Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

# Investigating the impact of changing climatic parameters on runoff using the Budyko-Zhang framework (Case study: Parts of QareQom watershed)

**Solale Kabiri Shah Abad[1], Ali Golkarian[*2], Mohammad Taghi Dastoorani[3]**

1. M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: solale.kabiri666@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: golkarian@um.ac.ir
3. Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: dastorani@um.ac.ir

**ARTICLE INFO**

**Article type:**
Research Paper

**Article history**
**Received:** 28 August 2023
**Revised:** 8 October 2023
**Accepted:** 28 October 2023
**Published online:** 06 June 2024

**Keywords:**
CORDEX, GFDL-ESM2M model, Mann-Kendall, rainfall change, temperature change

**ABSTRACT**

Climate change is one of the main challenges that has affected human life in recent decades. It plays a significant role in changing runoff due to its effects on temperature and precipitation. Therefore, evaluating this phenomenon is very important for assessing water resources and land management based on sustainable development. This research aimed to investigate the effects of climate change on runoff using the Budyko framework. Four sub-watersheds named Olang Asadi, Ardak Band Sarooj, Zoshk, and Kardeh Dam were selected from the QareQom watershed. Then, using the downscaled temperature and precipitation data of the CORDEX project of the GFDL-ESM2M model, under two emission scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), the runoff variation was evaluated for the times period of 2006-2100. The Nash-Sutcliffe statistic for the results produced by the Budyko-Zhang model for the studied areas was between 0.72-0.87, which indicated the appropriate performance of this model in runoff estimation. In addition, the results of the GFDL-ESM2M model indicated an increase in temperature and a decrease in rainfall under both RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios. The temperature forecasts from GCM indicated a warmer climate in the future with a significant upward trend and a significant decrease in precipitation with a significant downward trend, both of which play an important role in reducing future runoff. The results of the Mann-Kendall test showed that the runoff in all the studied areas under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and during the period of 1989-2100 had a downward trend. It can be concluded that the increase in temperature and also the decrease in precipitation in the future can reduce the runoff.

Citation: Kabiri Shah Abad, S., Golkarian, A., & Dastorani, M. T. (2024). Investigating the impact of changing climatic parameters on runoff using the Budyko-Zhang framework (Case study: Parts of QareQom watershed). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(1), 67-88.

**DOR:** 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7

**Publisher:** Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

***Corresponding author:** Ali Golkarian
**Address:** *Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
**Tel:** +989131576912
**Email:** golkarian@um.ac.ir

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

# Investigating the impact of changing climatic parameters on runoff using the Budyko-Zhang framework (Case study: Parts of QareQom watershed)

**Solale Kabiri Shah Abad[1], Ali Golkarian[*2], Mohammad Taghi Dastoorani[3]**

1. MSc Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: solale.kabiri666@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: golkarian@um.ac.ir
3. Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: dastorani@um.ac.ir

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** The importance and role of water in human life and the stability of the ecosystems is not hidden from anyone, therefore it has always been the focus of researchers and experts. The prediction results of many models (General Circulation Models) show that the amount and intensity of changes in climate phenomena such as rainfall and temperature are increasing in different regions of the world. The International Panel on Climate Change (IPCC) stated that the increase in temperature in successive decades causes considerable changes in the hydrological cycle such as the increase of water vapor in the atmosphere, changes in the pattern and intensity of precipitation, changes in extreme events, reduction of snow cover, widespread melting of ice as well as changes in soil moisture and runoff. Quantitative investigations of climate change effects on hydrological characteristics such as runoff discharge can be necessary to develop sustainable solutions for water resource management and help decision-makers for future planning. The effects of land use, vegetation, and climate change on runoff can generally be identified using hydrological models. In general, increasing surface runoff can increase the occurrence of floods and droughts and decrease water resources. To investigate the impact of climate change in future periods, first, the future climate variables must be simulated. By summarizing the previous research regarding the effects of climate change on hydrological processes and its importance in water resources management, the main purpose of this research was to evaluate the effects of climate change on two parameters of rainfall and temperature, and consequently on runoff in selected areas of northeastern Iran.

**Methodology:** In this research, four sub-watersheds of Zoshk, Olang Asadi, Ardak Band Sarooj, and Karde Dam were selected from the QareQom watershed with different morphological and geological characteristics. Then, data related to monthly precipitation, monthly minimum, maximum, and mean temperature, monthly evaporation, and monthly discharge were obtained from the meteorological and hydrometric stations located in the study area. In addition, to investigate the impacts of climate change on runoff in future time periods, the GFDL-ESM2M model related to the fifth report was used along with two released scenarios of RCP8.5 and RCP4.5 for the studied area. To determine the trend of predicted data of temperature, precipitation, and runoff in the future, the Mann-Kendall test was used. The Budyko's framework was also used to estimate future runoff. To evaluate the accuracy of the Budyko-Zhang model, the estimated data were compared to those measured in the hydrometric station using three statistics including determination coefficient ($R^2$), relative error (RE) and Nash-Sutcliffe coefficient (NSC).

**Results and Discussion:** The results showed that the Budyko-Zhang model has a good ability to estimate the runoff of the studied areas so that the value of $R^2$ varies from 0.73 to 0.94 and the NSC was obtained above 0.7 in all areas, which shows the proper efficiency of the model. Based on the results, temperature has an upward and significant trend during the statistical period (1989-2100) in all areas in both RCP. Precipitation has a downward trend in the future, but this trend was not statistically significant in all areas under RCP4.5, whereas

***Corresponding author:** Ali Golkarian
**Address:** Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
**Tel:** +989131576912
**Email:** golkarian@um.ac.ir

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

in RCP8.5, it showed a significant trend. In addition, the runoff had a decreasing trend in the studied period, which was significant in Karde station in both scenarios. In the Ardak and Zoshk stations, this trend was significant under RCP4.5 but not significant under RCP8.5, while these results were the opposite in the Olang Asadi station.

**Conclusion:** As a conclusion of this research, the following can be mentioned:

- The results of the Budyko-Zhang model, with an $R^2$ coefficient of about 0.73-0.94, and a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.72-0.87, indicate high agreement between observed and estimated runoff values, which shows very good ability of the model in estimating future runoff.
- Compared to the base period, the GCM model predicted higher temperature and lower precipitation for the future in all four sub-watersheds.
- The results of the Mann-Kendall test showed that in all sub-watersheds, temperature has an upward and significant trend under both scenarios, while the precipitation has a downward trend in the future, which was not significant under RCP4.5 scenario, and significant under the RCP8.5 scenario.
- Finally, it can be said that the temperature forecast from the GFDL-ESM2M model indicates a warmer climate in the future and plays an important role in reducing future runoff, also, the predicted decrease in rainfall can lead to the reduction of runoff in the future years.

**Ethical Considerations**

**Data availability statement:** All information and results are presented in the text of the article.
**Funding:** This research is derived from the M.Sc. Thesis at the Ferdowsi University of Mashhad.
**Authors' contribution:** This research was prepared by Solale Kabiri in the form of a preliminary design and then modified and completed by Ali Golkarian and Mohammad Taghi Dastoorani.
**Conflicts of interest:** The author of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.
**Acknowledgment:** Khorasan Razavi Regional Water Company is thanked and appreciated for its sincere cooperation in providing statistics and information.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

# بررسی تأثیر تغییر مؤلفه‌های اقلیمی بر رواناب با استفاده از چهارچوب بودیکو- ژانگ (مطالعه موردی: بخش‌هایی از حوزه آبخیز قره‌قوم)

**سلاله کبیری شاه‌آباد[۱]، علی گلکاریان[۲*]، محمدتقی دستورانی[۳]**

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. solale.kabiri666@gmail.com
۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. golkarian@um.ac.ir
۳. استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. dastorani@um.ac.ir

**مشخصات مقاله**

**نوع مقاله:**
پژوهشی

**تاریخچه مقاله**
**دریافت:** ۲۰ شهریور ۱۴۰۲
**بازنگری:** ۱۶ مهر ۱۴۰۲
**پذیرش:** ۶ آبان ۱۴۰۲
**انتشار برخط:** ۱۶ خرداد ۱۴۰۳

**واژه‌های کلیدی:**
پیش‌بینی بارش، پیش‌بینی دما، مدل GFDL-ESM2M، من-کندال، CORDEX

**چکیده**

فرآیند تغییر اقلیم یکی از اصلی‌ترین چالش‌هایی است که در دهه‌های اخیر، زندگی انسان‌ها را تحت تأثیر قرار داده است و به جهت تأثیر بر دما و بارش، نقش بسزایی در تغییر رواناب دارد. از این‌رو درک آن بر ارزیابی منابع آب و تحولات راهبردی سازگار، اهمیت زیادی دارد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از چهارچوب بودیکو است. به این منظور چهار زیرحوزه آبخیز اولنگ اسدی، ارداک بند ساروج، زشک و سد کارده از حوزه آبخیز قره‌قوم انتخاب شد. سپس با به کارگیری از داده‌های دما و بارش ریزمقیاس شده پروژه CORDEX مدل GFDL-ESM2M تحت دو سناریو انتشار (RCP4.5 و RCP8.5)، میزان تغییرات رواناب طی بازه زمانی (۲۱۰۰-۲۰۰۶) بررسی شد. نتایج ارزیابی مدل بودیکو-ژانگ به کمک آماره نش-ساتکلیف بین ۰/۸۷-۰/۷۲ به‌دست آمد که نشان‌گر کیفیت مناسب برآورد رواناب است. هم‌چنین، نتایج مدل GFDL-ESM2M حاکی از افزایش دما و کاهش بارندگی تحت هر دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 بود. پیش‌بینی‌های دما از GCM بیان‌گر آب و هوای گرم‌تر در آینده با روند صعودی و معنادار و کاهش قابل توجه بارش با روند نزولی و معنادار بود که هر دو عامل، نقش مهم و مثبتی در کاهش رواناب آینده دارند. نتایج حاصل از آزمون من-کندال نشان داد که رواناب در همه زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹، روندی نزولی داشته است و بنابراین می‌توان گفت افزایش دما و هم‌چنین کاهش بارش در آینده می‌تواند موجب کاهش میزان رواناب شود.

**استناد:** کبیری شاه‌آباد، سلاله، گلکاریان، علی، و دستورانی، محمدتقی (۱۴۰۳). بررسی تأثیر تغییر مؤلفه‌های اقلیمی بر رواناب با استفاده از چهارچوب بودیکو- ژانگ (مطالعه موردی: بخش‌هایی از حوزه آبخیز قره‌قوم). *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۲(۱)، ۶۷-۸۸.

**DOR:** 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران
© نویسندگان

## مقدمه

* **نویسنده مسئول:** علی گلکاریان
**نشانی:** گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
**تلفن:** ۰۹۱۳۱۵۷۶۹۱۲
**پست الکترونیکی:** golkarian@um.ac.ir

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

اصطلاح اقلیم به میانگین بلندمدت آب و هوای یک منطقه اشاره دارد. آب و هوا می‌تواند در طول زمان گرم‌تر یا سردتر شود یا میانگین هر یک از اجزای آن افزایش یا کاهش یابد، اما تغییر اقلیم یک تغییر غیرقابل برگشت در میانگین شرایط آب و هوایی است که در یک منطقه رخ می‌دهد (YoosefDoost et al., 2018). در سال‌های اخیر، تأثیرات تغییر اقلیم جهانی تشدید شده و این امر منجر به انجام تحقیقات فزاینده‌ای جهت بررسی اثرات آن در مناطق مختلف شده است (Arantes et al., 2021; He et al., 2019). هیئت بین دولتی تغییر اقلیم بر این باورند که تنوع آب و هوا منجر به تغییر در الگوهای بارش جهانی شده است (IPCC, 2007)، در نتیجه چرخه آب جهانی را تغییر داده و منجر به توزیع مجدد زمانی و مکانی منابع آب شده است (Murry et al., 2012; Milly et al., 2005). گزارش IPCC بیان می‌کند که افزایش دما در دهه‌های متوالی، باعث تغییرات بزرگ مقیاس در چرخه هیدرولوژیکی مانند افزایش بخار آب موجود در اتمسفر، تغییر الگو و شدت بارش، تغییر در وقایع حدی، کاهش پوشش برف و ذوب گسترده یخ و تغییر در رطوبت خاک و رواناب می‌شود. ارزیابی دسترسی به منابع آب در یک اقلیم درحال تغییر، یک عامل تعیین کننده برای ارتقای توسعه پایدار در یک منطقه است (Lee et al., 2023).

ارزیابی کمی از اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه (دبی) به منظور توسعه راه‌حل‌های پایدار برای مدیریت منابع آب ضروری است (Stednick, 1996; Yifru et al., 2021) و کمک زیادی به برنامه‌ریزان برای دوره‌های آتی خواهد کرد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹). اثرات تغییر کاربری و پوشش گیاهی و تغییرات آب و هوایی بر رواناب را می‌توان به‌طور کلی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی شناسایی کرد (Praskievicz & Chang, 2009). این مدل‌ها چهارچوب‌های ارزشمندی را برای بررسی تغییرات میان مسیرهای هیدرولوژیکی مختلف که توسط آب و هوا و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شوند، فراهم می‌کنند (Leavesley, 1994; Jiang et al., 2007; Wang et al., 2010). به‌طور کلی می‌توان اظهار داشت که تشدید رواناب سطحی باعث ایجاد سیل، خشک‌سالی و کاهش ذخایر می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روی سامانه‌های مختلف در دوره‌های آتی، ابتدا باید متغیرهای اقلیمی آینده شبیه‌سازی شوند (احمدی و همکاران، ۲۰۱۹). ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیکی در مورد تغییرات آب و هوای آینده از اهمیت بسیاری برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای مدیریت منابع آب و سیستم‌های محیطی برای مقابله با تنوع هیدروکلیمیایی برخوردار است (Li et al., 2020). بررسی روند تغییرات اقلیمی در ایران که قسمت بزرگی از آن دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است، اهمیت زیادی دارد. درسال‌های اخیر مطالعات انجام شده توسط پژوهش‌گران در خصوص بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب با استفاده از مدل‌های آماری در مقیاس‌های گوناگون، افزایش چشم‌گیری داشته است که این مسأله حاکی از اهمیت این موضوع دارد. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۵) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه حوزه آبخیز تویسرکان همدان را با استفاده داده‌های ایستگاه آب‌سنجی، هواشناسی و اطلاعات مربوط به ویژگی‌های خاک‌شناسی و توپوگرافی منطقه بررسی کردند. نتایج نشان داد که در اثر کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی، حجم رواناب خروجی کاهش خواهد یافت. احمدی و همکاران (۱۳۹۹) از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و IHACRES جهت ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوزه آبخیز کن استفاده کردند. نتایج مطالعه نشان داد که تغییرات رواناب در دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۰ تحت RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۴- ، ۲۶ و ۲- درصد در مدل ANN و ۲۶ ، ۲۸ و ۳۳ درصد در مدل IHACRES بود. Roderick و Farquhar (۲۰۱۱) با استفاده از چهارچوب بودیکو، تبخیر و تعرق (E) و رواناب (Q) طولانی مدت را در جنوب شرقی استرالیا پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند که ۱۰ درصد تغییر در بارندگی، با ثابت در نظر گرفتن سایر موارد، منجر به ۲۶ درصد تغییر در رواناب می‌شود. Li و همکاران (۲۰۲۰) از چهارچوب بودیکو برای شناسایی و نسبت دادن تغییرات رواناب به تغییر اقلیم و پوشش گیاهی در حوزه آبخیز رودخانه زرد میانه چین استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که رواناب سالانه در طی ۳۰ سال گذشته روند کاهشی معناداری داشت. Lei و همکاران (۲۰۲۱) سهم تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات رواناب در دریاچه پویانگ (PLB)[1] از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۵ را با استفاده از آزمون Mann-Kendall، Moving-T و مدل رگرسیون خطی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مقیاس زمانی سالانه، تغییرات آب و هوایی ۹۱/۸۸ درصد از افزایش عمق رواناب را به خود اختصاص داده است. Sharifi و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از نه روش مختلف، تأثیر تغییرات انسانی و تغییرپذیری اقلیم بر تغییرات رواناب را در دو حوزه آبخیز فلات مرکزی ایران، قلعه شاهرخ و جوانمردی، تعیین کردند. نتایج حاصل از این پژوهش بیان کرد که متغیرهای اقلیمی نقش غالبی در کاهش رواناب حوزه آبخیز قلعه شاهرخ دارد و ۶۰/۲ درصد از کل کاهش را به خود اختصاص می‌دهد. Zhao و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات و محرک‌های اصلی رواناب ناشی از ذوب برف در حوزه آبخیز رودخانه کایدو (KRB)[2] مرتبط با سه سناریوی اقلیمی آینده را ارزیابی کردند. نتایج روند کاهشی قابل توجه رواناب فقط در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان داد. Xu و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای، اثرات

[1] Poyang Lake Basin
[2] Kaidu River Basin

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی بر رواناب را در بخش میانی و پایین‌دست حوزه آبخیز رودخانه شیانگ (SRB)[1]، جنوب غرب چین، بررسی کردند. نتایج نشان داد که روند کاهشی قابل‌توجهی در رواناب سالانه به‌طور کلی در بخش میانی و پایین‌دست SRB وجود دارد. سهم فعالیت‌های انسانی در کاهش رواناب ۸۸/۷۲ درصد بود، در حالی که سهم تغییرات آب و هوا در کاهش رواناب تنها ۱۱/۲۸ درصد بود. Alamdari و همکاران (۲۰۲۲) پاسخ رواناب و بارهای آلاینده حوزه آبخیز برود ران[2]را به تغییرات آب و هوایی و تغییرات کاربری اراضی/پوشش (LULC)[3] پیش‌بینی شده، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بر اساس سناریوی RCP8.5، پیش‌بینی می‌شود که میزان بارش سالانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از سناریوی RCP4.5 افزایش یابد و تغییرات اقلیمی به احتمال زیاد تغییر فصلی رواناب را برای هر دو RCP افزایش خواهند داد.

به‌طور کلی، مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب، به روش‌های مختلف و اکثرا با نظر به معیارهای موثر اقلیمی، انسانی و هیدرولوژیکی، در نقاط مختلف جهان انجام شده است. می‌توان گفت هدف تمامی پژوهش‌ها در این زمینه، شناسایی عوامل موثر بر تغییرات رواناب و به دنبال آن ارائه اطلاعات اولیه به مدیران جهت اتخاذ تصمیمات صحیح و حیاتی در خصوص مدیریت بهینه برداشت آب و کاهش هرچه بیش‌تر تأثیر منفی فعالیت‌های انسانی و سازگاری بیش‌تر با تغییرات اقلیمی است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به این‌که بیش‌تر مساحت ایران از لحاظ اقلیمی جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و نیز در اکثر نقاط کاهش محسوس رواناب مشاهده می‌شود، درک اثرات ثانویه تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوزه آبخیز از اهمیت بالایی برخوردار است (Niyazi و همکاران، ۲۰۲۰). حوزه آبخیز قره‌قوم دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که در سال‌های اخیر به‌دلیل خشک‌سالی همواره با کمبود منابع آب سطحی رو به رو بوده، ضمن آن‌کـه توسعه بیش از حد کشاورزی، رشد اقتصادی و فعالیت‌های انسانی موجب تشدید کاهش رواناب سطحی شده است (عباسی، ۱۳۹۷). پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر نشان دادند که از چهارچوب بودیکو جهت ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم و اثرات آن بر رواناب در سراسر دنیا استفاده شده ولی تابه‌حال این مدل برای شرق ایران، اجرا نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر، برای اولین بار این مدل در زیرحوزه‌های آبخیز کوهستانی قره‌قوم اجرا شد که پس از کالیبراسیون و تایید کارایی مدل، امکان استفاده از ضرایب منطقه‌ای آن برای حوزه‌های آبخیز مشابه در منطقه مورد مطالعه قابل تعمیم است. با جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده در خصوص تأثیر تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی و اهمیت آن در مدیریت منابع آب، هدف کلی از تحقیق حاضر، بررسی تغییر اقلیم در دو پارامتر بارندگی و دما و تأثیر آن بر رواناب در حوزه‌های آبخیز منتخب شمال شرق ایران است.

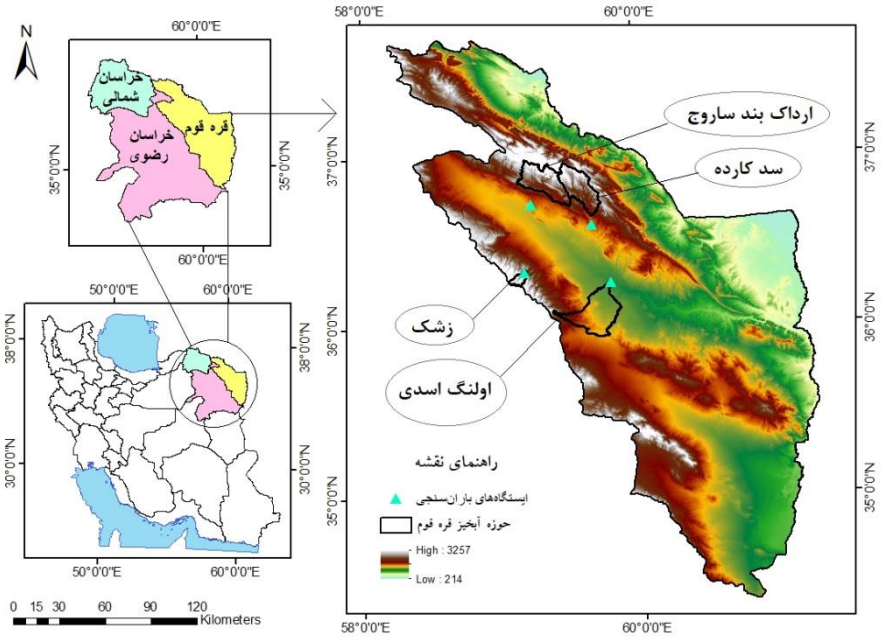
## مواد و روش تحقیق

### محدوده مورد مطالعه

برای محدوده مورد مطالعه این پژوهش، چهار زیرحوزه آبخیز زشک، اولنگ اسدی، ارداک بند ساروج و سد کارده از حوزه آبخیز قره‌قوم با خصوصیات ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی مختلف انتخاب شد. حوزه آبخیز قره‌قوم واقع در شرق و شمال خراسان رضوی و در مرز ایران با افغانستان و ترکمنستان قرار دارد و بخش بسیار کوچکی از خراسان شمالی را نیز دربر می‌گیرد. این محدوده شامل رودهایی است که به رود تجن می‌ریزند. بخشی از این رودها در خاک ایران وارد تجن شده و برخی پس از ورود به ترکمنستان وارد کانال قره‌قوم می‌شوند. رودهای مهم این حوزه، هریرود و کشف‌رود هستند (شکل۱). حوزه آبخیز قره‌قوم یکی از حوزه‌های آبخیز باز ایران است که در تقسیم‌بندی حوزه‌های آبخیز ایران، حوزه آبخیز اصلی به‌شمار می‌رود (افشین، ۱۳۷۳). مساحت کل حوزه آبخیز برابر ۴۴۱۶۵ کیلومتر مربع و بین مختصات جغرافیایی ۵۸ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شرقی گسترده شده است. مهـم‌تـرین رشـته کـوه‌هـا شامل هزارمسجد از سمت شمال و شـمال غربـی و بینـالود در غـرب اسـت. به‌دلیل عواملی مانند موقعیت جغرافیایی، وجود کوه‌های مرتفع و عظیم و مناطق کویری، اقلیم تا حد زیادی خشک و نیمه‌خشک است و این شرایط سبب به وجود آمدن بوم‌سازگان حساس شده است (Ghahraman & Shafiei, 2009). در جدول ۱ مشخصات و موقعیت جغرافیایی زیرحوزه‌های آبخیز مورد استفاده بیان شده است.

[1] Shiyang River Basin
[2] Broad Run
[3] Land Use/Land Cover

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قره‌قوم در استان خراسان رضوی و ایران و پراکندگی ایستگاه‌ها**

**Figure 1- Location of the GhareQom in Khorasan Razavi province and in the country and dispersion of stations**

**جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی**

**Table 1- Location of meteorological stations**

| ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع | نوع ایستگاه |
|---|---|---|---|---|
| ارداک بند ساروج | 59.24 | 36.73 | 1320 | باران‌سنجی |
| سد کارده | 59.68 | 36.61 | 1279 | باران‌سنجی |
| اولنگ اسدی | 59.80 | 36.25 | 912 | باران‌سنجی |
| زشک خراسان | 59.38 | 36.33 | 1832 | باران‌سنجی |

## روش‌شناسی پژوهش

### جمع آوری داده‌ها

در این پژوهش، داده‌های مربوط به بارش ماهانه، دمای حداقل، حداکثر و متوسط ماهانه، تبخیر ماهانه و دبی ماهانه از ایستگاه‌های باران‌سنجی، سینوپتیک و هیدرومتری چهار زیرحوزه آبخیز ارداک بند ساروج، سد کارده، اولنگ اسدی و زشک اخذ و پس از بررسی کیفیت داده‌ها و رفع نواقص، بلندترین پایه زمانی ممکن (۲۰۲۰-۱۹۹۰) انتخاب شد.

### استخراج داده‌های تغییر اقلیم

در این مطالعه برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب در سال‌های آینده، از داده‌های گزارش پنجم و مدل GFDL-ESM2M که دقت آن توسط یعقوب‌زاده و رمضانی (۱۳۹۸) تائید شده بود، به همراه سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 که به‌ترتیب سناریوهای میانه و خیلی بدبینانه نامیده می‌شوند، برای منطقه مورد مطالعه استفاده عمل آمد. بدین منظور داده‌های دمای میانگین و بارش (که جزء اصلی ترین متغیرهای موثر بر دبی هستند) مدل GFDL-ESM2M از طریق برونداد مستقیم مدل‌های پویایی ریزمقیاس شده پروژه کوردکس-منا (CORDEX –MNA) با تفکیک ۴۴ کیلومتری تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCP8.5 و RCP4.5) طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۰۶ دریافت شد.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

## آزمون شناسایی و تحلیل روند

برای بررسی وجود یا عدم وجود روند در داده‌های اقلیمی و روان‌آب از روش من-کندال استفاده شد. آزمون من-کندال ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendall (۱۹۷۵) تکامل یافت. این آزمون جزو متداول‌ترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به شمار می‌رود. من-کندال یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تعیین روند سری‌های زمانی هیدرولوژیکی است (McBean و Motiee، ۲۰۰۶). مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر است:

الف) محاسبه اختلاف بین تک تک مشاهدات با یکدیگر و اعمال تابع علامت و استخراج پارامتر S که از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k) \quad (۱)$$

که در آن: n تعداد مشاهدات و $x_j$ و $x_k$ به‌ترتیب داده‌های j ام و k ام سری‌اند. تابع علامت نیز توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$sgn = \begin{cases} +1 & \text{اگر} \quad (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{اگر} \quad (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{اگر} \quad (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (۲)$$

ب) محاسبه واریانس که از رابطه‌های (۳) و (۴) به‌دست می‌آید:

$$Var = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^{m} t_i\,(t_i-1)(2t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (۳)$$

$$Var = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (٤)$$

که در نهایت n تعداد داده‌های مشاهده‌ای، m معرف تعداد سری‌هایی که در آن حداقل یک داده تکراری وجود داشته باشد و t معرف داده‌های با ارزش یکسان است.

ج) نهایتاً مقدار آماره z توسط یکی از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{var\ (s)}} & \text{اگر} \quad s > 0 \\ 0 & \text{اگر} \quad s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{var\ (s)}} & \text{اگر} \quad s < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

در این پژوهش برای انجام این آزمون، از پکیج اصلاح شده من-کندال در زبان برنامه‌نویسی R استفاده شد.

## چهارچوب بودیکو و معادله تجربی ژانگ

چهارچوب بودیکو، تعادل بلندمدت آب و انرژی از طریق رابطه منحنی بین شاخص تبخیر و شاخص خشکی را توصیف می‌کند. چندین معادله تجربی که رابطه بین شاخص تبخیر و شاخص خشکی را تفسیر می‌کنند، در چهارچوب بودیکو با اعتبارسنجی در حوزه‌های آبخیز مختلف ارائه شده است، از جمله این معادلات تجربی ارائه شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۰۱)، به‌دلیل ویژگی‌های مختصر و اجرای آسان آن به‌طور گسترده استفاده شده است. در تحقیق حاضر از این مدل جهت پیش‌بینی متوسط رواناب سالانه استفاده شد. رابطه (۶) معادله تجربی ژانگ در چهارچوب Budyko که به‌عنوان مدل Budyko-Zhang می‌نامند، را شرح می‌دهد.

$$\frac{E}{P} = \frac{1+\omega(E_0/P)}{1+\omega(E_0/P)+(E_0/P)^{-1}} \quad (٦)$$

که در آن ω ضریب آب موجود در گیاه و نشان‌گر تفاوت نسبی در نحوه استفاده گیاهان از آب خاک برای تعرق است. Zhang و همکاران (۲۰۰۱) این پارامتر را عمدتا به‌دلیل تفاوت در عمق منطقه ریشه تفسیر می‌کنند. ضریب ω به‌عنوان فاکتور مؤثر در تبخیر و تعرق واقعی، بر اساس میزان رواناب (Q)، بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل ($E_0$) به‌دست می‌آید. این رابطه نشان می‌دهد که متوسط تبخیر و تعرق سالانه دراز مدت تحت شرایط آب و هوایی یکسان عمدتاً توسط ویژگی‌های پوشش گیاهی تعیین می‌شود و این تفاوت ممکن است به نحوه استفاده انواع پوشش گیاهی از آب خاک نسبت داده شود. پارامتر ω ابتدا، بر اساس میانگین داده‌های مشاهده‌ای سالانه بارش و رواناب به‌دست آمد ولی به‌دلیل مناسب نبودن و عدم تطابق روند داده‌ها، از نتایج خوبی برخوردار نبود. در ادامه این ضریب مجددا بر اساس تک‌رگبارهایی با رواناب منطبق بر میزان بارش برآورد شد. $E_0$، E و P به‌ترتیب تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر)، تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) و بارش (میلی‌متر) در حوزه آبخیز است. E را می‌توان از داده سنجش از دور که یکی از منابع اطلاعاتی مفید برای زمینه‌های

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

مختلف تحقیقاتی است، از مدل بیلان آب برای یک دوره مطالعه طولانی تخمین زد. در محاسبه $E_0$، روش‌های زیادی در دسترس است. با در نظر گرفتن نیازهای داده و تعداد پارامترها، از روش Blaney-Criddle مبتنی بر دما استفاده شد که در آن فقط متغیر دما و دو پارامتر درگیر هستند. رابطه بین دما و تبخیر و تعرق پتانسیل به شرح زیر است:

$$E_0 = ka(0.46T + 8.13) \quad (۷)$$

$E_0$ تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر) ، T میانگین دمای هوا (°C) ، a درصد ساعات شبانه روز برای دوره (روزانه یا ماهانه) از کل ساعات روز در سال است. ضریب k استفاده ماهانه بسته به نوع پوشش گیاهی، محل و فصل آن و مقدار اولیه آن در این مطالعه طبق ارجاع به Tabari و همکاران (۲۰۱۳)، ابتدا ۰/۸۵ تعیین شد و سپس با استفاده از داده‌های تشتک تبخیر موجود، این ضریب برای هر زیرحوزه آبخیز اصلاح شد. سپس از مقادیر $E_0$ بر اساس روش BC با پارامتر k اصلاح شده میانگین گرفته و از آن‌ها برای تخمین پارامتر ω استفاده شد.

### ارزیابی عملکرد مدل Budyko-Zhang

پس از تعیین مقدار پارامتر ω، میزان رواناب سالانه محاسبه شد. اولین اقدام به‌منظور بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی رواناب زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه، بررسی کارایی مدل به کارگرفته شده است. بدین منظور که آیا مدل بودیکو-ژانگ قابلیت پیش‌بینی داده‌های آینده را دارد یا خیر؟ در گام بعد، برای ارزیابی صحت عملکرد مدل بودیکو-ژانگ، داده‌های مشاهده‌ای از ایستگاه باران‌سنجی با داده‌های برآوردی تحت سه شاخص، ضریب تعیین ($R^2$)، خطای نسبی (RE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSC) طبق رابطه‌های ۱۰-۸ محاسبه شد. معیار ضریب تعیین رابطه میان مجذور مربعات خطا و واریانس مقادیر مشاهداتی را بیان می‌کند و نشان می‌دهدکه چند درصد تغییرات متغیر های وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل تبیین می شود. هرچه این شاخص به ۱ نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل بهتر است. RE به نسبت خطای مطلق ناشی از شبیه‌سازی به مشاهده اشاره دارد، که می‌تواند اعتبار مدل را نشان دهد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل معتبرتر است. NSC برای ارزیابی کیفیت مدل به‌کار می‌رود و مقادیر نزدیک به عدد یک، اندازه‌گیری خوبی از تناسب بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi}-\overline{Q_o})(Q_{si}-\overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi}-\overline{Q_o})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_{si}-\overline{Q_s})^2}} \right)^2 \quad (۸)$$

$$RE = \frac{\overline{Q_s}-\overline{Q_o}}{\overline{Q_o}} \quad (۹)$$

$$NSC = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi}-Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi}-\overline{Q_o})^2} \right) \quad (۱۰)$$

## نتایج و بحث

### محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل ($E_0$)

خط آبی در شکل ۲ منحنی‌های محاسبه شده $E_0$ را با استفاده از روش BC با مقدار اولیه پارامتر k و خط قرمز منحنی‌ها را بعد از اصلاح پارامتر k نشان می‌دهد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار k، ۰/۸۸، مربوط به زیرحوزه آبخیز اولنگ اسدی و کم‌ترین مقدار، ۰/۶۳، مربوط به زیرحوزه آبخیز زشک است. زیرحوزه آبخیز اولنگ به‌دلیل قرار گرفتن در ارتفاع کم‌تر نسبت به سایر زیرحوزه‌های آبخیز، متوسط دمای بیش‌تری را در طول سال تجربه می‌کند و همین امر سبب افزایش تبخیر و تعرق (تشتک تبخیر) و بالا رفتن ضریب k می‌شود. هم‌چنین، زیرحوزه آبخیز زشک دارای بیش‌ترین ارتفاع است و متوسط دمای کم‌تری دارد که موجب کاهش تبخیر و تعرق و پایین آمدن این ضریب شده است. Li و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهشی مشابه، ضریب k را در معادله بلانی کریدل اصلاح کردند.

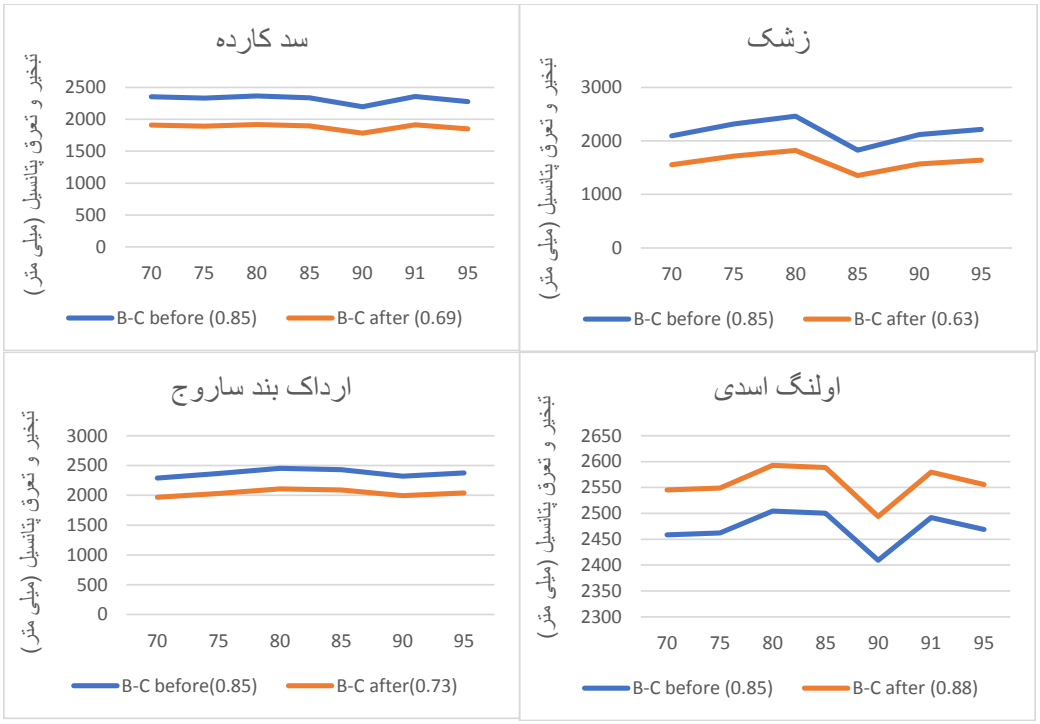
**جدول ۲- برآورد ضریب K در هر زیرحوزه آبخیز**

**Table 2- Estimation of coefficient K in each sub-watershed**

| زیرحوزه آبخیز | K |
|---|---|
| ارداک بند ساروج | 0.73 |
| سد کارده | 0.69 |
| اولنگ اسدی | 0.88 |
| زشک خراسان | 0.63 |

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل۲- مقایسه مقادیر تخمینی $E_0$ از روش BC (قبل و بعد از اصلاح پارامتر k)**

**Figure 2- Comparison of estimated values of $E_0$ from BC method (before and after correction of parameter k)**

## تخمین پارامتر امگا (ω)

جدول ۳ مقدار پارامتر ω را برای هر حوزه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در زیرحوزه‌های آبخیز ارداک بند ساروج، زشک و اولنگ اسدی که بیش‌ترین تطابق را در بین داده‌های برداشت شده بارش و رواناب داشتند، ضریب امگا به‌ترتیب ۰/۲۱ ، ۰/۲۰ و ۰/۰۰۲ بود که تشابه زیادی با مقدار این پارامتر در نتایج حاصل از پژوهش Li و همکاران (۲۰۲۰)، Junior و همکاران (۲۰۱۳)، قره‌چایی و همکاران (۱۳۹۴) و ابراهیمیان و همکاران (۱۳۹۶) داشت. هم‌چنین مقدار این ضریب در سد کارده ۹/۵۱ به‌دست آمد که غیرمعقول بوده و حاکی از عدم ارتباط بین بارش و رواناب مشاهده‌ای است. همان‌طور که گفته شد، امگا ضریب آب موجود در گیاه است که عمق منطقه ریشه را تفسیر می‌کند. مقادیر بالای این عدد نشان‌دهنده منطقه‌ای با پوشش گیاهی انبوه (مانند جنگل) است. از آن جایی که زیرحوزه آبخیز سدکارده کوهستانی و بیش‌تر سطح آن را مراتع تشکیل داده‌اند، بنابراین می‌توان گفت که به‌دلیل قرارگرفتن این حوزه در زون کپه داغ که اغلب دارای سازندهای آهکی‌اند، نفوذپذیری بالا در این جنس سنگ، بخش زیادی از روان‌آب را جذب کرده و میزان تولید رواناب را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است.

**جدول ۳- برآورد ضریب ω در هر زیرحوزه آبخیز**

**Table 3- Estimation of coefficient ω in each area**

| زیرحوزه آبخیز | Ω |
|---|---|
| ارداک بند ساروج | 0.21 |
| سد کارده | 9.51 |
| اولنگ اسدی | 0.002 |
| زشک خراسان | 0.20 |

## ارزیابی مدل با استفاده از معیارهای آماری

داده‌های رواناب تولید شده توسط مدل با رواناب مشاهداتی مقایسه و نتایج در جدول ۴ آورده شده است. به‌طور کلی، $R^2$ از ۰/۷۳ تا ۰/۹۴ متغیر است، که نشان می‌دهد رواناب محاسبه شده بر اساس مدل Budyko-Zhang می‌تواند حدود ۹۴-۷۳ درصد از تغییرات در رواناب مشاهده شده را توضیح دهد. هم‌چنین ضریب ناش در تمامی زیرحوزه‌های آبخیز بالای ۰/۷ به‌دست آمد که بیان‌گر کارایی بالای مدل

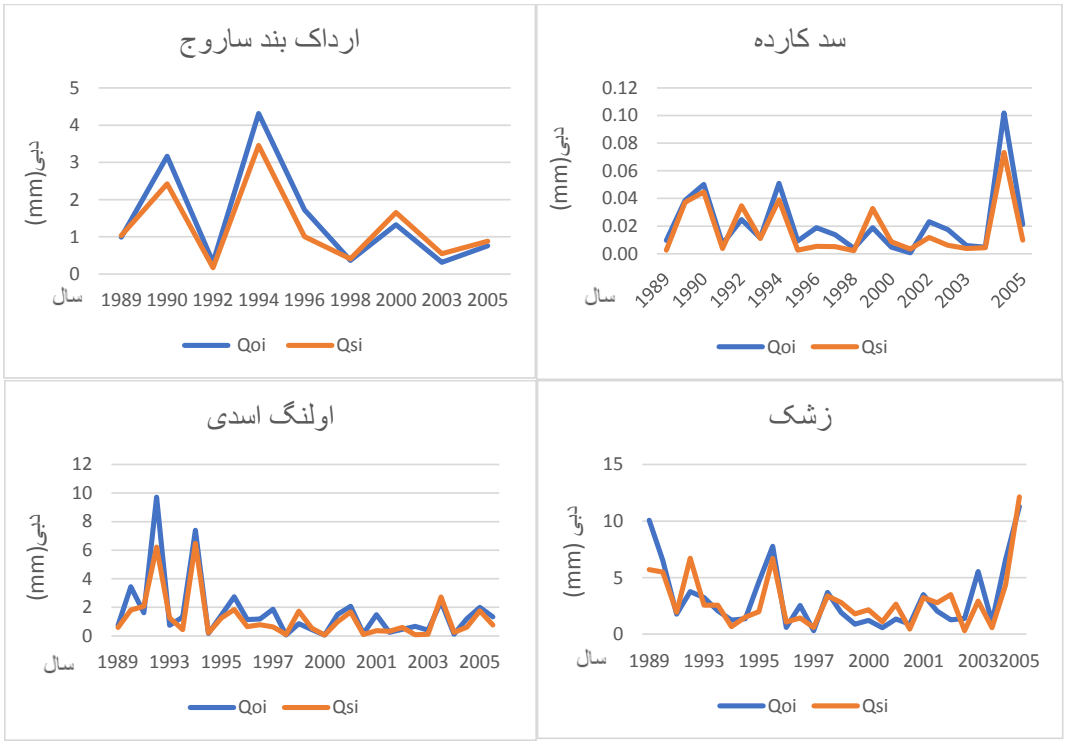
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

است. شکل ۳ رواناب مشاهده شده و برآورد شده را برای چهار ایستگاه نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، تغییرات دو منحنی رواناب به‌طور کلی تا حد زیادی منطبق است، که حاکی از آن است که مدل بودیکو-ژانگ عملکرد خوبی در بازتولید سری رواناب دارد. Xing و همکاران (۲۰۱۸)، به‌منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و Shen و همکاران (۲۰۱۷) نیز جهت بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از چهارچوب بودیکو در چندین زیرحوزه آبخیز در چین، از این شاخص‌ها برای ارزیابی صحت عملکرد مدل استفاده کردند و به نتایج مشابهی با تحقیق حاضر رسیدند.

**جدول ٤- برآورد شاخص‌های تحلیل سطح اطمینان مدل**

**Table 4- Estimation of model confidence level analysis indicators**

| $R^2$ | NSC | RE | زیرحوزه آبخیز |
|---|---|---|---|
| 0.94 | 0.87 | -0.13 | ارداک بند ساروج |
| 0.86 | 0.81 | -0.22 | سد کارده |
| 0.88 | 0.81 | -0.24 | اولنگ اسدی |
| 0.73 | 0.72 | -0.07 | زشک خراسان |




**شکل ۳- مقایسه رواناب مشاهده شده (خط آبی) و برآورد شده (خط نارنجی) بر اساس معادله تجربی ژانگ در چهارچوب بودیکو**

**Figure 3- Comparison of observed (blue line) and estimated (orange line) runoff based on Zhang's empirical equation in the Budyko framework**

## آزمون من-کندال

برای محاسبه جهت و معناداری روند سری زمانی داده‌های دبی، دما و بارش طی دوره آماری ۲۱۰۰-۱۹۸۹ برای دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد. این آزمون برای ارائه درک صحیحی از نسبت تغییرات متغیرهای اقلیمی و فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌کار می‌رود. منحنی سری زمانی و مقادیر آماره آزمون در مقیاس سالانه برای ایستگاه‌های مختلف در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد به‌دست آمد که نتایج آن در ادامه تشریح شده است.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

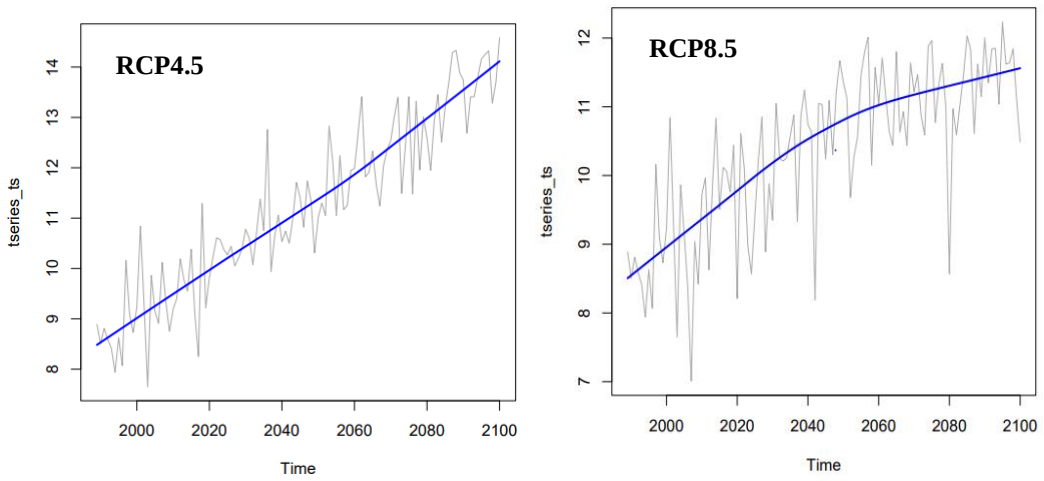
## دما

نتایج تحلیل روند دما در جدول ۵ و شکل‌های ۷-۴ نمایش داده شده است. مطابق شکل‌های ۷-۴ و جدول ۵، دمای همه ایستگاه‌ها روند افزایشی داشته و مقدار p-value از ۰/۰۱ کم‌تر بوده که موجب قبول شدن فرضیه یک ($H_1$) و معنادار بودن روند دما در سطح ۹۹ درصد طی سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت هردو RCP شده است. نتایج حاصل از تحقیق Li و همکاران (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های دما از GCMها بیانگر آب و هوای گرم‌تر در آینده با روند صعودی و معنادار است و نقش مهم و مثبتی در کاهش رواناب آینده دارد. Sanikhaniو همکاران (۲۰۱۳) نیز در پژوهش خود به پیش‌بینی تغییر اقلیم بر مبنای مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)[1] و بررسی اثرات آن بر رواناب حوضه پرداختند و به نتیجه مشابه یعنی افزایش دما در آینده اشاره کردند.

**جدول ۵- نتایج تحلیل من-کندال دما طی سال ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Table 5- Results of Mann-Kendall temperature analysis during 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

| RCP8.5 | | | RCP4.5 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 - sided p-value | Kendall's tau | Kendall test Positive Significance | 2 - sided p-value | Kendall's tau | زیرحوزه آبخیز |
| < 0.001 | 0.782 | 0.05 | < 0.001 | 0.578 | ارداک |
| < 0.001 | 0.768 | 0.05 | < 0.001 | 0.573 | کارده |
| < 0.001 | 0.755 | 0.05 | < 0.001 | 0.568 | اولنگ اسدی |
| < 0.001 | 0.782 | 0.05 | < 0.001 | 0.578 | زشک |



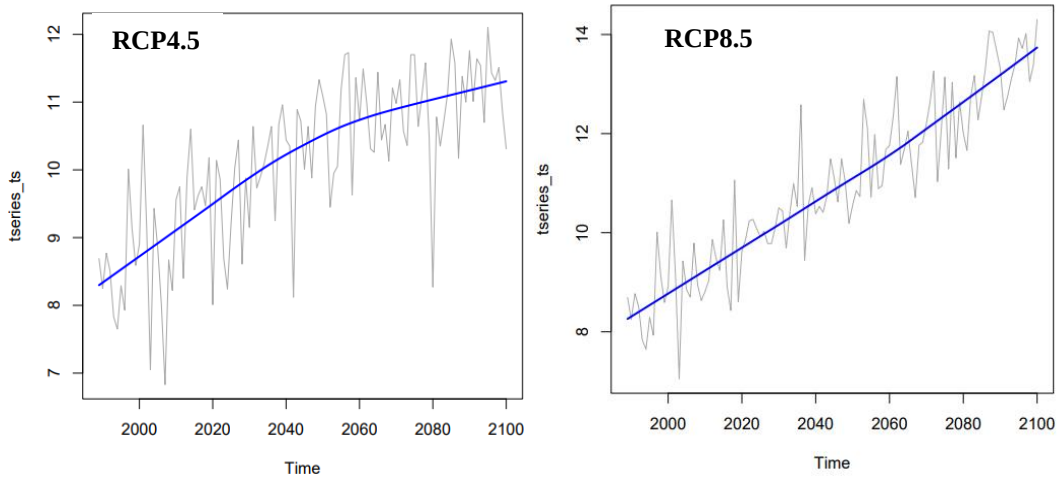

**شکل ٤- منحنی سری زمانی دما (℃) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز ارداک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 4- Simulated temperature time series curve (℃) of Ardak Sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

[1] General Circulation Model

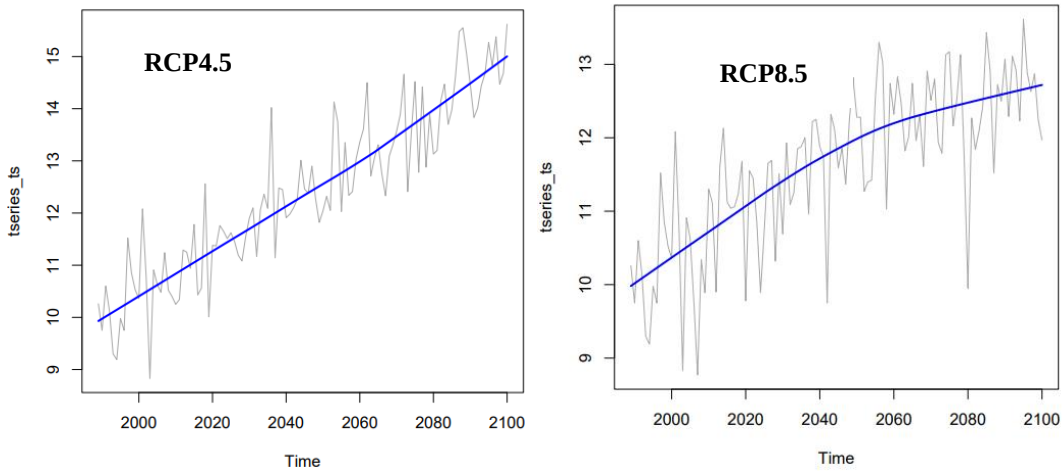
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ۵- منحنی سری زمانی دما (℃) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز کارده برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 5- Simulated temperature time series curve (℃) of Karde Sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

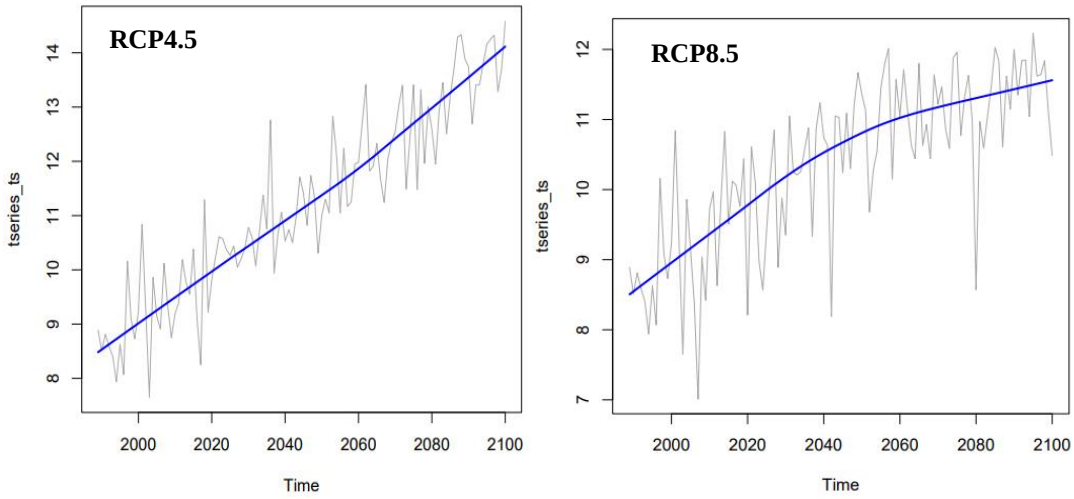



**شکل ٦- منحنی سری زمانی دما (℃) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز اولنگ برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 6- Simulated temperature time series curve (℃) of Olang Sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ۷- منحنی سری زمانی دما (℃) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز زشک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 7- Simulated temperature time series curve (℃) of Zoshk Sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

## بارش

نتایج تحلیل روند دما در جدول ۶ و شکل‌های ۱۱-۸ نمایش داده شده است. روند کاهشی بارش مشهود است و مقدار p-value برای همه زیرحوزه‌های آبخیز تحت RCP4.5 بیش‌تر از ۰/۰۵ بوده است. بنابراین فرض صفر ($H_0$) رد شده که نشان می‌دهد روند بارش در سطح ۹۵ درصد معنادار نبوده ولی میزان این پارامتر تحت RCP8.5 کم‌تر از ۰/۰۱ بوده و بیان‌گر روند معنادار در سطح ۹۹ درصد است. Ahmadi و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی تا افق ۲۰۹۰ در مناطق سردسیر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بر اساس سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5، تغییر اقلیم بر توزیع زمانی-مکانی بارش مناطق سردسیر ایران تأثیر خواهد داشت و آینده‌ای با بارش کم‌تر و متغیر را نشان خواهد داد. Ishida و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان دادند که در منطقه کالیفرنیای شمالی بر اساس مدل‌های MIROC5، ES2-HadGEM و CCSM4 و سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5، بارش دوره آینده تغییرات کاهشی خواهد داشت که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

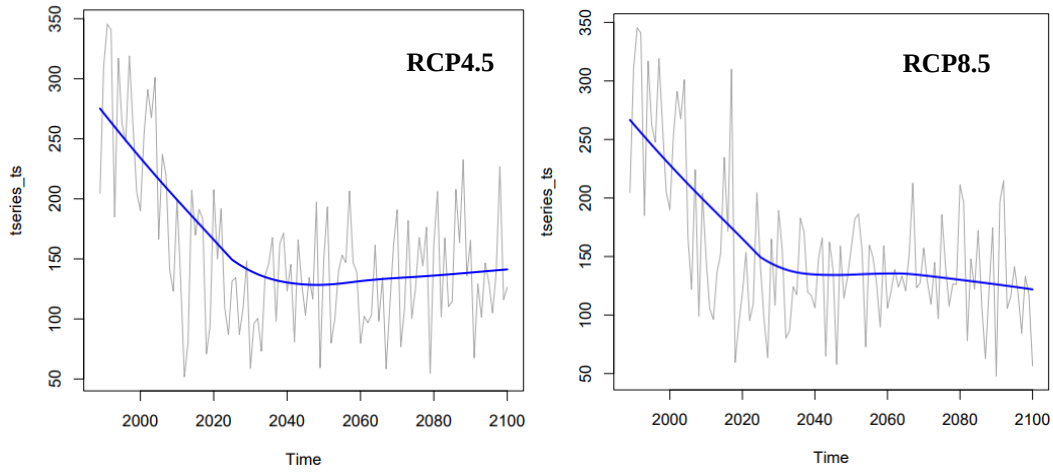
**جدول ٦- نتایج تحلیل من-کندال بارش طی سال ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Table 6- Results of Man-Kendall analysis of precipitation during 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

| RCP8.5 | | | RCP4.5 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 - sided p-value | Kendall's tau | Kendall test Positive Significance | 2 - sided p-value | Kendall's tau | زیرحوزه آبخیز |
| 0.0001 | -0.241 | 0.05 | 0.104 | -0.282 | **ارداک** |
| 0.0002 | -0.238 | 0.05 | 0.051 | -0.292 | **کارده** |
| 0.001 | -0.199 | 0.05 | 0.42 | -0.262 | **اولنگ اسدی** |
| 0.0001 | -0.243 | 0.05 | 0.099 | −0.283 | **زشک** |

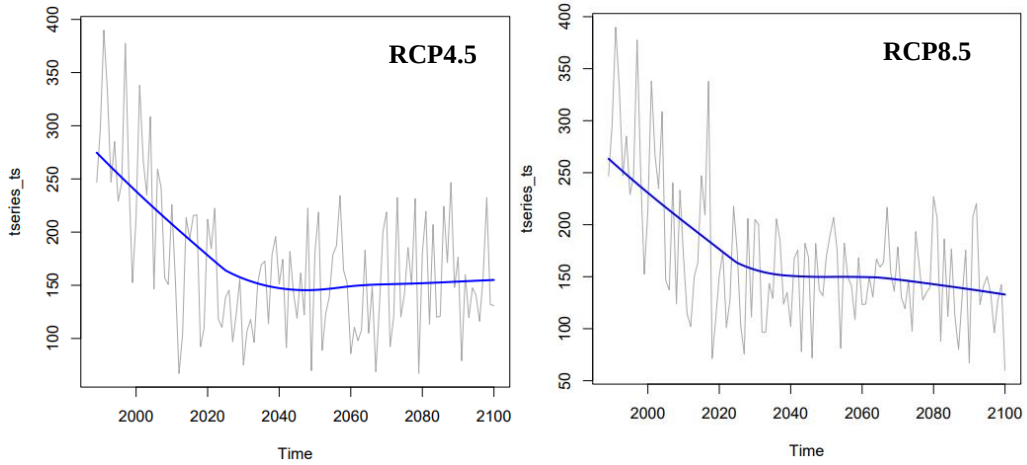
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]



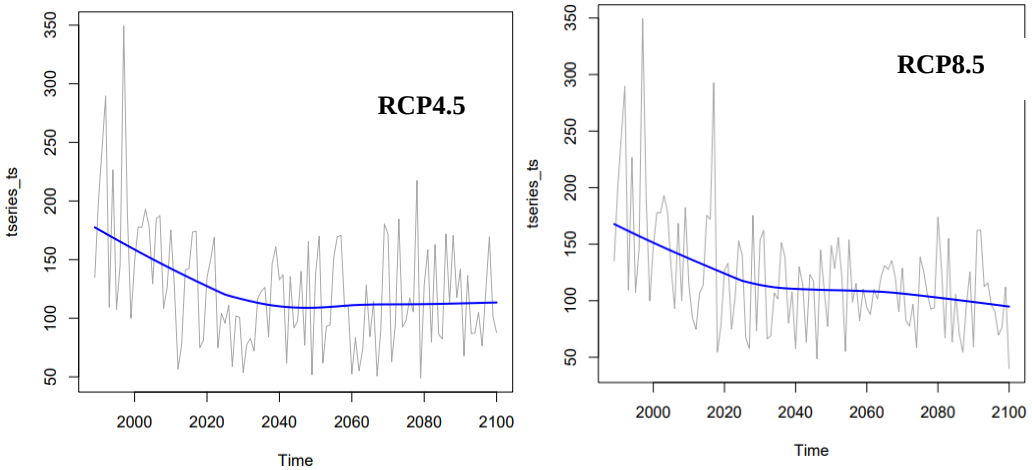

شکل ۸- منحنی سری زمانی بارش (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز ارداک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

**Figure 8- Simulated precipitation time series curve (mm) of Ardak sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**




شکل ۹- منحنی سری زمانی بارش (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز کارده برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

**Figure 9- Simulated precipitation time series curve (mm) of Karde sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

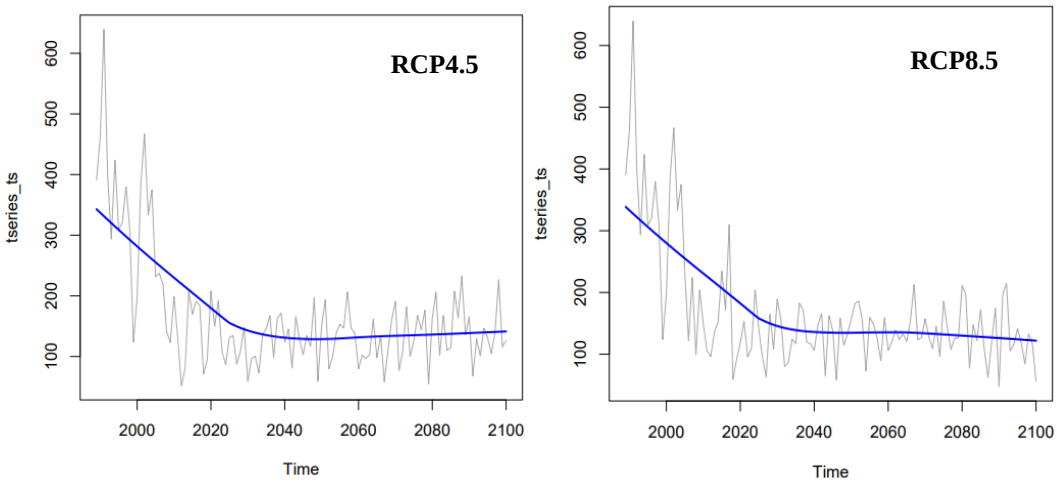



شکل ۱۰- منحنی سری زمانی بارش (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز اولنگ برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

**Figure 10- Simulated precipitation time series curve (mm) of Olang sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ۱۱- منحنی سری زمانی بارش (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز زشک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 11- Simulated precipitation time series curve (mm) of Zoshk sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenario**

## رواناب

نتایج تحلیل روند رواناب در جدول ۷ و شکل‌های ۱۵-۱۲ نمایش داده شده است. رواناب همه ایستگاه‌ها روند کاهشی داشته است. مقدار p-value تحت RCP4.5 برای همه زیرحوزه‌های آبخیز به‌جز اولنگ اسدی، از ۰/۰۵ کم‌تر بوده که موجب قبول شدن فرضیه یک ($H_1$) و معنادار بودن روند رواناب طی سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۸۹ شده است. میزان این پارامتر تحت RCP8.5 برای ایستگاه‌های کارده و اولنگ اسدی، بالاتر از ۰/۰۵ به‌دست آمده و بیانگر عدم وجود روند است درحالی‌که این روند برای ارداک و زشک، عکس دو ایستگاه فوق است. انصاری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی به بررسی روند تغییرات دما، بارش و دبی با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بارش منطقه دارای روندی نزولی، دما دارای روندی صعودی و دبی رودخانه طی دوره آماری دارای روندی کاهشی است. Modaresi و همکاران (۲۰۱۱) نیز در مطالعه خود به کاهش حجم رواناب در ۳۰ سال آتی اشاره کردند. نتایج حاصل از پژوهش Abdo و همکاران (۲۰۰۹) مبنی بر کاهش ۱۱-۱۰ درصد رواناب طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۱ بود که مشابه نتایج تحقیق حاضر است.

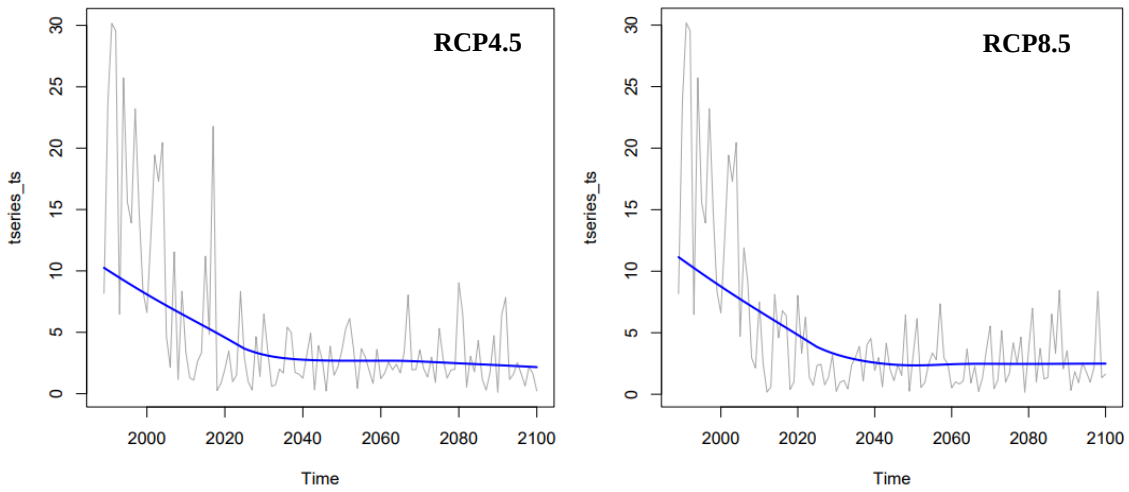
**جدول ۷- نتایج تحلیل من-کندال بارش طی سال ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Table 7- Results of Man-Kendall analysis of runoff during 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

| RCP8.5 | | Kendall test Positive Significance | RCP4.5 | | زیرحوزه آبخیز |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 - sided p-value | Kendall's tau | | 2 - sided p-value | Kendall's tau | |
| 0.07 | -0.288 | 0.05 | 0.018 | -0.306 | ارداک |
| 0.042 | -0.299 | 0.05 | 0.008 | -0.32 | کارده |
| 0.0003 | -0.232 | 0.05 | 0.119 | -0.28 | اولنگ اسدی |
| 0.084 | -0.285 | 0.05 | 0.016 | -0.307 | زشک |

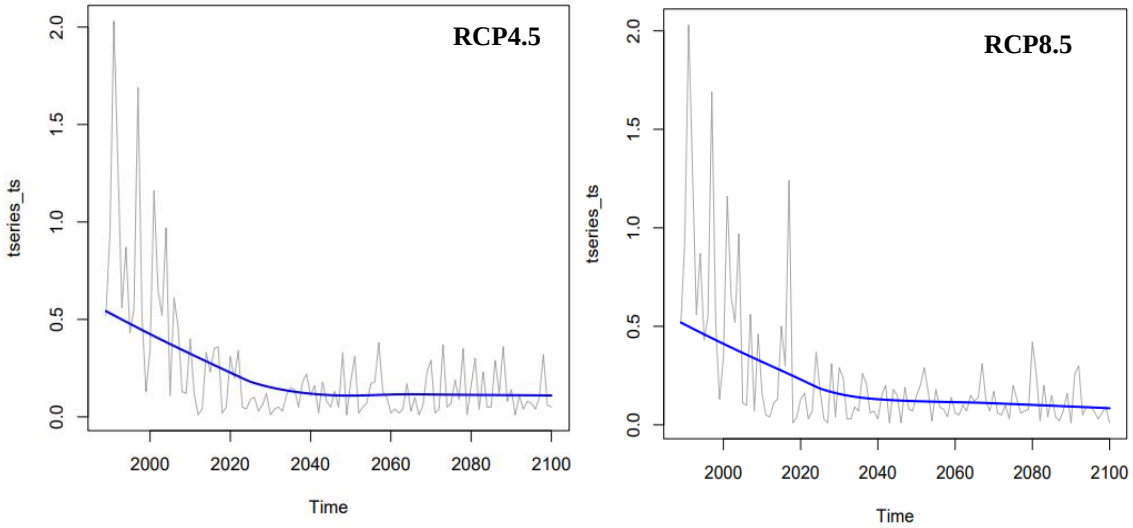
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ۱۲- منحنی سری زمانی رواناب (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز ارداک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 12- Simulated runoff time series curve (mm) of Ardak sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

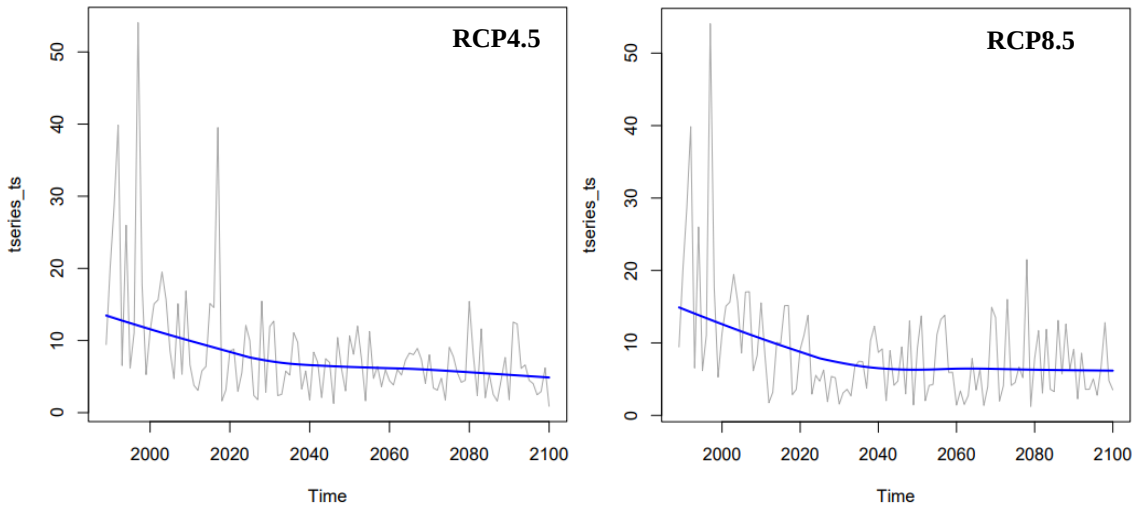



**شکل ۱۳- منحنی سری زمانی رواناب (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز کارده برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 13- Simulated runoff time series curve (mm) of Karde sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

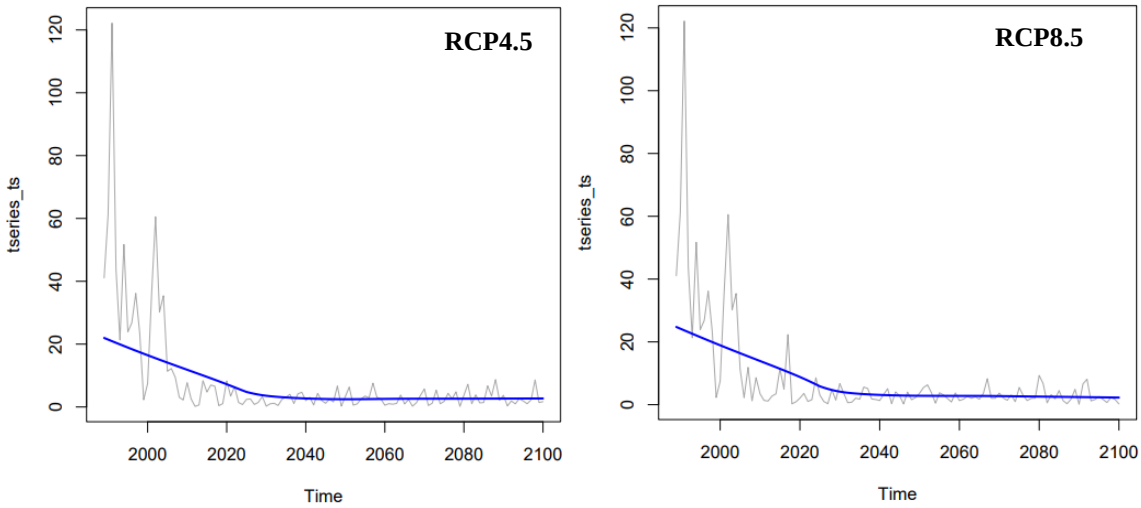
[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]




**شکل ١٤- منحنی سری زمانی رواناب (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز اولنگ برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 14- Simulated runoff time series curve (mm) of Olang sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**




**شکل ١٥- منحنی سری زمانی رواناب (میلی‌متر) شبیه‌سازی شده زیرحوزه آبخیز زشک برای دوره ۲۱۰۰-۱۹۸۹ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5**

**Figure 15- Simulated runoff time series curve (mm) of Zoshk sub-watershed for the period of 1989-2100 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios**

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه از چهارچوب بودیکو برای بررسی تغییرات رواناب در آینده استفاده شد. ابتدا با استفاده از داده‌های مشاهداتی دما، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل برای دوره‌های پایه (۲۰۱۷-۱۹۸۹) اجرا و ضمن محاسبه ضرایب مدل برای منطقه مورد مطالعه کارایی مدل نیز تایید شد. سپس متغیرهای اقلیمی دما و بارش از مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوهای میانه و خیلی بدبینانه RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۰۶) استخراج شد. در نهایت تغییرات رواناب آتی از متغیرهای آب و هوایی پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه بودیکو-ژانگ محاسبه و مورد بحث قرار گرفت.

مقدار ضریب $\omega$ برای همه زیرحوزه‌های آبخیز بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۲ اما برای زیرحوزه آبخیز سد کارده، حدود ۹/۵ برآورد شد که می‌تواند به‌دلیل ساختار آهکی منطقه و کاهش شدید رواناب و یا نقص داده‌های دما و بارش گزارش شده توسط ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرولوژی باشد. نتایج ارزیابی مدل بودیکو-ژانگ، با ضریب تبیین ۰/۹۴-۰/۷۲ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۷-۰/۷۲، حاکی از تطابق

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

بالای مقادیر رواناب مشاهده‌ای و برآورد شده توسط مدل است که توانایی بسیار خوب مدل را در برآورد رواناب آینده نشان می‌دهد. نسبت به دوره پایه، مدل GCM در هر چهار زیرحوزه آبخیز، دمای بیش‌تر و بارش کم‌تر را در آینده پیش‌بینی کرد.

در ابتدا جهت بررسی روند کلی سری زمانی داده‌های رواناب، دما و بارش طی سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۸۹ از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد. از سویی دیگر، با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون ناپارامتری من-کندال مشخص شد که به‌طور کلی در همه زیرحوزه‌های آبخیز داده‌های دما در طی سال‌های ۲۱۰۰-۱۹۸۹، دارای روند افزایشی و معنادار در سطح ۹۹ درصد تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بوده‌اند. هم‌چنین نتایج نشان داد که داده‌های بارش روند نزولی دارند که این روند تحت سناریوی RCP8.5، معنادار اما در سناریوی RCP4.5، معنادار نبود. پیش‌بینی مدل GCM حاکی از آن بود که رواناب در آینده، کاهش خواهد یافت اما معناداری روند متفاوت بود. در تمامی زیرحوزه‌های آبخیز به‌جز اولنگ، رواناب روندی معنادار تحت سناریوی RCP4.5 طی سال‌های مورد مطالعه داشت درصورتی‌که تحت سناریوی RCP8.5، این روند در حوزه‌های آبخیز ارداک و زشک معنادار اما در دو زیرحوزه آبخیز دیگر معنادار نبود.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پیش‌بینی دما از مدل GFDL-ESM2M، بیان‌گر آب و هوای گرم‌تر در آینده است و نقش مهم و مثبتی در کاهش رواناب آینده دارد. درحالی‌که پیش‌بینی می‌شود در آینده بارش روند کاهشی داشته باشد که این نیز میزان رواناب را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار خواهد داد و موجب کاهش آن در آینده می‌شود. با بهره‌گیری از تجارب و نتایج حاصل از مطالعه حاضر می‌توان مواردی هم‌چون، استفاده از مدل‌های گزارش ششم IPCC به همراه سناریوهای متنوع‌تر، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی جهت کاهش عدم قطعیت داده‌ها و هم‌چنین لحاظ نمودن فعالیت‌های انسانی هم‌چون تغییر کاربری‌های موجود را جهت مطالعات آتی توصیه نمود.

## ملاحظات اخلاقی

**دسترسی به داده‌ها:** همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

**حمایت مالی:** این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد با کد ۵۶۲۸۰ در دانشگاه فردوسی مشهد به انجام رسیده است.

**مشارکت نویسندگان:** این پژوهش توسط سلاله کبیری به‌صورت طرح اولیه تهیه و سپس توسط علی گلکاریان و محمدتقی دستورانی اصلاح و تکمیل شد.

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

**سپاس‌گزاری:** از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به‌دلیل همکاری صمیمانه در ارائه آمار و اطلاعات تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع

۱. ابراهیمیان، طاهره، حقی‌زاده، علی، زینی وند، حسین، طهماسبی پور، ناصر و علیجانی، رضوان. (۱۳۹۶). بررسی عملکرد روش الاستیسته اقلیمی و مدل SIMHYD به‌منظور ارزیابی کمی عوامل مؤثر بر خشکسالی هیدرولوژیک. *خشکبوم*، ۷(۲)، ۲۹-۴۲. **doi: 10.29252/aridbiom.7.2.29**

۲. احمدی، مهدی، معتمدوزیری، بهاره، احمدی، حسن، معینی، ابوالفضل و زهتابیان، غلامرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب آبخیز کن در دوره آینده. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۳(۲)، ۶۶-۸۱. **doi: 10.22092/wmej.2019.127163.1247**

۳. افشین، ید الله. (۱۳۷۴). رودهای ایران. وزارت نیرو – *شرکت مهندسین مشاور جاماب*. صص ۳۰۷-۳۰۸.

۴. انصاری، مریم، نوری، غلامرضا، فتوحی، صمد. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات دما، بارش و دبی با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه کاجو استان سیستان و بلوچستان). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*. ۷(۱۴)، ۱۵۲-۱۵۸. **doi: 10.29252/jwmr.7.14.158**

۵. پورمحمدی، سمانه، دستورانی، محمدتقی، مساح بوانی، علیرضا، گودرزی، مسعود، جعفری، هادی و رحیمیان، محمد حسن (۱۳۹۶). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوزه آبریز تویسرکان همدان). *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۱(۳۷)، ۱-۱۲. **https://www.sid.ir/paper/134841/fa**

۶. حیدری، حامد، موسوی بایگی، محمد، اسماعیلی، کاظم و گلکاریان، علی. (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوضه با استفاده از مدل های SWAT و WEPP (مطالعه موردی: حوضه دهبار). *تحقیقات آب و خاک ایران* (علوم کشاورزی ایران)، ۵۱(۴)، ۱۰۴۰-۱۰۲۷. **doi: 10.22059/ijswr.2020.287152.668293**

۷. عباسی، رضا. (۱۳۹۷) . بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان رواناب در حوزه آبخیز قره‌قوم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. *دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری*.

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

۸. قره‌چایی، حمید رضا، ملکیان، آرش، مقدم‌نیا، علیرضا و احمدی، آزاده (۱۳۹۴). پاسخ رواناب به تغییرپذیری اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در حوزه رودخانه کشکان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۷(۳)، ۲۶۴-۲۵۵. **doi.org/10.22092/ijwmse.2015.101632**

۹. یعقوب‌زاده، مصطفی و رمضانی، یوسف. (۱۳۹۸). 'ارزیابی مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییراقلیم در برآورد دما و بارش ایستگاه بیرجند .*پژوهش های اقلیم شناسی*، ۱۳۹۸(۳۷)، ۸۷-۱۰۰. **https://clima.irimo.ir/article_104802_12253.html**

## References

1. Abbasi, R. (2017). Investigating the effect of climate change on the amount of runoff in Qara Qom watershed. M.Sc. Thesis. *Sari Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources*. [In Persian]
2. Abdo, K. S., Fiseha, B. M., Rientjes, T., Gieske, A. S. M., & Haile, A. T. (2009). Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana Basin, *Ethiopia, Hydrological Processes*, 23(26), 3661-3669. doi:10.1002/hyp.7363
3. Afshin, Y. (1995). Rivers of Iran. Ministry of Energy - Jamab Consulting Engineers Company. pp. 307-308. [In Persian]
4. Ahmadi, H., Fallah Ghalhari, G. A., & Baaghideh, M. (2019). Projection of Climate Change Impacts on Seasonal Precipitation in Iranian Cold Regions Based on Radiative Forcing Scenarios (RCP). *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1), 177-196. doi: 10.22059/jesphys.2018.256956.1007003
5. Ahmadi, M., Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Moeini, A., & Zehtabian, G. R. (2020). Assessment of the Impact of Climate Change on Runoff on the Kan Watershed in the Future. *Watershed Management Research Journal*, 33(2), 66-81. doi: 10.22092/wmej.2019.127163.1247. [In Persian]
6. Alamdari, N., Claggett, P., Sample, D. J., Easton, Z. M., & Yazdi, M. N. (2022). Evaluating the joint effects of climate and land use change on runoff and pollutant loading in a rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129953. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129953
7. Ansari, M., Noori, G., & Fotohi, S. (2017). Investigation of temperature precipitation and flow trend using nonparametric mankendall (Case study: Kaju River in Sistan and Baluchestan). *Journal of Watershed Management Research*. 7(14), 158-152. doi:10.29252/jwmr.7.14.158. [In Persian]
8. Arantes, L. T., Carvalho, A. C. P., Carvalho, A. P. P., Lorandi, R., Moschini, L. E., Di, Lollo, J. A. (2021). Surface runoff associated with climate change and land use and land cover in southeast region of Brazil. *Environ. Chall*. 3, 100054. doi:10.1016/j.envc.2021.100054
9. Ebrahimian, T., Haghizadeh, A., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Alijani, R. (2017). Performance Investigation of the climate elasticity method and the model of SIMHYD For quantitative evaluation of the effective factors on hydrological drought. *Journal of Arid Biome*, *7*(2), 29-42. doi: 10.29252/aridbiom.7.2.29. [In Persian]
10. Gharechaei, H., Moghaddamnia, A., Malekian, A., & Ahmadi, A. (2015). Response of streamflow to climate variability and human activity in Kashkan river basin. *Watershed Engineering and Management*, 7(3), 255-264. doi: 10.22092/ijwmse.2015.101632. [In Persian]
11. He, Y., Qiu, H., Song, J., Zhao, Y., Zhang, L., Hu, S., Hu, Y. (2019a). Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, *China. Sustain. Cities Soc*. 51, 101729. doi: 10.1016/j.scs.2019.101729
12. 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]
13. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Fourth Assessment Report, Climate Change.
14. Ishida, K., Gorguner, M., Ercan, A., Trinh, T. and Kavvas, M. L. (2017). Trend analysis of watershed-scale precipitation over Northern California by means of dynamically downscaled CMIP5 future climate projections. *Science of the Total Environment*, 592, 12–24. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.086
15. Jiang, T., Chen, Y. Q., Xu, C. Y., Chen, X. H., Chen, X., and Singh, V. P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China, *J. Hydrol*., 336, 316–333, 2007. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.01.010
16. Junior, D. R., Cerqueira, C. M., Vieira, R. F., & Martins, E. S. (2013). Budyko's Framework and Climate Elasticity Concept in the Estimation of Climate Change Impacts on the Long-Term Mean Annual Streamflow. *In World Environmental and Water Resources Congress*. Showcasing the Future. 1110-1120. doi:10.1061/9780784412947.107.
17. Kendall, M. (1975). Rank correlation measures. *Charles Griffin, London*, 202, 15.
18. Leavesley, G. H.(1994). Modeling the effects of climate change on water resources. A review, *Climate Change*, 28, 159–177. doi: 10.1007/BF01094105

[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]
[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

19. Lee, T. Y., Chiu, C. C., Chen, C. J., Lin, C. Y., & Shiah, F. K. (2023). Assessing future availability of water resources in Taiwan based on the Budyko framework. *Ecological Indicators*, 146, 109808. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109808
20. Lei, X., Gao, L., Wei, J., Ma, M., Xu, L., Fan, H., & Fang, W. (2021). Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Poyang Lake Basin of China. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 123, 103019. doi:10.1016/j.pce.2021.103019
21. Li, H., Shi, C., Zhang, Y., Ning, T., Sun, P., Liu, X., Ma, X., Liu, W., & Collins, A. L. (2020). Using the Budyko hypothesis for detecting and attributing changes in runoff to climate and vegetation change in the soft sandstone area of the middle Yellow River basin, China. *Science of the Total Environment*, 703, 135588. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135588
22. Li, Z., Li, Q., Wang, J., Feng, Y. and Shao, Q. (2020). Impacts of projected climate change on runoff in upper reach of Heihe River basin using climate elasticity method and GCMs. *Science of The Total Environment*, 716, p.137072. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137072
23. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrical. *Journal of the Econometric Society*, 245–259. doi:10.2307/1907187. doi.org/10.2307/1907187
24. McBean, E., & Motiee, H. (2006). Assessment of impacts of climate change on water resources? a case study of the Great Lakes of North America. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. (5)3, 3209-3183. doi:10.5194/hess-12-239-2008
25. Milly, P. C. D., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V.(2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, 438, 347–350. doi: 10.1038/nature04312.
26. Modaresi, F., Araghinejad, Sh., Ebrahimi, K., & Kholghi, M. (2011). Assessment of Climate Change Effects on the Annual Water Yield of Rivers A Case Study of Gorganroud River, IRAN. *Journal of Water and Soil*, 25(6), 1365-1377. doi: 10.22067/jsw.v0i0.12152
27. Murray, S. J., Foster, P. N., and Prentice, I. C. (2012). Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*. 448–449, 14–29. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.044.
28. Niyazi, B. A., Masoud, M. H., Ahmed, M., Basahi, J. M., & Rashed, M. A. (2020). Runoff assessment and modeling in arid regions by integration of watershed and hydrologic models with GIS techniques. *Journal of African Earth Sciences*, 172, 103966. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103966
29. Poormohammadi, S., Dastorani, M. T., MASSAH, B. A., Gudarzi, M., Jafari, H., & Rahimian, M. H. (2017). Effects of Climate Change on River Runoff and Compatible Solutions (CaseStudy: Tuyserkan Basin, Hamedan). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. https://www.sid.ir/paper/134841/en. [In Persian]
30. Praskievicz, S., & Chang, H. (2009). A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography*, 33(5), 650-671. doi:10.1177/0309133309348098
31. Roderick, M. L., & Farquhar, G. D. (2011). A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. *Water Resources Research*, 47(12). doi: 10.1029/2010WR009826
32. Sanikhani, H., Dinpajoh, Y., Pouryusef, S., Ghavidel, S. Z., & Soltani, B. (2013). The Impacts of Climate Change on Runoff in Watersheds (Case Study: Ajichay Watershed in East Azerbaijan Province, Iran). *Journal of Water and Soil*, 27(6), 1225- 1234. doi: 10.22067/jsw.v0i0.21513
33. Sharifi, A., Mirabbasi, R., Nasr-Esfahani, M. A., Haghighi, A. T., & Nafchi, R. F. (2021). Quantifying the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff changes in central plateau of Iran using nine methods. *Journal of Hydrology*, 603, 127045. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127045
34. Shen, Q., Cong, Z., & Lei, H. (2017). Evaluating the impact of climate and underlying surface change on runoff within the Budyko framework: A study across 224 catchments in China. *Journal of Hydrology*, 554, 251-262. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.09.023
35. Stednick, J. D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*. 176, 79–95. doi: 10.1016/0022-1694(95)02780-7
36. Tabari, H., Hosseinzadeh Talaee, P., & Some'e, B. S. (2013). Spatial modelling of reference evapotranspiration using adjusted Blaney-Criddle equation in an arid environment. *Hydrological sciences journal*, 58(2), 408-420. doi: 10.1080/02626667.2012.755265
37. Wang, G., Yu, J., Shrestha, S., Ishidaira, K., and Takeuchi, H. (2010). Application of a distributed erosion model for the assessment of spatial erosion patterns in the Lushi catchment, China. *Environmental Earth Sciences*, 61, 787–797. doi: 10.1007/s12665-009-0391-z
38. Xing, W., Wang, W., Zou, S., & Deng, C. (2018). Projection of future runoff change using climate elasticity method derived from Budyko framework in major basins across China. *Global and Planetary Change*, 162, 120-135. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.006


[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]

39. Xue, D., Zhou, J., Zhao, X., Liu, C., Wei, W., Yang, X., & Zhao, Y. (2021). Impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical arid watershed, NW China. *Ecological Indicators*, 121, 107013. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107013
40. Yaghoobzadeh, M., & Rahmani, Y. (2020). Evaluation models and scenarios of the climate change Fifth Report in estimation temperature and precipitation of Birjand Station. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 87-100. https://clima.irimo.ir/article_104802_12253.html. [In Persian]
41. Yifru, B. A., Chung, I. M., Kim, M. G., & Chang, S. W. (2021). Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100926. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100926
42. YoosefDoost, A., YoosefDoost, I., Asghari, H., & Sadeghian, M. S. (2018). Comparison of HadCM3, CSIRO Mk3 and GFDL CM2. 1 in prediction the climate change in Taleghan River Basin. *Am. J. Civ. Eng. Archit*, 6(3), 93-100. doi: 10.12691/ajcea-6-3-1
43. Youssef, A. M., Ibrahem, S. M., El Sayed, A. N., & Masoud, M. H. (2020). Assessment and management of water resources in Wadi El-Deeb using geophysical, hydrological and GIS techniques-Red Sea. *Journal of African Earth Sciences*, 164, 103777. doi:10.1016/j.jafrearsci.2020.103777
44. Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water resources research, 37(3), 701-708. doi: 10.1029/2000WR900325
45. Zhao, B., Sun, H., Yan, D., Wei, G., Tuo, Y., & Zhang, W. (2021). Quantifying changes and drivers of runoff in the Kaidu River Basin associated with plausible climate scenarios. *Journal of Hydrology, Regional Studies*, 38, 100968. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100968


[ Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23 ]

[ DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.4.7 ]