

Assessment of the impact of climate change on water quality using statistical methods and WQI

Manizheh Pourali Dougaheh^{1✉}, Seyyed Mohammad Shoaee²

1. Corresponding Author, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University, Iran. E-mail: m.pouralidougaheh@znu.ac.ir
2. Department of Water and Hydraulic Structure Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University, Iran. E-mail: sm.shoaee@znu.ac.ir

(Received 4 Apr 2025, Revised 12 May 2025, Accepted 20 May 2025, Published online 26 Jun 2025) - Research Article

Extended Abstract

Background and Objective

Water quality assessment using quality indices effectively manages aquatic systems and safeguards water resource quality. Historically, rivers have played a crucial role in supplying drinking and agricultural water, contributing significantly to the formation of civilizations. Over the past half-century, the hydrological conditions of the Darband River, Tehran's second-largest river in terms of discharge, have been impacted by population growth and urban development in Tehran. This study aims to evaluate the current water quality of the Darband River and forecast its future condition under RCP scenarios. Monthly data on precipitation, temperature, hardness, TDS, EC, PH, and SO₄ from 1988–2005 were analyzed using the Water Quality Index (WQI). To examine the impact of climate change on river water quality, regression relationships were established between discharge parameters and water quality indices. Based on predicted discharge during the 2030–2047 period, water quality conditions under WQI were calculated for three scenarios: RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5. Statistical analyses revealed that the river's water quality in both the baseline and future periods is expected to remain in favorable conditions.

Methodology

This section discusses the various stages of the research process. After collecting baseline information and data for the Darband River basin (located in Tehran), the performance of climate models from the Fifth Assessment Report of the IPCC is evaluated. To assess the performance of these climate models, simulated climate variable results for the study area during the 17-year baseline period (1988–2005) are compared with observed recorded data. For this purpose, statistical error metrics, including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and the correlation coefficient (r), were employed. Subsequently, to utilize the output of AOGCM models in simulating qualitative climate variables for future periods, their computational grid cells, which are spatially coarse for the region, need to be downscaled to the station level. In this study, the Change Factor (CF) method was used for downscaling due to its simplicity, computational efficiency, and resulting savings in time and cost. The CF method calculates the climate change scenario based on the ratio of the long-term averages simulated by AOGCMs for the climate change period to the long-term averages simulated for the baseline period. Finally, variations in water quality for both the baseline and future periods will be analyzed using the Water Quality Index (WQI). To examine



changes in water quality using WQI, relevant parameters must first be measured, followed by the calculation of the WQI using a mathematical formula typically involving weighted contributions from each parameter. WQI computation will be conducted after collecting data, which includes parameters such as DO, BOD, turbidity, total suspended solids (TSS), nitrate, phosphate, pH, temperature, and fecal coliform.

Findings

Based on the results obtained from evaluating the performance of AOGCM models in estimating precipitation and temperature in the region, the *NSE* for both climate variables is close to 1, indicating the successful simulation of climate variables by these models. To calculate future climate change scenarios for precipitation and temperature during the 2030–2047 period relative to the baseline period (1988–2005), GFDL-ESM2G and MIROC ESM-CHEM models were employed under RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios, respectively. The results indicated that all scenarios (except for RCP 2.6) show a decrease in the long-term annual mean precipitation in future years compared to the baseline period. The greatest long-term annual mean precipitation reduction is projected under the RCP 8.5 scenario. Similarly, all scenarios suggest an increase in the long-term annual mean temperature in future years compared to the baseline. The most significant increase in long-term annual mean temperature is anticipated under the RCP 8.5 scenario. The relationships between water quality parameters and climate variables, including temperature and precipitation, were examined during the baseline period. The results revealed an inverse relationship between precipitation and EC, TDS, and SO₄. Additionally, the impact of rising temperatures on water quality is negative. Regarding pH, higher maximum and minimum temperatures, along with increased evaporation, indicate elevated concentrations of dissolved solids in surface waters, thereby negatively affecting this parameter. However, precipitation has a positive relationship, as increased river discharge compensates for the negative impacts of temperature. Subsequently, water quality parameters during the future period were analyzed. The investigations revealed that observed changes are directly influenced by variations in climatic factors, particularly precipitation and, consequently, river discharge. Furthermore, the baseline water quality is in good condition, and projections indicate that under all three scenarios, water quality will also remain in good condition. One key reason for this is the anticipated increase in precipitation and the river's self-purification capacity in future years.

Conclusion

Projections under various RCP scenarios indicate that despite a relative decrease in precipitation in the future compared to the baseline period, particularly under RCP 8.5, air temperatures are expected to rise significantly. These climatic changes directly impact river systems, as observed in the Darband River basin, where variations in precipitation and temperature influence hydrological dynamics and water quality parameters.

Analyses also point to critical links between climatic variables and water quality. Increased precipitation leads to reduced concentrations of dissolved solids in surface waters due to enhanced discharge and dilution capacity. On the other hand, rising temperatures, while triggering snowmelt and increasing discharge, can degrade water quality through evaporation and increased concentrations of dissolved solids, as observed in parameters such as EC, TDS, and pH.

Nevertheless, WQI assessments reveal that the water quality of the Darband River remains categorized as "good" both under baseline conditions and future scenarios. This condition is largely attributed to the river's natural self-purification capacity and relative increases in precipitation during certain future periods.

Keywords: Water Quality Index, Water Quality Parameters, Climate Change, RCP Scenarios, IPCC Fifth Assessment Report

Cite this article: Pourali Dougaheh Manizheh, Shoaee Seyyed Mohammad. Assessment of the Impact of Climate Change on Water Quality Using Statistical Methods and WQI. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 1-10. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12775.1011>

ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب با بهره‌گیری از روش‌های آماری و WQI

منیژه پورعلی دوگاهه^۱، سید محمد شعاعی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: m.pouralidougah@znu.ac.ir
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: sm.shoaei@znu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰، تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵) - مقاله پژوهشی

چکیده

ارزیابی کیفی منابع آب با استفاده از شاخص‌های کیفی، روشی مؤثر برای مدیریت پهنه‌های آبی و حفاظت از کیفیت منابع آب است. از گذشته، رودخانه‌ها به‌عنوان تأمین‌کنندگان اصلی آب شرب و کشاورزی، نقش مهمی در شکل‌گیری تمدن‌ها ایفا کرده‌اند. در طول نیم‌قرن گذشته، وضعیت آب‌شناسی رودخانه‌ی دربند که دومین رود پرآب تهران است، به‌دلیل افزایش جمعیت و توسعه‌ی شهری تهران، تحت تأثیر قرار گرفته است. این پژوهش، با هدف ارزیابی کیفیت آب رودخانه دربند در حال حاضر و پیش‌بینی آن برای دوره آبی و تحت سناریوهای RCP انجام پذیرفته است. در این پژوهش داده‌های ماهانه بارش، دما، سختی، TDS، EC، PH، SO₄ طی دوره آماری ۱۹۸۸-۲۰۰۵ با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) تحلیل شد. برای بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب رودخانه، بین پارامترهای دبی و پارامترهای کیفیت آب روابط رگرسیونی برقرار شد و با توجه به پیش‌بینی انجام‌شده برای دبی در دوره ۲۰۳۰-۲۰۴۷، شرایط کیفیت آب با WQI تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 محاسبه شد. نتایج نشان دادند که میانگین بلندمدت سالانه بارش در آینده نسبت به دوره پایه به‌ازای سناریوی RCP 8.5 بیش‌ترین کاهش را داشت. از طرفی کم‌ترین کاهش میانگین بلندمدت سالانه بارش در آینده نسبت به دوره پایه به‌ازای سناریوی RCP 4.5 خواهد بود. بررسی‌ها نشان دادند که کیفیت آب رودخانه در دوره زمانی پایه و آینده در شرایط مطلوبی قرار دارند.

کلیدواژه‌ها: شاخص کیفیت آب، پارامترهای کیفیت آب، تغییر اقلیم، سناریوهای RCP، گزارش پنجم ارزیابی IPCC

استناد: پورعلی دوگاهه منیژه، شعاعی سید محمد. ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب با استفاده از روش‌های آماری و WQI. *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۴؛ (۲)۱: ۱-۱۰. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12775.1011>

۱- مقدمه

تغییر سبک زندگی انسان‌ها و گرایش آن‌ها به زندگی شهری باعث کاهش اراضی و گسترش شهرها و تغییر آب‌شناسی رودخانه‌ها شده است. به‌علاوه، پدیده تغییر اقلیم که یکی از چالش‌های اصلی در سطح جهانی و به‌ویژه در ایران محسوب می‌شود، این مسئله را به‌طور قابل توجهی تشدید خواهد کرد. از آنجا که ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده و تأثیر تغییر اقلیم بر تغییرات رواناب بیش‌تر از تغییرات بارش است، این تأثیر در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب به‌وضوح بیش‌تر مشاهده می‌شود [۱ و ۲]. از این‌رو، مدیریت یک‌پارچه منابع آب در این نواحی از اهمیت بسیاری برخوردار است. تغییرات اقلیمی ناشی از رشد جمعیت و تغییرات محیط‌زیستی، مشکلات متعددی از جمله تغییر الگوی بارش [۳ و ۴]، ورود انواع آلودگی‌های خطرناک به رواناب شهرها و تهدید سلامت جانداران و زیست‌بوم‌ها [۵، ۶، ۷] را به‌دنبال خواهد داشت. مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس^۱ (AOGCM)، که بر مبنای اصول فیزیکی و روابط ریاضی تعریف شده‌اند، قادر به شبیه‌سازی عددی حرکات جوی و تبادلات حرارتی و تعاملات یخ، اقیانوس و خشکی هستند. این مدل‌ها به‌طور قابل اعتمادی برای پیش‌بینی سناریوهای اقلیمی آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. برای شبیه‌سازی شرایط متغیرهای اقلیمی در آینده، سناریوهای مختلفی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده است، چرا که این گازها تأثیرات قابل توجهی بر پدیده تغییر اقلیم دارند. مدل‌های AOGCM با قابلیت بالای خود در ارائه اطلاعات دقیق درباره واکنش جو نسبت به افزایش غلظت این گازها، نقش مؤثری در این زمینه ایفا می‌کنند [۹].

امروزه، منابع آب با کیفیت مناسب، به‌ویژه سامانه‌های رودخانه‌ای، به‌عنوان شریان‌های حیاتی هر منطقه در راستای توسعه پایدار به‌شدت مورد توجه هستند.

با افزایش تقاضای آب، بهبود سطح زندگی و آلودگی منابع آب ناشی از توسعه فعالیت‌های کشاورزی، شهری و صنعتی، شرایط زیست‌محیطی به‌طور فزاینده‌ای دچار آسیب شده است [۱۰ و ۱۱]. این مسئله به‌اندازه‌ای حائز اهمیت است که در بسیاری از مطالعات، کیفیت آب رودخانه‌ها مهم‌تر از کمیت آن به‌شمار می‌رود. به‌همین دلیل، استفاده از شاخص‌های کیفیت آب به‌عنوان ابزاری مؤثر مطرح می‌شود. این شاخص‌ها با ترکیب داده‌های کمی از پارامترهای مختلف کیفیت آب، می‌توانند تفسیر سریع و قابل‌فهمی از وضعیت کیفیت آب ارائه دهند. آن‌ها نه‌تنها تأثیر فعالیت‌های انسانی بر کیفیت آب را ردیابی می‌کنند، بلکه قادر به پیش‌بینی شرایط کلی منابع آبی در آینده نیز هستند. در واقع، این شاخص‌ها نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و حفاظت از زیست‌بوم‌های آبی ایفا می‌کنند، و می‌توانند به مسئولان و برنامه‌ریزان در تصمیم‌گیری‌های سازگار با محیط‌زیست کمک کنند.

در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی در زمینه بررسی پارامترهای کیفی مؤثر بر کیفیت آب‌های سطحی و تأثیر تغییر اقلیم بر آن صورت گرفته است که در ادامه به نمونه‌هایی از آنها اشاره خواهد شد.

دلپا^۲ و همکاران اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت آب‌های سطحی در ارتباط با آب آشامیدنی را بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که روند کیفیت آب آشامیدنی کاهشی بود. هم‌چنین، تغییرات آب و هوایی منجر به افزایش خطرپذیری در ارتباط با تأثیرات بالقوه سلامتی خواهد شد [۱۲]. نیک‌اختر^۳ و همکاران به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کیفیت رودخانه اردک در شمال شرق ایران پرداختند. مدل Qual2kW برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب شامل DO، pH، COD و NO₃ استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان ماهانه از IHACRES استفاده شد. داده‌های دما و بارندگی GCM از RCP2.6 و RCP8.5 برای سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۹ دریافت شدند. با وارد

^۳- Nikakhtar

^۱- Atmosphere-Ocean General Circulation Model

^۲- Delpa

WQI انجام شده است؛ اما بررسی پارامترهای کیفی منابع آب تحت شرایط تغییر اقلیم کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده، در این تحقیق، ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب رودخانه دربند با استفاده از روش‌های آماری و شاخص کیفیت آب^{۱۶} (WQI) که تاکنون به آن پرداخته نشده، انجام خواهد گرفت. در تحقیق حاضر تلاش می‌شود تا تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای کیفی TDS، EC، PH، SO₄ در افق زمانی آینده (۲۰۳۰-۲۰۴۷) تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 از گزارش پنجم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC-AR5) با مدل MIROC ESM-CHEM برای شبیه‌سازی دما و مدل GFDL-ESM2G برای شبیه‌سازی بارش، مورد بررسی قرار گیرد و تأثیر هریک از پارامترهای کیفی بر شاخص نشان داده شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق، ریزمقیاس‌سازی به روش عامل تغییر^{۱۷} صورت گرفته است و داده‌های آبی پارامترهای کیفی برآورد خواهد شد. در ادامه بعد از بررسی مواد و روش‌های مورد استفاده در این مطالعه و معرفی محدوده مطالعاتی، در نهایت به بحث در رابطه با یافته‌های تحقیق و نتیجه‌گیری پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی مراحل مختلف تحقیق پرداخته می‌شود. پس از جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های پایه برای منطقه مورد مطالعاتی، در ابتدا عمل‌کرد مدل‌های اقلیمی از گزارش پنجم IPCC، ارزیابی می‌شود. سپس متغیر اقلیمی مورد نظر در دوره آبی، شبیه‌سازی خواهد شد. در ادامه، به بررسی وضعیت کیفیت آب در شرایط حال و آینده با استفاده از WQI پرداخته و در نهایت، پارامترهای کیفی موثر معرفی خواهند شد.

کردن این داده‌ها به IHACRES، جریان‌های جریان شبیه‌سازی شد و Qual2kw را قادر می‌سازد تا اثرات آبی بر کیفیت آب را پیش‌بینی کند. نتایج نشان دادند که تغییرات دما بین ۰/۵ تا ۱/۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده بود. بنابراین کیفیت آب کاهش یافت [۱۳]. بار تلت و دد کرکوت-هووز^۴ راه‌بردهای سازگاری را برای تأثیرات تغییر اقلیم بر کیفیت آب را به صورت مروری بررسی نمودند [۱۴]. کوئودو-کاسترو^۵ و همکاران اثرات سناریوهای تغییر اقلیم را بر پیش‌بینی کیفیت آب مخازن استوایی، ارزیابی نمودند. نتایج افزایش WQI را برای مقادیر دمای پایین‌تر نشان دادند [۱۵]. کاجیکوچ^۶ مدل‌های یک‌پارچه هیدرودینامیک و کیفیت آب در آب‌های سطحی را بررسی نمودند [۱۶]. کوچیک^۷ و ساحیل^۸ (۲۰۲۴) میزان آلودگی آب رودخانه الگو^۹ در اتیوپی را با استفاده از شورای وزیران محیط زیست کانادا^{۱۰} (CCME)، WQI و شاخص کیفیت آب آبیاری^{۱۱} (IWQI) شناسایی نمودند. در مجموع ۱۲ نمونه آب از سه محل نمونه‌برداری رودخانه برای فصول خشک و مرطوب برای آزمایش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی جمع‌آوری شد. تحقیق ایشان تحلیل کاملی را از طریق مدل‌سازی برای تعیین مناسب بودن آب برای اهداف مختلف ارائه داد [۱۷]. مارسلینا^{۱۲} و همکاران سه روش - شاخص کلی آلودگی^{۱۳} (OIP)، روش Said-WQI، و شاخص آلودگی^{۱۴} (PI) - را برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه سیتاروم^{۱۵} مقایسه نمودند. تحقیق ایشان با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری با استانداردهای تعیین شده در مکان‌ها و دوره‌های زمانی مختلف، کیفیت آب رودخانه سیتاروم بالایی را با موفقیت ارزیابی نمودند [۱۸].

بررسی تحقیقات گذشته نشان داده است که گرچه ارزیابی کیفیت منابع آب با استفاده از روش‌های آماری و

¹¹- Irrigation Water Quality Index

¹²- Marselina

¹³- Overall Index of Pollution

¹⁴- Pollution Index

¹⁵- Citarum

¹⁶- Water Quality Index

¹⁷- Change Factor

⁴- Bartlett and Dedekorkut-Howes

⁵- Quevedo-Castro

⁶- Kacikoc

⁷- Kujiek

⁸- Sahile

⁹- Elgo

¹⁰- Canadian Council of Ministers of the Environment

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهر تهران از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۱ درجه و ۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. حوضه رودخانه دربند، یکی از مناطق مهم در مدیریت منابع آب و محیط‌زیست در تهران، شامل دو رودخانه دربند و گلابدره است. این حوضه بخشی از سامانه بزرگ‌تر حوضه‌های آبریز تهران-کرج به‌شمار می‌آید که از کوه‌های توچال شمال تهران سرچشمه می‌گیرد و به‌خاطر موقعیت جغرافیایی و آب‌شناسی خاص خود، نقشی حیاتی در تأمین آب این منطقه ایفا می‌کند. مساحت حوضه رودخانه دربند ۳۹ کیلومتر مربع بوده است که در شمال تهران قرار دارد و محدوده‌ای از دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز را در بر می‌گیرد. این حوضه به‌طور معمول از مناطق مرتفع کوهستانی و دره‌های عمیق تشکیل شده است. این منطقه دارای اقلیم کوهستانی با بارش‌های فصلی است. بارش‌ها به‌طور عمده به‌صورت باران و برف رخ می‌دهند که منبع اصلی تغذیه رودخانه‌ها و آب زیرزمینی هستند.

رودخانه‌های دربند و گلابدره منابع آب مهمی برای کشاورزی، تأمین آب شرب و همچنین تغذیه منابع آب زیرزمینی تهران هستند. در این پژوهش از اطلاعات مربوط به ایستگاه هواشناسی دربند و گلابدره استفاده شده است. با توجه به توسعه شهری تهران، این حوضه تحت فشار زیادی قرار گرفته است. افزایش ساخت‌وسازها و کاهش نفوذپذیری زمین می‌تواند منجر به سیلاب‌های شهری و کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها شود. از این‌رو، مدیریت پایدار این حوضه برای حفظ تعادل زیست‌بوم و تأمین منابع آب ضروری است.

رودخانه دربند از مسیرهای محبوب گردشگری و کوهنوردی است و بسیاری از مردم برای تفریح و لذت‌بردن

از طبیعت به این مناطق سفر می‌کنند. همچنین، دربند بخشی از تاریخ و فرهنگ تهران را نشان می‌دهد.

۲-۲- ارزیابی عمل‌کرد مدل‌های اقلیمی

به‌منظور ارزیابی عمل‌کرد مدل‌های اقلیمی، نتایج شبیه‌سازی متغیر اقلیمی در منطقه مورد مطالعه برای دوره پایه ۱۷ ساله (۱۹۸۸-۲۰۰۵) با داده‌های مشاهداتی ثبت‌شده، مقایسه شدند. بدین‌منظور، شاخص‌های خطاسنجی جذر میانگین مربعات خطا^{۱۸} ($RMSE$)، میانگین مطلق خطا^{۱۹} (MAE) و ضریب نش-ساتکلیف^{۲۰} (NSE)، همراه با ضریب همبستگی^{۲۱} (r) به‌کار گرفته شدند. دو معیار نخست، میزان دقت مدل را براساس تفاضل مقادیر پیش‌بینی‌شده (P_i) و مقادیر واقعی (O_i) مورد ارزیابی قرار می‌دهند که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند، دقت بیش‌تر مدل را در شبیه‌سازی متغیر مورد نظر نشان می‌دهد. معیار عمل‌کرد NSE نیز در صورتی که برابر با ۱ باشد، نشان‌گر تناسب کامل میان داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است. همچنین، بالا بودن r بیان‌گر روند تغییرات بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است. بنابراین بالا بودن r به‌تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی سنجش دقت و عمل‌کرد مدل نمی‌تواند باشد.

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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

²⁰- Nash-Sutcliffe Coefficient

²¹- Correlation Coefficient

¹⁸- Root Mean Square Error

¹⁹- Mean Absolute Error

۳-۲- شبیه‌سازی متغیر اقلیمی کیفی در دوره آتی

به‌منظور بهره‌گیری از خروجی مدل‌های AOGCM لازم است تا سلول‌های محاسباتی آنها که برای منطقه به‌لحاظ مکانی بزرگ‌مقیاس است، در مقیاس ایستگاهی ریزمقیاس شود. در این پژوهش برای ریزمقیاس کردن از روش عامل تغییر (به‌دلیل سادگی و سرعت بالای محاسبات و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان و هزینه)، استفاده شده است. در روش عامل تغییر، سناریوی تغییر اقلیم از نسبت میانگین بلندمدت شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره تغییر اقلیم و میانگین بلندمدت شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره پایه محاسبه می‌شود. سناریوی تغییر اقلیم یا سناریوهای خط سیر توازن واداشت تابشی^{۲۲} (RCP) توسط یک کمیته علمی و تحت نظارت هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی تدوین شدند. هدف این سناریوها تهیه مجموعه‌ای از اطلاعات است که امکان پیگیری عوامل اصلی تغییرات اقلیمی و استفاده از نتایج آنها در مدل‌های اقلیمی را فراهم کند. مدل‌های اقلیمی از طریق نتایج این سناریوها، غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی را شبیه‌سازی می‌کنند. خانواده سناریوهای RCP شامل چهار حالت مختلف است که براساس تفاوت در سطح فناوری، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، و سیاست‌های آینده طراحی شده‌اند. این سناریوها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر آنها بر سطح واداشت‌های تابشی را تا پایان قرن ۲۱ در چهار سطح مختلف، یعنی ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ وات بر متر مربع، طبقه‌بندی می‌کنند. نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ ارائه شده و همچنین تا سال ۲۳۰۰ مدل‌سازی شده‌اند.

۴-۲- بررسی تغییرات کیفیت آب برای دوره پایه و آتی با

استفاده از WQI

WQI یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی کیفیت آب است و شامل تعدادی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است که به‌نوعی بر سلامت محیط زیست و سلامت انسان تأثیر دارند. برای بررسی تغییرات کیفیت آب با استفاده از WQI، در ابتدا باید پارامترهای مرتبط با آن را سنجید و سپس با استفاده از یک فرمول ریاضی که به‌طور معمول شامل وزن‌دهی به هر پارامتر است، WQI محاسبه شود. محاسبه WQI پس از جمع‌آوری داده‌ها که شامل پارامترهایی مانند DO، BOD، کدورت، کل جامدات معلق، نیترات، فسفات، pH، دما و کالیفرم مدفوعی است با استفاده از رابطه (۵) انجام می‌شود:

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (5)$$

که در آن، W_i = وزن پارامتر i ام، n = تعداد پارامترها، و S_i = مقدار شاخص i ام از منحنی رتبه‌بندی می‌باشد. پارامترهای کیفی آب به همراه وزن آنها در جدول ۱ و طبقه‌بندی آب در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای کیفیت آب و وزن پارامترها براساس

WQI

Table 1. Water quality parameters and parameter weights based on WQI

Parameter	Weight
DO (Percentage)	0.17
Fecal Coliform (Number in 100 mL)	0.16
pH (Standard unit)	0.11
BOD (mgr/L)	0.11
Temperature Variations (°C)	0.10
Phosphate (mgr/L)	0.10
Total Nitrate (mgr/L)	0.1
Turbidity (NTU)	0.08
Total solids (mgr/L)	0.07

²²- Representative Concentration Pathways

جدول ۲- طبقه‌بندی آب براساس WQI

Table 2. Water classification based on WQI

Range of index variations	Water classification
0-25	Very bad
26-50	Bad
51-70	Moderate
51-70	Moderate
51-70	Moderate
71-90	Good
71-90	Good
91-100	Excellent
91-100	Excellent

۲-۳- پیش‌بینی بارش آبی حوضه

برای محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم بارش در دوره آبی ۲۰۴۷-۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۸ است، از مدل GFDL-ESM2G برای شبیه‌سازی بارش تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 استفاده شد. نتایج مدل به روش عامل تغییر ریزمقیاس شدند. در ادامه، نتایج تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه بارش آینده و دوره پایه مربوط به مدل GFDL-ESM2G در جدول ۴ ارائه شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

جدول ۴- تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه بارش برای دوره آینده و دوره پایه

Table 4. Long-term average monthly precipitation changes for the future and the baseline periods

Month	Long-term average precipitation (mm)			
	Baseline	Future (2030-2047)		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Jan	63.05	44.08	50.22	41.01
Feb	65.66	45.34	36.23	39.54
Mar	83.34	56.38	69.64	63.80
Apr	49.14	44.37	45.50	52.54
May	25.79	58.48	51.58	47.02
Jun	4.04	1.24	17.23	8.96
Jul	4.25	9.03	5.49	7.09
Aug	3.22	1.05	0.96	1.55
Sep	3.41	1.06	1.48	1.09
Oct	16.53	8.44	5.76	7.04
Nov	41.35	76.94	54.13	59.90
Dec	66.26	83.92	78.62	86.57
Long-term average annual changes (mm)	35.50	36.78	34.74	34.68
Long-term average annual change in future precipitation relative to baseline (%)	-	3.59	-2.15	-2.33
Difference between long-term annual average future and baseline precipitation (mm)	-	1.28	-0.77	-0.83

۳-۱- بررسی عمل کرد مدل اقلیمی

به‌منظور بررسی عمل کرد مدل‌های AOGCM در تخمین بارش و دمای منطقه برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی، نتایج مدل منتخب از گزارش پنجم IPCC در شبیه‌سازی بارش و دما برای دوره پایه با مقادیر متناظر مشاهداتی به‌وسیله معیارهای $RMSE$ ، MAE ، NSE و r مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج در جدول ۳ آورده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی مدل، مقدار آماره NSE برای هر دو پارامتر نزدیک به ۱ می‌باشد.

جدول ۳- شاخص‌های خطاسنجی و ضریب همبستگی برای ارزیابی GCMها

Table 3. Error indicators and correlation coefficient for evaluating GCMs

Precipitation estimation model	RMSE (mm)	MAE (mm)	NSE (Dimensionless)	r (%)
GFDL-ESM2G	21.79	18.52	0.41	65.7
Temperature estimation model	RMSE (°C)	MAE (°C)	NSE (Dimensionless)	r (%)
MIROC ESM-CHEM	2.33	1.92	0.94	99.01

همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، از خروجی‌های این جدول می‌توان به این موضوع پی برد که

همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، از خروجی‌های این جدول می‌توان به این موضوع پی برد که تمامی سناریوها افزایش میانگین دمای سالانه بلندمدت را در سال‌های آینده نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. بیش‌ترین افزایش میانگین بلندمدت سالانه بارش در آینده نسبت به دوره پایه به‌ازای سناریوی RCP 8.5 خواهد بود.

۳-۴- ارتباط بین پارامترهای کیفی آب و متغیرهای اقلیمی

در دوره پایه

ارتباط بین پارامترهای کیفی آب و متغیرهای اقلیمی از جمله دما و بارش در جدول ۶، در دوره پایه بررسی شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، مشاهده می‌شود که رابطه منفی بین بارندگی و EC، TDS و SO_4 نشان‌دهنده این واقعیت است که بارش بیش‌تر، منجر به کاهش EC و املاح در آب‌های سطحی می‌شود. این به‌دلیل افزایش دبی رودخانه و ظرفیت رقیق‌سازی آنها است. هم‌چنین، برای رابطه منفی دمای بیشینه نیز می‌توان چنین استدلال کرد که افزایش دما، دبی رودخانه را افزایش می‌دهد. با توجه به موقعیت حوضه آبریز، افزایش دما در فصول گرم‌تر موجب ذوب بیش‌تر برف و در نتیجه افزایش آب‌های سطحی می‌شود. در مورد دمای کمینه نیز، با توجه به مقادیر منفی آن در ماه‌های سرد سال که منجر به ذوب برف می‌گردد، رابطه مثبت مشخصی مشاهده می‌شود. این در حالی است که افزایش دما می‌تواند منجر به تبخیر بیش‌تر و افت کیفیت آب شود.

در مجموع، اثر افزایش دما رابطه معکوسی با کیفیت آب دارد. در خصوص pH، به‌نظر می‌رسد که افزایش دماهای بیشینه و کمینه و تبخیر بیش‌تر، به افزایش املاح در آب‌های سطحی منجر شده و این موضوع تأثیر کاهشی بر این پارامتر داشته باشد. با این حال، بارش دارای رابطه مثبت است و با افزایش دبی رودخانه، تأثیر منفی دما را جبران می‌کند.

تمامی سناریوها (به‌جز برای سناریوی RCP 2.6) کاهش میانگین بارش سالانه بلندمدت را در سال‌های آینده نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. بیش‌ترین کاهش میانگین بلندمدت سالانه بارش در آینده نسبت به دوره پایه به‌ازای سناریوی RCP 8.5 خواهد بود.

۳-۳- پیش‌بینی دما آتی حوضه

برای محاسبه سناریوهای تغییر اقلیم دما در دوره آتی ۲۰۴۷-۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۸ است، از مدل MIROC ESM-CHEM برای شبیه‌سازی دما تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 استفاده شد. نتایج مدل به روش عامل تغییر ریزمقیاس شدند. در ادامه، نتایج تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه دما در آینده و دوره پایه مربوط به مدل MIROC ESM-CHEM در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- تغییرات میانگین بلندمدت ماهانه دما برای دوره

آینده و دوره پایه

Table 5. Long-term average monthly temperature changes for the future and the baseline periods

Month	Long-term average temperature (°C)			
	Baseline	Future (2030-2047)		
		RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	1.90	3.31	2.84	2.81
Feb	3.72	5.02	4.63	5.36
Mar	8.28	10.10	9.72	10.14
Apr	14.73	17.22	16.33	17.44
May	19.56	22.76	22.16	23.17
Jun	25.63	28.82	28.41	28.23
Jul	28.31	31.55	32.77	31.61
Aug	27.62	30.44	31.43	31.05
Sep	23.20	26.12	26.66	26.18
Oct	16.55	19.08	18.89	19.79
Nov	9.34	11.73	10.68	11.73
Dec	4.34	5.85	5.37	5.62
Long-term average annual changes (°C)	15.26	17.67	17.49	17.76
Long-term average annual change in future temperature relative to baseline (%)	-	15.74	14.58	16.35
Difference between long-term annual average future and baseline temperature (°C)	-	2.40	2.23	2.50

جدول ۶- روابط چندمتغیره بین پارامترهای کیفیت آب و

متغیرهای اقلیمی در دوره پایه

Table 6. Multivariate equations between water quality parameters and climatic variables in the baseline period

Water quality parameter	Multivariate equations
EC	$EC = 2636 - 70.7T_{max} + 45.9T_{min} - 2.64P$
TDS	$TDS = 517 - 5.2T_{max} + 10.9T_{min} - 0.66P$
pH	$pH = 6.61 + 0.0367T_{max} - 0.0092T_{min} + 0.00305P$
SO ₄	$SO_4 = 8.56 - 0.223T_{max} + 0.064T_{min} - 0.0138P$

where, P = Precipitation; T_{max} = Maximum temperature; T_{min} = Minimum temperature

۳-۵- پارامترهای کیفی آب در دوره آتی

برای به‌دست آوردن پارامترهای کیفیت آب در آینده، می‌توان با جایگزین کردن مقادیر پیش‌بینی‌شده دماهای کمینه و بیشینه و بارش در روابط ارائه‌شده در جدول ۵، مقدار هر پارامتر را برای سال‌های مورد نظر تخمین زد. نتایج این برآورد برای پارامترهای کیفی آب در دوره آینده، در شکل ۱ نمایش داده شده است. تغییرات مشاهده‌شده به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات عوامل اقلیمی، به‌ویژه بارش و به‌تبع آن دبی رودخانه، قرار دارد.

۳-۶- ارزیابی شرایط کیفی رودخانه در دوره پایه و آتی

با توجه به روابط رگرسیونی به‌دست‌آمده برای هر پارامتر، مقدار هریک از آن‌ها برای شرایط پایه و سناریوهای مختلف محاسبه شد تا کیفیت رودخانه دربند از نظر WQI مورد ارزیابی قرار گیرد. شاخص معادل هر پارامتر با استفاده از منحنی‌های رتبه‌بندی و وزن‌دهی مطابق با جدول ۱ مشخص شد و در نهایت، مقدار شاخص برای شرایط پایه و هریک از سناریوها مطابق جدول ۷ محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کیفیت آب در شرایط پایه در وضعیت خوب قرار دارد و پیش‌بینی‌ها نیز حاکی از این است که برای هر سه سناریو، کیفیت آب نیز در وضعیت خوب قرار خواهد داشت که یکی از دلایل آن افزایش بارش و خودپالایی رودخانه در سال‌های آتی می‌باشد.

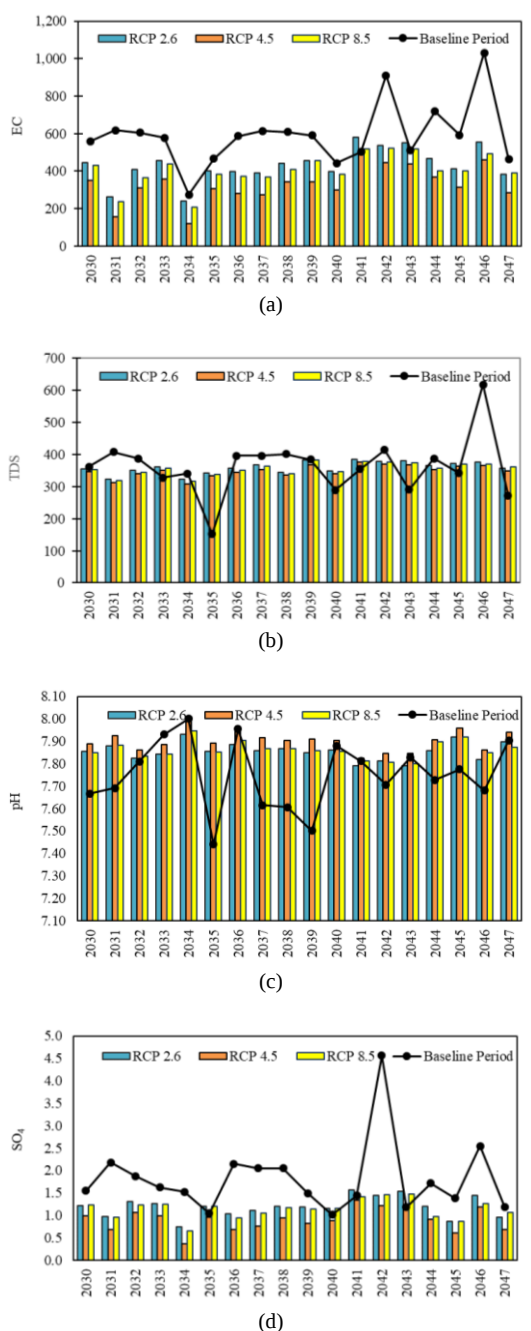


Figure 1. Variation of parameters (a) EC, (b) TDS, (c) pH, and (d) SO₄ in the future period under different scenarios

شکل ۱- تغییر پارامتر (الف) EC، (ب) TDS، (پ) pH و (ت) SO₄ در بازه آتی تحت سناریوهای مختلف

دیده شد، جایی که تغییرات بارش و دما بر دینامیک آب‌شناسی و پارامترهای کیفیت آب تأثیر می‌گذارد.

تحلیل‌ها همچنین به ارتباط کلیدی بین متغیرهای اقلیمی و کیفیت آب اشاره دارند. افزایش بارش منجر به کاهش غلظت املاح در آب‌های سطحی به دلیل افزایش دبی و ظرفیت رقیق‌سازی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش دما، هرچند با تحریک ذوب برف و افزایش دبی همراه است، می‌تواند کیفیت آب را از طریق تبخیر و غلظت املاح کاهش دهد، که این موضوع در پارامترهایی مانند EC، TDS و pH مشاهده می‌شود.

با این حال، ارزیابی WQI نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه دربند هم در شرایط پایه و هم در سناریوهای آتی، در دسته‌بندی "خوب" باقی می‌ماند. این وضعیت به‌طور عمده به ظرفیت خودپالایی طبیعی رودخانه و افزایش نسبی بارش در برخی بازه‌های زمانی آینده بازمی‌گردد.

در نهایت، این نتایج ضرورت تلفیق پیش‌بینی‌های اقلیمی در راهبردهای مدیریت منابع آب را تأکید می‌کند. اعمال شیوه‌های پایدار و اقدامات تطبیقی، برای کاهش تأثیرات منفی احتمالی و بهره‌برداری از فرآیندهای طبیعی برای حفظ کیفیت آب، در مواجهه با شرایط اقلیمی در حال تغییر، ضروری خواهد بود.

Declarations

• Ethical Approval

■ The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

• Competing interests

■ Conflict of Interest - None

• Availability of data and materials

■ Data will be made available on the request.

• Authors Contributions

Manizheh Pourali Dougaheh's conceived the original idea. She developed the theory and performed the calculations. Seyyed Mohammad Shoaee confirmed the analytical methods and supervised the findings of this work. All authors discussed the results.

جدول ۷- شرایط کیفی رودخانه دربند از نظر WQI در دوره پایه و آینده

Table 7. Quality conditions of the Darband River in terms of WQI in the baseline and future periods

Characteristic	Baseline	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
WQI	77.7	81.2	87.1	81.3
Water quality classification	Good	Good	Good	Good

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه اهمیت استفاده از مدل‌های اقلیمی را در پیش‌بینی پارامترهای بارش و دما و تأثیرات متعاقب آن‌ها بر کیفیت آب نشان می‌دهد. ارزیابی مدل‌های AOGCM با استفاده از معیارهای آماری مانند NSE ، MAE ، $RMSE$ و ضریب همبستگی، قابلیت اطمینان بالای این مدل‌ها را تأیید می‌کند؛ به‌ویژه برای مدل‌هایی مانند MIROC ESM-CHEM و GFDL-ESM2G که مقدار آماره NSE آن‌ها نزدیک به ۱ است.

پیش‌بینی تغییرات تحت سناریوهای مختلف RCP (2.6، 4.5 و 8.5) نشان می‌دهد که با وجود کاهش نسبی بارندگی در آینده نسبت به دوره پایه، به‌ویژه در سناریوی RCP 8.5، دمای هوا به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. این تغییرات اقلیمی تأثیر مستقیم بر سامانه‌های رودخانه‌ای دارد، همان‌طور که در حوضه رودخانه دربند

References

- [1] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, Redman CL, Wu J, Bai X, Briggs JM. Global change and the ecology of cities. *Science*. 2008 Feb; 319 (5864): 756-760. **doi: 10.1126/science.1150195.**
- [2] IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [3] Moradi MA, Golfam M. Approaches and challenges of quantifying water-energy-food security nexus in urban areas. *Water Resources and Climate Change*. 2025 Apr; 1(1): 18-27. **doi: 10.22091/wrcc.2024.11329.1004** [In Persian].
- [4] Kalhori M, Tadayon M, Kahrizi E, Ghiasvand M. Analysis and monitoring of water resources and drought using a combination of GRACE, MODIS, and Landsat 8 satellite images (Case study: Hamedan City). *Water Resources and Climate Change*. (2025) Apr; 1(1): 62-74. **doi: 10.22091/wrcc.2025.11390.1007** [In Persian].
- [5] Taheri S. Measuring the impact of microclimatic changes of planting vegetation on comfort indicators. *Water Resources and Climate Change*. (2025) Apr; 1 (1): 1-17. **doi: 10.22091/wrcc.2024.11315.1002** [In Persian].
- [6] Grimmond S, Oke TR. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*. 1999 Jul; 38 (7): 922-940. **doi: 10.1175/1520-0450(1999)038<0922:HSIUAL>2.0.CO;2.**
- [7] UNEP (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. United Nations Environment Programme.
- [8] Bagheri Khanghahi M, Hazar Jaribi A, Kamali MI, Zamani F. Forecasting rainfall in different climatic regions of Iran using the LARS WG7 climate model. *Water Resources and Climate Change*. (2025) Apr; 1(1): 28-39. **doi: 10.22091/wrcc.2025.11744.1008** [In Persian].
- [9] IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [10] IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [11] AR6 Climate Change 2021: *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [12] Delpa I, Jung AV, Baures E, Clement M, Thomas O. Impact of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*. 2009 Nov; 35 (8): 1225-1233.
- [13] Nikakhtar M, Rahmati SH, Massah Bavani AR. Impact of climate change on the future quality of surface waters: Case study of the Ardak River, northeast of Iran. *Water & Climate change*. 2020 Sep; 11 (3): 685-702. **doi: 10.2166/wcc.2019.132.**
- [14] Bartlett JA, Dedekorkut-Howes A. Adaptation strategies for climate change impacts on water quality: A systematic review of the literature. *Water & Climate Change*. 2023 Mar; 14 (3): 651-675. **doi: 10.2166/wcc.2022.279.**
- [15] Quevedo-Castro A, Bustos-Terrones YA, Bandala ER, Loaize JG, Rangel-Peraza JG. Modeling the effect of climate change scenarios on water quality for tropical reservoirs. *Journal of Environmental Management*. 2022 Nov; 322, 116137. **doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116137.**
- [16] Kacikoc M. Integrated Hydrodynamic and Water Quality Models in Surface Waters: Focus on Assessment of the Impacts of Climate Change. In: Bahadir, A.M., Haarstrick, A., Karadirek, I.E., Aydin, M.E., Kumcu, S.Y., Bandyopadhyay, A. (eds) *Hydrology and Urban Water Supply*. Water and Wastewater Management. Springer, Cham. 2024 Nov. **doi: 10.1007/978-3-031-72589-0_1.**
- [17] Kujiek DCh, Sahile ZA. Water quality assessment of Elgo River in Ethiopia using CCME, WQI and IWQI for domestic and agricultural usage. *Heliyon*. 2024 Jan; 10 (1). **doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23234.**
- [18] Marselina M, Rahmi NA, Nurhayati SA. The water quality of the Upper Citarum: Applying the overall index of pollution, Said-WQI, and pollution index methods. *Heliyon*. 2025 Jan; 11 (2): **doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41690.**