

Research Paper

Detection of Climate Change using Trend Analysis of Hydro-Climatic Extremes in the Tajan River Basin**Elnaz Aghaee Kahlik Bolaghi¹,****Ramin Fazloulou^{2*},****Mohsen Masoudian³****Mehdi Yasi⁴****Mehdi Nadi⁵**

¹ Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

² Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

⁴ Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran.

⁵ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.



10.22125/iwe.2026.553384.1901

Received:
March 13, 2026

Accepted:
August 9, 2026

Available online:
September 7, 2026

Keywords:
Climate Change, Tajan River Basin, Return Period, Downscaling.

Abstract

Climate change, as one of the most challenging issues of the twenty-first century, poses a serious threat to the sustainability of water resources. The present study was conducted to investigate the effects of climate change on temperature regimes, precipitation patterns (including both rainfall and snowfall), and the occurrence of hydro-climatic extreme events within the Tajan River basin, northern Iran. For this purpose, the SDSM downscaling model—due to its wide application and acceptable performance in generating daily temperature and precipitation—was employed under the Sixth Assessment Report (AR6) and the SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 scenarios for two future periods (2025–2055 and 2065–2095) at the Soleyman-Tangh and Kiassar stations. Design precipitation values were also estimated using statistical analysis and the EasyFit distribution-fitting model. The results indicate that monthly minimum and maximum temperatures increase in all scenarios, with stronger warming under high-emission scenarios. Moreover, the precipitation regime shifts in the future, with increases in winter and autumn precipitation and a noticeable decrease in spring precipitation. During the 2025–2055 period, the intensity of extreme precipitation events rises, increasing the likelihood of destructive floods; however, in the 2065–2095 period, a substantial decline in design precipitation is observed across all return periods, which may reduce the potential for intense rainfall events but increase the risk of widespread droughts. The decline in design precipitation during the late-century period reflects a shift in climate conditions toward fewer extreme rainfall events and generally drier conditions. These findings highlight intensified climatic variability, greater concentration of precipitation in short-duration extreme events, and increased surface runoff, all of which

* **Corresponding Author:** Ramin Fazloulou

Address: Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran.

Email: r.fazloulou@sanru.ac.ir
Tel: +981133687575

impose additional pressure on water-resources management. Therefore, developing adaptation strategies for future climate conditions and revising water-resources utilization plans in the Tajan River Basin will be essential and unavoidable.

1. Introduction

Rivers, as one of the most important natural components of aquatic ecosystems, are constantly influenced by various factors, including climate change. Climate change is a global phenomenon that has widespread impacts on water resources and natural hazards, such as floods. By altering precipitation patterns, temperature, and runoff, climate change can lead to significant changes in the flow regime of rivers.

2. Materials and Methods

In this study, the SDSM statistical downscaling model version 1.6 and large-scale climate data from the IPCC Sixth Assessment Report were used for modeling. The dataset included outputs from the MPI-ESM1-2-HR climate model as large-scale predictors, and local data from the Soleyman Tangeh station, including precipitation for the baseline period 1979–2014 and maximum and minimum temperatures for 1990–2014. After defining independent and dependent variables, calibration and validation steps were performed, and the downscaled data were compared with observed records. Model performance was evaluated using the statistical indicators NSE, RMSE, R^2 , and R. Temperature projections were generated for two future periods, 2025–2054 and 2065–2088, while precipitation projections corresponded to 2025–2054 and 2065–2094, respectively. For statistical analysis and fitting of data distributions, the EasyFit software was used, which includes 65 statistical distributions for continuous and discrete data. Distribution fitting was conducted using validated tests such as Anderson–Darling, Kolmogorov–Smirnov, and Chi-square. This approach allows accurate analysis of climate variability and assessment of hydrological hazards. The return periods of precipitation for the observed and two future periods under climate change scenarios were estimated using EasyFit for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, and 10,000 years.

3. Results

Temperature analysis indicates that during 2065–2088, both monthly minimum and maximum temperatures are projected to rise under all climate scenarios, particularly under SSP5-8.5, which represents unchecked development and high greenhouse gas emissions. This warming could increase evapotranspiration, reduce snow reserves, and ultimately decrease surface runoff, posing a serious threat to the basin's water resources. On the other hand, future precipitation trends (2025–2054 and 2065–2094) indicate changes in both temporal distribution and rainfall intensity. Increases in autumn and winter precipitation, contrasted with a significant reduction in spring, especially in May, suggest a shift toward more concentrated short-term rainfall and a higher likelihood of intense autumn floods, while summer remains the driest season. Analysis of design rainfall across different return periods reveals two contrasting patterns: during 2025–2054, the intensity of rare and extreme rainfall events increases, raising the probability of destructive floods; whereas during 2065–2094, a notable decrease in design rainfall is observed across all return periods, potentially reducing extreme rainfall but increasing the risk of widespread droughts. Overall, these findings highlight the need to revise water management policies, develop flood early warning systems, optimize water use patterns, and enhance the basin's adaptive capacity to future climatic conditions. Neglecting these changes could pose serious challenges to the water security and environmental sustainability of the Tajan River Basin in the near future. Therefore, incorporating these climate-driven changes, particularly for long-term return periods, is crucial in flood risk assessment and water resources management.

4. Discussion and Conclusion

The warming trend in the Tajan River Basin during the period 2025–2048 indicates an increase in both monthly T_{min} and T_{max} at the Soleyman Tangeh station. Minimum temperatures, particularly during the cold seasons, are projected to rise more than maximum temperatures, indicating a reduction in daily temperature variability. In the 2065–2088 period, both monthly minimum and maximum temperatures are expected to increase under all climate scenarios, with the highest rise under SSP5-8.5, which represents unchecked development and high greenhouse gas emissions.

On the other hand, analysis of future precipitation trends (2025–2054 and 2065–2094) shows changes in the temporal distribution and intensity of rainfall. Design rainfall analysis across different return periods reveals two contrasting patterns: during 2025–2054, the intensity of rare and extreme rainfall events increases, raising the likelihood of destructive floods; whereas in 2065–2094, a noticeable decrease in design rainfall is observed across all return periods, which may reduce the potential for intense rainfall but increase the risk of widespread droughts.

5. Six important references

- 1) Akbari, M., Malekinezhad, H., & Hajibigloo, M. (2025). Analysis of Climate Change and Future Trends of Precipitation and Temperature in the Karde Dam Basin. *Desert Management*, 12(4), 87-106.
- 2) Ba, W., Du, P., Liu, T., Bao, A., Luo, M., Hassan, M., & Qin, C. (2018). Simulating hydrological responses to climate change using dynamic and statistical downscaling methods: a case study in the Kaidu River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 10, 905-920.
- 3) Challa, V., & Renganathan, M. (2025). Assessment of climate change impact on meteorological variables of Indravati River Basin using SDSM and CMIP6 models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 1-22.
- 4) Mojerloo, F., Fazloul, 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.
- 5) Schittkowski, K. (2002). EASY-FIT: a software system for data fitting in dynamical systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23, 153-169.
- 6) Singh, D., Jain, S. K., & Gupta, R. D. (2015). Statistical downscaling and projection of future temperature and precipitation change in middle catchment of Sutlej River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 124, 843-860.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The present study was conducted with the financial and moral support of the Vice-Chancellor's Office of Research and Technology of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University as part of the activities carried out in the form of a research-oriented student core entitled "Flood Studies in the City of Sari" and a doctoral dissertation at the aforementioned university. The authors hereby express their gratitude and appreciation.

آشکارسازی تغییر اقلیم با تحلیل روند وقوع رخداد‌های فرین اقلیمی در حوضه آبریز تجن

الناز آقایی کهلیک بلاغی^۱، رامین فضل‌اولی^{۲*}، محسن مسعودیان^۳، مهدی یاسی^۴، مهدی نادی^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

تغییرات اقلیمی، یکی از چالش برانگیزترین مسائل قرن بیست و یکم، پایداری منابع آب را تهدید می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر الگوهای دما، بارندگی (مجموع باران و برف) و رخداد‌های حدی هیدرواقلیمی در حوضه آبریز رودخانه تجن انجام شده است. برای این منظور از مدل ریزمقیاس گر SDSM به دلیل سابقه استفاده گسترده از این مدل و عملکرد قابل قبول در تولید داده‌های روزانه دما و بارندگی، تحت گزارش ششم تغییر اقلیم و سناریوهای مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در دو بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۵۵ و ۲۰۶۵-۲۰۹۵ برای دما و بارندگی ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و کیاسر استفاده شد و بارندگی طراحی نیز با روش آماری و مدل EasyFit محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که دمای حداقل و حداکثر ماهانه در تمام سناریوها افزایش می‌یابد و این روند در سناریوهای با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای شدیدتر است. همچنین الگوی بارندگی در آینده تغییر یافته، به گونه‌ای که بارندگی زمستانه و پاییزه افزایش و بارندگی بهار کاهش می‌یابد. در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۵، شدت بارندگی‌های شدید افزایش یافته که احتمال وقوع سیلاب‌های مخرب را بیشتر می‌کند؛ اما در دوره ۲۰۶۵-۲۰۹۵، کاهش محسوسی در بارندگی‌های طراحی در تمام دوره‌های بازگشت دیده می‌شود که می‌تواند به کاهش پتانسیل بارندگی‌های شدید اما در عوض افزایش احتمال خشکسالی‌های گسترده منجر شود. کاهش بارندگی‌های طراحی در دوره دوم بیانگر تغییر الگوی اقلیم به سمت کاهش رخداد بارندگی‌های شدید و افزایش شرایط خشک‌تر در آینده است. این نتایج حاکی از افزایش نوسانات اقلیمی، تمرکز بارندگی‌ها در رخداد‌های شدید و افزایش رواناب سطحی است که در مجموع، فشار مضاعفی بر مدیریت منابع آب وارد می‌سازد. بر این اساس، تدوین راهبردهای سازگاری با اقلیم آینده و بازنگری در الگوهای بهره‌برداری از منابع آب در حوضه رودخانه تجن، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه آبریز تجن، دوره بازگشت، ریزمقیاس‌نمایی.

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ایمیل: elnaz95.aghaee@gmail.com

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. (*- نویسنده مسئول): raminfazl@yahoo.com (r.fazloul@sanru.ac.ir)

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ایمیل: mohsen_masoudian@yahoo.com

^۴ استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: m.yasi@ut.ac.ir

^۵ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ایمیل: mehdi.nadi@gmail.com



مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت در الگوهای اقلیمی زمین اطلاق می‌شود که عمدتاً در اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو رخ می‌دهد و به یکی از اساسی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار تبدیل شده است. این پدیده، یکی از مهم‌ترین تهدیدهای قرن بیست‌ویکم است که ثبات منابع آب را به مخاطره می‌اندازد. تغییرات در بارندگی و دما بر رواناب و دسترسی به منابع آب تأثیر می‌گذارند و در حالی که تقاضا برای آب آشامیدنی در حال افزایش است، چالش‌های قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند (Challa and Renganathan., 2025). آشکارترین پیامد افزایش غلظت کربن دی اکسید در جو وقوع گرمایش جهانی است. گرم شدن کره زمین بخشی از تغییر اقلیم قلمداد می‌شود. تغییر اقلیم، تغییرات کلی و گسترده دمای منطقه‌ای و جهانی، تغییر در رژیم بارندگی، میزان رواناب، سرعت باد، تابش خورشیدی و دمای هواست. (Maslin, 2014). تغییر اقلیم با دگرگون کردن فرآیندهای مختلف در اکوسیستم‌های طبیعی، منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Xu and Singh, 2004; Mupenzi et al., 2011). تغییر در آبدی متوسط سالانه و فصلی، بزرگی و فراوانی سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها متأثر از تغییر شرایط اقلیمی است (رحیم‌زاده و عسگری، ۱۳۸۳). بولین (۲۰۱۶) اثرات گازهای گلخانه‌ای را بر سامانه اقلیم جهانی مورد بررسی قرار داد. وی با تمرکز بر نقش دی‌اکسید کربن (CO_2) و سایر گازهای گلخانه‌ای، نشان داد که تجمع این گازها در لایه‌های بالایی جو موجب جذب مجدد تابش فروسرخ زمین و در نتیجه افزایش دمای میانگین سطحی سیاره می‌شود. این پدیده که به اثر گلخانه‌ای معروف است، در صورت تداوم می‌تواند الگوهای بارندگی، شدت و فراوانی سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و حتی تعادل اکوسیستم‌های طبیعی را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد (Bolin., 1986). یانگ و همکاران (۲۰۲۰) برای تحلیل واریانس بین بارندگی و رواناب از تابع کاپولای آرشمیدین استفاده کردند و تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی روی رواناب فلات

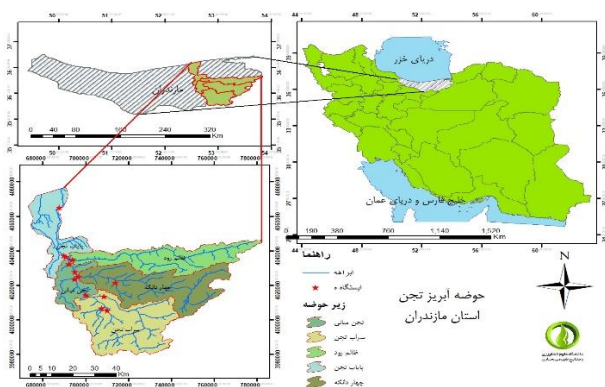
تبت با استفاده از مدل WEP-L نشان دادند سهم تغییر اقلیم و تأثیر کاربری اراضی در تغییرات رواناب برای دو حوضه مورد بررسی ۸۱/۷ و ۷۱/۵ درصد است. سهم باقیمانده تأثیر مربوط به فعالیت‌های انسانی است. تغییرات آب و هوایی منجر به ذوب یخچال‌های منجمد دائمی و تغییر توزیع عمودی پوشش گیاهی شده است که دلیل اصلی رواناب است (Yang et al., 2020). با و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب را با ترکیب روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و آماری شامل مدل‌های اقلیم منطقه‌ای [RCMs] و مدل‌های گردش عمومی جو [GCMs] بررسی کردند. روند تغییر اقلیم با استفاده از سه مدل اقلیم منطقه‌ای تصحیح‌شده از نظر سوگیری HadGEM3-RA، RegCM4 و SUN-MM5 و یک مجموعه مدل GCM با روش تغییر دلتا، تحت دو سناریوی آینده (RCP4.5) و (RCP8.5) و از مدل هیدرولوژیکی SWAT (با ارزیابی آب و خاک) نشان دادند که هر دو متغیر دما و بارندگی نسبت به دوره مرجع در آینده افزایش خواهند یافت، به‌طوری که حداکثر افزایش میانگین دمای سالانه به ۲/۴ درجه سانتی‌گراد و بیشترین درصد افزایش میانگین بارندگی سالانه به ۳۸/۴ درصد خواهد رسید. براساس نتایج حاصل از تصحیح سوگیری خروجی مدل‌های اقلیمی، مشخص شد که دقت مدل‌های منطقه‌ای در شبیه‌سازی دما بسیار بهتر از بارندگی است. (Ba et al., 2018). در مطالعه‌ای دیگر، شو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDM) و خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 نشان دادند که حوضه آبریز رودخانه Kaidu، در شمال غرب چین افزایشی در روند دما را تجربه خواهد کرد، در حالی که تغییرات بارندگی فاقد روند مشخصی خواهد بود (Xu et al., 2016). چالا و رنگاناتان (۲۰۲۵) با استفاده از مدل آماری ریزمقیاس‌گر (SDSM) به منظور ریزمقیاس‌سازی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی (GCM) برای حوضه آبریز رودخانه ایندراواتی در هند، متغیرهای هواشناسی T_{max} و T_{min} PCP Pathagudem با استفاده از چهار مدل

بلایای بزرگ و در مقیاس بزرگ به دلیل تغییرات اقلیمی بیشتر شود. بر اساس پیش‌بینی‌های آژانس هواشناسی ژاپن (JMA)، انتظار می‌رود که احتمال سالیانه وقوع سیل در صورتی که سناریوی افزایش دمای ۴ درجه سانتی‌گراد دنبال شود حدود ۱/۴ برابر تغییر می‌کند (Nakamura & Shimatani, 2021). موجولو و همکاران (۱۳۹۷) بررسی آثار تغییر اقلیم در حوضه آبریز تجن طی دوره آینده (۱۳۹۸-۱۴۲۸) با استفاده از خروجی‌های مدل جوی CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ریزمقیاس‌سازی نتایج به کمک مدل SDSM نشان داد که میانگین دمای سالانه افزایش و میزان بارندگی کاهش خواهد یافت. افزایش دما و در پی آن افزایش تبخیر، کاهش کمی و کیفی منابع آب حوضه را به همراه خواهد داشت. همچنین تغییر در الگوی بارندگی زمستانی و کاهش بارندگی سالانه منجر به افت منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود. تغییرات اقلیمی سبب تغییر در آبدهی متوسط سالانه و فصلی، بزرگی و فراوانی سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها می‌گردد (رحیم زاده و عسگری، ۱۳۸۳). تغییرات اقلیمی بر منابع آب در بسیاری از مناطق تأثیر خواهد گذاشت. توزیع زمانی و مکانی و در دسترس بودن منابع آب و همچنین فراوانی رویدادهای حدی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. برای مقابله با چالش‌های جدید متمرکز بر مدیریت منابع آب، کمی‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی در مقیاس حوضه ضروری است. هنگام تعیین پارامترهای طراحی منابع آب، مانند جریان رودخانه‌ها در حوضه‌های رودخانه انتخاب‌شده، باید تغییر متغیرهای هیدرولوژیکی (مانند بارندگی) پیش‌بینی شود. علاوه بر این، تغییرات آب و هوا احتمالاً تأثیرات قابل توجهی بر هیدرولوژی و منابع آب حوضه خواهد داشت و ممکن است در نهایت منجر به سیل‌های جدی‌تر شود. تغییر اقلیم منجر به ذوب یخچال‌ها، نابودی یخ‌های دائمی و جابجایی در توزیع ارتفاعی پوشش گیاهی شده است که این موارد، دلایل اصلی تغییرات رواناب در حوضه رودخانه محسوب می‌شوند. و مبنایی علمی برای حفاظت منطقی و بهره‌برداری بهینه از منابع آب، و نیز فعالیت‌های حفاظت خاک و منابع آب فراهم می‌کند.

CanESM5، MPI-ESM1-2-HR، EC-Earth3 و NorESM2-LM نشان دادند مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد را دارد و نتایج ریزمقیاس‌سازی شده، تغییرات قابل توجهی را در الگوهای هواشناسی نشان دادند (Challa and Renganathan 2025). اکبری و همکاران (Akbari et al., 2025) تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارندگی در حوضه سد کارده با استفاده از مدل‌های سری CMIP6 و تحت سه سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، میانی (SSP245) و بدبینانه (SSP585) مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مدل SDSM نشان می‌دهند که در آینده، بیشترین افزایش بارندگی در ماه مارس و در فصل زمستان در تمامی سناریوها رخ خواهد داد، به‌طور کلی، در تمامی سناریوها، انتظار می‌رود که دما در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش یابد، در حالی که میزان بارندگی بسته به ماه، فصل و ویژگی‌های کوهستانی حوضه سد کارده، ممکن است افزایش یا کاهش یابد (Akbari et al., 2025). سینگ و همکاران (۲۰۱۵) مجموعه‌ای از دو مدل گردش عمومی جو (GCM)، شامل CGCM3 و HadCM3، برای پیش‌بینی دمای بیشینه (T Max)، دمای کمینه (T Min) و بارندگی نشان دادند که میانگین سالانه دمای بیشینه، دمای کمینه و بارندگی در همه سناریوهای مدل‌های CGCM3 و HadCM3 در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت. همچنین، میانگین ماهانه دمای کمینه افزایش می‌یابد (Singh et al., 2015). ژائوفی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی بارندگی‌های فصلی در مناطق گرمسیری پرداختند. نتایج نشان داد که مدل ANN توانست پیش‌بینی‌های دقیق‌تری برای بارندگی‌های شدید و غیرمعمول انجام دهد، در حالی که مدل SDSM بیشتر در پیش‌بینی بارندگی‌های متوسط و فصلی عملکرد خوبی داشت. به‌ویژه در مناطقی که بارندگی‌ها به‌طور غیرقابل پیش‌بینی و شدید رخ می‌دهند، ANN نتایج بهتری داشت. با این حال، مدل SDSM در شبیه‌سازی بارندگی‌های سالانه عملکرد قابل‌قبولی داشت (Zhaofei et al. 2020). پیش‌بینی می‌شود در آینده



39N سیستم UTM و بیضوی WGS84 در استان مازندران قرار دارد. بیش از ۶۰ درصد حوضه از مناطق کوهستانی، حدود ۲۵ درصد آن از اراضی جلگه‌ای و دشت‌های ساحلی و بقیه آن از تراس‌های رودخانه‌ای، اراضی کوهپایه‌ای و تپه ماهورها تشکیل شده است (مطالعات شناسایی توجیهی طرح آبخیزداری تجن (حوضه آبریز سد شهید رجائی)، (۱۳۳۲).



شکل (۱): نقشه حوضه و زیر حوضه‌های رودخانه تجن

مدل گردش عمومی MPI-ESM1-2- HR_historical_1979-2014

در مطالعات مربوط به تغییرات اقلیم در دوره‌های آتی، یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین ابزارها، مدل‌های گردش عمومی جو (General Circulation Models - GCMs) هستند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی و دینامیکی مؤثر بر جو و اقیانوس‌ها، قادرند رفتار اقلیم زمین را در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون بازسازی کنند. ساختار GCMها به گونه‌ای طراحی شده که امکان تحلیل سه‌بعدی وضعیت آب‌وهوا، از جمله دما، بارندگی، فشار، و سایر پارامترهای اقلیمی را فراهم می‌سازد. این مدل‌ها بر اساس دقت، حوزه عملکرد و سطح پوشش، به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند؛ از جمله مدل‌های منطقه‌ای با تمرکز بر نواحی خاص تا مدل‌های جهانی با دید کل‌نگر. با وجود مزایای قابل‌توجه GCMها در ارزیابی روندهای کلان اقلیمی، محدودیت اصلی آن‌ها در مقیاس مکانی بزرگ خروجی‌هاست که استفاده مستقیم از آن‌ها را در مطالعات محلی و منطقه‌ای با چالش مواجه می‌سازد. در

(Yang et al., 2020). اغلب شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی نشان دادند که رواناب کل در آینده به دلیل افزایش تبخیر کاهش خواهد یافت، به‌طوری که حداکثر کاهش می‌تواند تا ۲۲/۳ درصد برسد. همچنین، احتمال افزایش دبی اوج (جریان سیلابی) در آینده بیش از ۹۹٪ است. همچنین نتایج مطالعه با و همکاران ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که در آینده احتمالاً آب کمتری در بخش‌های بالادست حوضه رودخانه کایدو در دسترس خواهد بود و توزیع زمانی جریان نیز ممکن است متمرکزتر شود (یعنی سیلابی‌تر و ناپایدارتر گردد) (Ba et al., 2018). بارندگی و دما از شاخص‌های حیاتی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم هستند. تغییر اقلیم از طریق ایجاد تغییراتی در الگوهای بارندگی و دما، چرخه آب و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Akbari et al., 2025). با توجه به نتایج مطالعات مختلف، بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین عامل تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و شدت سیلاب‌ها دارد. در حالی که دما به‌طور یکنواخت در اغلب سناریوهای آینده افزایش خواهد یافت، تغییرات بارندگی از نظر زمانی، مکانی و فصلی بسیار متغیر هستند و مستقیماً بر رواناب و وقوع سیلاب اثر می‌گذارند. افزایش بارندگی می‌تواند باعث افزایش دبی‌های اوج و بالا رفتن احتمال بروز سیلاب‌های شدید و در مقابل، کاهش بارندگی ممکن است منجر به خشکسالی و کاهش جریان پایه شود. از این‌رو، برای ارزیابی دقیق اثرات تغییر اقلیم بر سیلاب و رواناب، بررسی تغییرات بارندگی در کنار سناریوهای اقلیمی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه ضروری است. این تحلیل‌ها نه تنها در فهم بهتر خطرات پیش‌رو، بلکه در به‌روزرسانی طراحی سازه‌های آبی و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در آینده اهمیت بسزایی دارند.

محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز رودخانه تجن با وسعتی حدود ۴۰۱۵/۸۸ کیلومترمربع و مختصات جغرافیایی ۵۲° ۵۶' تا ۵۴° ۵۹' طول شرقی و ۳۵° ۵۶' تا ۳۶° ۴۹' عرض شمالی در زون

جغرافیایی مناطق مورد مطالعه تنظیم شود. (Wilby and Dessai, 2010). فهرست متغیرهای ECMWF_ERA5_1979-2014 در جدول ۱ آورده شده است.

همین راستا، به منظور افزایش دقت و کاربردی سازی نتایج در سطوح خردتر، استفاده از روش های ریزمقیاس نمایی (Downscaling) ضروری است. این فرآیند موجب می شود خروجی مدل های GCM متناسب با شرایط اقلیمی و

جدول (۱): فهرست متغیرهای ECMWF_ERA5_1979-2014

پیش بینی کننده	تعریف	پیش بینی کننده	تعریف
mslp	فشار سطح دریا	p5zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
p1_f	سرعت باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p850	ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1_u	مؤلفه منطقه ای باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_f	سرعت باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1_v	مؤلفه نصف النهاری باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_u	مؤلفه منطقه ای باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_v	مؤلفه نصف النهاری باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1th	جهت باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8th	جهت باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p500	ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	p8zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p5_f	سرعت باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	prcp	بارندگی کل
p5_u	مؤلفه منطقه ای باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	s500	رطوبت ویژه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
p5_v	مؤلفه نصف النهاری باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	s850	رطوبت ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p5_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	shum	رطوبت ویژه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
p5th	جهت باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	temp	دمای هوا در ارتفاع ۲ متر

دقیق تر در مقیاس محلی یا منطقه ای تبدیل می شوند. این روش به پژوهشگران کمک می کند تا اثرات تغییر اقلیم را در مقیاس های قابل استفاده برای تصمیم گیری های محلی بررسی کنند. دانشمندان پیش بینی کرده اند انتشار گازهای گلخانه ای باعث خواهد شد گرمایش جهانی در طول قرن بیست و یکم ادامه یابد. با این حال، تأثیرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف یکسان نخواهد بود، زیرا گردش جو و رطوبت مرتبط با آن در مناطق مختلف متفاوت است (Lana et al, 2016). بنابراین، در اختیار داشتن اطلاعات قابل اعتماد در مقیاس های منطقه ای برای ارائه راهکارهای مؤثر در زمینه سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم، بسیار ضروری است. مدل های گردش عمومی جو (General Circulation Models - GCMs) توانایی شبیه سازی

مدل SDSM^۱

مدل های گردش عمومی جو (General Circulation Models - GCM2s) ابزار اصلی برای شبیه سازی اقلیم جهانی و بررسی تأثیرات تغییر اقلیم در سطح کلان هستند. با این حال، دقت تفکیک مکانی این مدل ها معمولاً بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر است و برای تحلیل های محلی یا منطقه ای، مانند مطالعات هیدرولوژیکی، کشاورزی یا مدیریت منابع آب، مناسب نیستند. بنابراین، جهت انتقال نتایج این مدل ها به مقیاس های کوچک تر، از ریزمقیاس نمایی (Downscaling) استفاده می شود. (Hewitson and Crane, 2006) ریزمقیاس نمایی فرآیندی است که در آن خروجی های مدل های اقلیمی در مقیاس بزرگ به اطلاعات اقلیمی

² General Circulation Models

¹ Statistical DownScaling Model



ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی از خروجی مدل‌های GCM توسعه یافته‌اند: روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDM^1) و روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی (DDM^2). (Mearns et al, 1999; Busuioc et al, 2006).

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و آماری معمولاً برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب استفاده می‌شوند. به‌طور کلی، هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند.

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDM) و دینامیکی (DDM) از تکنیک‌های متفاوتی برای استخراج سیگنال‌های تغییر اقلیم استفاده می‌کنند. روش SDM با ایجاد یک رابطه آماری بین خروجی‌های مدل گردش عمومی جو (GCM) و داده‌های مشاهداتی اقلیمی چندساله در مقیاس‌های بزرگ و منطقه‌ای، اقلیم آینده منطقه‌ای را پیش‌بینی می‌کند. با این حال، این روش قادر به تولید اطلاعات مکانی با جزئیات بالا نیست (Christensen & Christensen, 2007; Zhang & Huang, 2013). در مقابل، روش DDM می‌تواند با استفاده از یک مدل اقلیم منطقه‌ای (RCM^3) که به مدل GCM متصل شده، پیش‌بینی‌هایی با وضوح مکانی بالاتر ارائه دهد. البته این روش به‌شدت تحت تأثیر شرایط مرزی‌ای است که توسط مدل‌های GCM فراهم می‌شود. مزیت اصلی روش آماری SDM ، پایین بودن هزینه محاسباتی و سهولت در اجرا است، در حالی که اجرای یک مدل RCM در روش DDM به منابع محاسباتی زیاد و دانش تخصصی بالا در زمینه محاسبات عددی نیاز دارد. از این رو، SDM ها اغلب به‌عنوان تکمیل‌کننده‌ای برای روش‌های DDM در نظر گرفته می‌شوند (Sachindra et al, 2014).

ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی^۴

در این روش از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای ($RCMs$) استفاده می‌شود که در آن‌ها مدل‌های عددی با تفکیک بالاتر اجرا شده و درون مدل GCM لانه‌گزینی ($nesting$) می‌شوند.

سیستم اقلیم در مقیاس جهانی و قاره‌ای را دارند، اما خروجی‌های آن‌ها به دلیل تفکیک مکانی نسبتاً پایین، برای تحلیل‌های محلی و منطقه‌ای مناسب نیستند. از این‌رو، جهت استفاده از خروجی GCM در مقیاس محلی، فرآیند ریزمقیاس‌سازی ($Downscaling$) ضروری است (Fowler et al., 2007). مدل $SDSM$ ($Statistical Downscaling Model$) یک ابزار تحت ویندوز می‌باشد که یکی از شناخته‌شده‌ترین ابزارهاست که بر مبنای رگرسیون آماری و تولید داده‌های تصادفی مشروط طراحی شده است. این مدل برای نخستین بار توسط Wilby و همکاران توسعه یافت، اما در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعدد در جهت بهبود و استفاده گسترده از آن انجام شده است (Hashmi et al., 2011). مدل $SDSM$ با هدف برقراری رابطه آماری بین متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس (نظیر فشار، رطوبت، دما، و ... با متغیرهای محلی (مانند بارندگی یا دمای یک ایستگاه خاص) طراحی شده است. فرض اصلی در این مدل آن است که ارتباط بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و محلی در طول زمان پایدار باقی می‌ماند. $SDSM$ شامل دو بخش اصلی است:

واسنجی (Calibration): در این مرحله، داده‌های تاریخی مشاهده‌شده ایستگاه و داده‌های پیش‌بینی‌کننده مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گرفته و با بهره‌گیری از رگرسیون چندمتغیره، روابط آماری بین آن‌ها استخراج می‌شود.

تولید داده: پس از واسنجی مدل، داده‌های آینده حاصل از خروجی GCM ها تحت سناریوهای اقلیمی مختلف وارد مدل شده و سری‌های زمانی داده‌های اقلیمی محلی تولید می‌شوند (Chen et al., 2011).

در حال حاضر، مطالعات مرتبط با تأثیرات تغییر اقلیم عمدتاً بر پایه استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) متمرکز هستند. اما دقت پایین این مدل‌ها به دلیل وضوح مکانی نسبتاً بزرگ، ارائه اطلاعات دقیق در مقیاس منطقه‌ای را دشوار می‌سازد. به همین دلیل، دو روش برای

³ Regional Climate Model

⁴ Dynamical Downscaling

¹ Species Distribution Model

² Deterministic Derivative-based Method for Sensitivity Analysis

شبیه‌سازی اقلیم آینده: بهره‌گیری از خروجی GCM ها برای تولید داده‌های آینده در مقیاس روزانه یا ماهانه (Liu et al., 2020). مدل SDSM تاکنون در نسخه‌های متعددی توسعه یافته است و نسخه‌های جدیدتر آن توانایی‌های بیشتری در پردازش داده‌ها و مدیریت عدم قطعیت دارند. در این پژوهش از نسخه ۶/۱ این مدل استفاده شد که توانایی بالاتری در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی نسبت به نسخه‌های پیشین دارد. در مطالعه حاضر، از داده‌های خروجی مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-HR - به دلیل اینکه MPI سری High Resolution هستند و دارای تفکیک‌پذیری مکانی بسیار بالاتر نسبت به نسخه‌های استاندارد است همچنین وضوح افقی بالای مدل باعث می‌شود الگوهای هم‌دید، پوشش‌های جوی، چرخه‌های بارندگی و ویژگی‌های مکانی اقلیم به‌ویژه در مناطق کوهستانی و حوضه‌های کوچک با دقت بیشتری بازنمایی شوند. به عنوان متغیرهای بزرگ‌مقیاس در مقیاس روزانه استفاده شد. متغیرهای محلی شامل بارندگی و دمای بیشینه و کمینه ایستگاه سلیمان‌تنگه بوده که به صورت جداگانه در مدل تعریف شدند. پس از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، داده‌های ریزمقیاس‌شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه و کارایی مدل از نظر آماری ارزیابی گردید. برای مدل‌سازی با مدل ریزمقیاس‌گر SDSM داده‌های مدل گردش عمومی جو از سایت کانادایی^۲ برای گزارش ششم تهیه شد. در جدول ۱ اطلاعات مورد استفاده ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارندگی و دما آورده شده است.

این روش به طور مستقیم فرآیندهای فیزیکی را شبیه‌سازی می‌کند و نتایج نسبتاً دقیق‌تری دارد، اما نیازمند توان پردازشی بالا و منابع داده‌ای وسیع است (Giorgi & Mearns, 1999).

ریزمقیاس‌نمایی آماری^۱

در این روش، روابط آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (مانند فشار سطحی، دمای تراز بالا و ...) و متغیرهای محلی (مانند بارندگی یا دمای ایستگاه) استخراج می‌شود و سپس این روابط برای پیش‌بینی شرایط محلی در آینده به کار می‌رود. روش‌های آماری نیاز به داده‌های محلی تاریخی دارند و شامل تکنیک‌هایی مانند رگرسیون آماری (مدل SDSM)، الگوهای تطبیقی (analog methods) و مدل‌سازی شبکه‌های عصبی یا یادگیری ماشین هستند. از مزایای این روش می‌توان به سادگی اجرا، نیاز کمتر به منابع پردازشی و کاربرد گسترده آن در مطالعات توسعه پایدار و مدیریت منابع اشاره کرد (Wilby et al., 2002).

روش کار SDSM را می‌توان در چهار گام اصلی طبقه‌بندی کرد:

کنترل کیفیت داده‌ها: شامل بررسی نواقص، داده‌های پرت و همگن‌سازی داده‌های تاریخی.

غربال‌گری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده: با استفاده از معیارهایی چون ضریب همبستگی، ضریب همبستگی جزئی و آزمون‌های آماری بین داده‌های محلی و داده‌های جوی.

واسنجی مدل: تنظیم پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت یافتن بهترین رابطه بین متغیرها.

² <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=predcmip6#dlinterface>

¹ Statistical Downscaling



جدول (۲) کاتالاعات مورد استفاده ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارندگی و دما

ایستگاه	نوع داده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره پایه	منبع داده
سلیمان‌تنگه	بارندگی	۵۳/۱۳°E	۳۶/۱۵°N	۴۵۴	۱۹۷۹-۲۰۱۴	شرکت آب منطقه‌ای استان
	دما	۵۳/۱۳°E	۳۶/۱۵°N	۴۵۴	۱۹۹۰-۲۰۱۴	مازندران
ایستگاه کیاسر	بارندگی	۵۳/۰۶°E	۳۶/۴۲°N	-۲	۱۹۹۰-۲۰۱۴	شرکت آب منطقه‌ای استان
	دما	۵۳/۰۶°E	۳۶/۴۲°N	-۲	۱۹۹۰-۲۰۱۴	مازندران

سناریوهای انتشار

مدل‌های گردش عمومی جو (General Circulation Models - GCMs) ابزارهای اصلی برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیم در مقیاس جهانی هستند. این مدل‌ها برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده، به داده‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه‌های زمانی مختلف نیاز دارند. با توجه به عدم قطعیت در خصوص روندهای آتی توسعه اقتصادی، رشد جمعیت، استفاده از انرژی و سیاست‌های زیست‌محیطی، پیش‌بینی دقیق میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، برای پوشش طیف وسیعی از مسیرهای ممکن توسعه، از سناریوهای انتشار بهره گرفته می‌شود (O'Neill et al., 2016).

سناریوهای انتشار، ابزارهایی برای بررسی پیامدهای مختلف تغییرات اقلیمی و ارزیابی اثرات آن بر محیط‌زیست، منابع آب، کشاورزی و دیگر بخش‌ها هستند. این سناریوها، پیش‌نگری‌هایی مبتنی بر مفروضات مختلف اجتماعی، اقتصادی، تکنولوژیکی و سیاسی‌اند و پیش‌بینی یا پیش‌گویی آینده به معنای قطعی آن نیستند، بلکه برای آزمون واکنش سیستم اقلیمی به شرایط گوناگون فرضی به کار می‌روند (Van Vuuren et al., 2011).

در این مطالعه از گزارش ششم و مدل ریزمقیاس‌گر آماری SDSM بدلیل کارایی بهتر در تولید داده‌های دمایی و بارندگی استفاده شد. متغیرهای بزرگ مقیاس منطقه مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره مشاهداتی حاصل از

MPI-ESM1 به عنوان متغیرهای مستقل و بارندگی و دمای ایستگاه سلیمان‌تنگه به عنوان متغیرهای وابسته وارد مدل شد و نتایج حاصل از مدل با نتایج مشاهده شده مقایسه و عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. از شاخص‌های آماری ارزیابی، ضریب نش-ساتکیلف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب (R) استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

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

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

در این روابط $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\bar{S}$ میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهداتی هر ماه در کل دوره و S_i داده‌های شبیه‌سازی شده هر ماه در کل دوره می‌باشد.

(square) و ترسیم نمودارهای متنوع شامل: تابع چگالی احتمال (PDF)، تابع توزیع تجمعی (CDF)، نمودار ریسک و سایر نمودارهای آماری است. مراحل استفاده از EasyFit برای محاسبه دوره بازگشت در فلوچارت شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳). فلوچارت محاسبه دوره بازگشت در Easy Fit

دهند. بر این اساس، مقادیر نهایی دوره بازگشت سیلاب برای سناریوهای آینده با استفاده از توزیع‌های دارای بهترین برازش محاسبه و تحلیل شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل ریزمقایاس گر SDSM بارندگی برای ایستگاه‌های سلیمان تنگه و کیاسر در دو دوره ۲۰۹۵-۲۰۶۵ و ۲۰۵۵-۲۰۲۵ تولید شد. همچنین در این بررسی، دمای بیشینه و کمینه روزانه هر دو ایستگاه مورد تحلیل قرار گرفته است. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل، داده‌های بارندگی و دما از ایستگاه‌های منتخب در دو بخش استفاده شد. برای بارندگی ۷۰ درصد داده‌ها مربوط به دوره‌ی آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۳ جهت واسنجی و ۳۰ درصد داده‌ها مربوط به دوره‌ی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ برای صحت‌سنجی به کار گرفته شد. انتخاب این بازه‌های زمانی بر اساس دسترسی به داده‌ها انجام شد در این پژوهش، ابتدا دما و بارندگی آینده با استفاده از مدل SDSM و مبتنی بر خروجی

محاسبه دوره بازگشت با Easy Fit

ارزیابی برازش توزیع‌های آماری با استفاده از آزمون‌های آماری معتبر شامل آزمون اندرسون-دارلینگ (Anderson-Darling)، آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov)، آزمون کای دو (Chi-

در این پژوهش، برای برآورد دقیق دوره‌های بازگشت سیلاب تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، داده‌های بارندگی استخراج‌شده از مدل‌های اقلیمی به روش آماری مورد تحلیل قرار گرفت و سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار EasyFit بهترین توزیع‌های آماری متناسب با مقادیر دبی‌های حدی انتخاب شد. نتایج آزمون‌های برازش نشان داد که بر اساس معیار Anderson-Darling، توزیع Log-Pearson III و Gen Extreme و Johnson SB بهترین تطابق را با داده‌ها دارد؛ در حالی که آزمون Kolmogorov-Smirnov توزیع Log Logistic Cauchy و Burr و نیز توزیع Johnson SB را به عنوان گزینه‌های مناسب معرفی کرد. همچنین آزمون Chi-Squared توزیع‌های Pearson5 و Laplace Cauchy را به عنوان مناسب‌ترین الگوها پیشنهاد نمود. ترکیب این آزمون‌ها بیانگر آن است که رفتار دبی‌های حدی در سناریوهای تغییر اقلیم یک الگوی کاملاً یکنواخت ندارد و بسته به ماهیت توزیع داده‌ها، چند توزیع مختلف می‌توانند برازش مناسبی ارائه



Bias Correction شامل تطبیق میانگین، واریانس و توزیع آماری اصلاح شدند تا سوگیری سیستماتیک مدل کاهش یابد و شدت بارندگی‌های سنگین را کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی برآورد نکند و این موضوع می‌تواند محاسبه دوره بازگشت و بارندگی‌های حدی را دچار خطا کند.

مدل‌های اقلیمی CMIP6 ریزمقیاس‌نمایی شدند و سپس سری‌های شبیه‌سازی شده تصحیح‌بایاس شده به‌عنوان ورودی تحلیل مقادیر حدی مورد استفاده قرار گرفتند. بارندگی‌های روزانه شدید مستقیماً از سری زمانی شبیه‌سازی شده SDSM استخراج شده و پیش از تحلیل، با روش‌های استاندارد تصحیح بایاس

جدول (۳): نتایج واسنجی و ارزیابی گردش عمومی ECMWF_ERA5_1979-2014 برای بارندگی در ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و کیاسر

ایستگاه	متغیر اقلیمی	سال دوره	NSE	RMSE	R^2	R
سلیمان‌تنگه	بارندگی	۱۹۷۹-۲۰۱۴	۰/۸۲	۲/۴۸	۰/۸۱	۰/۸۸
کیاسر	بارندگی	۱۹۸۰-۲۰۱۴	۰/۸	۲/۶۷	۰/۷۹	۰/۸۲

جدول (۴): نتایج واسنجی و ارزیابی گردش عمومی ECMWF_ERA5_1979-2014 برای دمای ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و کیاسر

ایستگاه	متغیر اقلیمی	سال دوره	NSE	RMSE	R^2	R
سلیمان‌تنگه	T_{min}	۱۹۹۰-۲۰۱۴	۰/۷۷	۰/۰۵۸	۰/۷۸	۰/۹۴
	T_{max}	۱۹۹۰-۲۰۱۴	۰/۵۶	۰/۰۵۷	۰/۶۵	۰/۸۰
کیاسر	T_{min}	۱۹۹۰-۲۰۱۴	۰/۷۹	۰/۰۶۱	۰/۷۶	۰/۸۹
	T_{max}	۱۹۹۰-۲۰۱۴	۰/۷۶	۰/۰۰۸	۰/۷۹	۰/۸۶

تغییرات دما

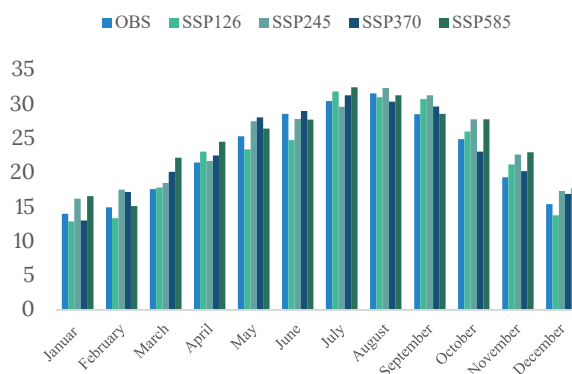
با توجه به شکل ۴ این نمودارها به وضوح نشان‌دهنده یک روند گرمایش در حوضه آبریز رودخانه تجن در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۵ هستند که در هر دو پارامتر T_{min} و T_{max} ماهانه در ایستگاه سلیمان‌تنگه و کیاسر مشاهده می‌شود. دماهای حداقل، به‌ویژه در فصول سرد، افزایش بیشتری را نسبت به دماهای حداکثر تجربه خواهند کرد، که نشانگر کاهش نوسانات دمایی روزانه است. این افزایش دما پیامدهای هیدرولوژیکی مهمی دارد: اولاً، می‌تواند منجر به کاهش و تغییر زمان‌بندی ذوب برف‌ها در بالادست حوضه شود که منابع آب رودخانه را در بهار تحت تأثیر قرار

می‌دهد. ثانیاً، افزایش دما به طور مستقیم باعث افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) می‌شود که میزان آب موجود در دسترس برای رواناب را کاهش می‌دهد. این امر به نوبه خود، پتانسیل تولید رواناب را در حوضه کاهش داده و می‌تواند منجر به کاهش حجم جریان رودخانه شود، به‌خصوص در فصول گرم و خشک. تفاوت‌های بین سناریوهای اقلیمی (SSP) نیز حاکی از آن است که هرچند در کوتاه‌مدت محسوس نیست، اما سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده، تأثیر مستقیم و فزاینده‌ای بر این پیامدهای هیدرولوژیکی خواهد داشت و مدیریت منابع آبی حوضه را تحت چالش قرار خواهد داد.

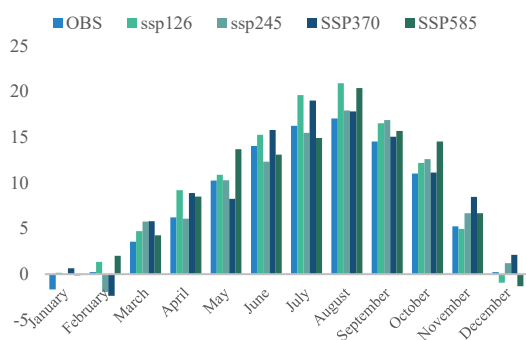
میانگین دمای حداقل ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



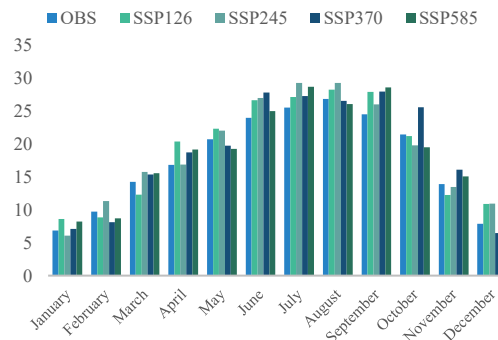
میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه کیاسر



میانگین دمای حداقل ماهانه ایستگاه کیاسر



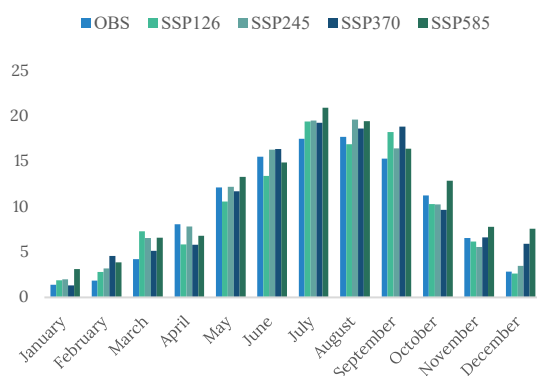
شکل (۴): میانگین دمای حداقل و حداکثر ایستگاه های سلیمان تنگه و کیاسر در سال های ۲۰۲۵-۲۰۵۵

خواهد داشت که می تواند به کاهش شدید منابع آب ناشی از ذوب برف در کوهستان ها منجر شود. همچنین افزایش دما به طور قابل توجهی نرخ تبخیر و تعرق را بالا می برد که در نتیجه، میزان آب موجود برای رواناب را کاهش داده و فشار بیشتری بر منابع آبی حوضه وارد می کند. این امر به طور مستقیم حجم جریان رودخانه را کاهش داده و می تواند منجر به دوره های طولانی تر و شدیدتر خشکسالی شود. مدیریت منابع آب در این دوره، به دلیل تأثیر فزاینده تغییر اقلیم، با چالش روبرو خواهد بود

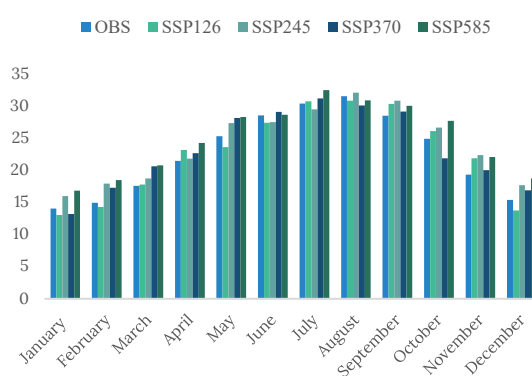
نمودارهای شکل ۵ روند گرمایش را در حوضه آبریز رودخانه تجن برای دوره زمانی ۲۰۶۵-۲۰۹۵ نشان می دهند. در این دوره، افزایش دما بسیار شدیدتر و تفاوت بین سناریوهای مختلف اقلیمی (SSP) بسیار چشمگیرتر خواهد بود. دماهای حداقل و حداکثر ماهانه در تمام طول سال افزایش خواهند یافت، اما افزایش در سناریوهای با انتشار گازهای گلخانه ای بالا مانند SSP585 بسیار محسوس تر از سناریوهای با انتشار کم مانند SSP126 خواهد بود. این گرمایش شدید پیامدهای هیدرولوژیکی جدی و فزاینده ای



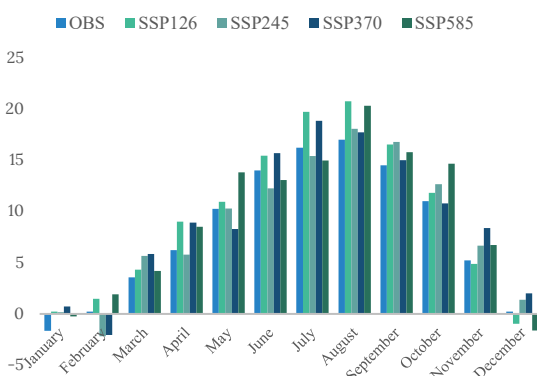
میانگین دمای حداقل ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



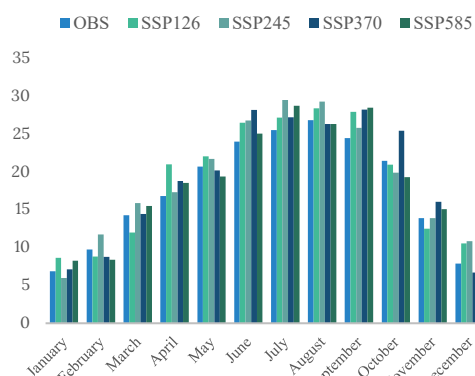
میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



میانگین دمای حداقل ماهانه ایستگاه کیاسر



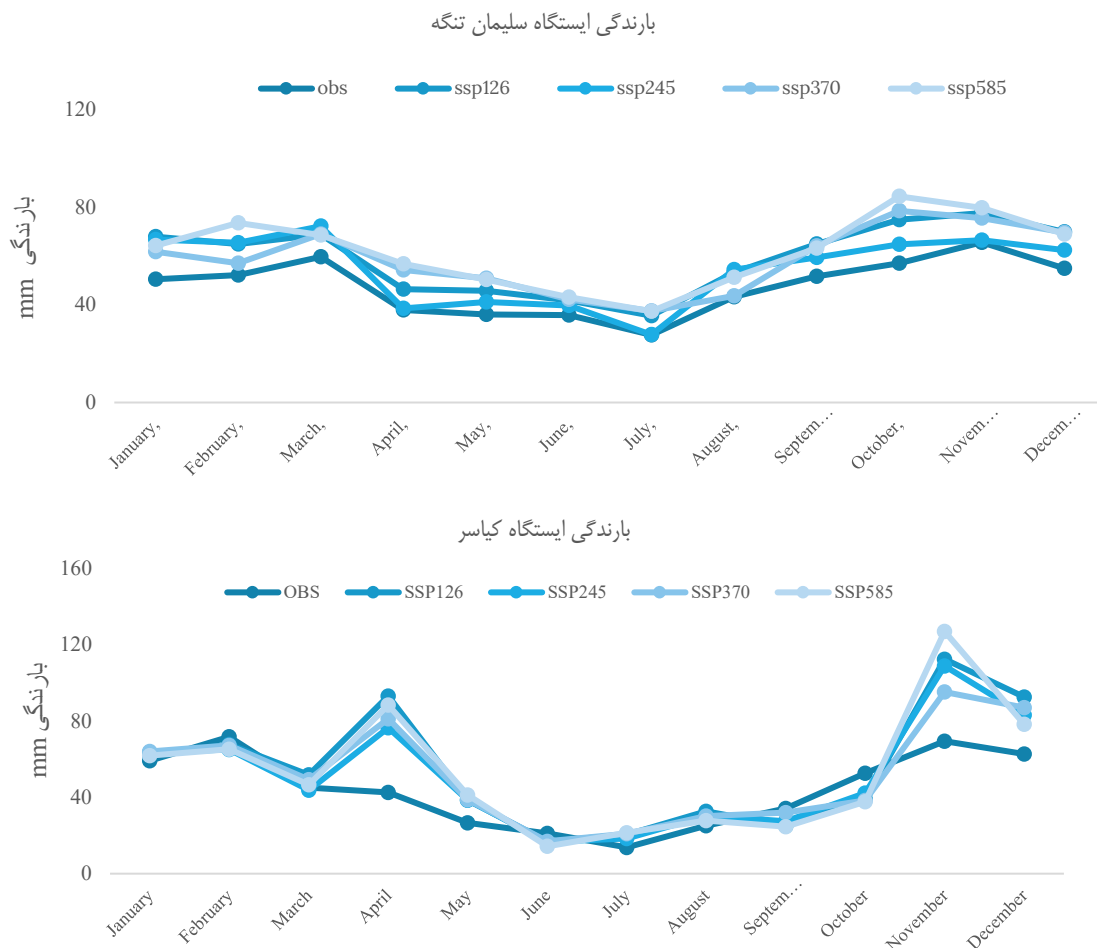
میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه کیاسر



شکل (۵) "میانگین دمای حداقل و حداکثر ایستگاه‌های سلیمان تنگه و کیاسر در سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۹۵"

بیانگر تضعیف بارش‌های بهاری و افزایش پتانسیل خشکی خاک در آینده است. همچنین، در ایستگاه کیاسر با توجه به ارتفاع بیشتر، نوسانات بارش ماهانه شدیدتر بوده و پیک بارشی بهاری برجسته‌تر از سلیمان‌تنگه مشاهده می‌شود، در حالی که در سلیمان‌تنگه بیشترین بارش عمدتاً در فصل پاییز رخ می‌دهد. در مجموع، یافته‌ها بیانگر آن است که تغییر اقلیم می‌تواند هم موجب تقویت بارش‌های شدید و هم کاهش بارش‌های پایه شود؛ مسئله‌ای که مدیریت منابع آب و کنترل ریسک سیلاب را در دهه‌های آتی با چالش‌های قابل توجهی مواجه خواهد کرد.

با توجه به شکل ۶ در مقایسه الگوی بارندگی ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و کیاسر تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه تمامی سناریوها روند کلی تغییرات ماهانه بارش را حفظ کرده‌اند، اما تفاوت‌های معناداری در شدت و توزیع فصلی بارش نسبت به دوره مشاهداتی مشاهده می‌شود. سناریوی شدید SSP5-8.5 در هر دو ایستگاه بیشترین افزایش بارندگی را در ماه‌های زمستان، و به‌ویژه در فصل پاییز، نشان می‌دهد؛ الگویی که می‌تواند به افزایش فراوانی و شدت رخدادهای سیلابی پاییزی منجر شود. در مقابل، طی ماه‌های بهار و اوایل تابستان، کاهش قابل توجهی در بارش ثبت شده است که



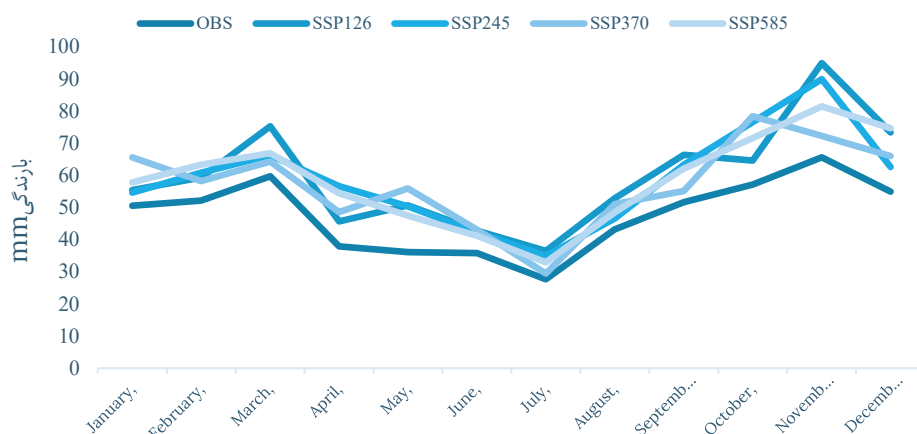
شکل (۷): مجموع بارندگی ماهانه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و کیاسر در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۵

آوریل در دوره آینده نسبت به دوره پایه تقریباً دو برابر خواهد شد که این پدیده می‌تواند ناشی از تغییر رژیم بارش‌های منطقه و تقویت جبهه‌های بهاری باشد. در مجموع، یافته‌های تحقیق حاضر برخلاف برخی الگوهای رایج، حاکی از مرطوب‌تر شدن اقلیم منطقه در دهه‌های آتی است. با این حال، این افزایش بارش عمدتاً در قالب پیک‌های فصلی در پاییز و بهار ظاهر می‌شود. چنین الگویی نه تنها به معنای فراوانی منابع آب نیست، بلکه هشداردهنده افزایش جدی مخاطرات سیلابی و تغییر زمان‌بندی رواناب‌های ورودی به مخازن سدهاست. این مسئله بازنگری در دستورالعمل‌های بهره‌برداری از سدها و ظرفیت سیستم‌های کنترل سیلاب در حوضه تجن را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

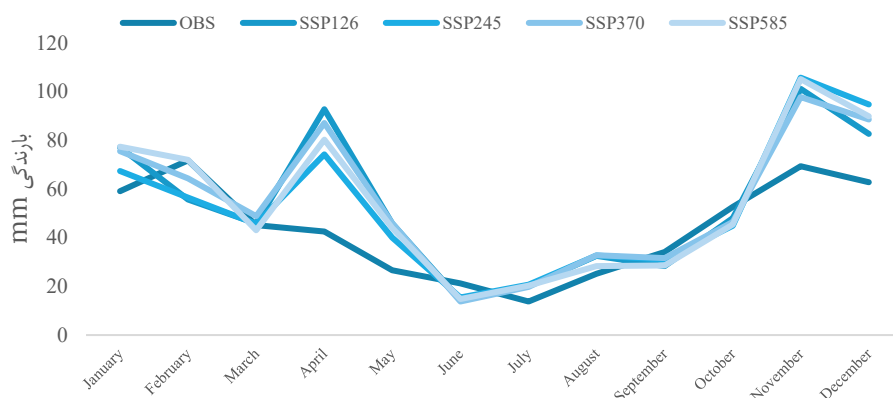
شکل ۸ در ایستگاه سلیمان تنگه، بیشترین انحراف مثبت بارش نسبت به دوره پایه در فصل پاییز و به‌ویژه در ماه نوامبر رخ می‌دهد؛ جایی که تمامی سناریوها بارشی فراتر از ۸۰ میلی‌متر را پیش‌بینی کرده‌اند (در مقابل ۶۵ میلی‌متر دوره پایه). نکته قابل توجه در این ایستگاه، پیش‌تازی سناریوی SSP1-2.6 در برخی ماه‌های پیک است که نشان‌دهنده پتانسیل بالای رخدادهای حدی حتی در سناریوهای با انتشار کم کربن می‌باشد. در مقابل، ایستگاه کیاسر به دلیل ویژگی‌های فیزیوگرافیک و ارتفاع بیشتر، نوسانات شدیدتری را تجربه می‌کند. در این ایستگاه، علاوه بر پیک پاییزی (که به بیش از ۱۰۰ میلی‌متر می‌رسد)، یک جهش خیره‌کننده در بارش‌های بهاری (ماه آوریل) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که بارش ماه



بارندگی ایستگاه سلیمان تنگه



بارندگی ایستگاه کیاسر



شکل (۸): مجموع بارندگی ماهانه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و کیاسر در دوره ۲۰۶۵-۲۰۹۵

محسوسی بالاتر از دوره مشاهداتی هستند. در نتیجه با افزایش دوره بازگشت، بارندگی‌های شدید در آینده، به‌ویژه در سناریوهای با تغییرات اقلیمی شدید، شدت بیشتری پیدا می‌کنند. این یعنی احتمال وقوع سیلاب‌های بسیار بزرگ در آینده بیشتر خواهد بود.

۲- کاهش نسبی بارندگی در دوره‌های بازگشت کوتاه (وقایع رایج)

در دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت (۲، ۵، ۱۰ ساله)، بارندگی در آینده در بیشتر سناریوها کمتر از گذشته است. در نتیجه بارندگی‌های رایج ممکن است شدت کمتری داشته باشند و تکرار آن‌ها کمتر از گذشته باشد.

داده‌های جدول ۵ و ۶ حاصل محاسبه مقادیر بارندگی طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف (T) با استفاده از مدل توزیع آماری EasyFit بر پایه داده‌های مشاهداتی و خروجی سناریوهای اقلیمی مختلف در بازه زمانی ۲۰۵۵-۲۰۲۵ است. هدف این بخش ارزیابی تغییر شدت و فراوانی بارندگی‌های حدی در اثر تغییر اقلیم در آینده است.

با توجه به جدول برای دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۵

۱- افزایش بارندگی در دوره‌های بازگشت بلند (وقایع شدید ولی نادر) در دوره‌های بازگشت بلندمدت (۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ساله)، بارندگی‌های پیش‌بینی‌شده در سناریوهای SSP، به‌ویژه SSP1-2.6 و SSP5-8.5، به‌طور

کمتر از مقادیر مشاهده شده تاریخی (OBS) هستند. این کاهش بارندگی هم در وقایع رایج با دوره های بازگشت کوتاه و هم در وقایع شدید با دوره های بازگشت بلند مدت مشاهده می شود. به عنوان مثال، در دوره های بازگشت بلند، مقادیر بارندگی در سناریوهای SSP بین ۳۸/۸ تا ۵۷/۶ میلی متر است، در حالی که در داده های مشاهداتی این مقدار بین ۶۸ تا ۸۶/۵ میلی متر بوده است. این الگو به این معنی است که در آینده، نه تنها بارندگی های رایج ممکن است کاهش یابند، بلکه احتمال وقوع سیلاب های بسیار شدید ناشی از بارندگی های نادر نیز کمتر از گذشته خواهد بود. این یافته یک چالش جدی برای منابع آب ایجاد می کند، زیرا کاهش کلی بارندگی می تواند به خشکسالی های شدیدتر و کمبود آب منجر شود.

نتایج برآزش توزیع های آماری نشان داد که در هر یک از دوره های زمانی بررسی شده، توزیع متفاوتی به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. این امر بیانگر آن است که رفتار آماری دبی های حداکثر سالانه در طول زمان ثابت نبوده و تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و شرایط هیدرولوژیکی قرار دارد. بنابراین، تعیین مدل برآزش به صورت اختصاصی برای هر دوره زمانی ضروری است و به کارگیری یک توزیع واحد برای تمامی دوره ها می تواند موجب کاهش دقت در برآورد دوره های بازگشت سیلاب شود.

به عنوان نمونه، در دوره بازگشت ۵ ساله ایستگاه سلیمان تنگه، مقدار بارندگی مشاهداتی برابر با ۴۹/۵ میلی متر بوده، در حالی که در سناریو SSP2-4.5 این مقدار به حدود ۳۱/۰۹ میلی متر کاهش یافته است. این کاهش در بارندگی های رایج می تواند نشان دهنده انتقال الگوی بارندگی به سمت بارندگی های کم تواتر باشد. در مقابل، در دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله، مقدار بارندگی در دوره مشاهداتی ۸۶/۴۷ میلی متر بوده ولی در سناریو SSP1-2.6 به ۹۰/۸۰ میلی متر افزایش یافته است. این افزایش در سایر سناریوها نیز مشاهده شده و می تواند نشان دهنده افزایش وقوع بارندگی های حدی در آینده باشد. این الگو، که کاهش در بارندگی های با دوره بازگشت کوتاه و افزایش در بارندگی های با دوره بازگشت بلند را نشان می دهد، می تواند نشانه ای از افزایش ناپایداری اقلیمی و تمایل بارندگی ها به تمرکز در رخداد های حدی و شدید در آینده باشد. چنین شرایطی می تواند منجر به افزایش خطر وقوع سیلاب های ناگهانی و شدید شود، به ویژه در مناطق پایین دست حوضه هایی مانند تجن.

برای دوره ۲۰۹۵-۲۰۶۵، برخلاف تصور رایج از افزایش شدت بارندگی های حدی، در این دوره زمانی، بارندگی های پیش بینی شده برای تمام دوره های بازگشت (از ۲ تا ۱۰۰۰ ساله) در همه سناریوهای اقلیمی (SSP) به طور محسوسی



جدول (۵) نتایج دوره بازگشت بارندگی در دوره مشاهداتی و دو دوره آینده پیش بینی شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم ایستگاه سلیمان تنگه با استفاده از مدل توزیع آماری EasyFit

T	P	OBS	2025-2055				2065-2095			
			SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2	0.5	39.8	27.5	27.4	28.1	27.4	30.5	28.9	28.8	27.7
5	0.2	49.5	31.4	31.1	31.3	32.1	34.7	32.8	33.7	32.4
10	0.1	54.8	34.3	33.5	33.3	35.3	36.7	35.0	36.6	34.8
25	0.04	60.6	38.6	36.6	35.8	39.7	38.7	37.5	40.0	37.0
50	0.02	64.5	42.3	38.8	37.7	43.0	39.9	39.1	42.3	38.0
100	0.01	68.0	46.6	41.1	39.7	46.5	40.9	40.7	44.5	38.8
200	0.005	71.2	51.5	43.3	41.8	50.1	41.8	42.2	46.6	39.4
500	0.002	75.2	59.3	46.3	44.7	55.1	42.9	44.0	49.3	39.9
1000	0.001	78.0	66.3	48.5	47.1	59.0	43.6	45.3	51.3	40.2
10000	0.0001	86.5	98.8	56.0	55.7	73.2	45.6	49.4	57.6	40.8

جدول (۶) نتایج دوره بازگشت بارندگی در دوره مشاهداتی و دو دوره آینده پیش بینی شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم ایستگاه کیاسر با استفاده از مدل توزیع آماری EasyFit

T	P	OBS	2025-2055				2065-2095			
			SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2	0.5	39.8	32.18	32.33	29.67	32.07	32.26	29.89	29.51	31.16
5	0.2	49.5	38.66	37.18	35	37.07	38.24	34.27	36.25	35.72
10	0.1	54.8	43.14	39.89	38.03	39.94	41.32	36.68	41.06	37.88
25	0.04	60.6	49.01	42.83	41.36	43.11	44.44	39.24	47.56	39.91
50	0.02	64.5	53.53	44.72	43.53	45.19	46.3	40.85	52.7	41.03
100	0.01	68.0	58.16	46.38	45.45	47.04	47.84	42.25	58.1	41.9
200	0.005	71.2	62.91	47.83	47.15	48.7	49.12	43.45	63.78	42.58
500	0.002	75.2	69.41	49.5	49.13	50.63	50.48	44.81	71.78	43.26
1000	0.001	78.0	74.5	50.59	50.44	51.92	51.32	45.68	78.22	43.64
10000	0.0001	86.5	92.57	53.38	53.87	55.35	53.21	47.85	102.31	44.41

آینده، تغییراتی در شدت بارش‌های حدی محتمل است و این می‌تواند بر دبی‌های طراحی و در نتیجه بر عرض بستر، پهنه سیلاب‌خیزی و حریم حفاظتی رودخانه اثر بگذارد. بنابراین، در مطالعات نوین و طرح‌های عمرانی حساس، توصیه می‌شود اثر تغییر اقلیم به‌صورت تحلیل تکمیلی در

در نهایت، در طراحی‌های مرتبط با حد بستر و حریم رودخانه‌ها، اصل بر استفاده از دوره بازگشت‌های طراحی ثابت (مثلاً ۲۵، ۵۰ یا ۱۰۰ ساله) بر اساس داده‌های مشاهداتی یا طراحی است و دستورالعمل‌های رسمی فعلاً الزام مستقیمی برای اعمال سناریوهای تغییر اقلیم ندارند. اما نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تحت سناریوهای

و رفتار بارندگی‌های حدی در حوضه آبریز رودخانه تجن خواهد داشت. تحلیل دما نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰۶۵ تا ۲۰۹۵، دماهای حداقل و حداکثر ماهانه در تمامی سناریوهای اقلیمی افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه در سناریو SSP5-8.5 که نمایانگر توسعه بی‌رویه و انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای است. این گرمایش می‌تواند با افزایش نرخ تبخیر و تعرق، کاهش ذخایر برفی و در نهایت کاهش رواناب سطحی، منابع آبی حوضه را با تهدید جدی مواجه کند. از سوی دیگر، تحلیل روند بارندگی در دوره‌های آینده (۲۰۵۵-۲۰۲۵ و ۲۰۹۵-۲۰۶۵) حاکی از تغییر در توزیع زمانی و شدت بارندگی‌ها است. افزایش بارندگی در زمستان و پاییز در مقابل کاهش معنادار در فصل بهار، به‌ویژه در ماه مه، نشان می‌دهد که الگوی بارندگی فصلی به سمت تمرکز بیشتر در بازه‌های کوتاه‌مدت و وقوع سیلاب‌های شدید پاییزی تغییر خواهد کرد. این در حالی است که تابستان همچنان خشک‌ترین فصل باقی می‌ماند. بررسی بارندگی‌های طراحی در دوره‌های بازگشت مختلف نیز نشان‌دهنده دو روند متضاد است: در دوره ۲۰۵۵-۲۰۲۵، شدت بارندگی‌های نادر و شدید افزایش یافته که احتمال وقوع سیلاب‌های مخرب را بیشتر می‌کند؛ اما در دوره ۲۰۹۵-۲۰۶۵، کاهش محسوسی در بارندگی‌های طراحی در تمام بازه‌های بازگشت دیده می‌شود که می‌تواند به کاهش پتانسیل بارندگی‌های شدید اما در عوض افزایش احتمال خشکسالی‌های گسترده منجر شود. در مجموع، نتایج این پژوهش بر ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب، بهینه‌سازی الگوهای مصرف، و ارتقاء ظرفیت سازگاری حوضه با شرایط اقلیمی آینده تأکید دارد. عدم توجه به این تغییرات می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور، امنیت آبی و زیست‌محیطی حوضه رودخانه تجن را با چالش‌های جدی روبرو کند. بنابراین، در ارزیابی خطر سیلاب و مدیریت منابع آب، در نظر گرفتن این تغییرات به‌ویژه در دوره‌های بازگشت بلندمدت، از اهمیت زیادی برخوردار است.

طراحی حریم رودخانه‌ها لحاظ شود تا از کم‌برآوردی دبی‌های سیلابی و افزایش ریسک خسارات جلوگیری گردد.

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر به‌شمار می‌رود که با تغییر در الگوهای بارندگی و دما، پایداری منابع آب را به‌طور جدی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بررسی‌ها در حوضه رودخانه تجن نشان می‌دهد که اثر تغییر اقلیم بر الگوی بارندگی به‌صورت دوگانه ظاهر می‌شود: از یک‌سو کاهش در بارندگی‌های رایج و از سوی دیگر افزایش در رخدادهای شدید و نادر. بنابراین، لازم است در طراحی سازه‌های آبی و مدیریت منابع آب، این تغییرات در نظر گرفته شود تا از خسارات ناشی از سیلاب‌های آینده پیشگیری گردد.

مدل‌های اقلیمی و نتایج به‌دست‌آمده از ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM همواره با درجاتی از عدم قطعیت همراهند، زیرا هر مدل بر اساس فرضیات، ساختار دینامیکی و پارامترسازی خاص خود عمل می‌کند و بنابراین در شبیه‌سازی آینده، خروجی‌های متفاوتی ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، مدل SDSM نیز به‌عنوان یک مدل آماری، به کیفیت داده‌های مشاهده‌ای، نحوه انتخاب پیش‌بین‌ها و فرایند واسنجی وابسته است و این موضوع باعث بروز خطاهایی در بازتولید شرایط اقلیمی آینده می‌شود. با وجود این، هنگامی که این مدل‌ها به‌درستی واسنجی و ارزیابی عملکرد شوند، می‌توانند روندها و تغییرات کلی اقلیم آینده را با اعتماد متوسط تا بالا نشان دهند؛ هرچند دقت آن‌ها در مقیاس محلی و برای پیش‌بینی رویدادهای حدی کمتر است. بنابراین نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی و SDSM قابل‌استفاده و معتبر هستند، اما باید همراه با تحلیل عدم قطعیت تفسیر شوند تا محدوده قابل‌قبولی از پیش‌بینی‌ها و میزان اطمینان آن‌ها مشخص شود.

نتایج این تحقیق بیانگر آن است که تغییر اقلیم در دهه‌های آینده اثرات قابل توجهی بر الگوهای دما، بارندگی



قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مادی و معنوی حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به عنوان بخشی از فعالیت‌های انجام شده در قالب هسته دانشجویی پژوهش محور با عنوان "مطالعات سیلاب در شهر ساری" و رساله دکتری در دانشگاه مذکور انجام شده است که به این وسیله مراتب تشکر و قدردانی نویسندگان اعلام می‌شود.

منابع

- رحیم‌زاده، ف. و عسگری، ا. ۱۳۸۳، نگرشی بر تفاوت نرخ افزایش دمای حداقل و حداکثر و کاهش دامنه شبانه روزی دما در کشور. تحقیقات جغرافیایی، ۷۳(۱۹)، ۱۵۵-۱۷۱.
- مطالعات شناسایی توجیهی طرح آبخیزداری تجن (حوضه آبریز سد شهید رجائی)، ۱۳۳۲، شرکت خدمات مهندسی جهاد، مهندسين مشاور خزر، جلد ۱۰.
- موجرلو، ف.، فضل‌اولی، ر. و عمادی، ع. ۱۳۹۸، کاربرد مدل IHACRES برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز تجن. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۱)، ۱۲۹-۱۴۱.
- Akbari, M., Malekinezhad, H., & Hajibigloo, M. (2025). Analysis of Climate Change and Future Trends of Precipitation and Temperature in the Karde Dam Basin. *Desert Management*, 12(4), 87-106.
- Ba, W., Du, P., Liu, T., Bao, A., Luo, M., Hassan, M., & Qin, C. (2018). Simulating hydrological responses to climate change using dynamic and statistical downscaling methods: a case study in the Kaidu River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 10, 905-920.
- Benestad, R. E., Chen, D. & Hanssen-Bauer I. (2008). Empirical-statistical downscaling. World Climate Research Programme, WCRP Report No. 2008-1.
- Bolin, B. R. (1986). The greenhouse effect, climate change and ecosystems. SCOPE Report No. 29.
- Busuioc A., Giorgi F. & Bi X. (2006). Comparison of regional climate model and statistical downscaling simulations of different winter precipitation change scenarios over Romania. *Theoretical and Applied Climatology*, 86(1-4): 101-123.
- Challa, V., & Renganathan, M. (2025). Assessment of climate change impact on meteorological variables of Indravati River Basin using SDSM and CMIP6 models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 1-22.
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>
- Christensen J H & Christensen O B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81: 7-30.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., & Melville, B. W. (2011). Statistical downscaling of rainfall using SDSM for a climate change impact assessment in the upper Indus Basin. *International Journal of Climatology*, 31(11), 1579-1593. <https://doi.org/10.1002/joc.2179>
- Hewitson, B. C., & Crane, R. G. (2006). Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: Precipitation downscaling over South Africa. *International Journal of Climatology*, 26(10), 1315-1337. <https://doi.org/10.1002/joc.1314>

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Lana, M. A., Eulenstein, F., Schlindwein, S., Guevara, E., Meira, S., Wurbs, A., ... & Bonatti, M. (2016). Regionalization of climate scenarios impacts on maize production and the role of cultivar and planting date as an adaptation strategy. *Regional Environmental Change*, 16(5), 1319-1331.

Liu, Y., Zhang, L., & Wang, Z. (2022). Comparison of statistical and machine learning models for temperature downscaling in the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 35(5), 1234-1247.

Maslin, M. (2014). Climate change: a very short introduction. OUP Oxford.

Mearns L O, Bogardi I & Giorgi F. (1999). Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D6): 6603–6621.

Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... & Rogelj, J. (2020). The SSP greenhouse gas concentrations and radiative forcing geoscientific model. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>

Mupenzi J D L P & Li L. (2011). Impacts of global warming perturbation on water resources in arid zone: Case study of Kaidu River Basin in Northwest China. *Journal of Mountain Science*, 8: 704–710.

Nakamura, R., & Shimatani, Y. (2021). Extreme-flood control operation of dams in Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100821.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., & van Vuuren, D. P. (2016). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.

Sachindra D. A., Huang F. & Barton A. F. (2014). Multi-model ensemble approach for statistically downscaling general circulation model outputs to precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140: 1161–1178.

Schittkowski, K. (2002). EASY-FIT: a software system for data fitting in dynamical systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23, 153-169.

Xu C. C., Zhao J. & Deng H. J. (2016). Scenario-based runoff prediction for the Kaidu River basin of the

Tianshan Mountains, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1126.