

The rainfall-runoff hydrological simulation model based on satellite products with the effect of climate scenarios in the Takab Watershed

Mohammad Babaei¹ , Esmail Asadi^{2*} , Sabereh Darbandi³ 

¹ Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Extended Abstract

Introduction

Runoff is an important hydrological component in the assessment of water resources. Most water resource applications rely on runoff as an essential hydrologic variable. The hydrology of watersheds is influenced by many factors, including climate change. Watershed discharge estimation is an important step in surface water resources planning and management, especially in watersheds that lack data. In this study, due to the uneven spatial distribution of meteorological stations in the study area of Takab, satellite images and products were used to evaluate the possible effects of climatic factors, including rainfall and temperature on runoff. Therefore, in the first step to analyze rainfall and temperature changes from 1998 to 2020, TRMM and FLDAS satellite products, respectively, were evaluated using different statistical criteria with Takab synoptic station data to ensure their accuracy and suitability as inputs for hydrological models such as the IHACRES model. In the second step, considering that the selection of the rainfall-runoff model requires knowing the capabilities and limitations of the hydrological models of the watershed, which depends on access to various watershed parameters. However, a model should be used that provides reliable results despite limited inputs.

Materials and Methods

The Takab Watershed is one of the 25 sub-watersheds of Lake Urmia, located south of this watershed. The only permanent and significant river in this watershed is the Sarogh Chay River, which is the longest river in the area. In this study, the non-parametric Mann-Kendall and Sen's slope tests were used to analyze the trend of rainfall and temperature changes. Subsequently, the IHACRES model was used to simulate the river discharge using temperature and rainfall data from satellite products. Additionally, in this study, the IHACRES model was used to predict runoff generation under the influence of climate change and evaluate different climate scenarios. This model is an integrated conceptual model for rainfall-runoff simulation. The IHACRES model has always been of interest due to its low data requirements and high accuracy in runoff estimation. For this purpose, this study used the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Representative Concentration Pathways (RCPs) scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) for projections up to 2100. To evaluate the IHACRES model, the determination coefficient (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), root mean square error (RMSE), and bias error (Bias) were used during the calibration and validation periods.

Results and Discussion

In the first step, the analysis of the rainfall data of the Takab Watershed showed that the highest amount of rainfall occurs in April, March, and November, respectively, which together accounts for approximately 45% of the total annual rainfall of the study area, with estimated values of 53.1, 40.4, and 39.6 mm per month, respectively. Also, the highest and lowest average temperatures in the region occur in July and January, respectively, with estimated values of 24.2 °C and -3.4 °C, respectively. In the second step, the simulated discharge results from the RCP2.6 scenario indicated that the greatest increase in discharge in the future for the Takab study area was estimated for December, November, and January. Similarly, under the RCP8.5 scenario, the highest increases in future discharge were projected for August, July, and January, respectively. According to the results, according to the RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios, the predicted average annual discharge was 8.3 and 1.5 cubic meters per second, respectively. The model evaluation parameters for the IHACRES model during the 14-year calibration period were calculated as follows: $R^2 = 0.82$ and 0.80 , $RMSE = 1.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and $Bias = 0.42$. Similarly, during the validation period, these values were calculated as $R^2 = 0.71$ and 0.68 , $RMSE = 4.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and $Bias = 0.1$, respectively.

Conclusion

The results of the present study showed that the watershed has been affected by increasing temperature and precipitation trends during the statistical period. The results of the trend analysis and satellite data evaluation were compared with and confirmed by previous research. The IHACRES model simulation results demonstrated that this model has a strong ability to simulate watershed discharge and is consistent with the results of other studies. However, while the model performs well for the low-flow conditions, it struggles with accurately simulating peak discharges, as noted in several studies. According to the RCP2.6 scenario, the predicted discharge for the future period is expected to increase compared to the baseline period. The annual discharge changes rate under this scenario was calculated as +19.4%, which can be attributed to an increase in average rainfall, a reduction in greenhouse gases, and relatively stable temperatures in the future. However, according to the RCP8.5 scenario, a decline in river discharge was projected compared to the baseline period. The annual simulated discharge change under this scenario was estimated as -1.68%, resulting from increased greenhouse gas emissions, higher temperatures, and notable decrease in rainfall. One of the major consequences of this scenario would be a shortage in the timely supply of agricultural water and a significant reduction in food security.

Keywords: Rainfall, Climate change, Discharge, Satellite products, IHACRES model, RCP.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We are grateful to the sewage water department of the new city of Sahand.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The data and results used in this research will be available through correspondence with the author.

Authors' contribution

Mohammad Babaei: Software, methodology, writing original draft preparation; **Esmail Asadi:** Resources, methodology, manuscript editing; **Sabereh Darbandi:** Resources, manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: esasadi@gmail.com

Citation: Babaei, M., Asadi, E., & Darbandi, S. (2025). The rainfall-runoff hydrological simulation model based on satellite products with the effect of climate scenarios in the study area of Takab. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 179-194.

doi: 10.22098/mmws.2024.14690.1424

Received: 15 February 2024, Received in revised form: 25 May 2024, Accepted: 30 May 2024, Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 179-194

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)



شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب مبتنی بر اطلاعات ماهواره‌ای تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی در حوزه آبخیز تکاب

محمد بابایی^۱، اسماعیل اسدی^{۲*}، صابره دربندی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

برآورد خروجی حوزه آبخیز یک گام مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب سطحی است، به ویژه در حوزه‌های آبخیزی که فاقد داده‌های قابل اطمینان از متغیرهای اقلیمی هستند. در راستای ضرورت این مسأله در مطالعه حاضر به سبب توزیع نامناسب مکانی ایستگاه‌های هواشناسی در حوزه آبخیز تکاب، از تصاویر و اطلاعات ماهواره‌ای جهت ارزیابی اثرات احتمالی عوامل اقلیمی شامل بارش و دما بر رواناب استفاده شد. بدین منظور برای بررسی تغییرات ماهانه بارش و دما از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ به ترتیب از اطلاعات ماهواره‌ای TRMM و FLDAS استفاده شد. نتایج ارزیابی، دقت مناسب این اطلاعات ماهواره‌ای را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی برای بارش و دما به ترتیب با همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۹۸ نشان می‌دهد. بررسی داده‌های بارش حوزه آبخیز نشان داد که بیشترین میزان بارندگی در ۳ ماه میلادی آوریل، مارچ و نوامبر معادل ماه‌های فروردین، اسفند و آبان رخ می‌دهد که به ترتیب ۵۳/۱۴، ۴۰/۴۵ و ۳۹/۶۱ میلی‌متر و تقریباً معادل ۴۵ درصد از کل بارندگی سالانه است. همچنین بیشترین و کمترین دمای متوسط محدوده به ترتیب در ماه‌های میلادی ژوئیه و ژانویه معادل ماه‌های تیر و دی بوده که به ترتیب ۲۴/۲۰ و ۳/۴۹- درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. همچنین روند تغییرات بارش و دما با آزمون‌های ناپارامتری من-کندال و شیب سن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی به طور کلی نشان از روند افزایشی غیرمعدار بارش و دما در کل منطقه مطالعاتی داشت. در ادامه از مدل مفهومی IHACRES با استفاده از داده‌های دما و بارش اطلاعات ماهواره‌ای برای شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز مورد استفاده قرار گرفت. به منظور پیش‌بینی رواناب تولیدی تحت تأثیر تغییر اقلیم و ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی در آینده نیز از مدل IHACRES استفاده شد. بدین منظور از گزارشات برنامه پنجم توسعه تحت عنوان سناریوهای انتشار RCP (RCP2.6 و RCP8.5) برای سال‌های آتی تا سال ۲۱۰۰ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی جریان تحت سناریو RCP2.6 حاکی از آن است که بیشترین افزایش دبی در دوره آبی برای حوزه آبخیز تکاب مربوط به ماه‌های دسامبر، نوامبر و ژانویه برآورد شد. همچنین تحت سناریو RCP8.5 بیشترین افزایش دبی در دوره آبی به ترتیب در ماه‌های اوت، ژوئیه و ژانویه محاسبه شده است. از طرفی مطابق شبیه‌سازی بیشترین کاهش دبی تحت هر دو سناریو به ترتیب در ماه‌های آوریل و می به دست آمد. طبق نتایج، متوسط دبی سالانه طبق سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب معادل ۸/۳۳ و ۵/۰۹ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، دبی رودخانه، بارش، دما، مدل IHACRES

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: esasadi@gmail.com

استناد: بابایی، محمد، اسدی، اسماعیل و دربندی، صابره (۱۴۰۴). شبیه‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب مبتنی بر اطلاعات ماهواره‌ای تحت تأثیر

سناریوهای اقلیمی در حوزه آبخیز تکاب. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، (۱)۵، ۱۷۹-۱۹۴

DOI: 10.22098/mmws.2024.14690.1424

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱



مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۱۷۹ تا ۱۹۴

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

در طول دهه‌های اخیر ۳۱ درصد از ۱۴۵ رودخانه اصلی جهان از نظر آماری نشان از افزایش ۹ درصدی و ۶۹ درصد از رودخانه‌ها کاهش ۲۲ درصدی رواناب سالانه داشته‌اند (Walling et al., 2003). این تغییرات رواناب حوزه‌های آبخیز تا حدود زیادی تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارد (IPCC, 2007). تغییرات اقلیمی عمدتاً با تأثیر بر بارندگی و تبخیر و تعرق منجر به افزایش یا کاهش رواناب می‌شوند (Chien et al., 2013; Zhao et al., 2015). با توجه به روند فعلی افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تشدید گرمایش جهانی برای دهه‌های آینده غیرقابل انکار خواهد بود به طوری که تأثیر بسزایی بر منابع و پدیده‌های طبیعی و به همان نسبت بر فعالیت‌های انسانی خواهد گذاشت. به دلیل قرارگیری بیشتر مساحت ایران در منطقه اقلیمی خشک و نیمه خشک، لزوم مطالعه رژیم دما و بارش ایران تحت تأثیر گرمایش جهانی از اهمیت بسزایی برخوردار است. همچنین تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب، تغییر در حمل رسوب و در نتیجه خطرات ناشی از سیلابی شدن و تغییر در مرفولوژی رودخانه نیز می‌تواند به همراه داشته باشد (Caletka et al., 2020). انتخاب یک مدل بارش-رواناب مناسب برای حوزه آبخیز از جهت بهره‌وری برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مهم است و انتخاب مدل، نیاز به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژی حوزه آبخیز دارد که این امر نیازمند دسترسی به پارامترهای هواشناسی از جمله بارش و دما است (Ibrahim et al., 2021). در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های حاصل در زمینه‌های مختلف فناوری ماهواره‌ها و بانک‌های اطلاعاتی، نسل جدیدی از داده‌های اقلیمی در دسترس قرار گرفته است که با پوشش فضایی جهانی، وضوح مکانی و زمانی مناسب، توانسته‌اند عدم دسترسی آسان به داده‌ها، توزیع نامناسب ایستگاه‌ها و وجود داده‌های گم شده را از بین ببرند و توزیع مکانی مناسبی از داده‌های بارش در مقیاس وسیع فراهم آورند. در حال حاضر تعداد زیادی از اطلاعات بارش ماهواره‌ای به صورت زمان واقعی و آنلین در دسترس هستند (Ebert et al., 2007). اما استفاده از این مجموعه داده‌های بارش ماهواره‌ای در مرحله اول نیازمند ارزیابی صحت اطلاعات بارش ماهواره‌ای و مناسب بودن کاربرد آن‌ها در محدوده‌های مطالعاتی، یک امر ضروری بوده و در مرحله دوم لازمه استفاده از این اطلاعات ماهواره‌ای، ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها می‌باشد تا بتوان توزیع مکانی مناسبی از تغییرات بارش را در محدوده مطالعاتی مشاهده کرد (Suroso et al., 2023).

مطابق با بررسی مطالعات انجام شده، شواهد حاکی از این امر است که کمی‌سازی تأثیرات تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب، از اهمیت زیادی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب منطقه‌ای برخوردار است (Ogden et al., 2017; Meraj et al., 2017).

همچنین مطابق با مطالعات انجام شده، مدل هیدرولوژیکی IHACRES برای برآورد میزان تغییرات دبی و رواناب در بسیاری از حوزه‌های آبخیزی آبخیز مورد استفاده قرار گرفته است. هدف آن کمک به مهندسی منابع آب برای توصیف رابطه بین رواناب و بارش حوزه آبخیز است. از جمله کاربردهای مدل هیدرولوژیکی IHACRES می‌توان به شبیه‌سازی رواناب، استخراج شاخص جریان آرام (عدد رینولدز)، مطالعه رژیم هیدرولوژیکی و تغییرات محیطی، بررسی روابط بین خصوصیات پاسخ دینامیکی، کنترل یا اطمینان از کیفیت داده‌های هیدرومتری و تئوری هیدروگراف واحد و کاربردهای آن اشاره کرد (Ghanim et al., 2022).

در مطالعه‌ای (Fattahi et al., 2022) به منظور برآورد خروجی ۱۹ زیرحوزه آبخیز در استان گیلان از ادغام مدل‌های هیبریدی با مدل هیدرولوژیکی IHACRES استفاده کردند. مدل IHACRES با استفاده از داده‌های بارش و دما دریافت شده از ایستگاه‌های سینوپتیک و همچنین داده‌های بارش مبتنی بر ماهواره واسنجی شد. کمترین و بالاترین ضریب نش-ساتلکلیف برای مدل IHACRES در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۶۸ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۱۱ و ۰/۷۳ برآورد شد. همچنین مشاهده شد که استفاده از داده‌های بارش مبتنی بر ماهواره باعث می‌شود که ضریب نش بین ۱۰-۷۵ درصد در محدوده‌های مطالعاتی کاهش یابد. نتایج حاکی از آن بود که ادغام مدل IHACRES با یک مدل داده‌محور (GMDH) به‌طور کلی می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را در کلیه زیرحوزه‌های آبخیز بهبود بخشد.

در مطالعه دیگری (Shin and Kim, 2021) به منظور شبیه‌سازی رواناب پنج حوزه آبخیز در استرالیا از ترکیب دو مدل GR4J و IHACRES استفاده کردند. این پنج حوزه آبخیز از دو حوزه آبخیز مرطوب، یک حوزه آبخیز میانی و دو حوزه آبخیز خشک تشکیل شده است. ارزیابی پارامترها و تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از داده‌های مختلف مکانی و زمانی ۴۰ ساله محدوده مورد مطالعه انجام گرفت. نتایج نشان داد که مؤلفه‌های تولید بارش مؤثر مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان برای حوزه‌های آبخیز مرطوب مناسب‌تر هستند. همچنین مدل GR4J در شبیه‌سازی جریان حوزه‌های آبخیز متوسط و یک حوزه آبخیز خشک مناسب است. طبق نتایج به دست آمده مدل GR4J شبیه‌سازی جریان حوزه‌های آبخیز مرطوب و خشک و تولید بارش مؤثر شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز میانی را بهبود بخشید. در پژوهشی (Avand et al., 2023) اثر تغییر اقلیم را بر بارش و رواناب در حوزه آبخیز تجن، مازندران مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بدین منظور، با استفاده از داده‌های گزارش پنجم در قالب دو سناریو اقلیمی خوشبینانه (RCP2.6) و بدبینانه

در مطالعه دیگری (Golkarian et al. (2023) با هدف بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوزه آبخیز فریزی واقع در استان خراسان رضوی انجام دادند. بدین منظور، ابتدا مدل SWAT با اطلاعات مورد نیاز از حوزه آبخیز مورد مطالعه و داده‌های رواناب و رسوب واسنجی شد. جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر فرسایش حوزه آبخیز مورد مطالعه برای دوره‌ی آینده (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) از خروجی مدل اقلیمی MPI-ESM1-2HR مربوط به فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) و دو سناریوی انتشار متوسط و خیلی بدبینانه استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان رواناب در دوره آینه کاهش و میزان رسوب افزایش خواهد یافت. میانگین رواناب شبیه‌سازی شده تحت شرایط اقلیم آینده با دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد که نشان دهنده کاهش ۴۸/۹۰ درصدی رواناب در سناریو SSP2-4.5 و کاهش ۴۲/۸۰ درصدی رواناب در سناریو SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته است.

در مطالعه‌ای (Lotfifard al. (2018) تخمین رواناب روزانه را به کمک مدل نیمه مفهومی IHACRES در حوزه آبخیز ناورود گیلان مورد بررسی کردند. در این پژوهش بارش رواناب حوزه آبخیز ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های دبی روزانه ایستگاه خرچگیل در خروجی حوزه آبخیز و نیز داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوزه آبخیز، طی دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ به عنوان دوره واسنجی و دوره ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ نیز به عنوان دوره صحت‌سنجی شبیه‌سازی شد. نتایج آن‌ها بر اساس ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف و میانگین خطای کل و میانگین خطای نسبی پارامتریک ارائه شد که مقدار به دست آمده در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۵۸ به دست آمد.

بررسی مطالعات در سطح بین المللی و سطح داخلی نشان می‌دهد که ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی با روش‌های مختلف توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است. در راستای ضرورت این مسأله در پژوهش حاضر داده‌های بارش ماهانه ماهواره TRMM و داده‌های دما ماهواره FLDAS برای حوزه آبخیز تکاب از محیط سامانه Google Earth Engine استخراج شد. از طرفی در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی رواناب تولیدی تحت تأثیر تغییر اقلیم و ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی نیز از مدل IHACRES استفاده شد. با توجه به اهمیت دقت بارش و دما در مدل هیدرولوژیکی IHACRES در دسترس بودن سری زمانی داده‌ها الزامی هست. از طرفی عدم دسترسی آسان به داده‌ها، توزیع نامناسب ایستگاه‌ها و وجود داده‌های گم شده و برآورد نقطه‌ای، رویکرد استفاده از

(RCP8.5) نسبت به پیش‌بینی داده‌های اقلیم آینده در یک دوره ۲۷ ساله (۲۰۲۳-۲۰۵۰) اقدام شد. در نهایت، رواناب آینده رودخانه تجن با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که شدت خشکسالی هواشناسی آینده در ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز تجن با یکدیگر متفاوت بوده، اما در حالت کلی دارای یک روند مشابه هستند. در برخی از سال‌ها وضعیت خشکسالی خیلی شدید و در برخی از سال‌ها شرایط فرامرطوب ارزیابی شد که نشان‌دهنده وجود تغییرات اقلیمی در یک منطقه است. ضریب نش-ساتکلیف برابر با ۰/۴۸ و ضریب تعیین ۰/۵۸ نشان‌دهنده صحت مطلوب مدل IHACRES در شبیه‌سازی رواناب آینده است.

همچنین در پژوهشی (Hassani et al. (2022) تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب شهری منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بررسی قرار دادند. با ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی بارش دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، پنج مدل با بهترین عملکرد جهت پیش‌بینی بارش دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) انتخاب و برنوداد آن‌ها تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 با بهره‌گیری از مدل LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شد. نتایج تحلیل‌ها در مقیاس ماهانه نشان داد که در سناریوی SSP5-8.5، بارش در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس کاهش و در ماه‌های اوت و سپتامبر افزایش خواهد یافت. در سناریوی SSP1-2.6 نیز در ماه سپتامبر افزایش بارش پیش‌بینی شده است. پیش‌بینی‌ها در مقیاس سالانه روند مشخصی نداشته و در برخی مدل‌ها افزایش و در برخی دیگر کاهش بارش پیش‌بینی شده است. سپس تغییرات رواناب در این دو سناریو با مدل SWMM ارزیابی شد. نتایج اجرای مدل در سناریوی بدبینانه نشان داد که با افزایش ۳۱/۴۰ و ۲۶/۸۱ درصد بارش در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال نسبت به دوره پایه، حجم رواناب به ترتیب ۲۵/۲۴ و ۲۰/۷۰ درصد افزایش خواهد یافت.

در مطالعه‌ای که توسط (Ahmadi et al. (2019) انجام شد، از سه مدل SWAT، ANN و IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در منطقه کن به صورت روزانه، ماهانه و سالانه استفاده شد. نتایج نشان داد کارایی مدل‌های یادشده با در نظر گرفتن کمترین خطا، مدل ANN بهتر از دو مدل دیگر، ضریب نش ساتکلیف (NS) برابر ۰/۸۶، ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۸۷، معیار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر ۲/۲۱ و معیار میانگین انحراف خطا (MBE) برابر ۰/۰۸ محاسبه شد و همچنین برای مدل SWAT ضریب NS برابر ۰/۶۵، ضریب R^2 برابر ۰/۶۸، ضریب RMSE برابر ۳/۳۳ و معیار میانگین انحراف خطا (MBE) برابر ۰/۱۶ محاسبه شد که بهتر از مدل IHACRES است. با اینکه مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر خطای بیشتری دارد ولی بازم قابل قبول است.

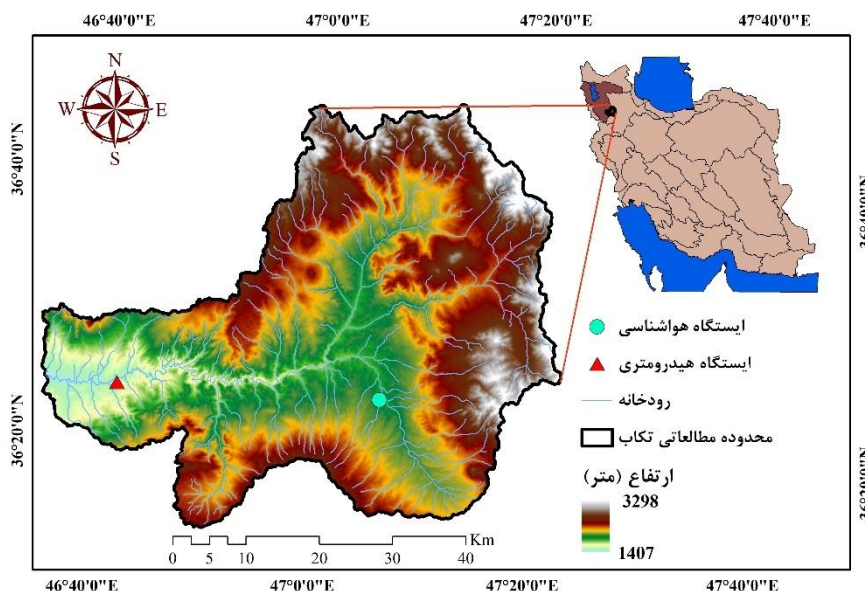
دائمی این منطقه رودخانه ساروق چای است که در واقع طولانی‌ترین رودخانه محدود نیز به‌شمار می‌رود. این رودخانه شاخه اصلی زرينه رود را تشکیل می‌دهد. منبع تغذیه رودخانه ساروق چای نزولات جوی است و جهت جریان رودخانه از شرق به غرب است. با در نظر گرفتن میانگین بارش سالانه ۳۵۰ میلی‌متر، این محدوده در گروه رژیم بارانی نیمه بیابانی یا نیمه خشک محسوب می‌شود. بیشترین دمای حوزه آبخیز در اوایل تیرماه است که به ۳۶ درجه سانتیگراد می‌رسد و سردترین دمای محدود، مطالعاتی هم در اواخر دی ماه است که به منفی ۳۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد. لازم به ذکر است که در بیشتر روزهای سرد سال به‌طور میانگین این محدوده رتبه اول سردترین شهر کشور را به خود اختصاص می‌دهد (IWRMC, 2013). در شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز تکاب به همراه نقشه رقوم ارتفاعی، شبکه رودخانه و ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری ارائه شده است.

اطلاعات ماهواره‌ای با اعمال ریزمقیاس‌نمایی برای حوزه آبخیز تکاب مورد استفاده قرار گرفت که به‌جای اعمال مقادیر یک ایستگاه و تعمیم آن به کل محدوده، از میانگین وزنی پیکسل‌های نقشه‌های ماهانه بارش و دما استفاده شد که این امر می‌تواند نشان دهنده قابل قبول‌تری از دقت نتایج برای حوزه آبخیز باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تکاب یکی از ۲۵ زیرحوزه آبخیز دریاچه ارومیه است که در جنوب این حوزه آبخیز آبریز قرار دارد (شکل ۱). این محدوده با مساحت ۲۴۰۹ کیلومترمربع بین طول‌های جغرافیایی ۴۶/۱۳ تا ۴۶/۳۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۷/۲۲ تا ۴۷/۲۲ شمالی گسترده شده است. رودخانه‌های حوزه آبخیز تکاب در دو نوع دائمی و فصلی تقسیم‌بندی می‌شوند. تنها رود پرآب و



شکل ۱- نقشه موقعیت حوزه آبخیز تکاب

Figure 1- Location map of the Takab watershed

این آزمون ابتدا آماره S با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Kendall, 1948).

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

که در آن n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند. تابع علامت نیز از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Kendall, 1948).

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

۲-۲- آزمون تحلیل روند من-کندال

این آزمون یکی از متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند است که ابتدا توسط منن (Mann, 1945) ارائه شد و سپس توسط کندال (Kendall, 1948) توسعه یافت و کاربرد آن توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه شده است (Kendall, 1948; Mann, 1945; Mitchell et al., 1966). یکی از نقاط قوت این روش می‌تواند به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره کرد. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌شود نیز از دیگر مزایای استفاده از آن است. برای محاسبه آماره

گرفته می‌شود. همچنین مقدار مثبت شیب میانه حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان دهنده نزولی بودن روند است. درصد تغییرات بارش و دما نیز با استفاده از شیب سن و از رابطه (۶) برآورد می‌شود (Yue and Hashino, 2003).

$$\text{درصد تغییرات نسبت به میانگین} = \frac{ss \times N}{\bar{x}} \quad (۶)$$

که در آن ss شیب سن، N تعداد سال آماری \bar{x} میانگین بارش یا دمای دوره مورد نظر است.

۲-۴- معرفی مدل هیدرولوژیکی IHACRES

یک مدل یکپارچه مفهومی متریک برای شبیه‌سازی بارش-رواناب است که توسط Jakeman et al. (1990) توسعه یافت. مدل IHACRES همواره به دلیل احتیاج به داده‌های کمتر و قدرت بالا در برآورد رواناب مورد توجه بوده است (Fattahi et al., 2022). به علت محدودیت‌های فیزیکی و زمانی، اندازه‌گیری دبی رودخانه‌ها با مشکلاتی روبه‌رو است. علاوه بر این، تغییر اقلیم، تغییرات کیفیت آب و تحقیقات بوم‌شناسی می‌تواند با استفاده از مدل‌های هیدرولوژی برآورد رواناب مورد ارزیابی قرار گیرند. مدل IHACRES توسط کارکانو و همکاران (Carcano et al., 2008) برای اهدافی مانند ارزیابی متغیرهای اقلیمی مانند تغییرات بارش دما و نیز تغییرات ضریب رواناب مورد استفاده قرار گرفته است.

مقدار مثبت و منفی S نشان‌دهنده روند افزایشی و کاهش‌ی در سری‌های زمانی در نظر گرفته می‌شود (Mann, 1945; Kendall, 1948; Mitchell et al., 1966).

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (۳)$$

همچنین مقدار واریانس S طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m (t(t-1)(2t+5))}{18} \quad (۴)$$

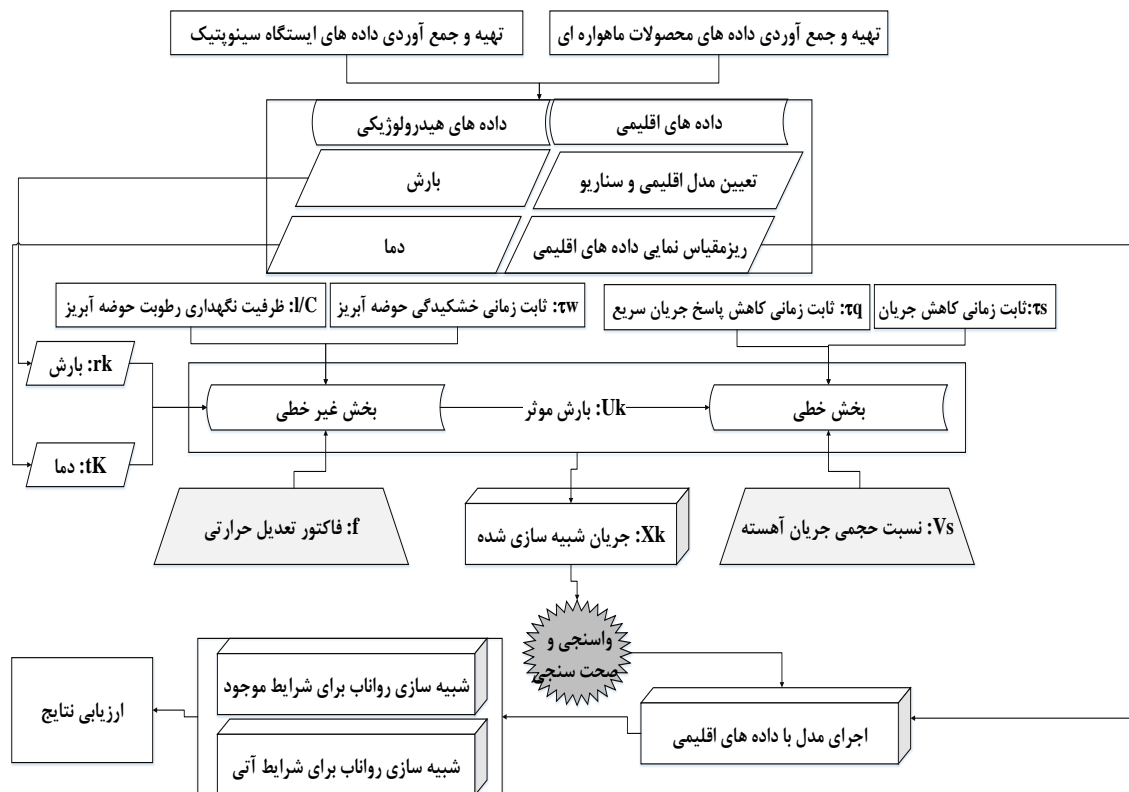
که در آن m معرف تعداد سری‌هایی است که در آن حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t نیز فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است.

۲-۳- آزمون شیب سن در تعیین شیب روند

در این روش، تغییرات در مقادیر سری زمانی بر اساس محاسبه شیب تغییرات بین کلیه جفت داده‌های مشاهداتی (به‌ازای n داده تعداد کل شیب‌ها برابر با $n \times (n-1) / 2$ است) از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Sen, 1968).

$$\beta = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{for } i=1, 2, \dots, N \quad (۵)$$

که در آن x_k و x_j به ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان k و j ، و j یک واحد زمانی بعد از k است. سپس میانه شیب‌های محاسبه شده به عنوان مقدار متوسط شیب سری زمانی در نظر



شکل ۲- ساختار کلی مدل هیدرولوژیکی IHACRES و رویکرد مورد استفاده در مطالعه حاضر

Figure 2- The general structure of the IHACRES hydrological model and the approach used in the present study

$$X_k = X_k^{(q)} + X_k^{(s)} \quad (10)$$

$$X_k^{(q)} = -\alpha_q \cdot X_{k-1}^{(q)} + \beta_q \quad (11)$$

$$X_k^{(s)} = -\alpha_s \cdot X_{k-1}^{(s)} + \beta_s \cdot u_k \quad (12)$$

$$T_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad (13)$$

$$T_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad (14)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روند بارش و دما

داده‌های بارش از نسخه ۷ ماهواره TRMM در مقیاس زمانی ماهانه برای کل دوره شبیه‌سازی استخراج شد. ورودی‌های مورد استفاده در این نسخه، سنجنده‌های مایکروویو و مادون قرمز هستند و باران‌سنج‌های مرکز آب و هواشناسی بارش جهانی (GPCP) برای تصحیح اریب و فراهم کردن بهترین تخمین از بارش مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش از نقشه DEM محدوده مطالعاتی در قالب مدل کوکریجینگ استفاده شد. همچنین برای داده‌های دما نیز از اطلاعات ماهواره‌ای FLDAS استفاده شد.

جهت بررسی و کنترل اطلاعات ماهواره‌ای بارش و دما با داده‌های مشاهداتی از ضریب تبیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) برای کل دوره آماری بهره گرفته شد. که این ارزیابی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مطابق نتایج به دست آمده این مقادیر برای داده‌های ماهانه بارش در کل دوره آماری به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷۰ و ۶/۷ برآورد شد. همچنین در خصوص مؤلفه دما نیز به ترتیب معادل ۰/۹۸، ۰/۸۷ و ۱/۲ محاسبه شد. همچنین مقادیر فوق برای بازه‌های زمانی فصلی و سالانه در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق با ارزیابی داده‌های بارش و دما اطلاعات ماهواره‌ای با داده‌های ایستگاه هواشناسی تکاب (شکل ۳)، نتایج حاکی از عملکرد خوب مقادیر اطلاعات ماهواره‌ای در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده است.

مدل IHACRES به پنج تا هفت متغیر برای واسنجی نیاز دارد که برای استفاده در حوزه‌های آبخیز بزرگ مناسب است. همچنین این مدل طبق شکل ۲ شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است که به ترتیب برای محاسبه تلفات و تبدیل بارش مؤثر به رواناب تعریف شده است. بخش اول مدل IHACRES، بارش را در پایه زمانی K (r_k) به بارش مؤثر (u_k) و بارش مازاد که سرانجام به وسیله تخبیر از بین می‌رود (با فرض نفوذ ناپذیر بودن حوزه آبخیز) تبدیل می‌کند که این بخش با عنوان بخش تلفات شناخته می‌شود. در بخش دوم توسط یک تابع تبدیل خطی (یا هیدروگراف واحد) بارش مؤثر به جریان مدل‌سازی شده (x_k) تبدیل می‌شود. به منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر در رابطه (۷) از ضریب رطوبتی حرارتی (S_k) استفاده می‌شود (Ye et al., 1997). از طرفی ضریب رطوبتی حوزه آبخیز تابعی از تخبیر و تعرق در حوزه آبخیز بوده که با استفاده از رابطه‌های (۷) و (۸) بیان می‌شود.

$$U_k = S_k r_k, \quad (0 < S_k < 1) \quad (7)$$

$$S_k = C \cdot r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_w(t_k)}\right) \cdot S_{k-1}, \quad S_0 = 0 \quad (8)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w \cdot e^{0.062f(R-t)}, \quad \tau_w(t_k) > 1 \quad (9)$$

در رابطه (۷)، $\tau_w(t_k)$ مقدار شاخص S_k را در رابطه (۹) هنگامی که بارشی اتفاق نمی‌افتد کنترل می‌کند که در آن R برابر با دمای مرجع، τ_w ثابت زمانی خشک شدن حوزه آبخیز و f فاکتور تعدیل دما و t_k زمان مرجع است.

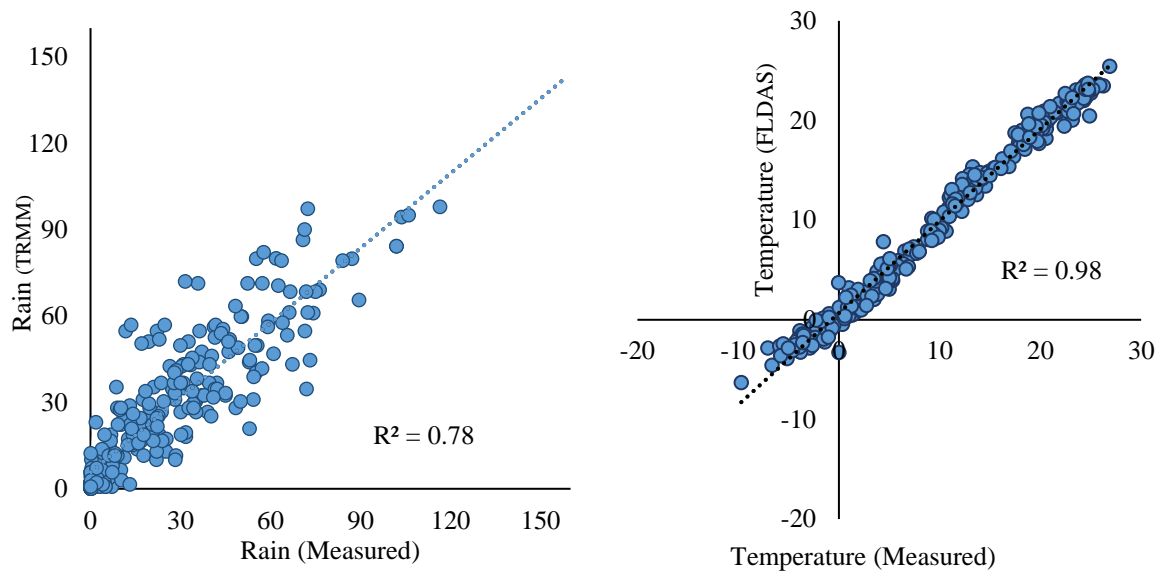
در رابطه (۸)، پارامتر C به گونه‌ای تعیین می‌شود که حجم بارندگی مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان گردد. برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی) که دارای سه پارامتر V_s ، τ_s و τ_q است، از ترکیب دو مؤلفه جریان سریع $x_k^{(q)}$ و جریان آهسته $x_k^{(s)}$ منجر به تولید رواناب x_k می‌شود که از رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) محاسبه می‌شود.

که در آن α_q و β_q به ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع است. همچنین α_s و β_s به ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته است که از رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود (Ye et al., 1997).

جدول ۱- تجزیه و تحلیل آماری اطلاعات ماهواره‌ای بارش و دما با داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰

Table 1- Statistical analysis of precipitation and temperature satellite data with the observation data of the meteorological station in the period from 1998 to 2020

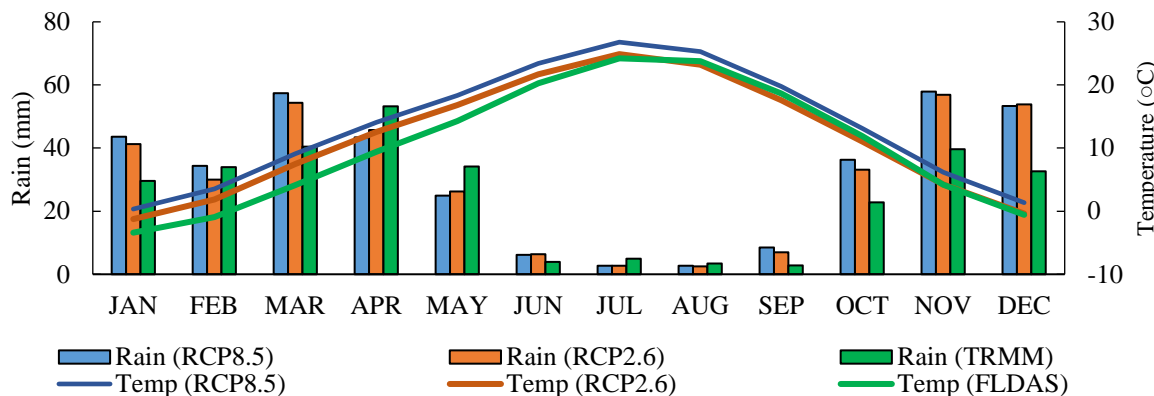
پارامترهای اقلیمی	مقیاس زمانی	R ²	NSE	RMSE
بارش	ماهانه	0.78	0.70	6.7
	فصلی	0.89	0.85	18.1
	سالانه	0.82	0.71	103.2
دما	ماهانه	0.98	0.87	1.2
	فصلی	0.99	0.93	0.24
	سالانه	0.93	0.89	0.38



شکل ۳- نمودار پراکنش مقادیر بارش و دما استخراج شده از اطلاعات ماهواره‌ای در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده
Figure 3- Scatter plot of precipitation and temperature values extracted from satellite data with measured values

است و مقادیر آن به ترتیب ۵۳/۱۴، ۴۰/۴۵ و ۳۹/۶۱ میلی‌متر در ماه برآورد شده است. همچنین بیشترین و کمترین دمای متوسط محدوده به ترتیب در ماه‌های میلادی ژوئیه و ژانویه معادل ماه‌های تیر و دی است که به ترتیب ۲۴/۲۰ و ۳/۴۹- درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

در شکل ۴ تغییرات توأم متوسط بارندگی و دما به صورت ماهانه برای داده‌های TRMM و FLDAS قرار داده شده است. بررسی داده‌های بارش حوزه آبخیز تکاب حاکی از آن است که بیشترین میزان بارندگی به ترتیب در ۳ ماه میلادی آوریل، مارچ و نوامبر معادل ماه‌های فروردین، اسفند و آبان رخ می‌دهد که تقریباً معادل ۴۵ درصد از کل بارندگی سالانه محدوده مطالعاتی

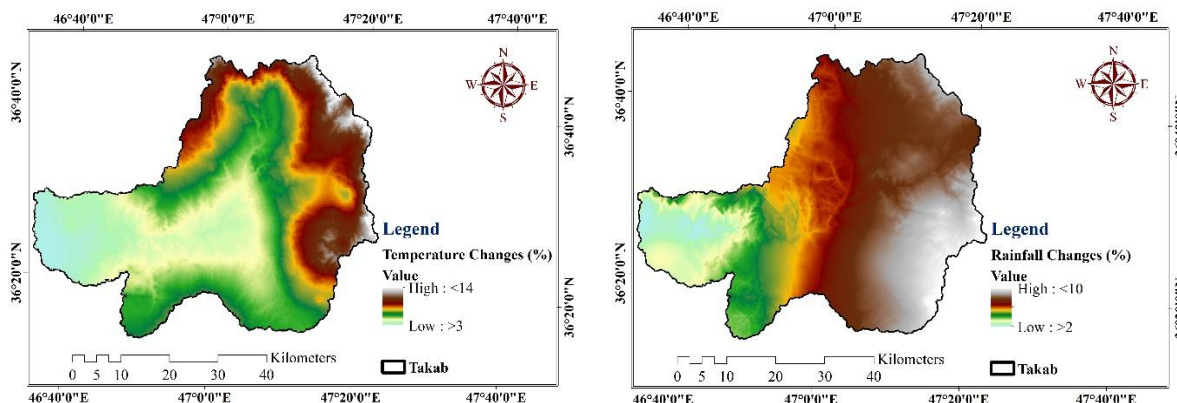


شکل ۴- مقایسه مقادیر متوسط ماهانه بارش و دما برای حوزه آبخیز تکاب حاصل از اطلاعات ماهواره‌ای برای دوره آماری و مدل‌های تغییر اقلیم برای دوره آتی

Figure 4- Comparison of average monthly rainfall and temperature values for Takab watershed obtained from satellite data for the statistical period and climate change models for the future period

سالانه بارش در ارتفاعات نسبت به متوسط سالانه بیشتر از دشت است. همچنین درصد تغییرات سالانه دما مربوط به حوزه آبخیز مطالعاتی به صورت مکانی نشان داده شده است (شکل ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات سالانه دما در کل حوزه آبخیز به صورت افزایشی است که درصد آن در قسمت شمالی منطقه مطالعاتی نسبت به مناطق جنوبی بیشتر بوده است (در کل منطقه به صورت افزایشی و غیرمعدار است). به صورت کلی تغییرات دما در منطقه مطالعاتی نشان از افزایش ۹/۸۰ درصدی (۱/۰۱ درجه سانتی‌گراد) نسبت به میانگین بازه زمانی دارد که بیشترین افزایش مربوط به ارتفاعات با ۱۳/۷۹ درصد و کمترین تغییر در دشت با ۳/۱۲ درصد بوده است.

روند تغییرات بارش و دما برای دوره‌ی زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ طبق محصول ماهواره‌ای TRMM 3B43V7 و FLDAS مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، در شکل ۵ درصد تغییرات سالانه بارش و دما مربوط به حوزه آبخیز تکاب که بر اساس رابطه (۶)، به صورت مکانی (برای تک تک پیکسل‌ها) به دست آمده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات سالانه بارش در کل حوزه آبخیز تکاب در سطح ۹۹ درصد به صورت افزایشی و غیرمعدار است. به جهت اینکه این محدوده به لحاظ مساحت، یک حوزه آبخیز کوچک تلقی می‌شود، به همین دلیل طبق شکل ۵ برای دشت و ارتفاعات این روند ملایم افزایشی تقریباً مشابه بوده اما با این وجود، به‌طورکلی درصد تغییرات



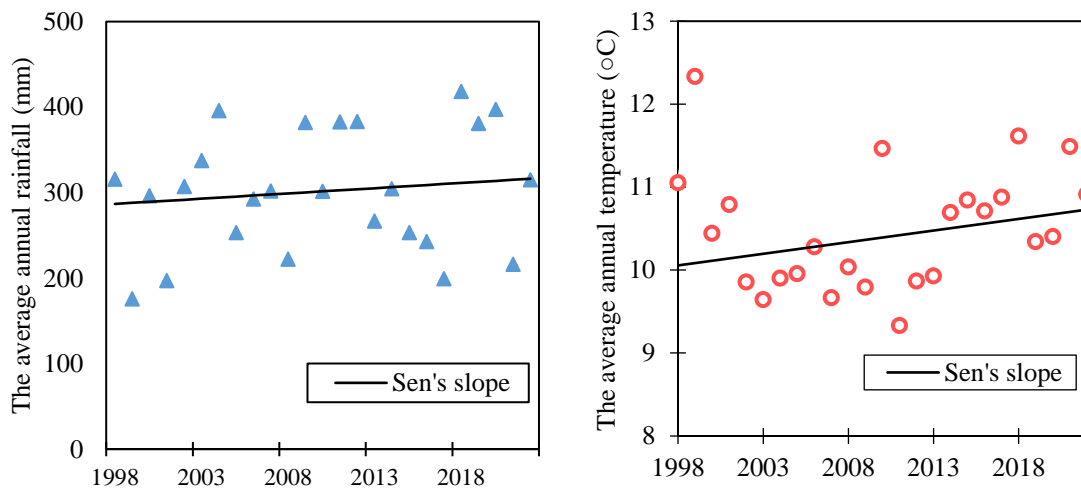
شکل ۵- درصد تغییرات بارش و دما سالانه حوزه آبخیز تکاب نسبت به متوسط سالانه دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰

Figure 5- The percentage of precipitation and temperature changes in the Takab watershed compared to the annual average of the statistical period from 1998 to 2020

جدول ۲- روند تغییرات بارش و دما در ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ (*: سطح معناداری ۵ درصد)

Table 2- Trend of precipitation and temperature changes in the meteorological station from 1998 to 2020 (*: 5% significance level)

دما (درجه سانتی‌گراد)			بارش (میلی‌متر)			دوره زمانی
Test Z	Sig.	Q	Test Z	Sig.	Q	
0.63		0.03	-0.11		-0.12	ژانویه
0.30		0.01	0.58		0.25	فوریه
-0.09		-0.00	0.49		0.33	مارس
-0.40		-0.03	-0.07		-0.09	آوریل
0.54		0.02	-0.30		-0.18	مه
1.38		0.04	-1.08		-0.01	ژوئن
2.20	*	0.06	0.44		0.00	ژوئیه
1.00		0.04	-0.11		0.00	اوت
1.33		0.04	-0.29		0.00	سپتامبر
-1.00		-0.05	1.35		0.74	اکتبر
0.54		0.02	1.51		1.12	نوامبر
-0.35		-0.02	0.25		0.24	دسامبر
1.33		0.01	1.56		2.03	زمستان
0.49		0.02	0.49		0.73	بهار
0.63		0.02	-0.07		-0.37	تابستان
2.08	*	0.04	-0.16		-0.04	پاییز
1.33		0.02	0.72		1.22	سالانه



شکل ۶- روند شیب سن در سری زمانی سالانه بارندگی و دما

Figure 6- Trend of Sen's slope in the annual time series of precipitation and temperature

مطابق با بررسی روند فصلی به ترتیب در فصل زمستان و پاییز برای بارندگی و دما به دست آمد.

با استفاده از روش من-کندال وجود روند در سری‌های زمانی هیدروکلیماتولوژی در منطقه مورد مطالعه تعیین شد اما این روش قادر به کمی‌سازی مقدار روند است که برای این منظور از روش ناپارامتری شیب سن می‌توان استفاده کرد. شکل ۶ بیانگر روند شیب سن در سری زمانی سالانه بارش و دما است. نتایج این آزمون حاکی از افزایش هر دو پارامتر در سری زمانی سالانه با شیب ۱/۲ و ۰/۰۲ بوده که نشان از همگرایی نتایج دو آزمون فوق است.

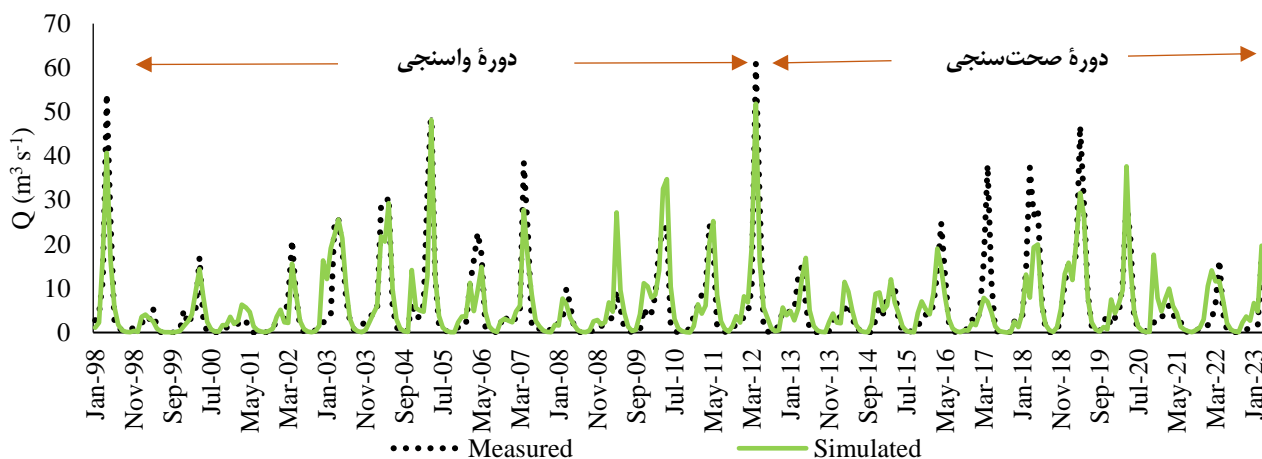
جدول ۲ نتایج آزمون من-کندال در مورد بارش و دما را نشان می‌دهد. بارش در بازه‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه غیرمعنادار بوده و روند تغییرات بارندگی سالانه در ایستگاه تکاب معادل ۱/۲۲ میلی‌متر برآورد شده است. همچنین دما فقط در ماه ژوئیه و فصل پاییز در سطح ۹۵ درصد معنادار است که روند تغییرات سالانه دما در این ایستگاه ۰/۰۲ درجه سانتی‌گراد به-دست آمد. براساس نتایج روند ماهانه بیشترین روند تغییرات بارندگی و دما به ترتیب در ماه‌های نوامبر و ژوئیه معادل ۱/۱۲ میلی‌متر و ۰/۰۶ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که این نتایج

۳-۲- مدل شبیه سازی

در این پژوهش از مدل IHACRES به عنوان یک ابزار مدل سازی برای برآورد دبی رودخانه به صورت ماهانه استفاده شده است. مدل IHACRES با استفاده از داده های دما و بارش اطلاعات ماهواره ای برای دوره آماری ۲۲ سال اجرا شد. دوره آماری از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۲۰ به عنوان دوره پایه شبیه سازی در این پژوهش انتخاب شد. در مطالعه حاضر به منظور واسنجی و صحت سنجی مدل از داده های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری صفاخانه به عنوان داده های مشاهده ای استفاده شد که ۶۰ درصد داده ها برای واسنجی و ۴۰ درصد جهت صحت سنجی لحاظ شد. به منظور بررسی کارایی مدل IHACRES از ضریب تبیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، میانگین مربعات

خطا (RMSE) و خطای اریبی (Bias) در دوره های واسنجی و صحت سنجی بهره گرفته شد.

طبق نتایج به دست آمده این مقادیر ضریب تبیین، ضریب کارایی نش-ساتکلیف، میانگین مربعات خطا و خطای اریبی برای دوره ۱۴ ساله واسنجی مدل به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۰ (بی بعد)، ۴/۱ (مترمکعب بر ثانیه) و ۰/۴۲ برآورد شد. همچنین این مقادیر برای دوره صحت سنجی نیز به ترتیب معادل ۰/۷۱ و ۰/۶۸ (بی بعد)، ۴/۷ (مترمکعب بر ثانیه) و ۰/۱ محاسبه شده است (جدول ۳). در جمع بندی قابل ذکر است که دبی شبیه سازی شده روند قابل قبولی با جریان رودخانه در دوره صحت سنجی نیز دارد (شکل ۷). همچنین میانگین دبی سالانه و کل دوره زمانی قابل قبول است. با استفاده از نتایج به دست آمده می توان چنین نتیجه گرفت که مدل عملکرد خوبی را در منطقه از خود نشان داده است.



شکل ۷- مقایسه دبی مشاهده ای و شبیه سازی در ایستگاه هیدرومتری صفاخانه برای دوره های واسنجی و صحت سنجی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۲
Figure 7- Comparison of observed and simulated discharge at Safakhane hydrometric station for the calibration and validation period from 1998 to 2022

جدول ۳- تجزیه و تحلیل آماری نتایج برای دوره های واسنجی (۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲) و صحت سنجی (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰)

Table 3- Statistical analysis of the results for the calibration period (1998 to 2012) and validation period (2013 to 2020)

دوره زمانی	R^2	NSE	RMSE	BIAS
واسنجی	0.82	0.80	4.1	0.42
صحت سنجی	0.71	0.68	4.7	0.1

میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه ای با کاهش روبه رو خواهد شد. اما در سناریو RCP8.5 میزان غلظت دی اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ را در حدود ۱۹۶۰ ppm و همچنین رشد جمعیت در حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد شد و همچنین اثر گازهای گلخانه ای بر واداشت تابشی را تا حدود $۸/۵ \text{ W/m}^2$ اعلام نمودند. مطابق این سناریو رشد تکنولوژی بدلیل افزایش تولید ناخالصی داخل کشور نسبت به سناریوی RCP2.6 کاهش خواهد یافت (Allahverdipour et al., 2022).

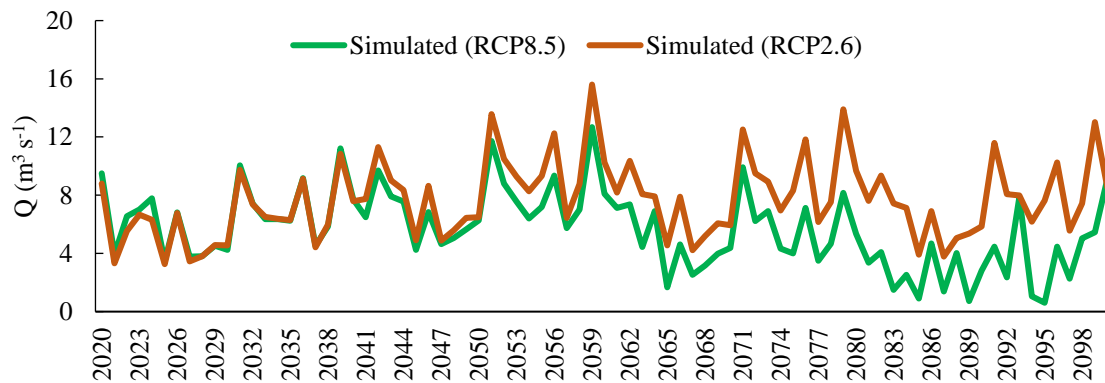
همچنین به منظور بررسی کارایی مدل جهت تولید داده های بارش و دما برای دوره های زمانی سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ از مدل

همچنین در پژوهش حاضر به منظور برآورد دبی رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم به ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی پرداخته شد. بدین منظور از سناریوهای انتشار RCP (RCP2.6 و RCP8.5) برای سال های آتی استفاده شد.

مطابق سناریو RCP2.6 میزان غلظت گاز دی اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ را در حدود ۴۹۰ ppm و همچنین جمعیت جهان را حدود ۷ میلیارد نفر و همچنین اثر گازهای گلخانه ای بر واداشت تابشی را تا حدود $۲/۶ \text{ W/m}^2$ اعلام نمودند. در این سناریو رشد تکنولوژی افزایش خواهد یافت و میزان استفاده از انرژی های نو به جای انرژی و سوخت فسیلی افزایش خواهد داشت و در نهایت

RCP8.5 به ترتیب معادل ۸/۳۱ و ۵/۱۴ مترمکعب بر ثانیه پیش‌بینی شد. به‌طور کلی تحت سناریو RCP2.6 دبی پیش‌بینی شده دارای یک شیب صعودی غیرمعدنار است. به‌طوری‌که درصد تغییرات سالانه دبی تحت این سناریو معادل ۱۹/۳۹ درصد به دست آمد. همچنین در بررسی خروجی مدل IHACRES ناشی از سناریو RCP8.5 ملاحظه می‌شود که روند آبی رودخانه یک روند نزولی معدنار بوده که درصد تغییرات سالانه دبی شبیه‌سازی شده طبق این سناریو معادل ۶۸/۱- درصد برآورد شد. مطابق با شکل ۸ مشاهده می‌شود که این روند نزولی از سال ۲۰۶۰ شیب تندتری دارد.

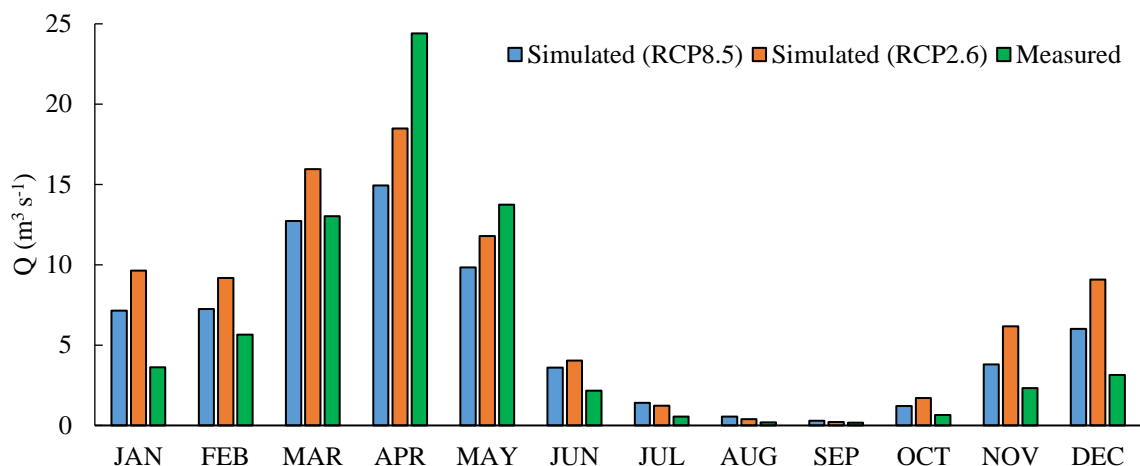
ریز مقیاس‌نمایی LARS استفاده شد. با توجه به نتایج مشخص است که مدل‌ها در برآورد متغیرهای هواشناسی در دوره پایه کارایی لازم را تحت هر دو سناریو ندارند. پس از واسنجی مدل، سری زمانی رواناب ماهانه حوزه آبخیز تکاب تا سال ۲۱۰۰ برای داده‌های دما و بارش تولید شده حاصل از مدل LARS برای هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از مدل IHACRES شبیه‌سازی شد. تغییرات سالانه دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES برای دوره آبی تحت سناریوهای اقلیمی در شکل ۸ ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده متوسط دبی سالانه طبق سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و



شکل ۸- مقایسه متوسط سالانه دبی شبیه‌سازی شده برای دوره سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP2.6
Figure 8- Comparison of the simulated annual average discharge for the period from 2020 to 2100 under RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios

مطابق شکل ۹، نتایج شبیه‌سازی جریان تحت سناریو RCP2.6 حاکی از آن است که بیشترین افزایش دبی در دوره آبی برای حوزه آبخیز تکاب مربوط به ماه‌های دسامبر، نوامبر و ژانویه برآورد شد. همچنین تحت سناریو RCP8.5 بیشترین افزایش دبی در دوره آبی به ترتیب در ماه‌های آگوست، ژوئیه و ژانویه محاسبه شد. از طرفی بیشترین کاهش دبی تحت هر دو سناریو به ترتیب در ماه‌های آوریل و می شبیه‌سازی به دست آمد.

همچنین متوسط رواناب ماهانه درازمدت در دوره آبی با میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی در هر دو سناریو بررسی شد. مطابق با داده‌های ایستگاه هیدرومتری بیشترین مقادیر دبی رودخانه به ترتیب در ماه‌های آوریل، مارچ و می (فصل بهار) اندازه‌گیری شده است که این امر طبق اجرای مدل برای داده‌های هردو سناریو اقلیمی نیز صدق می‌کند اما از شدت دبی اوج در ماه‌های فصل بهار رفته رفته کاسته می‌شود. به جز ماه‌های فصل بهار در سایر ماه‌های سال به طور متوسط تحت هر دو سناریو تغییر اقلیم پیش‌بینی شد که مقادیر ماهانه دبی شبیه‌سازی شده نسبت مقادیر مشاهداتی میزان بیشتری خواهد داشت.



شکل ۹- مقایسه متوسط ماهانه دبی شبیه‌سازی شده برای دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 با متوسط ماهانه دبی اندازه‌گیری شده ایستگاه هیدرومتری دوره آماری

Figure 9- Comparison of the simulated monthly average discharge for the period from 2020 to 2100 under RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios with the monthly average discharge measured at the hydrometric station for the statistical period

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به جهت توزیع نامناسب مکانی ایستگاه‌های هواشناسی در حوزه آبخیز تکاب، از اطلاعات ماهواره‌ای جهت ارزیابی اثرات احتمالی عوامل اقلیمی شامل بارش و دما استفاده شد. بدین منظور برای بررسی تغییرات بارش و دما از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ به صورت ماهانه به ترتیب از اطلاعات ماهواره‌ای TRMM و FLDAS با استفاده از معیارهای آماری مختلف با داده‌های ایستگاه سینوپتیک تکاب به صورت ماهانه، سالانه و فصلی مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی‌های فصلی از دقت مناسب‌تری برخوردار بودند. مطابق با نتایج به دست آمده تغییرات سالانه بارش در کل حوزه آبخیز تکاب در سطح ۹۹ درصد به صورت افزایشی غیرمعنادار برآورد شد.

به طور کلی درصد تغییرات سالانه بارش در ارتفاعات نسبت به متوسط سالانه بیشتر از دشت است. تغییرات سالانه دما نیز در کل حوزه آبخیز به صورت افزایشی بوده که درصد آن در قسمت شمالی منطقه مطالعاتی نسبت به مناطق جنوبی بیشتر بوده است (در کل منطقه به صورت افزایشی غیرمعنادار است). به صورت کلی تغییرات دما در منطقه مطالعاتی نشان از افزایش ۹/۸۰ درصدی (۱/۰۱ درجه سانتی‌گراد) نسبت به میانگین بازه زمانی دارد که بیشترین افزایش مربوط به ارتفاعات با ۱۳/۷۹ درصد و کمترین تغییر در دشت با ۳/۱۲ درصد بوده است.

نتایج پژوهش نشان داد که حوزه آبخیز در طول دوره آماری با افزایش دما و بارش درگیر است. عواملی که می‌تواند اثرات معکوسی بر دبی رودخانه ساروق‌چای داشته باشد. افزایش دما در ماه‌های گرم سال در اثر تغییر اقلیم در مطالعات Dong et al. (2014)، Tan et al. (2015) و Salimi et al. (2023) نیز عنوان شده است. این نتایج در قسمت بررسی روند و ارزیابی

اطلاعات ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هواشناسی با نتایج Nouri et al. (2021) و Rahimiani et al. (2022) مقایسه شد و صحت آن مورد تأیید قرار گرفت.

به‌منظور شبیه‌سازی دبی از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. نتایج نشان داد مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی دبی حوزه آبخیز دارد که با یافته‌های Mojerloo et al. (2019) همخوانی دارد. با این وجود عملکرد این مدل برای جریان آرام رودخانه و دبی‌های کم مناسب بوده، اما در شبیه‌سازی دبی‌های پیک حوزه آبخیز ضعیف عمل می‌کند که به این موضوع در مطالعات متعددی اشاره شده است.

جهت پیش‌بینی رواناب تولیدی از سناریوهای اقلیمی مختلف از گزارشات برنامه پنجم توسعه تحت عنوان سناریوهای انتشار RCP (RCP2.6 و RCP8.5) با ریزمقیاس‌نمایی توسط مدل LARS برای سال‌های آتی تا سال ۲۱۰۰ استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده متوسط دبی سالانه طبق سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب معادل ۸/۳۱ و ۵/۱۴ مترمکعب برثانیه پیش‌بینی شد. به‌طورکلی تحت سناریو RCP2.6 دبی پیش‌بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. به‌طوری که درصد تغییرات سالانه دبی تحت این سناریو معادل ۱۹/۳۹ درصد محاسبه شد که این امر ناشی از افزایش متوسط بارندگی، کاهش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات ناچیز دما در دوره آبی است. اما برای سناریو RCP8.5 ملاحظه شد که دبی آبی رودخانه نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت که درصد تغییرات سالانه دبی شبیه‌سازی شده طبق این سناریو معادل ۶۸/۱- درصد برآورد شد که ناشی از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش دما و کاهش محسوس بارندگی است. از

شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۲). گزارش حوضه دریاچه ارومیه، بیلان آب محدوده مطالعاتی تکاب، شرکت مهندسی مشاور. ریحیمیانی ایرانشاهی، حمید، مرادی، حمیدرضا و جلیلی، خلیل (۱۴۰۱). روند تغییرات بارش و دما در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱-۱۲. doi:10.22098/mmws.2022.9520.1048

گلکاریان، علی، شیخ‌رودی، الهه، زرین، آذر و راشکی، علیرضا (۱۴۰۲). بررسی و تحلیل اثرهای تغییرات اقلیمی بر مقدار رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز فریزی). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۲۹۸-۲۸۳. doi:10.22098/mmws.2023.13722.1361

لطفی‌راد، مرتضی، ادیب، آرش و حقیقی، علی (۱۳۹۷). تخمین رواناب روزانه به کمک مدل نیمه مفهومی IHACRES در حوضه آبریز ناورود گیلان. *اکوهیدرولوژی*، ۵(۲)، ۴۶۰-۴۴۹. doi:10.22059/ije.2017.234237.614

موجرلو، فاطمه، فضل‌اولی، رامین و عمادی، علیرضا (۱۳۹۸). کاربرد مدل IHACRES برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز تنج. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۱)، ۱۲۹-۱۴۱. doi:20.1001.1.20087942.1398.13.1.12.8

نوری، مهرباب، مرید، سعید، کریمی، نعمت‌الله و غلامی، هوشنگ (۱۴۰۰). تغییرات مکانی و زمانی روند در دما و بارش حوضه آبریز فرامرزی ارس. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۳)، ۱۰۴-۱۱۷. doi: 20.1001.1.17352347.1400.17.3.5.0 .۱۱۷

پیامدهای این سناریو نقصان در تأمین بهنگام آب بخش کشاورزی و کاهش محسوس امنیت غذایی خواهد بود.

منابع

آوند، محمدتقی، مرادی، حمیدرضا و حزباوی، زینب (۱۴۰۲). ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی زمان حال و پیش‌نگری آن در آینده در حوزه آبخیز تنج. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۷۸-۵۷. doi:10.22098/mmws.2023.13352.1330

الله‌پوردی پور، پویا، قربانی، محمد علی و اسدی، اسماعیل (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر طبقه‌بندی اقلیمی ایران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۱۱۲-۹۵. doi:10.22098/mmws.2023.12755.1271

حسنی، محمد رضا، نیک‌سخن، محمدحسین، اردستانی، مجتبی و موسوی جنبه‌سرای، سید فرید (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۶۹-۲۸۵. doi:10.22098/mmws.2022.11849.1176

سلیمی، محسن، ستاری، محمدتقی و پارسا، جواد (۱۴۰۲). بررسی اثر تغییر اقلیم براساس سناریوهای مختلف بر رواناب و جریان ورودی به مخزن سد نهند. *دانش آب و خاک*، ۳۳(۴)، ۱۳۳-۱۴۷. doi:10.22034/ws.2022.52756.2486

References

- Abushandi, E. H., & Merkel, B. J. (2011). Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. *Journal of Water and Climate Change*, 2(1), 56-71. doi:10.2166/wcc.2011.048
- Ahmadi, M., Moeni, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyani, G. R. (2019). Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 111, 65-77. doi:10.1016/j.pce.2019.05.002
- Allahverdipour, P., Ghorbani, M. A., & Asadi, E. (2023). Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran. *Water and Soil Management and Modelling*. doi:10.22098/mmws.2023.12755.1271 [In Persian]
- Avand, M., Moradi, H. R., & Hazbavi, Z. (2023). Evaluation of current meteorological and hydrological drought and its future forecast in the Tajan watershed. *Water and Soil Management and Modelling*. doi:10.22098/mmws.2023.13352.1330. [In Persian]
- Caletka, M., Šulc Michalková, M., Karásek, P., & Fučík, P. (2020). Improvement of SCS-CN initial abstraction coefficient in the Czech Republic: a study of five catchments. *Water*, 12(7), 1964. doi:10.3390/w12071964
- Carcano, E. C., Bartolini, P., Muselli, M., & Piroddi, L. (2008). Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily streamflows. *Journal of hydrology* 362(3-4), 291-307. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.08.026
- Chien, H., Yeh, P.J.-F. and Knouft, J. (2013). Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. 491, 73-88. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.026
- Ebert, E.E., Janowiak, J.E. and Kidd, C. (2007). Comparison of near-real-time rainfall estimates from satellite observations and numerical models. 88(1), 47-64. doi:10.1175/BAMS-88-1-47
- Fattahi, P., Ashrafzadeh, A., Pirmoradian, N., & Vazifedoust, M. (2022). Integrating IHACRES with a data-driven model to investigate the possibility of improving monthly flow estimates. *Water Supply*, 22(1), 360-371. doi:10.2166/ws.2021.267
- Ghanim, A. A., Beddu, S., Abd Manan, T. S. B., Al Yami, S. H., Irfan, M., Mursal, S. N. F., & Khan, T. (2022). Prediction of runoff in watersheds located within data-scarce regions. *Sustainability*, 14(13), 7986. doi:10.3390/su14137986
- Gholami, H., Lotfirad, M., Ashrafi, S. M., Biazar, S. M., & Singh, V. P. (2022). Multi-GCM ensemble model for reduction of uncertainty in runoff projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-12. doi:10.1007/s00477-022-02311-1
- Golkarian, A., Sheikhoodei, E., Zarrin, A., & Rashki, A. (2023). Investigating and analyzing the effects of climate change on the amount of runoff and sediment using the SWAT model (Case study: Ferizi watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, doi:10.22098/mmws.2023.13722.1361. [In Persian]

- Hassani, M. R., Niksokhan, M. H., Ardestani, M., & Mousavi Janbehsarayi, S. F. (2022). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (Case study: district 10 of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 269-285. doi:10.22098/mmws.2022.11849.1176. [In Persian]
- Ibrahim, A., Zakaria, N., Harun, N., & Hashim, M. M. (2021, March). Rainfall runoff modeling for the basin in Bukit Kledang, Perak. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 1106, No. 1, p. 012033). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1106/1/012033
- IPCC. (2007). The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 996, 113-119.
- IWRMC (Iran Water Resources Management Company) (2013) Report of Urmia Lake watershed. Water resources balance report of the Takab study area *Yekom Consulting Engineers Company* [In Persian]
- Jakeman, A. J., Littlewood, I. G., & Whitehead, P. G. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of hydrology*, 117(1-4), 275-300. doi:10.1016/0022-1694(90)90097-H
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
- Lotfirad, M., Adib, A., & Haghghi, A. (2018). Estimation of daily runoff using of the semi-conceptual rainfall-runoff IHACRES model in the Navrood watershed (a watershed in the Gilan province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(2), 449-460. doi:10.22059/IJE.2017.234237.614. [In Persian]
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. 245-259. doi:10.2307/1907187
- Meraj, G., Singh, S. K., Kanga, S., & Islam, M. (2021). Modeling on comparison of ecosystem services concepts, tools, methods and their ecological-economic implications: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-20. doi:10.1007/s40808-021-01131-6
- Mitchell, J., Dzerdzevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W., Lamb, H., Rao, K. and Wallén, C, Switzerland. (1966). *Climatic Change*. Technical Note, No. 79. 99.
- Mojerloo, F., Fazloulou, R., & emadi, A. (2019). Application of the IHACRES model to assess the effects of climate change on the discharge of Tajan Watershed. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(1), 129-141. doi:20.1001.1.20087942.1398.13.1.12.8. [In Persian]
- National Research Council. (1991). Opportunities in the hydrologic sciences. *National Academies Press*.
- Nouri, M., Morid, S., Karimi, N., & Gholami, H. (2021). Spatial and temporal variation of temperature and precipitation trends of Aras Transboundary River Basin. *Iran-Water Resources Research*, 17(3), 104-117. doi:20.1001.1.17352347.1400.17.3.5.0. [In Persian]
- Ogden, F. L., Hawkins, R. P., Walter, M. T., & Goodrich, D. C. (2017). Comment on "Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework or spatially lumped rainfall-runoff response" by MS Bartlett et al. *Water Resources Research*, 53(7), 6345-6350. doi:10.1002/2016WR020176
- Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H. R., & Jalili, K. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 1-12. doi:10.22098/mmws.2022.9520.1048. [In Persian]
- Rizeei, H. M., Pradhan, B., & Saharkhiz, M. A. (2018). Surface runoff prediction regarding LULC and climate dynamics using coupled LTM, optimized ARIMA, and GIS-based SCS-CN models in tropical region. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(3), 1-16. doi:10.1007/s12517-018-3397-6
- Salimi, M., Sattari, M. T., & Parsa, J. (2023). Investigating the effect of climate change based on different scenarios on the runoff and inflow to Nahand dam reservoir. *Water and Soil Science*, 33(4), 133-147. doi:10.22034/ws.2022.52756.2486. [In Persian]
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Shin, M. J., & Kim, C. S. (2021). Component combination test to investigate improvement of the IHACRES and GR4J rainfall-runoff models. *Water*, 13(15), 2126. doi:10.3390/w13152126
- Suroso, S., Santoso, P. B., Birkinshaw, S., Kilsby, C., Bardossy, A., & Aldrian, E. (2023). Assessment of TRMM rainfall data for flood modelling in three contrasting catchments in Java, Indonesia. *Journal of Hydroinformatics*. doi:10.2166/hydro.2023.132
- Walling, D., Fang, D.J.G. and change, p. (2003). Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. 39(1-2): 111-126. doi:10.1016/S0921-8181(03)00020-1.
- Ye, W., Bates, B. C., Viney, N. R., Sivapalan, M., & Jakeman, A. J. (1997). Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33(1), 153-166. doi:10.1029/96WR02840
- Yue, S., & Hashino, M. (2003). Long term trends of annual and monthly rainfall in Japan 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 587-596. doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb03677.x
- Zhao, Y., Zou, X., Gao, J., Xu, X., Wang, C., Tang, D., Wang, T. and Wu, X. (2015). Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China. 536, 803-812. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.07.119