



Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan, Using the LARS-WG08 Model

Abdul Aziz Qazizada¹, Kamal Omidvar^{2*}, Gholamali Muzafari³, Ahmad Mazidi⁴

¹ PhD Student in Climatology, Faculty of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran

^{2 & 3} Professor in Climatology, Faculty of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran

⁴ Associate Professor in Climatology, Faculty of Geography, University of Yazd, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 27 May 2024

Revised: 31 December 2024

Accepted: 16 January 2025

Available Online: 16 January 2025

Keywords:

Climate Change

Climatic Trend Analysis

Temperature and Precipitation
Variability

Mann-Kendall Test

LARS-WG Weather
Generator

Kabul Basin

ABSTRACT

One of the most contentious issues among contemporary climatologists is the existence of climate change and alteration in the trends of atmospheric parameters. The primary aim of this research was to examine the trends in precipitation and temperature changes under climate change conditions, and to predict future temperature and precipitation in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan. To evaluate the impact of climate change on precipitation and temperature parameters, detection, trend analysis, prediction, and model accuracy analyses were conducted. In this process, methods such as anomalies, the non-parametric Mann-Kendall test, Theil-Sen's slope, the LARS-WG model (sixth report), and statistical indices such as the correlation coefficient, coefficient of determination (r , R^2), RMSE, and NRMSE were used. The research findings indicate that in the Kabul Drainage Basin, the trends in these parameters are positive, with increasing annual average precipitation and increasing annual average temperature. The rainy season has gradually shifted from winter to summer. Specifically, the annual precipitation between 1979 and 2020 increased by approximately 0.30% or 0.93 mm, while the temperature increased significantly by about 8% (1.2°C). Predictions suggest that the trend of increasing temperature and decreasing precipitation will continue from the baseline period (1991–2021) into the 2021–2050 period. Across all scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 the minimum temperature is projected to increase by 0.4°C, 0.5°C, and 0.6°C, respectively, and the maximum temperature by 0.6°C, 0.7°C, and 0.8°C compared to the baseline period. Annual precipitation is also expected to decrease by approximately 11% compared to the baseline period. Therefore, the impacts of climate change, including increased temperatures and altered precipitation patterns, are likely to exacerbate the risk of floods and related hazards in the future. The study of precipitation and temperature parameters under climate change is crucial. Accordingly, adaptation strategies for climate change and the enhancement of resilience are recommended.

*Corresponding author: Dr. Kamal Omidvar

E-mail address: komidvar@yazd.ac.ir

How to cite this article: Qazizada, A. A., Omidvar, K., Ghlamali Muzafari, Gh. A., & Mazidi, A. (2025). Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan, Using the LARS-WG08 Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 68-87. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.88181.1488>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change, as one of the most critical challenges of the present century, has had widespread effects on the environment, water resources, agriculture, and human livelihoods worldwide. It remains one of the most controversial topics in climatology. Most climatologists believe that changes in temperature or precipitation cannot simply be interpreted as long-term or short-term climatic fluctuations. Studies indicate that climate change is a global threat that disrupts the sustainability of various components of the Earth's system. Therefore, understanding current conditions and making climate projections are essential for identifying vulnerabilities and developing strategies to adapt to climate change.

Long-standing internal conflicts, diverse climates, complex topography, and a lack of meteorological stations have hindered extensive research in this field. To date, no comprehensive scientific studies have been conducted on precipitation and temperature trends in the Kabul Basin. While numerous global studies exist, research efforts in Afghanistan have been limited. Among the few studies in Afghanistan are those by Babar et al. (2016), Aliyar, Dhungana, and Shrestha (2022), Broomand (2015), Mestarshed (2013, 2014), Nasrati (2018), Sharafat (2020), and Salehi (2022). These studies indicate a declining trend in precipitation, particularly during spring and winter, and a rising trend in temperature across Afghanistan.

The Kabul River Basin, due to its unique geographical location and climatic conditions, has been significantly impacted by climate change, experiencing notable alterations in precipitation and temperature parameters. This region not only holds critical importance for water supply and agriculture for its inhabitants, but also warrants closer examination due to the frequent occurrence of floods and droughts. A detailed assessment of precipitation and temperature trends in the basin is essential.

The primary objective of this study is to investigate the impacts of climate change on precipitation and temperature variables and to forecast these parameters in the Kabul River Basin. This research employs various methods, including anomaly detection, the non-parametric Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, the LARS-WG model, and correlation coefficients, to analyze precipitation and temperature trends and address the existing research gap.

Material and Methods

This study utilized ground-based data from 28 meteorological stations over the period 1979–2020, as well as atmospheric data from NASA's MERRA-2 dataset. In 2021, missing precipitation and temperature data for the years 1979–2020 were completed by Japanese researchers using the gap-filling method. Due to the lack of daily ground-based precipitation and temperature data, daily precipitation and temperature records for 1991–2020 were downloaded from NASA's MERRA-2 platform. Missing and anomalous data were completed using statistical methods such as moving averages, and outliers were identified and removed using statistical tests like the Shapiro-Wilk test.

Analytical methods, including anomalies, the non-parametric Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and statistical indices such as the correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), RMSE, and NRMSE, were applied in the analysis. Trend analysis was conducted using the anomaly method (Equation 1) and the Mann-Kendall test (Equation 2). Using outputs from the Sixth Assessment Report of the IPCC and the LARS-WG8 model (HadGEM3-GC31-LL-CMIP6), climatic elements were projected for the 2021–2050 period. The validation of the results was conducted using statistical measures, including r , R^2 , RMSE, and NRMSE (Equations 4, 5, and 6). Data analysis was performed using ArcGIS, Excel, and SPSS software.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & Z = \frac{Y_i - \mu}{\sigma} \\
 (2) \quad & \text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \\
 (3) \quad & U_{tT} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad K_T \max |U_{tT}|
 \end{aligned}$$

$$(4) \quad RMSE = \frac{\sum \sqrt{(xi - \mu)^2}}{n}$$

$$(5) \quad MSE = \frac{1}{n} \sum (xi - \mu)^2$$

$$(6) \quad R = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2}}$$

Additionally, using validation indices such as the correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE), and normalized root mean square error (NRMSE), along with observational precipitation and temperature data from five meteorological stations in the Kabul River Basin for the period 1991–2020, the outputs of the LARS-WG8 model were validated. The results confirm the satisfactory performance of the model in generating downscaled precipitation and temperature data.

Results and Discussion

The Mann-Kendall test, recommended by the World Meteorological Organization, was used in this study to analyze the annual rainfall trend. This statistical method is a standard approach for evaluating temporal trends in hydrological data. The results, presented in Table 2, indicate that during the period 1979–2020, the mean annual rainfall was 310 mm, with minimum and maximum values of 116 mm and 358 mm, respectively. Using a 95% confidence level ($\alpha = 0.05$), the calculated Z-statistic for the Mann-Kendall test was 1.96, confirming a statistically significant increasing trend. An annual rainfall increase of 0.30% was observed in the Kabul River Basin.

Similarly, the trends in annual minimum, maximum, and mean temperatures were analyzed, as detailed in Table 3. The results reveal significant increases in all three temperature parameters. Specifically, the Mann-Kendall test showed that the annual minimum temperature exhibited the most pronounced trend, with a Z-value of 5.25, followed by significant increases in the annual mean and maximum temperatures. Analysis of the data in Table 2 confirms that all temperature types have risen considerably over the period 1979–2020.

Figure 5, based on Table 2, illustrates the temporal trend of annual mean temperature in the Kabul River Basin, highlighting a clear and substantial increase over the study period. These findings, combined with the lack of effective adaptation measures to address climate change, suggest that the observed trends are likely to continue. This ongoing temperature rise is expected to accelerate glacier melting, leading to a higher frequency of floods in the basin in the coming years.

Conclusion

The results of this study indicate that the annual precipitation in the Kabul Basin during the period 1979–2020 experienced an insignificant increase of approximately 0.3%, equivalent to 0.93 mm, while temperature exhibited a significant rise of nearly 8%, corresponding to an increase of 1.2°C. Projections suggest that the upward trend in temperature and the downward trend in precipitation will persist during 2021–2050 compared to the baseline period (1991–2021). Under all Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios—SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5—minimum temperatures are projected to increase by 0.4°C, 0.5°C, and 0.6°C, respectively, and maximum temperatures by 0.6°C, 0.7°C, and 0.8°C, respectively, compared to the baseline period. Additionally, annual precipitation is expected to decrease by approximately 11% relative to the baseline. The forecasts further suggest changes in the region's precipitation regime, specifically a reduction in the proportion of precipitation occurring during colder months compared to other months. Consequently, the ratio of solid precipitation (snow) to liquid precipitation (rain) is projected to decline in the coming years.



آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما در حوضه آبریز کابل افغانستان با استفاده از مدل لارس

عبدالعزیز قاضی زاده^۱، کمال امیدوار^{۲*}، غلامعلی مظفری^۳، احمد مزیدی^۴

^{۱،۲،۳،۴} دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷	از جمله مسائلی که در بین اقلیم‌شناسان امروزه مورد اختلاف قرار دارد، وجود تغییرات اقلیمی یا تغییر روند در متغیرهای جوی است. هدف اصلی در این تحقیق آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دما، و پیش‌بینی دما و بارش در حوضه آبریز کابل می‌باشد. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دما، آشکارسازی، روندیابی، پیش‌بینی و تحلیل دقت مدل‌ها انجام گرفت. در این فرایند از روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتریک من-کندال، شیب سنس، مدل لارس (گزارش ششم) و ضریب همبستگی، ضریب تعیین، r، R^2، $RMSE$، $NRMSE$ استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در حوضه آبریز کابل، میانگین بارش سالانه در سطح اطمینان ۰/۰۵ از روند افزایشی برخوردار بوده و میانگین سالانه دما در سطح اطمینان ۰/۰۵ روند افزایشی داشته و فصل بارندگی از زمستان به تابستان تغییر تدریجی نموده است. به عبارت دیگر، مقدار سالانه بارش در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ تقریباً ۰/۳۰ درصد یا معادل ۰/۹۳ میلی‌متر افزایش غیر محسوس و دما به طور قابل توجهی افزایش یافته است که تقریباً ۸ درصد یا معادل ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که روند افزایش دما و کاهش بارش نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۱) در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ادامه خواهد داشت. در تمامی سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دمای کمینه به ترتیب به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درجه سلسیوس و دمای بیشینه به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، افزایش و بارش سالانه نیز حدود ۱۱ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت؛ بنابراین بر اثر تغییرات اقلیمی افزایش دما و تغییر الگوی بارش، احتمال وقوع سیلاب و خطرات مرتبط با آن در آینده جدی‌تر خواهد شد. از این جهت مطالعات متغیرهای بارش و دما تحت شرایط تغییر اقلیم بسیار ضروری بوده و راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری پیشنهاد می‌شود.
کلمات کلیدی: تغییر اقلیم تحلیل روند اقلیمی تغییرپذیری دما و بارندگی آزمون من-کندال تولیدکننده آب و هوایی LARS-WG - حوضه کابل	

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست، منابع آب، کشاورزی و معیشت انسان‌ها در سراسر جهان داشته است. تغییر اقلیم یکی از بحث‌برانگیزترین مباحث اقلیمی است، بیشتر اقلیم‌شناسان معتقدند که تغییرات گرمایی یا بارشی را نمی‌توان به عنوان نوسانات طولانی یا کوتاه‌مدت آب‌وهوا تفسیر کرد (Omidvar & Khosravi, 2010). تغییرات در ویژگی‌های بارش و دما باعث تغییر در دسترسی به آب می‌شود و پیامدهایی برای انسان و زیست‌کره دارد. مطالعات نشان می‌دهند که تغییر اقلیم یک تهدید جهانی است که پایداری بخش‌های مختلف سامانه‌ی زمین را مختل کرده است (Parsa, Zarin, Mofidi, & Dadashi Rudbari, 2024). افزایش دما و نوسانات بارش نیز می‌تواند بر دسترسی به آب و تولید محصول در آینده تأثیر بگذارد (Rahimi & Zarei, 2019; Douville et al., 2021; IPCC, 2021; Ellison et al., 2017; Swain, Singh, Touma, & Diffenbaugh, 2020). بنابراین، آگاهی از شرایط کنونی و پیش‌بینی‌های اقلیمی برای شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و توسعه‌ی راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است. جنگ‌های داخلی طولانی‌مدت، اقلیم متنوع، توپوگرافی پیچیده و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی از عواملی هستند که مانع انجام تحقیقات گسترده در این زمینه شده‌اند. تاکنون تحقیقات علمی درباره‌ی روند تغییرات بارش و دما در حوضه‌ی آبریز کابل، صورت نگرفته است؛ اما در این تحقیق تلاش کرده‌ام از روش‌های متنوعی از جمله روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتری من-کندال، شیب سنس^۱، مدل لارس^۲ و ضرایب همبستگی برای بررسی روند تغییرات بارش و دما پرداخته شود تا گوشه‌ای از خلأ تحقیقاتی پر گردد.

افزایش دما، بارش‌های شدید، تغییر در الگوهای بارش تحت شرایط تغییر اقلیم در مناطق مختلف جهان و ایران در پژوهش‌های پوکهرل و همکاران (Pokhrel et al., 2021)، فریچ و همکاران (Frich et al., 2002)، کریستنسن و همکاران (Christensen, Wood, Ekström, Fowler, Kilsby, Voisin, & Lettenmaier, 2004)، بنیستون و همکاران (Beniston et al., 2007)، اکستروم و همکاران (Fowler & Kilsby, 2007)، فری و همکاران (Frei, Schöll, Fukutome, Schmidli, & Vidale, 2006)، میلیهوت و همکاران (Mailhot, Duchesne, Caya & Talbot, 2007)، استیل دون و همکاران (Steele-Dunne et al., 2008)، سوینگت و همکاران (Souvignat, Gaese, Ribbe, Kretschmer & Oyarzun, 2008) و آذری و همکاران (Azari, Moradi, Saghafian & Faramarzi, 2016) گزارش شده است. با وجود پژوهش‌های زیادی که در سطح جهانی انجام شده، پژوهش‌های معدودی در افغانستان صورت گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیقات بابر و همکاران (Babar et al., 2016)، علیار و همکاران (Aliyar, Dhungana & Shrestha, 2022)، برومند (Broomand, 2015)، مسترشد (Mestarshed, 2014)، مسترشد (Mestarshed, 2013)، نصرتی (Nasrati, 2018)، شرافت (Sharafat, 2020) و صالحی (Salehi, 2022) در افغانستان استناد کرد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که بارش در افغانستان، به‌ویژه در فصول بهار و زمستان، روند کاهشی و دما روند افزایشی را طی نموده است.

حوضه‌ی آبریز کابل به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص خود، از تغییرات اقلیمی به‌شدت متأثر شده و شاهد تغییرات قابل‌توجهی در متغیرهای بارش و دما بوده است. این منطقه نه تنها اهمیت بالایی از نظر تأمین منابع آب و کشاورزی برای جمعیت ساکن در آن دارد، بلکه به دلیل وقوع مکرر سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها، شایسته‌ی بررسی دقیق‌تری برای شناسایی روند تغییرات بارش و دما می‌باشد. به‌منظور بررسی روند تغییرات بارش و دما تحت تغییرات اقلیمی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه در حوضه‌ی آبریز کابل از داده‌های زمینی ۲۸ ایستگاه هواشناسی در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ و داده‌های هوایی وبگاه ناسا (میرا ۳)

1- Theil-Sen's Slope

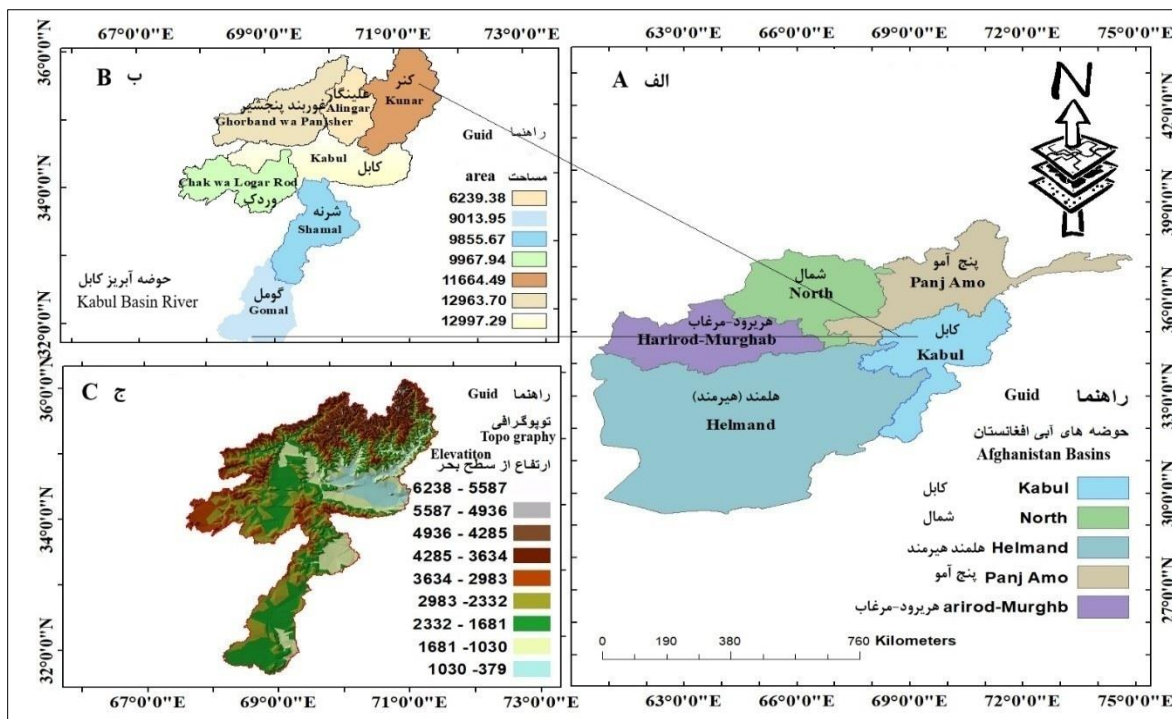
2 -LARS-WG8 GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL

3-The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

استفاده شده است. با بهره‌گیری از خروجی‌های گزارش ششم IPCC و مدل LARS-WG8- HadGEM3-GC31-LL -CMIP6 عناصر اقلیمی در دوره زمانی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) پیش‌بینی شده است.

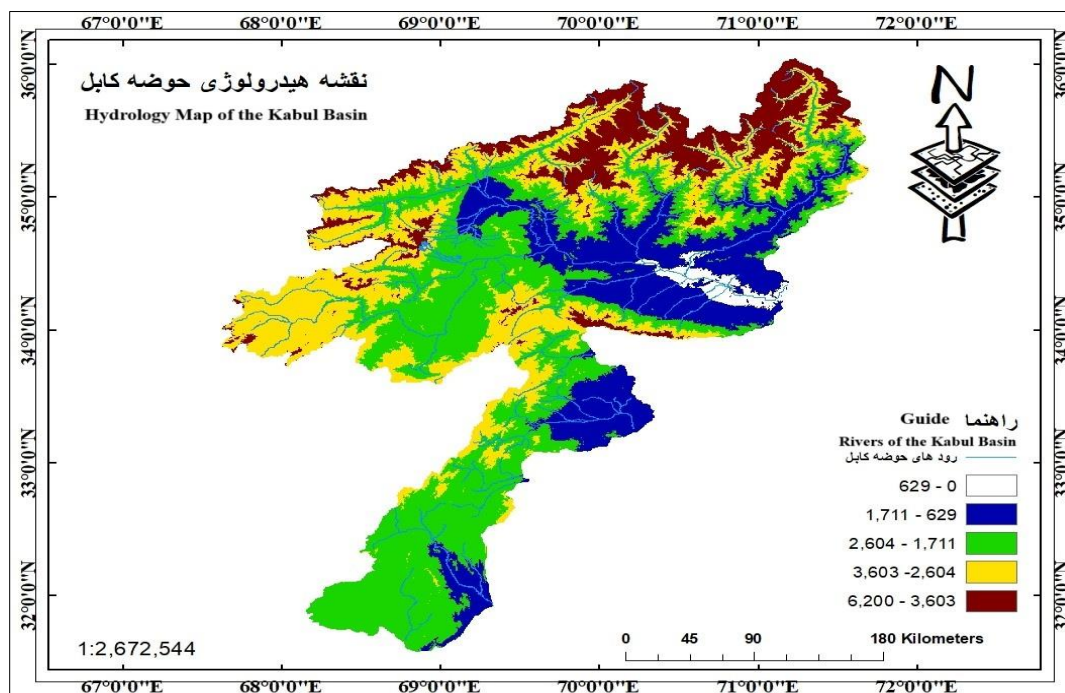
منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی کابل در شمال شرق افغانستان قرار دارد. این حوضه از طرف شمال به حوضه‌ی آمو، از طرف شرق به کشور پاکستان و از جنوب غرب به حوضه‌ی آبریز هیرمند (هلمند) متصل می‌باشد. استان‌های کابل، لوگر، میدان وردگ، پنجشیر، پروان، کاپیسا، لغمان، ننگرهار، کنر، نورستان، خوست، پکتیا و پکتیکا را در برمی‌گیرد. شکل ۱ مساحت کل حوضه‌ی آبریز کابل تقریباً ۷۶۹۰۸ کیلومترمربع است. حدود ۵۵ درصد از اراضی این حوضه ارتفاعات کوهستانی را تشکیل می‌دهد و بیش‌ترین مناطق آن در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. ظرفیت منابع آبی قابل دسترسی این حوضه‌ی ۱۹۰ میلیارد مترمکعب است که از این مقدار، ۵/۲ میلیارد مترمکعب برای زراعت و سایر مقاصد مصرف می‌شود. رود کابل و شاخه‌های آن از دامنه‌های جنوبی هندوکش و کوه‌های مرکزی سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی به رود سند می‌ریزد (شکل ۲)، (Hasanzai, 2022).



شکل ۱- الف) حوضه‌های آبی افغانستان، ب) منطقه مورد مطالعه ج) توپوگرافی

Fig.1. A Five River Basin of AF, B Study Area C Topography



شکل ۲- نقشه هیدرولوژی حوضه کابل
Fig. 2. Hydrology Map of the Kabul Basin

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی روند تغییرات بارش و دمای تحت شرایط تغییرات اقلیمی در سه مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه، از داده‌های زمینی ۲۸ ایستگاه هواشناسی در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ و داده‌های هوایی وبگاه ناسا (میرا ۲) استفاده شده است. در سال ۲۰۲۱ ارقام گم‌شده‌ی بارش و دمای سال‌های ۱۹۷۹-۲۰۲۰ را جاپانی‌ها با استفاده از روش گپ فیلینگ^۱ انجام دادند. به همین علت این دوره‌ی زمانی انتخاب و از وزارت انرژی و آب افغانستان دریافت گردیده و به دلیل عدم داده‌ی روزانه بارش و دما زمینی، داده‌های بارش و دمای روزانه‌ی سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۰ از وبگاه ناسا (میرا ۲) دانلود گردیده است. داده‌های گم‌شده و ناهنجاری‌ها با استفاده از روش‌های آماری نظیر میانگین‌گیری متحرک^۲ تکمیل شده‌اند و داده‌های ناهنجار با استفاده از آزمون‌های آماری مانند آزمون شاپیرو-ویلک^۳ شناسایی و حذف شده‌اند. در این فرایند از روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتریک من-کندال، شیب سنس، مدل لارس (گزارش ششم) و ضریب همبستگی، ضریب تعیین، r , R^2 , $RMSE$, $NRMSE$ استفاده گردید. روندیابی به ترتیب و با استفاده از روش‌های آماری آنومالی رابطه (۱) آزمون نا پارامتری من-کندال رابطه (۲) انجام شده است. با بهره‌گیری از خروجی‌های گزارش ششم IPCC و مدل LARS-WG8- HadGEM3-GC31-LL -CMIP6، عناصر اقلیمی در دوره‌ی زمانی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) پیش‌بینی شده است. اعتبارسنجی نتایج توسط r , R^2 , $RMSE$, $NRMSE$ ، رابطه (۴)، رابطه (۵) و رابطه (۶) سنجیده شده و در این پژوهش برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای ArcGIS, Excel و SPSS نیز کار گرفته‌ایم.

1- Gap-filling
2- Moving Average

3- Shapiro-Wilk Test

$$Z = \frac{Y_i - \mu}{\sigma} \quad (۱)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (۲)$$

$$U_{tT} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \operatorname{sgn}(X_i - X_j) \quad K_T \max |U_{tT}| \quad (۳)$$

$$RMSE = \frac{\sum \sqrt{(x_i - \mu)^2}}{n} \quad (۴)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu)^2 \quad (۵)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (۶)$$

با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و داده‌های مشاهداتی دما و بارش پنج ایستگاه آب‌وهوا شناسی حوضه آبریز کابل در بازه زمانی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) خروجی‌های منتج از مدل LARS-WG8 اعتبارسنجی شدند. نتایج کارایی قابل قبول مدل در ایجاد داده‌های ریزمقیاس نمایی شده بارش و دما را تأیید می‌کند (جدول ۱).

جدول ۱- اعتبار سنجی داده‌های برآوردی مدل LARS-WG8 GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL

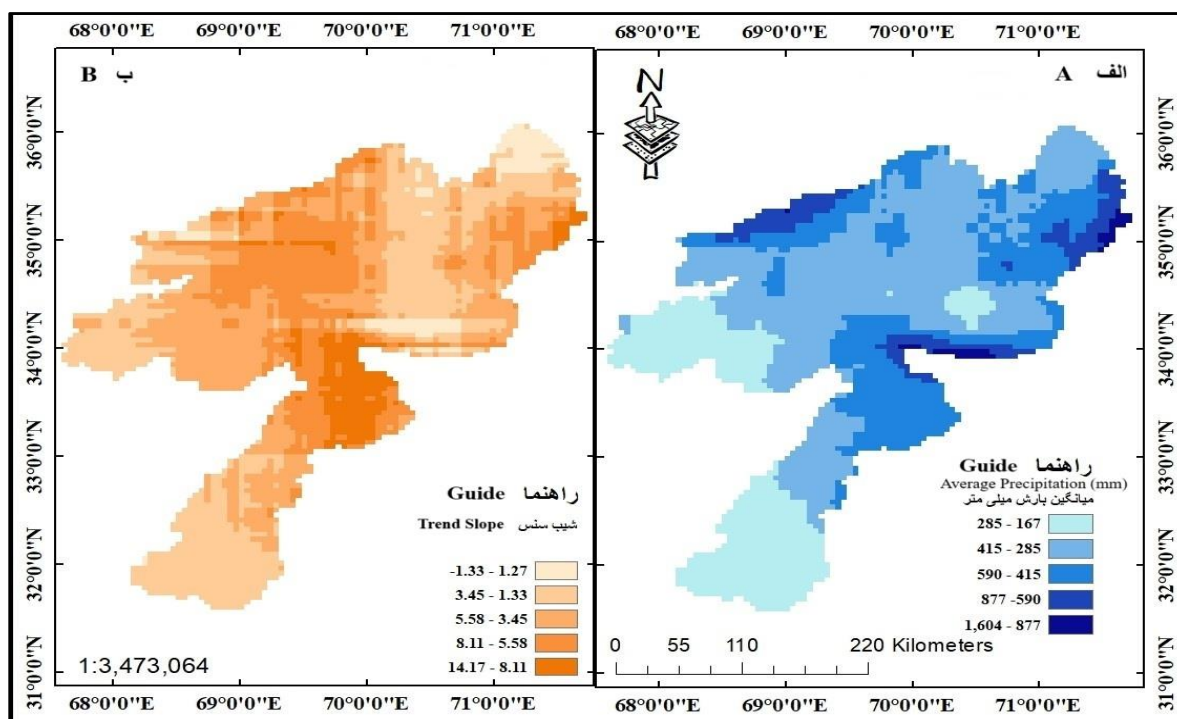
Table 1- Validation of Estimated Data from the LARS-WG8 Model Using GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL

ایستگاه‌ها Stations	کابل میدان هوایی Kabul Airport	کنر Kunar	خاواک Khawak	قرغه Qargha	عمرز Omarz
R	0.93	0.95	0.98	0.98	0.95
R ²	0.87	0.90	0.96	0.97	0.89
RMSE	5.58	5.98	3.40	3.2	2.6
NRMSE	11%	11%	8 %	7 %	10 %

تحلیل نقشه بارش و نقشه شیب روند

نقشه بارش، توزیع مکانی میانگین بلندمدت بارندگی را در حوضه کابل نمایش می‌دهد. رنگ‌های مختلف در این نقشه از آبی روشن تا آبی تیره، مقادیر متفاوت بارندگی را نشان می‌دهد. مناطق با رنگ آبی روشن نشان‌دهنده کمترین میزان بارندگی متوسط سالانه (۱۶۶ تا ۲۸۴ میلی‌متر) این مناطق اغلب در ارتفاعات پایین قرار دارد، جایی که بارش به حداقل می‌رسد. مکان‌های با رنگ آبی کمی تیره‌تر نشان‌دهنده مناطقی با بارندگی متوسط سالانه هستند. رنگ آبی تیره‌ترین نشان‌دهنده مناطقی با بالاترین میانگین بارش سالانه (۸۷۶ تا ۱۶۰۳ میلی‌متر) است. این مناطق در ارتفاعات بالاتر از ۳۰۰۰ متر قرار دارند و عمدتاً تحت تأثیر جریان‌های سایبری زمستانی، جریان مونسون و بادهای مرطوب هند قرار می‌گیرند. این نواحی عمدتاً قسمت‌های شمال و شمال شرقی حوضه کابل را در بر می‌گیرند. در مقابل، بخش‌های جنوبی و جنوب غربی حوضه کابل کمترین میانگین بارش را نشان می‌دهند.

شکل ۳- (الف) و شکل ۳- (ب) نقشه شیب روند بارش است که با استفاده از شیب سنس در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ حوضه کابل ترسیم شده است. این نقشه به بررسی تغییرات بارش در نقاط مختلف حوضه طی این بازه زمانی می‌پردازد. رنگ‌های مختلف در نقشه شیب روند، میزان و جهت تغییرات بارش در طول زمان را نشان می‌دهد. رنگ‌های روشن‌تر، نشان‌دهنده شیب منفی (بین ۱.۳۳- تا ۱.۲۷- میلی‌متر) هستند که بیانگر کاهش بسیار کم بارش در طول زمان است. رنگ‌های نارنجی تیره‌تر نشان‌دهنده بیشترین شیب تغییرات بارش (بین ۸.۱۱ تا ۱۴.۱۷ میلی‌متر) در طول زمان هستند. این مناطق احتمالاً تغییرات شدید بارندگی را تجربه کرده‌اند، که می‌تواند ناشی از تغییرات در الگوهای اقلیمی منطقه‌ای یا جهانی باشد و اثرات جدی بر محیط‌زیست و جوامع محلی داشته است.



شکل ۳- (الف) نقشه بارش و (ب) نقشه شیب روند حوضه کابل

Fig. 3. A) Precipitation Map and B gradient Trend Map of the Kabul Basin

نتایج و بحث

نتایج حاصل از روند تغییرات بارش و دما به ما کمک می‌کند تا در راستای حوادث احتمالی که در آینده ممکن است رخ دهد، تدابیر لازم و کافی را باید گرفت. در زیر، متغیرهای بارش و دما در بازه‌ی زمانی ماهانه و سالانه در حوضه‌ی آبریز کابل با استفاده از مدل‌های ذکرشده به ترتیب مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

تحلیل روند سالانه بارش

برای تحلیل روند سالانه بارندگی، از آزمون پیشنهادی سازمان جهانی هواشناسی (آزمون من-کندال) در این تحقیق استفاده شده است. این آزمون به عنوان یک روش آماری برای تحلیل روند زمانی بارندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل سالانه بارندگی در جدول ۲ آورده شده است.

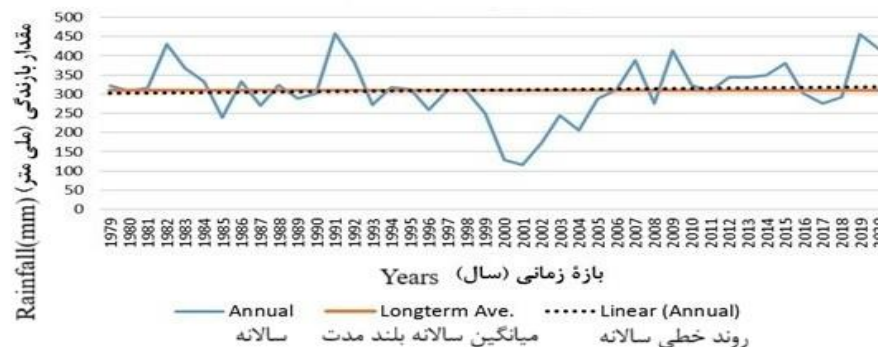
میانگین، کمترین و بیشترین مقدار بارندگی سالانه در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ به ترتیب ۳۱۰ میلی‌متر، ۱۱۶ میلی‌متر و ۳۵۸ میلی‌متر است. سطح اطمینان برای تجزیه و تحلیل آزمون من-کندال ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) انتخاب شده است. آماره Z محاسبه شده برای آزمون من-کندال برابر با ۱/۹۶ است، که نشان‌دهنده وجود یک‌روند افزایشی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. در نتیجه، یک‌روند افزایشی ۰/۳۰ درصد در بارندگی سالانه حوضه آبریز کابل مشاهده می‌شود.

جدول ۲- نتیجه روند سالانه بارش در حوضه آبریز کابل

Table 2- Results of Annual Precipitation Trends in the Kabul River Basin

نتیجه روند Trend Analysis Results	مدت ارقام و داده Period of Records and Data	بارندگی کمینه-بیشینه (میلی‌متر) Minimum-Maximum Rainfall (mm) 116 358	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) Annual Average Rainfall (mm) 310	$\alpha=0.05$ (Z) 1/96	حوضه Basin کابل Kabul
↑ 0/30	2020-1979	2021-1991	310	1/96	

نمودار میانگین بارندگی، بر اساس داده‌های ۲۸ ایستگاه سنجش هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰، تغییرات سالانه درازمدت بارندگی در حوضه آبریز کابل را نشان می‌دهد. شکل ۴ که براساس نتایج جدول ۲ برای تحلیل روند میانگین سالانه بارش در حوضه آبریز کابل تهیه شده است، خطوط نقطه‌چین سیاه و خط مستقیم نارنجی به ترتیب میانگین سالانه و روند خطی بارندگی را نمایش می‌دهند. این سری زمانی نشان می‌دهد که کمترین بارش ۱۱۶ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ و بیشترین بارش ۳۵۸ میلی‌متر در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۹ ثبت شده است. میانگین بلندمدت سالانه بارش نیز ۳۱۰ میلی‌متر بوده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، می‌توان گفت که میزان بارندگی سالانه در حوضه آبریز کابل روند افزایشی غیر محسوس داشته است.



شکل ۴- میانگین سالانه درازمدت بارندگی در حوضه آبریز کابل از ۱۹۷۹-۲۰۲۰

Fig. 4. Long-Term Annual Average Precipitation in the Kabul River Basin (1979-2020)

تحلیل روند سالانه دما

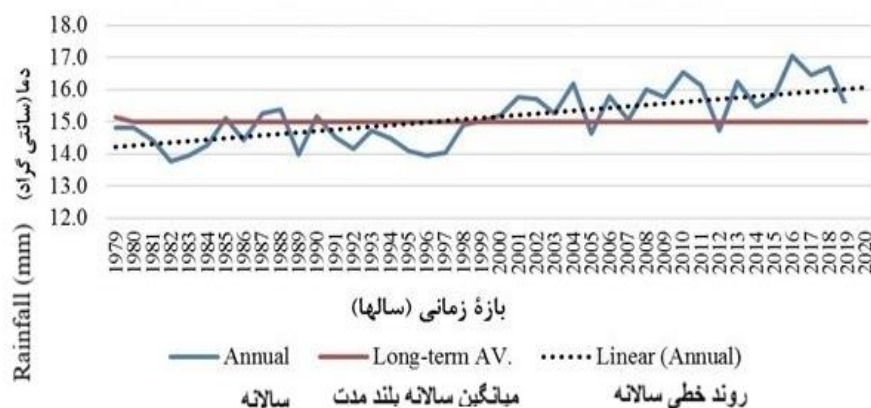
در این بخش، تحلیل روند سالانه دما در حوضه آبریز کابل انجام شده است. در این تحلیل، روند دمای کمینه، بیشینه و میانگین سالانه مورد بررسی قرار گرفته، در جدول ۳ آورده شده. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دمای کمینه سالانه، دمای میانگین سالانه و دمای بیشینه سالانه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. نتایج کلی آزمون من-کندال برای این حوضه آبریز نشان می‌دهد که دمای سالانه به‌طور قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش است.

جدول ۳- نتیجه روند دمای سالانه (کمینه، بیشینه و میانگین) حوضه آبریز کابل

Table 3- Results of the Annual Temperature Trend (Minimum, Maximum, and Average) in the Kabul River Basin

روند Trend	نتایج روند آزمون منکندال Mann-Kendall Trend Test Results	مدت ارقام Period of Records	دما سالانه (°C) Annual Temperature (°C)
افزایش قابل ملاحظه Significant Increase	(↑) 5/25	2020-1979	دما حداقل سالانه Annual Minimum Temperature
افزایش قابل ملاحظه Significant Increase	(↑) 4/47		دما حداکثر سالانه Annual Maximum Temperature
افزایش قابل ملاحظه Significant Increase	(↑) 4/36	2020-1979	دما میانگین سالانه Annual Average Temperature

باتوجه به جدول ۲ می توان نتیجه گرفت که هر سه نوع دما (کمینه، بیشینه و میانگین) در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده است. این افزایش ها در واقع نشان دهنده پیامدهای منفی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز کابل می باشد. بیش ترین تغییر روند در دمای کمینه مشاهده می شود، که دارای رقم $Z = 5/25$ است و یک روند افزایشی را نشان می دهد. شکل ۵ که بر اساس نتایج جدول ۲ برای تحلیل روند زمانی دمای میانگین سالانه در حوضه آبریز کابل ترتیب داده شده است، به وضوح مشخص است که دما در تمام بازه زمانی یک روند افزایش قابل ملاحظه را طی کرده است. با توجه به این یافته ها و عدم وجود راهکارهای مناسب برای سازگاری با تغییر اقلیم، احتمال دارد که این روند همچنان ادامه یابد و شاهد بیشتر شدن دما و در پی آن از اثر ذوب یخچال ها انتظار می رود که وقوع سیلاب ها در این حوضه در سال های آینده بیشتر شود.



شکل ۵- روند تغییرات میانگین دمای سالانه حوضه کابل

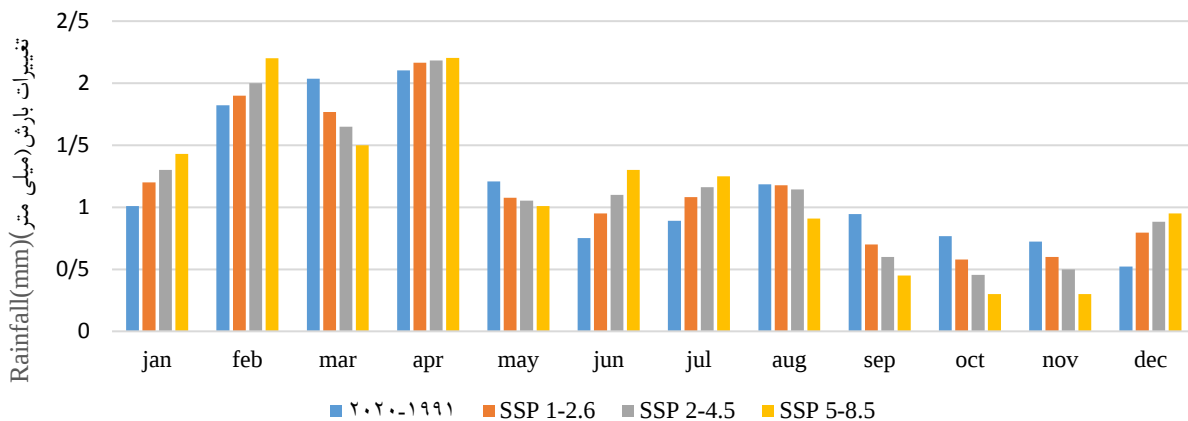
Fig. 5. Trend of Annual Average Temperature Changes in the Kabul River Basin

پیش‌بینی پارامترهای بارش و دما

پیش‌بینی بارش، دمای کمینه و بیشینه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰، در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۲۰ با استفاده از مدل HADGEM3-GCM31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 (خوش‌بینانه)، سناریو SSP2-4.5 (واقع‌نگر) و SSP 5-8.5 (بدبینانه) استفاده شده است.

پیش‌بینی بارندگی ماهانه

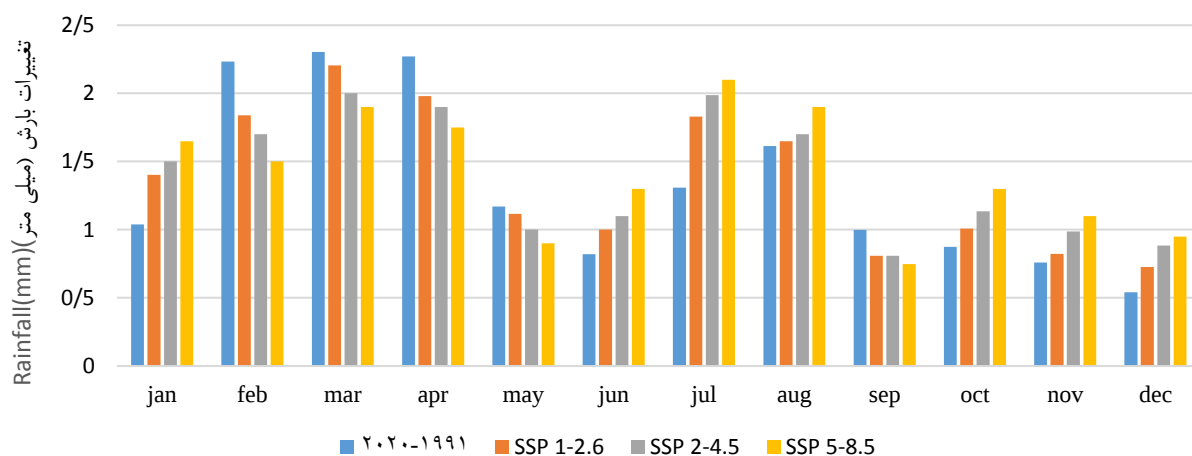
میانگین بارش ماهیانه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای هر سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در طول ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، جولای و دسامبر نشان می‌دهد که بارندگی نسبت به دوره پایه افزایش یافته است، و در ماه‌های مارس، می، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش یافته است. در ایستگاه میدان هوایی کابل شکل ۶ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، جولای و دسامبر افزایش و در ماه‌های مارس، می، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش را نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو نشان می‌دهد. ایستگاه کنر شکل ۷ بارش در ماه‌های ژانویه، جون، جولای آگوست، اکتبر، نوامبر و دسامبر افزایش و در ماه‌های فوریه مارس آوریل، می و سپتامبر کاهش نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شده است. ایستگاه قرغه شکل ۸ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل، می، ژوئن، جولای، نوامبر و دسامبر افزایش و در ماه‌های مارس، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش را نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو نشان می‌دهد. در ایستگاه خاواک شکل ۹ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، سپتامبر، اکتبر و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو توسط مدل برآورده شده است. در ایستگاه عمرض شکل ۱۰ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، اکتبر، نوامبر و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو توسط مدل برآورده شده است.



شکل ۶- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه میدان هوایی کابل با استفاده از سناریوهای مدل

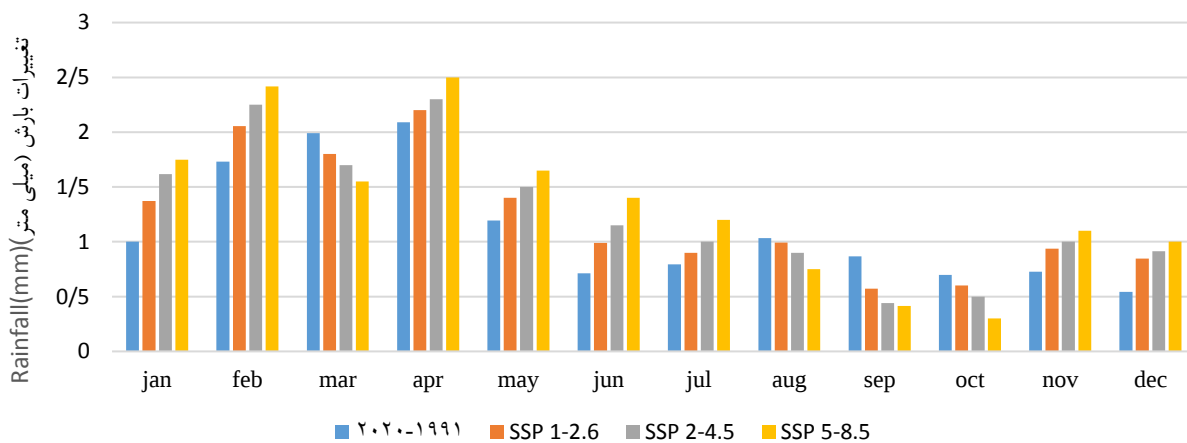
HADGEM3-GCM31-LL

Fig. 6. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Kabul Airport Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



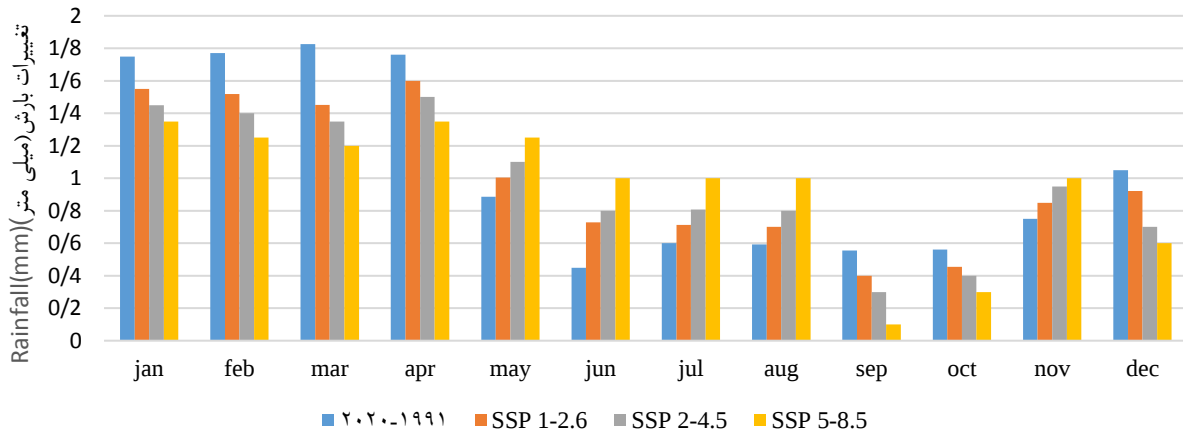
شکل ۷- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه کُنر با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .7. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Kunar Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



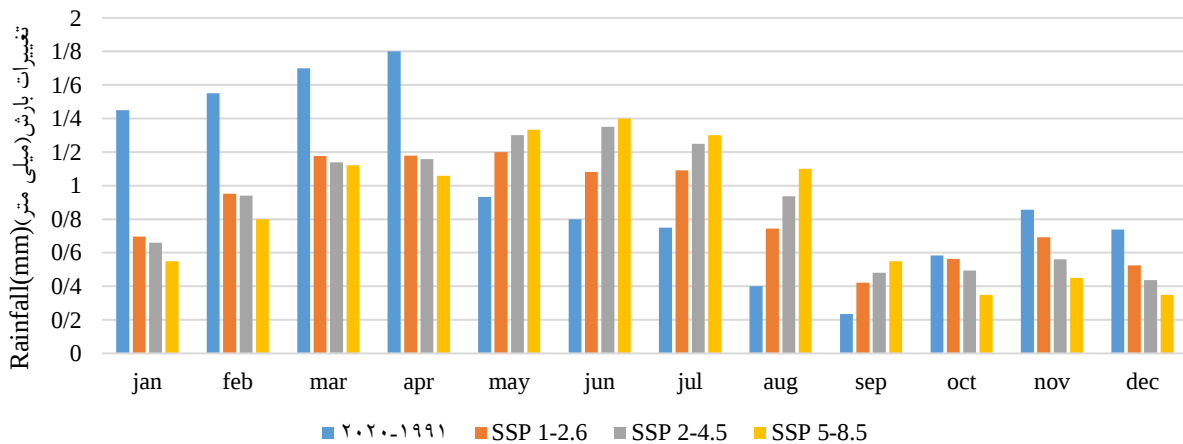
شکل ۸- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه قرغه با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .8. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Qargha Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



شکل ۹- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه خاواک با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig.9. Comparison of Predicted Monthly Mean Precipitation with the Baseline Period for Khawak Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



شکل ۱۰- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه عمرض با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig.10. Comparison of Predicted Monthly Mean Precipitation with the Baseline Period for Omarz Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios

در زیر جداول خروجی عملکرد مدل لارس و تغییرات میانگین بارش ماهانه ایستگاه میدان هوایی حوضه آبریز کابل آمده است. به جهت تعدد جداول، از ذکر جداول سایر ایستگاه ها خود داری گردیده است. نتایج حاصل خروجی عملکرد مدل لارس در سه سناریو در جدول ۴ و تغییرات میانگین بارش ماهانه در سه سناریو در جدول ۵ نشان می‌دهد که بارش در اغلب ماه‌ها روند افزایشی داشته و انتظار می‌رود که در ۳۰ سال آینده ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در هر سه سناریو مقدار بارش ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست (فصل بهار و تابستان) روند افزایشی داشته و بقیه ماه روند کاهشی را طی می‌کند.

جدول ۴- خروجی عملکرد مدل LARS-WG8 بارش ایستگاه حوضه کابل

Table 4- Output of LARS-WG8 Model Performance for Precipitation at Kabul Basin Station

ایستگاه میدان هوایی کابل Kabul airport Station											
Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
16.22	21.69	23.93	28.49	36.94	28.16	21.59	37.45	65.38	60.95	51.31	30.84
بارش پایه ۱۹۹۱-۲۰۲۰ BaselinePrecipitation 1991-2020											
15.30	20.10	20.11	27.97	36.24	33.46	27.46	47.19	55.38	58.19	43.95	29.57
بارش آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ProjectedPrecipitation 2021-2050											
0.98	0.76	0.73	0.93	0.92	0.39	0.43	0.21	0.40	0.46	0.33	0.84
p-value											
0.92	1.59	3.82	0.52	0.70	-5.30	-5.87	-9.74	10.00	2.76	7.36	1.27
تفاوت بارش پایه بر بارش آتی Difference Between Baseline and ProjectedPrecipitation											

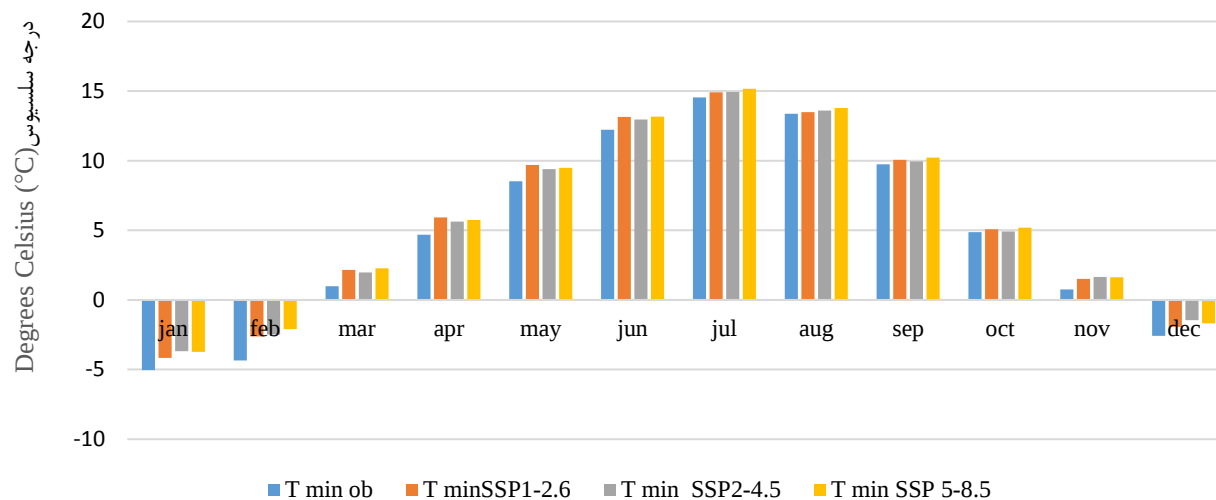
جدول ۵- میانگین بارش ایستگاه میدان هوایی کابل از ۱۹۹۱-۲۰۲۰ و بارش آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در سه سناریو

Table 5- Average Precipitation of Kabul Airport Station from 1991-2020 and Projected Precipitation for 2021-2050 under Three Scenarios

ایستگاه میدان هوایی کابل Kabul airport Station											
Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
0.52	0.72	0.77	0.95	1.19	0.89	0.75	1.21	2.10	2.04	1.82	1.01
0.80	0.60	0.58	0.70	1.18	1.08	0.95	1.08	2.17	1.77	1.90	1.20
0.88	0.50	0.45	0.60	1.14	1.16	1.10	1.05	2.18	1.65	2.00	1.30
0.95	0.30	0.30	0.45	0.91	1.25	1.30	1.01	2.20	1.50	2.20	1.43

پیش‌بینی دمای کمینه

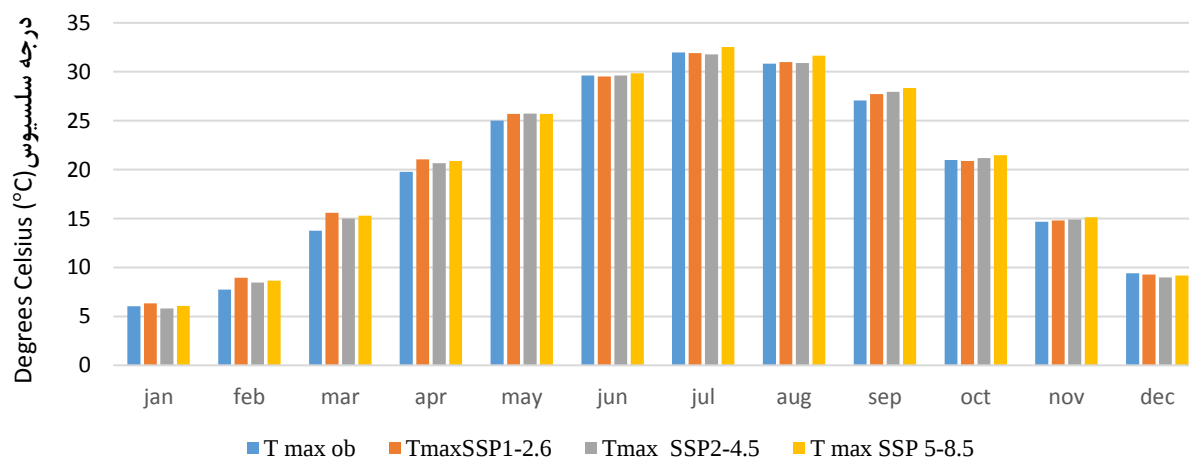
میانگین ماهیانه دمای کمینه ایستگاه میدان هوایی کابل در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر به ترتیب ۱/۶۵، ۲/۲۵، ۰/۹۲ نسبت به دوره پایه کاهش و در تمامی سناریوها SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش یافته است. در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- میانگین ماهانه دمای پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه آب‌وهوا شناسی میدان هوایی کابل
Fig. 11. Comparison of Predicted Monthly Mean Temperature with the Baseline Period for Kabul Airport Meteorological Station

پیش‌بینی دمای بیشینه

پیش‌بینی میانگین بیشینه دمای ماهانه نشان می‌دهد که روند دما نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. فقط در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر هیچ روندی نداشته و در سایر سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یافته است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- میانگین ماهانه دمای پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه آب‌وهوا شناسی میدان هوایی کابل
Fig. 12. Comparison of Predicted Monthly Mean Temperature with the Baseline Period for Kabul Airport Meteorological Station

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که مقدار سالانه بارش حوضه‌ی کابل در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ تقریباً ۰/۳۰ درصد یا معادل ۰/۹۳ میلی‌متر افزایش غیر محسوس و دما به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، تقریباً ۸ درصد یا معادل ۱/۲ درجه سلسیوس افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های انجام‌شده حاکی از کاهش بارش و ادامه‌ی روند افزایش دما با شدت بیشتر دارد. میانگین ماهانه دمای کمینه در سناریو SSP1-2.6 (خوش‌بینانه) به میزان ۰/۶ درجه سلسیوس، سناریو SSP2-4.5 (واقع‌نگر) ۰/۷ درجه سلسیوس و در سناریو SSP5-8.5 (بدبینانه) ۰/۸ درجه سلسیوس و دمای بیشینه به ترتیب به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، افزایش و بارش سالانه نیز حدود ۱۱٪ کاهش نسبت به دوره پایه خواهد یافت. از سوی دیگر، پیش‌بینی بارندگی سال‌های آتی در افق زمانی ۳۰ ساله بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، حکایت از تغییر رژیم بارش منطقه و به‌طور خاص کاهش نسبت میزان بارش ماه‌های سرد به میزان بارش سایر ماه‌ها، داشته است. لذا در سال‌های آتی نیز از نسبت بارش‌های جامد به بارش‌های مایع کاسته می‌شود. افزایش میانگین بارش و دمای حوضه کابل متاثر از تغییرات در الگوهای اقلیمی منطقه‌ای و جهانی بوده و اثرات زبان بار بر محیط‌زیست و جوامع محلی گذاشته است.

به اثر تغییرات اقلیمی افزایش دما و تغییر الگوی بارش، یعنی کاهش بارندگی در فصل زمستان و افزایش بارش به فصول پاییز، تابستان و نیمه‌ی دوم بهار، تبدیل شده است. به‌علاوه، نوع بارش نیز تغییر کرده، به‌طوری‌که مقدار برف در زمستان کاهش گردیده و مقدار باران‌های موسمی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. از طرف دیگر پتانسیل بارش‌های رگباری، وقوع روان‌آب و سیلاب با شدت بالا در سایر فصول خصوصاً فصل بهار بیشتر بوده، که باعث خسارات زیان‌بار بر زیرساخت‌های شهری و روستایی، از جمله جاده‌ها، پل‌ها، خانه‌های مسکونی، مدارس و بیمارستان‌ها شده و همچنین، این سیلاب‌ها باعث از بین رفتن مزارع و محصولات کشاورزی، تخریب زمین‌ها، ایجاد خسارات در جوامع و از دست دادن زندگی و اموال انسان‌ها گردیده است. افزایش سیلاب‌های ویرانگر و تنش در منابع آبی حوضه‌ی کابل کماکان و با شدت بیشتری در دوره آتی پیش‌بینی شده است.

نتایج این تحقیق به‌طور مشابه با سایر محققین، مانند رئوفی و همکاران (Raoufi, Taqwa & Attayee, 2024) به بررسی تغییرات دما در شهر کابل پرداخته که نتایج تحقیق ایشان از افزایش دما حکایت دارد. هدایت و همکاران (Hedayat, Ebrahimi Khouf, 2024) "بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات آب‌های سطحی و زیرزمینی کابل افغانستان"، پژوهش رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2024) تحت عنوان "تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی در ولایت قندهار افغانستان"، صفی و راسخ (Safi & Rasikh, 2024) به "تأثیرات تغییرات اقلیمی بر رودخانه‌های افغانستان"، پژوهش صدیقی و شرشتا (Sidiqi & Shrestha, 2021) در مورد ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه کابل پرداخته نتایج تحقیق ایشان کاهش بارش و افزایش دما را در آینده گزارش کرده است. مایر (Mayar, 2020) "تحلیل جریان رودخانه و پیش‌بینی سیلاب‌ها در حوضه رودخانه کابل"، نشان می‌دهد که در حوضه‌ی کابل، افزایش دما و تغییر الگوی بارش به شکلی است که بارندگی در فصل زمستان کمتر شده و در فصول پاییز، تابستان و نیمه دوم بهار بیشتر می‌گردد. این الگوی تغییرات در تطابق با تحقیقات دیگر در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که این تغییرات اقلیمی یک الگوی گسترده دارد. پیش‌بینی‌ها نیز ادامه افزایش دما و کاهش بارش را تأیید می‌کند، به‌طوری‌که در آینده انتظار می‌رود که نسبت بارش‌های جامد به بارش‌های مایع کاهش یابد.

References

- Aliyar, Q., Dhungana, S., & Shrestha, S. (2022). Spatio-temporal trend mapping of precipitation and its extremes across Afghanistan (1951–2010). *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1-2), 605–626. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03851-2>
- Azari, M., Moradi, H. R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2016). Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gorganroud River Basin. *Water and Soil*, 27(3), 537-547. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26051>
- Babar, Z. A., Zhi, X., Ge, F., Riaz, M., Mahmood, A., Sultan, S., ... & Ahmad, M. F. (2016). Assessment of Southwest Asia surface temperature changes: CMIP5 20th and 21st century simulations. *Pakistan Journal of Meteorology*, 13(25), 1–15. <https://www.prdb.pk/article/assessment-of-southwest-asia-surface-temperature-changes-cm-190>
- Baidar, K., Ihsan, I., Zahid, S., & Nabavi, S. A. (2024). Climate change and its impact on water resources and groundwater in Afghanistan. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*. 344-347. <http://dx.doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.235>
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., ... & Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(1), 71-95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>
- Bromand, M. T. (2015). *Impact assessment of climate change on water resources in the Kabul River Basin, Afghanistan*. (Master's thesis). Ritsumeikan University, Shiga, Japan, Environmental Systems and Civil Engineering.
- Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., & Lettenmaier, D. P. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, 62(1-3), 337-363. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013684.13621.1f>
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., ... & Zolina, O. (2021). Water cycle changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://centaur.reading.ac.uk/101319/1/101319.pdf>
- Ekström, M., Fowler, H. J., Kilsby, G. G., & Jones, P. D. (2003). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Part 2: Future estimates and use in impact studies. *Journal of Hydrology*, 300(1-4), 234-251. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.019>
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Fowler, H. J., & Kilsby, C. G. (2007). Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Journal of Climate Change*, 80, 337-367. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9117-3>
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., & Vidale, P. L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111, D06105. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JD005965>
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), 193-212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- Hasanzai, F. H. (2022). *Assessment and analysis of the impacts of climate change on water resources in five river basins of Afghanistan*. (Master's Thesis). Yazd University, Physical Climatology, Faculty of Physics. [In Persian]

- Hedayat, S. J., Ebrahimi Khouf, M., Omidvar, K., & Sharifi Pichon, M. (2024). Investigation of factors affecting surface and groundwater resources using satellite products (Case study: Kabul, Afghanistan). *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(1), 13–24. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1291>
- IPCC. (2021). *The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Chapter 11, 955-917. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., & Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.019>
- Mayar, M. A. (2020). River flow analyses for flood projection in the Kabul River Basin. *Central Asian Journal of Water Research*, 6(1), 1-17. <http://dx.doi.org/10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-1/1-17.eng>
- Mestarched, M. (2013). *Identifying rainfall and temperature characteristics in Afghanistan*. (Master's thesis). University of Isfahan, Faculty of Geographical Sciences and Planning. [In Persian].
- Mestarched, M. (2014). The climatic characteristics of Afghanistan's rainfall. *Geographical Research Quarterly*, 29(3), 191–202. [In Persian] <http://georesearch.ir/article-1-355-fa.html>
- Nasrati, R. (2018). *Study of the recent half-century drought in the country*. General Information and Communications Department, Academy of Sciences, Kabul, Afghanistan, 41–48 and 79–88. [In Persian]
- Omidvar, K., & Khosravi, Y. (2010). Examination of changes in some climatic elements on the northern coasts of the Persian Gulf using the Kendall test. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 21(2), 38. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1389.21.2.4.0>
- Parsa, S., Zarin, A., Mofidi, A., & Dadashi Rudbari, A. (2024). Impacts of climate change on temperature and precipitation in Afghanistan with emphasis on the Helmand and Harirod basins. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(1), 35–38. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1294>
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>
- Rahimi, D., & Zarei, F. (2019). Effects of climate change on the volume of water resources and inter-basin water transfer. *Irrigation and Engineering Sciences (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(3), 61–74. [In Persian] <https://doi.org/10.22055/jise.2017.21862.1565>
- Rahmati, J., Darmel, M. B., Ullah, S., & Ghaforzai, A. (2024). Impacts of climate change on groundwater resources in Afghanistan: A case study of Kandahar Province. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*, 291-295. <http://dx.doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.221>
- Raoufi, H., Taqwa, S., & Attayee, S. N. (2024). Temperature trend analysis: A case study of Kabul, Afghanistan. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 12(1). <https://doi.org/10.26491/mhwm/194452>
- Safi, A. G., & Rasikh, K. (2024). Climate change effects on the rivers of Afghanistan. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*. 313-317. <https://doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.226>
- Salehi, F. A. (2022). *Synoptic analysis of heavy snowfall events in Afghanistan*. (Master's thesis). Yazd University, Department of Geography, Atmospheric Sciences. [In Persian]
- Sharafat, A. (2020). *Synoptic study of maximum daily rainfall in Kabul Province*. (Master's thesis) Yazd University, Department of Geography, Atmospheric Sciences. [In Persian]
- Sidiqi, M., & Shrestha, S. (2021). Assessment of climate change impact on the hydrology of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water Engineering and Management*, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.47884/jweam.v2i1pp01-21>

- Souvignet, M., Gaese, H., Ribbe, L., Kretschmer, N., & Oyarzun, R. (2008). Climate change impacts on water availability in the arid Elqui Valley, North Central Chile: A preliminary assessment. In *IWRA World Water Congress*, Montpellier, France.
- Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., & Hanafin, J. (2008). The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 28-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.025>
- Swain, D. L., Singh, D., Touma, D., & Diffenbaugh, N. S. (2020). Attributing extreme events to climate change: A new frontier in a warming world. *One Earth*, 2(6), 522-527. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.011>