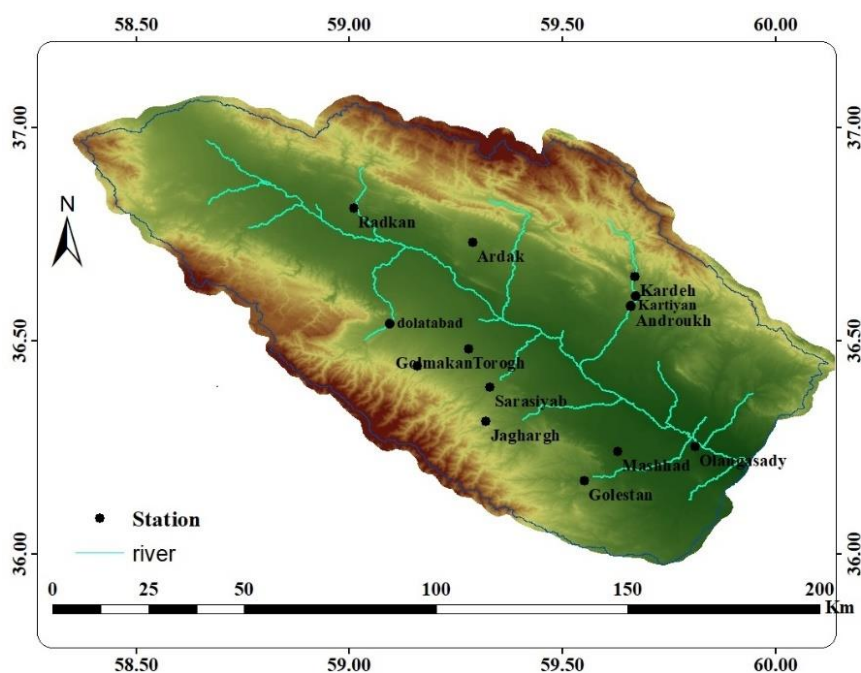
که در آن: sim و obs به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده هستند. σ انحراف معیار، T دوره زمانی، μ میانگین و r همبستگی خطی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های مدل است (Zarrin et al., 2021).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N 1 (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (4)$$

دامنه ضریب NSE بین $-\infty$ تا یک است دامنه بین صفر تا یک قابل قبول و بهترین حالت زمانی است که ضریب NSE برابر یک باشد (Moriassi et al., 2007).

محدوده مورد مطالعه

حوضه کشف رود بخشی از حوضه آبریز قره قوم (جنوب غرب قره قوم) است که شامل محدوده‌های مطالعاتی مشهد، چناران، سنگ بست، نریمانی و آق دربند می‌باشد. (شکل ۱). وسعت کل قسمت علیای حوضه آبریز رودخانه کشف رود در حدود ۳۳۱۹ کیلومترمربع است. منبع تغذیه این رود، باران‌های فصلی و ذوب برف در فصل گرم است. کمترین و بیشترین ارتفاع حوضه به ترتیب ۸۵۲ و ۳۳۰۹ متر می‌باشد. وجود ارتفاعات مختلف و همچنین نزدیکی حوضه آبریز رودخانه کشف رود به کویر مرکزی، باعث تنوع آب‌وهوایی در آن گردیده است. میزان نزولات جوی در ارتفاع و سطح دشت تفاوت زیادی دارد به‌طوری‌که در ارتفاعات هزار مسجد ۸۰۰ میلی‌متر و در سطح دشت مشهد، متوسط ۲۵۰ میلی‌متر ثبت شده است. این رودخانه از شمال مشهد می‌گذرد و دارای قدمت تاریخی مهمی است (RashidiGhane et al., 2023).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

بررسی تغییرات بارش و دمای حوضه در شرایط تغییر اقلیم: به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های جهانی اقلیمی ACCESS-ESM1-5, MRI-ESM2-0, MIROC6 در تولید داده‌های بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه داده‌های تاریخی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه به‌صورت ماهانه و سالانه برای ایستگاه‌های منتخب در حوضه مقایسه گردیدند. در نهایت، آماره‌های محاسبه‌شده، عملکرد مناسب‌تر مدل MIROC6 را در بیشتر ایستگاه‌های حوضه آبریز رودخانه کشف رود نشان می‌دهد.

مقایسه تغییرات بین فصلی بارش

نتایج حاصل از مدل‌سازی اقلیمی حاکی از کاهش بارش در فصل بهار در اکثر سناریوها، به‌جز سناریوی SSP5_8.5 است. در فصل تابستان تغییرات اندکی در میزان بارش مشاهده شده است. باین‌حال، در فصل پاییز، کاهش جزئی در میزان بارش در همه سناریوها پیش‌بینی می‌شود. فصل زمستان افزایش بارش در تمام سناریوها را نشان می‌دهد که این افزایش در سناریوی SSP5_8.5، قابل‌توجه‌تر بوده است. کمترین افزایش بارش زمستانه در دوره آینده نزدیک و سناریوی SSP1_2.6 مشاهده شده است. تمرکز بارش در فصول خاصی از سال، به‌ویژه در فصل زمستان، می‌تواند پیامدهای مهمی برای بخش کشاورزی، به‌خصوص کشت پاییزه محصولات دیم، داشته باشد. تغییرات در الگوی بارش فصلی می‌تواند بر منابع آب زیرزمینی، جریان رودخانه‌ها و در نهایت بر امنیت غذایی و زیست‌بوم منطقه تأثیرگذار باشد. در ادامه با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۵ مشخص گردید در متوسط بارش سالانه تحت سناریوی SSP1_2.6 و SSP5_8.5 در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۴) به ترتیب کاهش ۲/۹۲ و افزایش ۳/۴۴ درصدی و تحت سناریوی SSP1_2.6 و SSP5_8.5 در دوره آینده میانی (۲۰۸۴-۲۰۵۵) به ترتیب افزایش ۲/۹۶ و ۸/۷۹ درصدی نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. این تغییرات با توجه به ماهیت هر سناریو و شرایط اجتماعی و اقتصادی حاکم بر آن‌ها است. از نظر مقایسه فصلی، در اکثر سناریوهای دوره‌های آینده در فصل‌های بهار و پاییز کاهش بارش بین ۱/۵۱ تا ۸/۱۸ درصد مشاهده گردید و تنها در سناریوی SSP5_8.5 دوره آینده میانی (۲۰۵۵-۸۴) در فصل بهار به میزان ۳/۵۶ درصد افزایش بارش بود. در فصل‌های تابستان و زمستان در همه سناریوها افزایش بارش بین ۳/۰۵ تا ۳۳/۵۷ درصد مشاهده گردید. این تغییرات نشان‌دهنده ماهیت پیچیده تغییرات اقلیمی و تأثیرات متغیر آن بر مناطق مختلف است.

جدول ۵. درصد تغییرپذیری متوسط بارش فصلی و سالانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی نسبت به دوره پایه

Seasons فصل	Precipitation Change (mm/%) تغییرات بارش	SSP126(2025-54)	SSP585(2025-54)	SSP126(2055-84)	SSP585(2055-84)
Spring بهار	(%)	-8.18	-1.51	-3.08	3.56
	(mm)	-8.24	-1.52	-3.10	3.59
Summer تابستان	(%)	3.05	12.25	16.59	33.57
	(mm)	0.35	1.39	1.89	3.82
Autumn پاییز	(%)	-3.26	-2.03	-3.68	-2.09
	(mm)	-1.05	-0.65	-1.18	-0.67
Winter زمستان	(%)	6.75	15.18	16.59	20.96
	(mm)	3.30	7.41	8.10	10.23
Annual سالانه	(%)	-2.92	3.44	2.96	8.79
	(mm)	-5.65	6.63	5.71	16.97

در مقایسه توسط دمای بیشینه فصلی و سالانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی نسبت به دوره پایه در جدول ۶ مشخص گردید در همه سناریوها و همه فصل‌ها دمای بیشینه به‌صورت افزایشی خواهد بود که کمترین افزایش در دمای بیشینه سالانه سناریوی SSP126 در دوره آینده نزدیک، به میزان ۱,۱۱ درجه سانتی‌گراد و بیشترین افزایش دمای بیشینه سالانه تحت سناریوی SSP585 در دوره آینده میانی به میزان ۳,۷۴ درجه سانتی‌گراد رخ خواهد داد.

جدول ۶. درصد تغییرپذیری متوسط دمای بیشینه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی نسبت به دوره پایه

فصل Seasons/	SSP126(2025-54)	SSP585(2025-54)	SSP126(2055-84)	SSP585(2055-84)
بهار Spring/	1.35	2.09	2.06	4.27
تابستان Summer/	1.07	1.90	2.08	3.89
پاییز Autumn/	1.49	1.64	1.83	3.51
زمستان Winter/	0.55	1.17	1.89	3.30
سالانه Annual/	1.11	1.70	1.97	3.74

با توجه به جدول ۷ با مقایسه تغییرات دمای کمینه فصلی و سالانه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی نسبت به دوره پایه مشخص گردید در همه سناریوها و همه فصل‌ها دمای کمینه به‌صورت افزایشی خواهد بود که کمترین افزایش دمای کمینه سالانه مربوط به سناریوی SSP126 در دوره آینده نزدیک به میزان ۰٫۱۸ درجه سانتی‌گراد و بیشترین افزایش دمای کمینه سالانه تحت سناریوی SSP585 در دوره آینده میانی به میزان ۲٫۲۱ درجه سانتی‌گراد اتفاق خواهد افتاد.

جدول ۷. درصد تغییرپذیری متوسط دمای کمینه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی نسبت به دوره پایه

فصل Seasons/	SSP126(2025-54) °C	SSP585(2025-54) °C	SSP126(2055-84) °C	SSP585(2055-84) °C
بهار Spring/	1.20	1.77	1.65	3.50
تابستان Summer/	1.51	2.47	2.45	5.11
پاییز Autumn/	1.11	1.51	1.44	3.41
زمستان Winter/	0.18	0.62	0.96	2.21
سالانه Annual/	0.98	1.59	1.63	2.48

بررسی تغییرات رواناب در شرایط تغییر اقلیم

به‌منظور آینده‌نگری رواناب در این مطالعه از مدل SWAT استفاده گردید. برای واسنجی جریان در سطح حوضه از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است. پارامترهایی که بیشترین نقش را بر شکل‌گیری رواناب سطحی در مدل ایفا می‌نمایند، برای واسنجی استفاده شدند. با توجه به نحوه تنظیم مدل با استفاده از نقشه‌های کاربری در دسترس و دوره دسترسی داده‌های دبی، واسنجی مدل برای دوره ۱۳ ساله اول (۲۰۱۱-۱۹۹۸) صورت گرفت و دوره ۸ سال بعدی (۲۰۲۰-۲۰۱۲) برای اعتبارسنجی عملکرد مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های مذکور در این مطالعه در جدول ۸ ارائه شده است.

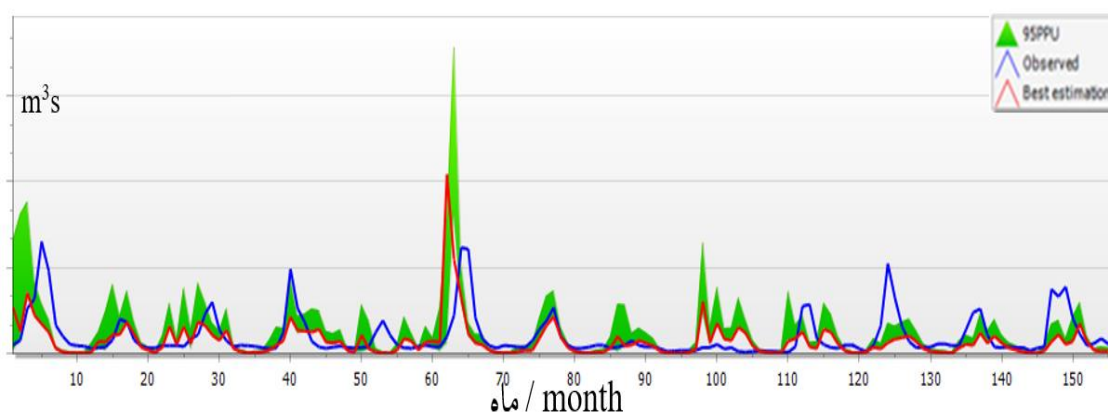
جدول ۸. نتایج ارزیابی مدل SWAT در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

ایستگاه	شماره زیر حوضه	واسنجی		اعتبارسنجی	
		NSH	RMSE(m3/s)	R2	NSH
دولت‌آباد	۱۳	۰/۷۳	۱۲/۱۵۴	۰/۶۷۲	۰/۸۱
کرتیان	۳۴	۰/۷۷	۱۴/۲۰۵	۰/۶۸۴	۰/۷۶

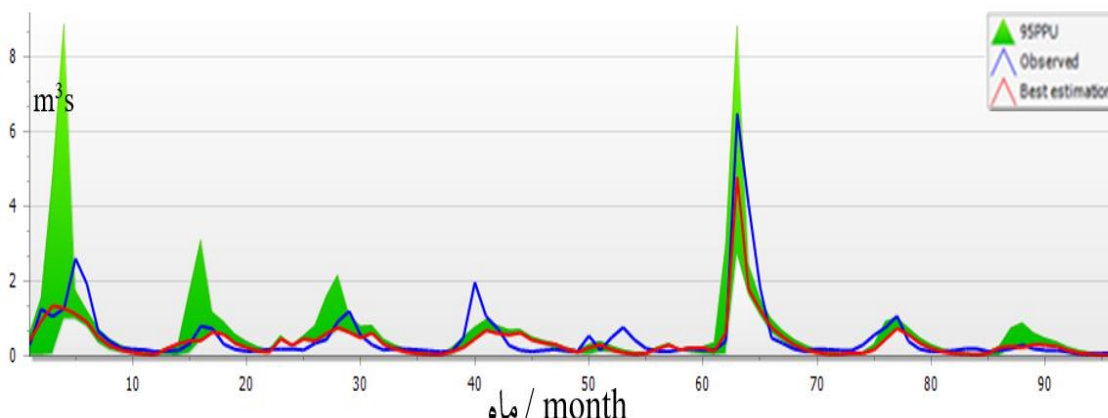
با مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده و پایه مشخص گردید که بعضی از ماه‌های سال تا حدودی همبستگی کمتری دارند. همچنین در این ارتباط می‌توان به مطالعات (Tolson & Shoemaker, 2004) و (Chu & Shirmohammadi, 2004) اشاره کرد. دلایل این مسئله عبارت است از: کوهستانی بودن و وجود سنگ‌آهک، آهک مارنی و آهک دولومیتی مربوط به کرتاسه زیرین که از ضخامت قابل توجهی برخوردار بوده و بخش عمده نواحی مرتفع را تشکیل می‌دهند. بخش‌هایی از

جریانی که مدل با اختلاف کمی نسبت به هیدروگراف پایه شبیه‌سازی کرده است، در اواخر زمستان و اوایل بهار به‌خصوص در ماه‌های مارس، آوریل و می اتفاق افتاده است. از عواملی که سبب افت هیدروگراف مربوط به دبی شبیه‌سازی شده است، برداشت آب با هدف تأمین آب شرب مناطق مجاور با استفاده از خطوط انتقال آب و احداث سد مخزنی (طرق، کارده و ارداک) و سایر اقدامات آبخیزداری جهت تأمین نیازهای مختلف ساکنین حوزه آبخیز می‌باشد که یکی از دلایل عدم دستیابی به نتایج مطلوب در سایر ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه است.

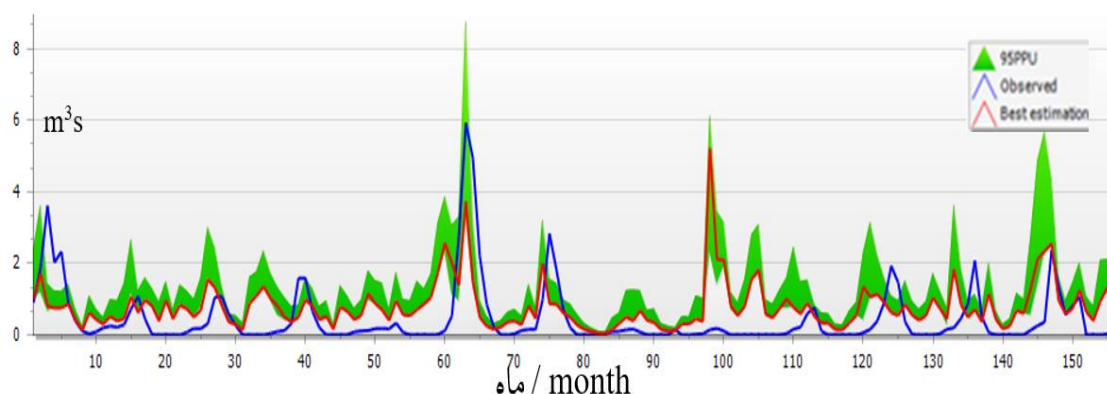
در ادامه توسط مدل SWAT-CUP هیدروگراف‌های هر ایستگاه ترسیم گردید. شکل‌های شماره ۳ تا ۶ هیدروگراف‌های ایستگاه‌های دبی سنجی دولت‌آباد و کرتیان در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی که نتایج بهتری نسبت به سایر ایستگاه‌های دبی سنجی داشتند را نشان می‌دهند. ضرایب NSE , $RMSE$, R^2 به ترتیب در دوره واسنجی برای ایستگاه‌های منتخب دولت‌آباد $0/73$ ، $12/154$ ، $0/672$ و کرتیان $0/81$ ، $13/25$ ، $0/72$ و در دوره اعتبارسنجی برای ایستگاه دولت‌آباد $0/77$ ، $14/205$ ، $0/684$ و کرتیان $0/76$ ، $16/43$ ، $0/66$ به دست آمدند. با توجه به وجود داده‌های مفقود در برخی ایستگاه‌های دبی سنجی و همچنین عدم همخوانی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و ثبت شده در دوره پایه، جهت دستیابی به نتایج مطلوب، مدل مذکور در دوره‌های بالا و به‌دفعات زیاد اجرا گردیده است که در نهایت نتایج مدنظر در این دو ایستگاه حاصل گردید.



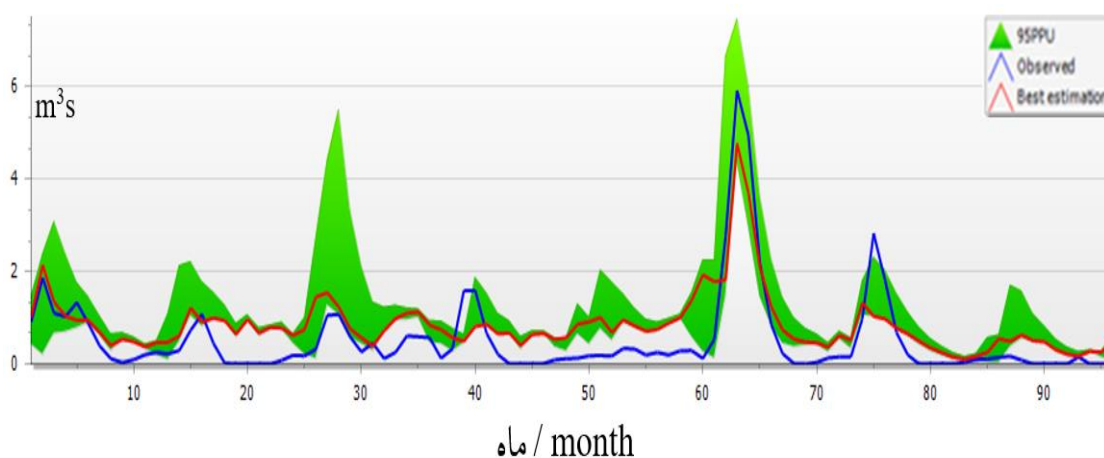
شکل ۳. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده رواناب ایستگاه دبی سنجی دولت آباد در دوره واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۱۱)



شکل ۴. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده رواناب ایستگاه دبی سنجی دولت آباد در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۲۰)



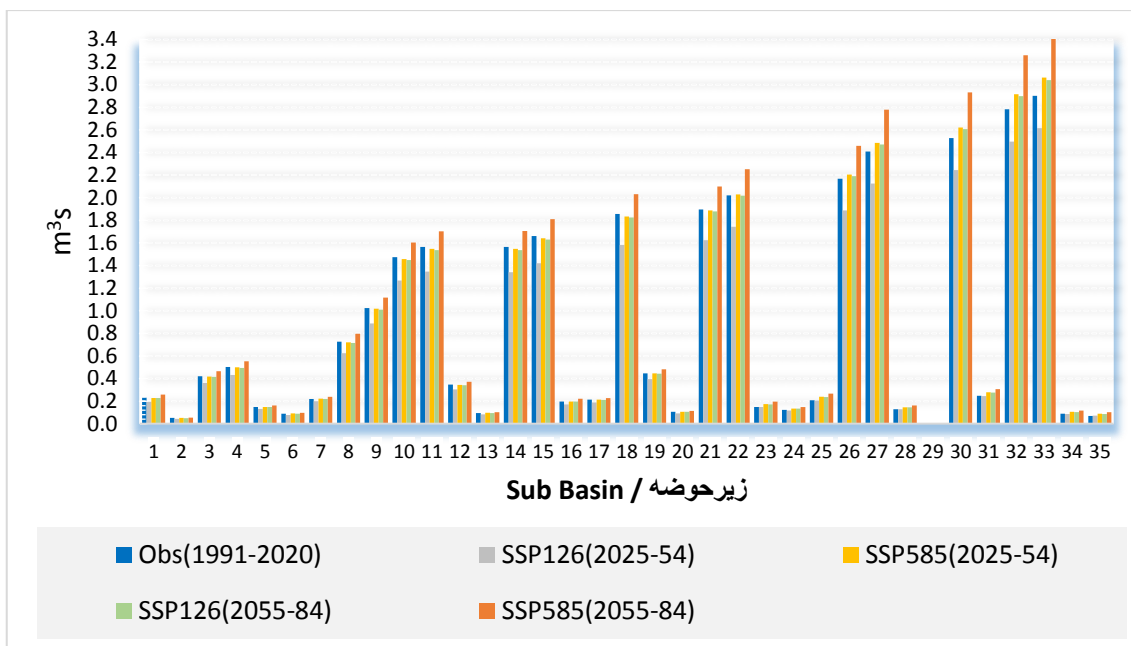
شکل ۵. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده رواناب ایستگاه دبی سنجی کرتیان در دوره واسنجی (۱۹۹۸-۲۰۱۱)



شکل ۶. هیدروگراف مشاهداتی و شبیه سازی شده رواناب ایستگاه دبی سنجی کرتیان در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۲۰)

دورنمای رواناب

پس از آینده‌نگری رواناب با استفاده از داده‌های بارش و دمای کمینه و دمای بیشینه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی تحت سناریوهای SSP1_2.6 و SSP5_8.5 مقادیر متوسط رواناب سالانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج موجود مقادیر پیش‌نگری شده در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی SSP1_2.6 در همه زیر حوضه‌ها به میزان قابل توجهی کمتر از دوره مشابه پایه خواهد بود. در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی SSP5_8.5 و دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP1_2.6 مقادیر آینده‌نگری شده در اکثر زیر حوضه‌ها اندکی بیشتر از دوره مشابه پایه محاسبه گردیده است. در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP5_8.5 مقادیر رواناب با اختلاف بیشتری نسبت به دوره مشابه پایه پیش‌نگری شد.



شکل ۷. مقایسه رواناب سالانه زیر حوضه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره‌های پایه و آینده نزدیک و آینده میانی تحت سناریوهای SSP126, SSP585

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۹ در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی SSP126 مقدار رواناب به میزان ۱۰,۰۳ درصد کاهش می‌یابد و در سایر دوره‌ها و سناریوها مقادیر رواناب بین ۳,۳۷ درصد در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP1_2.6 تا ۱۵,۵۶ درصد در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP5_8.5 به‌صورت افزایشی می‌باشد. یکی از دلایل افزایش رواناب در برخی سناریوها، افزایش بارش‌های شدید و فرین است و از طرف دیگر، کاهش بارش برف و ذوب سریع آن که ناشی از افزایش دما است، سهم رواناب را بیشتر می‌کند (Sheykh Rabiee et al., 2024). همچنین، از اثرات منفی افزایش دما، تغییر در الگوی فصلی بارش است (Heidary et al, 2020). در سناریوهای با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (مانند SSP5-8.5)، این اثرات تشدید شده و رواناب تا ۱۵,۵۶٪ افزایش می‌یابد. این پدیده، پیچیدگی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب را نشان می‌دهد و لزوم مدیریت سازگار با این شرایط را برجسته می‌سازد.

جدول ۹. میزان تغییر متوسط رواناب حوضه نسبت به دوره پایه

سناریو	دوره	متوسط رواناب (Centimeter Per Second)	مقدار تغییر	درصد تغییر
Observation	1991-2020	0.876	**	**
SSP1_2.6	2025-2054	0.768	-0.108	-10.03%
SSP5_8.5	2025-2054	0.891	0.015	4.30%
SSP1_2.6	2055-2084	0.885	0.010	3.37%
SSP5_8.5	2055-2084	0.990	0.114	15.56%

بحث

این پژوهش به بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز کشف رود با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی CMhyd و مدل هیدرولوژیکی SWAT پرداخته است. نتایج بررسی تغییرات بارشی نشان می‌دهند از نظر فصلی، فصول گذار بارش کاهش‌یافته و در بهار و پاییز کاهش جزئی در بیشتر سناریوها و دوره‌ها رخ خواهد داد، درحالی‌که تابستان و زمستان شاهد افزایش بارش (۳/۰۵ تا ۳۳/۵۷ درصد) هستند. در فصل زمستان، افزایش بارش می‌تواند به رویدادهای

فرین بارشی و خطر سیلاب منجر شود. فصل تابستان نیز علی‌رغم افزایش بارش، همچنان کم بارش‌ترین فصل باقی می‌ماند. این تغییرات نشان‌دهنده ماهیت پیچیده تغییرات اقلیمی و تأثیرات متغیر آن بر مناطق مختلف است. با مقایسه تغییرات دمای بیشینه و کمینه فصلی و سالانه حوضه مشخص گردید در همه سناریوها و همه فصل‌ها دما به‌صورت افزایشی خواهد بود که کمترین افزایش مربوط به سناریوی SSP126 و بیشترین افزایش دما تحت سناریوی SSP585 اتفاق خواهد افتاد.

مقایسه پژوهش‌های مختلفی که بر اساس مدل‌های مختلف گزارش ششم انجام‌شده نشان داد که نتایج برخی از تحقیقات انجام‌شده با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. به‌عنوان نمونه بابائیان و همکاران، ۲۰۲۳ تغییرات بارشی شرق ایران تحت دو سناریوی بدینانه و متوسط را بین ۱۵- تا ۳۷- درصد پیش‌بینی نمودند. همچنین Kazemi Rashkhavari et al (2014) علت کاهش رواناب حوضه آبریز رودخانه کشف رود را تغییرات پیش‌بینی‌شده بارش و دما در آینده عنوان نمودند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر رواناب قسمت علیای حوضه آبریز رودخانه کشف رود، انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش دما و بارش در بیشتر سناریوها، منجر به افزایش رواناب می‌شود. این تغییرات عمدتاً ناشی از افزایش شدت و فراوانی بارش‌های شدید و افزایش دما است. در بررسی تغییرات رواناب تحت سناریوهای مختلف در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه مشخص گردید در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی SSP126 مقدار رواناب به میزان ۱۰/۰۳ درصد کاهش می‌یابد و در سایر دوره‌ها و سناریوها مقادیر رواناب بین ۳/۳۷ درصد در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP1_2.6 تا ۱۵/۵۶ درصد در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP5_8.5 افزایش خواهد یافت. احتمالاً این افزایش به‌ویژه در اواخر زمستان یا تابستان، در اثر فراوانی بیشتر بارش‌های فرین یا حدی خواهد بود. بنابراین بهبود زیرساخت‌های آبخیزداری، افزایش بهره‌وری مصرف آب، و سرمایه‌گذاری در سیستم‌های آبیاری برای تضمین امنیت آب ضروری است. با توجه به نتایج موجود تغییر اقلیم تأثیرات متنوعی بر رواناب و مدیریت منابع آب منطقه مورد مطالعه خواهد داشت که این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مدیریتی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در جهت سازگاری با تغییرات اقلیمی استفاده شود.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

در این پژوهش که مستخرج از رساله دکتری است، سهم نویسندگان به‌صورت زیر مشخص می‌شود: حسین ایمانی پور، مسئولیت مفهوم‌سازی، مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل، انجام محاسبات، نگارش پیش‌نویس اولیه، ویرایش و مختار کرمی، عبدالرضا کاشکی با مسئولیت استادان راهنما و مرتضی اسمعیل نژاد با مسئولیت استاد مشاور مسئولیت بررسی و اصلاح نهایی را بر عهده داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری‌رسان بوده‌اند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- شیخ ربیعی، محمدرضا؛ پیروان، حمیدرضا؛ دانشکار آراسته، پیمان؛ اکبری، مهری و معتمدوزیری، بهارک. (۱۴۰۳). بررسی اثرات تغییرات اقلیم با استفاده از نتایج گزارش ششم هیات بین الدول بر میزان تولید رواناب و رسوب. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۶(۴)، ۵۵۰-۵۷۰. doi: 10.22092/ijwmse.2024.365664.2062
- حیدری، حامد؛ موسوی بایگی، محمد؛ اسماعیلی، کاظم و گلکاریان، علی. (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوضه با استفاده از مدل‌های SWAT و WEPP (مطالعه موردی: حوضه دهبار). تحقیقات آب‌و‌خاک/ایران، ۵۱(۴)، ۱۰۲۷-۱۰۴۰. doi: 10.22059/ijswr.2020.287152.668293
- کاویان، عطالله؛ گلشن، محمد؛ روحانی، حامد و اسمعیلی عوری، اباذر. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از الگوی SWAT. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۲)، ۱۹۷-۲۱۱. doi: 10.22059/jphgr.2015.54459
- بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانه‌داری، لیلی؛ کریمیان، مریم؛ کوزه‌گران، سعیده؛ کوهی، منصوره؛ فرامرزی، یاشار و ملیوسی، شراره. (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیک زمین و فضا، ۴۹ (۲)، ۴۳۱-۴۴۹. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>
- رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا، کوهی، منصوره. (۱۴۰۲). ارزیابی توانمندی سه روش آماری ریزمقیاس گردانی برون‌داد دما و بارش مدل‌های CMIP6 در حوضه آبریز کشف رود. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۵۳ (۱)، ۱۱۷-۱۳۲.
- کاظمی رخشواری، ایمان؛ اسدی وایقان، امیر و آذری، محمود. (۱۴۰۳). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر روی دبی حوضه آبریز رودخانه کشف رود با استفاده از مدل SWAT. نشریه علوم آب‌و‌خاک، ۲۸(۱)، ۹۳-۱۰۹. Doi:10.47176/jwss.28.1.58051
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی و صالح‌آبادی، نرگس. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). مجله ژئوفیزیک/ایران، ۱۵ (۱)، ۳۵-۵۴. <https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292>
- زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳ (۱)، ۷۵-۹۰. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.308361.1007551>

References

- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 563-572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>.
- Aryal, A., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2019). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 193-209. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2359-3>.
- Babaian, I., Modirian, R., Khazanehdari, L., Karimian, M., Kozegaran, S., Kouhi, M., Faramarzi, Y., & Malboosi, Sh. (2019). Iran's precipitation outlook in the 21st century using

- statistical downscaling of selected CMIP6 models using CMHyd software. *Physics of Earth and Space*, 49 (2), 431-449. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>. [In Persian].
- Baker, N. C., & Huang, H. P. (2014). A comparative study of precipitation and evaporation between CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles in semiarid regions. *Journal of Climate*, 27(10), 3731-3749. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00398.1>.
- Chu, T. W., & Shirmohammadi, A. (2004). Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1057-1073. doi: 10.13031/2013.16579.
- Delavar, M., Morid, S., Morid, R., Farokhnia, A., Babaeian, F., Srinivasan, R., & Karimi, P. (2020). Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology*, 585, 124762. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124762>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Guo, J., Yan, Y., Chen, D., Lv, Y., Han, Y., Guo, X., ... & Zhai, P. (2020). The response of warm-season precipitation extremes in China to global warming: an observational perspective from radiosonde measurements. *Climate Dynamics*, 54, 3977-3989. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05216-3>.
- Heidary, H., Mousavi, M., Esmaili, K., & 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), 1027-1040. doi: 10.22059/ijswr.2020.287152.668293. [In Persian].
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaei Nejad, S. H., & 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), 243-258.
- Kataoka, T., Tatebe, H., Koyama, H., Mochizuki, T., Ogochi, K., Naoe, H., ... & Watanabe, M. (2020). Seasonal to decadal predictions with MIROC6: Description and basic evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(12), e2019MS002035. doi:10.1029/2019MS002035.
- Kavian, A., Golshan, M., Rouhani, H., & Esmaali Auri, A. (2015). Simulation of runoff and sediment load of the Haraz River watershed of Mazandaran using the SWAT model. *Physical Geography Research*, 47(2), 197-211. doi: 10.22059/jphgr.2015.54459. [In Persian].
- Kazemi Rashkhavari, I., Asadi Vaighan, A., & Azari, M. (2014). Predicting the effects of climate change and land use on the discharge of the Kashfarud River basin using the SWAT model. *Journal of Soil and Water Sciences*, 28(1), 109-93. doi:10.47176/jwss.28.1.58051. [In Persian].
- Kim, H. J., Cho, K., Kim, Y., Park, H., Lee, J. W., Kim, S. J., & Chae, Y. (2020). Spatial assessment of water-use vulnerability under future climate and socioeconomic scenarios within a River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(7), 05020011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001235](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001235).
- Kim, J. H., Sung, J. H., Chung, E. S., Kim, S. U., Son, M., & Shiru, M. S. (2021). Comparison of Projection in Meteorological and Hydrological Droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5. *Sustainability*, 13(4), 2066. <https://doi.org/10.3390/su13042066>.
- Lee, J. Y., & Wang, B. (2014). Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, 42, 101-119.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi: 10.13031/2013.23153.
- Nikakhtar, M., Rahmati, S. H., Massah Bavani, A. R., & Babaeian, I. (2024). Mitigating the adverse impacts of climate change on river water quality through adaptation strategies: A Case Study of the Ardak Catchment, Northeast Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(9), 9131-9147. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05057-8>.

- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914. <https://doi.org/10.1029/2018WR024067>.
- Rabazanahary Tanteliniaina, M. F., Rahaman, M. H., & Zhai, J. (2021). Assessment of the future impact of climate change on the hydrology of the Mangoky River, Madagascar using ANN and SWAT. *Water*, 13(9), 1239. <https://doi.org/10.3390/w13091239>.
- Raghavan, S. V., Liu, J., Nguyen, N. S., Vu, M. T., & Liong, S. Y. (2018). Assessment of CMIP5 historical simulations of rainfall over Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 989-1002. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2111-z>.
- Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., Janbaz Ghobadi, G. R., & Kouhi, M. (2023). Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of CMIP6 models in the Kashfrud basin. *Journal of Climate Research*, 1402(53), 117-132. [In Persian].
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. (2016). Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. URL: <http://swat.tamu.edu/software/cmhyd>, 42.
- Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>.
- Sheykh Rabiee, M. R., Peyrowan, H. R., Daneshkar Arasteh, P., Akbary, M. and Motamedvaziri, B. (2024). Investigating the effects of climate change using the results of the sixth report of the inter-state delegation on the amount of runoff and sediment yield. *Watershed Engineering and Management*, 16(4), 550-570. doi: 10.22092/ijwmse.2024.365664.2062. [In Persian].
- Sun, H., & Cornish, P. S. (2005). Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 795-807. <https://doi.org/10.1002/hyp.5617>.
- Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., & Portmann, R. W. (2006). How often does it rain?. *Journal of climate*, 19(6), 916-934. <https://doi.org/10.1175/JCLI3672.1>.
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2004). *Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000: Model*. Cornell Library Technical Reports and Papers.
- Wang, B., Kim, H. J., Kikuchi, K., & Kitoh, A. (2011). Diagnostic metrics for evaluation of annual and diurnal cycles. *Climate dynamics*, 37, 941-955. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0877-0>.
- Wang, J., Hu, L., Li, D., & Ren, M. (2020). Potential impacts of projected climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Wabash River Basin. *Advances in Meteorology*, (1), 9698423. <https://doi.org/10.1155/2020/9698423>.
- Yan, Y., Lu, R., & Li, C. (2019). Relationship between the future projections of Sahel rainfall and the simulation biases of present South Asian and Western North Pacific rainfall in summer. *Journal of Climate*, 32(4), 1327-1343. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0846.1>.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., ... & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931-965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., Salehabadi, N. (2021). Investigation of Iran's temperature anomalies and trends in different climatic zones using coupled models of the Climate Change Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). *Iranian Journal of Geophysics*, 15 (1), 35-54. <https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292>. [In Persian].
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research*, 53(1), 75-90. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.308361.1007551>. [In Persian].
- Zazulie, N., Rusticucci, M., & Raga, G. B. (2018). Regional climate of the Subtropical Central Andes using high-resolution CMIP5 models. Part II: future projections for the twenty-first century. *Climate dynamics*, 51, 2913-2925. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4056-4>.

Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., ... & Srbinovsky, J. (2020). The Australian earth system model: ACCESS-ESM1. 5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 193-214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/ES19035>.