Advanced Environmental Sciences ***(Adv. Environ. Sci.)*** **2025, 23(2):533-546** **ISSN: 2588-6177**

Original Article

Hydro-Climatic Assessment of Climate Change Impacts on the Upper Watersheds of Gorgan Bay Wetland

Received: 2025.03.12
Accepted: 2025.07.10

Behzad Rayegani,[1]* Susan Barti [2], Mona Izadian[3], Seid Ghasem Ghorbanzadeh Zaferani[1]

[1] Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran.

[2] Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

[3] Research Group of Biodiversity and Biosafety, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran

How to cite this article:
Rayegani, B., Barti, S., Izadian, M. and Ghorbanzadeh Zaferani, S.G., 2025. Hydro-Climatic Assessment of Climate Change Impacts on the Upper Watersheds of Gorgan Bay Wetland. Adv. Environ. Sci. 23(2).: 533-546.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Wetlands play a pivotal role in supplying freshwater resources, controlling floods, and maintaining biodiversity. However, they have become increasingly vulnerable to the effects of climate change, such as the rise in greenhouse gas emissions, global warming, and altered precipitation patterns. Gorgan Bay Wetland, situated along the southeastern coast of the Caspian Sea, exemplifies a sensitive ecosystem under substantial pressure from sea-level fluctuations and reduced freshwater inflows from its upper watersheds. According to the Sixth Assessment Report (AR6) of the IPCC, rising temperatures and extreme weather events—including intensified drought and heavy rainfall—can significantly affect the hydrology and ecological functions of wetlands. In this study, we draw on TerraClimate data and outputs from General Circulation Models to examine hydro-climatic trends in the upper watersheds of Gorgan Bay Wetland over a 64-year span, and to project potential future scenarios of climate variability.

Material and Methods: In the first step, monthly data on temperature, precipitation, evapotranspiration, snow water equivalent, and drought indices were retrieved from the TerraClimate database for the period 1958–2021. These data were validated against observations from three meteorological stations located in the upper watersheds of Gorgan Bay. Subsequent trend analyses for temperature, precipitation, and drought indices were conducted using the non-parametric Mann–Kendall test, alongside ordinary least squares regression. Next, future climate projections were obtained from selected GCMs in IPCC AR6, corresponding to four Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Downscaling was performed through the Change Factor approach, which applies statistical corrections based on the discrepancies between historical observations and coarse-resolution GCM outputs. Finally, the results were interpreted with regard to sustainable water resource management strategies aimed at mitigating the impacts of climate change on Gorgan Bay Wetland.

Results and Discussion: Time-series analyses revealed a statistically significant upward trend in all temperature parameters (minimum, maximum, mean, and median) across the watersheds during the 64-year study period. Conversely, most areas did not exhibit a clear or substantial decline in precipitation. Only some eastern segments showed a slight yet statistically significant reduction in rainfall. Meanwhile, increases in temperature and evapotranspiration, coupled with decreases in snow water equivalent in certain mountainous areas, have led to a worsening of climatic water deficit and drought conditions—particularly since the 1990s. These findings partially explain the diminished surface inflows and reduced water levels in Gorgan Bay Wetland. Downscaled climate projections under different SSPs point to further warming in the coming decades. Under more optimistic scenarios (SSP1-2.6), annual temperatures are projected to rise by about 1.0 to 1.5 °C in the near future (2021–2040). However, in more extreme scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5), rapid warming alongside shifts in rainfall patterns could intensify drought conditions and reduce effective runoff. Although heavier rainfall events may occur, increased evapotranspiration and reduced snow storage could collectively diminish the net water input to the wetland. If realized, these changes would amplify drought severity, compromise the wetland's ecological services, and impact local livelihoods.

Conclusion: Overall, the findings underscore the urgent need for adaptive management and planning to address the impacts of climate change in the upper watersheds of Gorgan Bay Wetland. Strategies such as adjusting cropping patterns, allocating adequate environmental flow, employing water-efficient irrigation technologies, and rehabilitating vegetative cover in upstream regions appear essential for mitigating climate-related risks. Ongoing monitoring of hydro-climatic variables, the integration of more advanced downscaling methods, and a focus on interdisciplinary approaches—including ecosystem-based management and economic-environmental modeling—could further enhance conservation efforts. The insights gained here reaffirm the importance of immediate and sustained policy actions to preserve the ecological integrity and socio-economic benefits of Gorgan Bay Wetland in the face of intensifying climate challenges.

Keywords: Gorgan Bay Wetland, Climate Change, Mann–Kendall, GCMs, Downscaling, Drought Index

* **Corresponding Author Email Address:** rayegani@rcesd.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2025.239143.1497

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم محیطی نوین، ۵۴۶-۵۳۳ : (۲) ۲۳، ۱۴۰۴ شاپا: ۶۱۷۷-۲۵۸۸

مقاله پژوهشی

ارزیابی هیدرواقلیمی اثر تغییرات اقلیمی بر حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

بهزاد رایگانی[1]* ، سوسن براتی[2]، منا ایزدیان[3]، سید قاسم قربان‌زاده زعفرانی[1]

[1] گروه پژوهشی ارزیابی و مخارات محیط‌زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

[2] پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

[3] گروه پژوهشی تنوع‌زیستی و ایمنی‌زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: تالاب‌ها از اکوسیستم‌های کلیدی در تأمین منابع آب شیرین، تعدیل سیلاب و حفظ تنوع زیستی به‌شمار می‌روند؛ اما تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، روزبه‌روز آسیب‌پذیرتر می‌شوند. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی و تغییرات الگوهای بارش، تهدیدی جدی برای پایداری این زیست‌بوم‌ها محسوب می‌شود. تالاب خلیج گرگان در سواحل جنوب شرقی دریای خزر، نمونه‌ای بارز از چنین اکوسیستم‌های حساسی است که نوسانات تراز دریا و آوردهای آب شیرین حوزه‌های بالادست در دهه‌های اخیر، فشار مضاعفی بر آن وارد کرده‌اند. بر اساس گزارش ششم پنل بین‌المللی تغییر اقلیم (AR6)، افزایش دما و فراوانی رخدادهای حدی نظیر خشکسالی و بارش‌های شدید، بر رفتار هیدرولوژیک تالاب‌ها تأثیر بسزایی خواهد داشت. در این پژوهش، با تکیه بر داده‌های تراکلایمت و خروجی مدل‌های گردش عمومی (GCMs)، تحولات اقلیمی حوزه‌های بالادست تالاب خلیج گرگان در بازه‌ای ۶۴ ساله مورد تحلیل قرار گرفت و چشم‌اندازهای آتی در سناریوهای گوناگون بررسی شد.

مواد و روش‌ها: ابتدا داده‌های دما، بارش، تبخیر و تعرق، آب معادل برف و شاخص‌های خشکسالی از پایگاه TerraClimate در مقیاس ماهیانه برای دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱ استخراج گردید. سپس به‌منظور ارزیابی صحت و دقت داده‌ها، خروجی‌های تراکلایمت با مشاهدات سه ایستگاه هواشناسی منتخب در حوزه‌های بالادست تالاب خلیج گرگان مقایسه شد. در مرحله‌ی بعد، از روش‌های آماری من–کندال و رگرسیون کمترین مربعات خطا (OLS) برای شناسایی و تحلیل روند دما، بارش و شاخص‌های خشکسالی استفاده شد. به‌منظور پیش‌بینی تغییرات آتی اقلیم، خروجی مدل‌های گردش عمومی در گزارش ششم IPCC تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به روش عامل تغییر (Change Factor) ریزمقیاس شدند. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده با توجه به رویکردهای مدیریت پایدار منابع آب تفسیر و پیشنهادهایی جهت انطباق با تغییرات اقلیمی ارائه شد.

نتایج و بحث: بررسی سری‌های زمانی نشان داد که همه‌ی پارامترهای دمایی (کمینه، بیشینه، میانگین و میانه) در زیرحوضه‌های مورد مطالعه طی ۶۴ سال اخیر روند افزایشی معناداری داشتند؛ در حالی‌که رفتار بارش در اغلب حوضه‌ها الگوی مشخصی نداشت و تنها در بعضی بخش‌های شرقی حوزه، کاهش خفیف و معنادار مشاهده شد. همچنین، کمبود آب اقلیمی و شاخص خشکسالی پالمر، به‌ویژه از اواخر دهه ۱۹۹۰، روند بدترشدن شرایط را نشان دادند که می‌تواند بر تشدید خشکسالی‌های متناوب و کاهش رواناب تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر، روند کاهشی معنادار در آب معادل برف به‌خصوص در مناطق کوهستانی بالادست، بر الگوی جریان فصلی و تغذیه تالاب تأثیر منفی داشته است.

در مرحله پیش‌بینی تغییرات آتی، خروجی ریزمقیاس‌شده مدل‌های GCMs حاکی از آن است که در سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، افزایش دمای سالیانه در افق زمانی میان‌مدت در حدود ۱ تا ۱/۵ درجه سلسیوس خواهد بود. در مقابل، سناریوهای پرانتشار (SSP3-7.0 و SSP5-8.5) افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در دما و تشدید بی‌هنجاری‌های بارش را نشان می‌دهند. به‌رغم احتمال بارش‌های حدی شدید، افزایش سریع تبخیر و تعرق و کاهش ذخایر برفی می‌تواند در مجموع رواناب مؤثر را کاهش داده و فشار مضاعفی بر منابع آبی تالاب وارد کند. تشدید خشکسالی و افت سطح آب تالاب، پیامدهایی چون کاهش تنوع زیستی، افت کیفیت آب و تضعیف معیشت جوامع محلی را در پی خواهد داشت.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه بیانگر اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی تطبیقی در برابر آثار تغییر اقلیم است. اجرای راهکارهایی نظیر اصلاح الگوی کشت، تخصیص حقآبه برای تالاب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری، احیای پوشش گیاهی در مناطق بالادست و پایش مستمر پارامترهای اقلیمی، می‌تواند در کاهش تبعات گرمایش جهانی و حفظ پایداری تالاب خلیج گرگان نقش مهمی ایفا کند. در مجموع، پیش‌بینی‌های اقلیمی و روندهای تاریخی اخذ شده در این پژوهش، بر ضرورت توجه فوری نهادهای ذی‌ربط به مدیریت پایدار آب و انطباق با سناریوهای محتمل آینده تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: تالاب خلیج گرگان، تغییر اقلیم، من–کندال، مدل‌های گردش عمومی، ریزمقیاس‌سازی، شاخص خشکسالی

استناد به این مقاله: *رایگانی، ب.، براتی، س.، ایزدیان، م. و قربان‌زاده زعفرانی، س.ق. ۱۴۰۴. ارزیابی هیدرواقلیمی اثر تغییرات اقلیمی بر حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۲): ۵۳۳-۵۴۶.*

* **Corresponding Author Email Address:** rayegani@rcesd.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2025.239143.1497

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه با رشد فزاینده‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، به‌عنوان چالشی اساسی برای زیست‌بوم‌های حساس نظیر تالاب‌ها مطرح شده است. تغییر دما، تغییر الگوی بارش و اسیدی‌شدن منابع آبی می‌تواند تأثیرات منفی شدیدی بر این اکوسیستم‌های مهم داشته باشد (Nayak, 2022). به استناد گزارش‌های جدید پنل بین‌المللی تغییرات اقلیمی (AR6)، تغییر اقلیم تأثیرات فزاینده، پیچیده و اغلب برگشت‌ناپذیری بر اکوسیستم‌ها، تنوع‌زیستی و سیستم‌های انسانی دارد. با توجه به میزان گرمایش جهانی پس از سال ۲۰۴۰، تغییر اقلیم تهدیدی جدی برای سیستم‌های طبیعی و انسانی خواهد بود و با افزایش فراوانی رخدادهای حدی مانند خشکسالی و سیلاب، پیامدهای شدیدی برای منابع آب شیرین و اکوسیستم‌های وابسته، از جمله تالاب‌ها، به همراه خواهد داشت (Jan *et al.*, 2023). این دگرگونی‌های هیدرواقلیمی، به‌جز کاهش کمیت آب، با تأثیرگذاری بر فرآیندهای تصفیه آب در تالاب‌ها، می‌توانند منجر به تغییر در چرخه‌های بیوشیمیایی شده و کیفیت آب را کاهش دهند. افزایش دما می‌تواند نرخ تجزیه مواد آلی و آزادسازی مواد مغذی را تسریع کند که در نهایت ممکن است به انتقال این ترکیبات به مناطق پایین‌دست منجر شود و چالش‌های محیط‌زیستی جدی مانند اوتریفیکاسیون و اسیدی‌شدن را به همراه داشته باشد (Salimi and Scholz, 2021) و در نتیجه باعث افت کارکردهای اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی آن‌ها خواهد شد.

بررسی‌ها در تالاب‌های رامسر نشان داده‌اند که تا سال ۲۱۰۰، تغییرات اقلیمی باعث کاهش سطح تالاب‌های جهانی خواهد شد. طبق مدل‌سازی‌های انجام‌شده، ۴۷٪ از تالاب‌های مورد بررسی در دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۴ کاهش داشته‌اند و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در آینده، تعداد تالاب‌هایی که کاهش بیش از ۱۰٪ مساحت را تجربه خواهند کرد، بین ۱۹٪ تا ۲۴۳٪ وابسته به سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش خواهد یافت (Xi *et al.*, 2020). مطالعه و پایش نظام‌مند روند تغییرات اقلیمی و بررسی ارتباط آن با رفتار هیدرولوژیک تالاب‌ها، نقشی کلیدی در تدوین راهبردهای مدیریتی و اتخاذ سیاست‌های سازگارانه دارد. مطالعات نشان داده‌اند که پایش بلندمدت تغییرات دما، بارندگی و سطح آب تالاب‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای احیاء و مدیریت پایدار این اکوسیستم‌های حساس ارائه کند و به کاهش پیامدهای منفی تغییرات اقلیمی کمک نماید (Cassatt and Wilcox, 2020). به‌منظور دستیابی به درک عمیق‌تر از این روند، دسترسی به داده‌های اقلیمی پیوسته و بلندمدت امری حیاتی است. بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که مدل‌سازی‌های دقیق اقلیمی و تحلیل روندهای هیدرولوژیک، نیازمند داده‌های تاریخی طولانی‌مدت از دما، بارش و سایر پارامترهای آب‌وهوایی هستند. بدون چنین داده‌هایی، ارزیابی دقیق تأثیر تغییرات اقلیمی بر تالاب‌ها و منابع آب غیرممکن خواهد بود (Massmann, 2020). یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های داده در این زمینه، Terra Climate است که مجموعه‌ای جامع از اطلاعات دمایی، بارشی، شاخص خشکسالی پالمر، تبخیر و تعرق و سایر عناصر اقلیمی را در سطح جهانی و با تفکیک مکانی و زمانی مطلوب ارائه می‌دهد. این داده‌ها می‌توانند برای تحلیل‌های هیدرولوژیک و بررسی روندهای اقلیمی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرند (Abatzoglou *et al.*, 2018; Hanchane *et al.*, 2023). در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های این پایگاه برای یک دوره ۶۴ ساله، شرایط اقلیمی حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان بررسی شده و روند تغییرات تاریخی آن از طریق آزمون من-کندال و همچنین بررسی همبستگی پیرسون و رگرسیون کمترین مربعات خطا (OLS) تحلیل شد. به این ترتیب، ضمن شناسایی شیب و معناداری تغییرات دما، بارش و پارامترهای مرتبط، تصویری روشن از پویایی اقلیمی گذشته

منطقه ارائه شد. روش من-کندال، که به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های غیرپارامتری برای تحلیل روندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی شناخته می‌شود، به‌طور گسترده‌ای برای شناسایی روندهای بلندمدت در داده‌های سری‌زمانی به کار می‌رود و نسبت به داده‌های پرت و توزیع نرمال حساسیت کمتری دارد (Hamed and Rao, 1998) بنابراین روش مناسبی جهت بررسی روندهای معنی‌دار در سری‌های زمانی مانند داده‌های تراکلایمت می‌باشد.

علاوه بر مرور وضعیت گذشته، بسیاری از مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که باید به پیش‌بینی و ارزیابی آینده نیز توجه ویژه داشت؛ زیرا روند کنونی افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و سناریوهای مختلف انتشار (SSPها) ارائه‌شده در گزارش ششم IPCC (AR6)، بیانگر احتمال تغییر الگوهای بارش، تشدید خشکسالی‌های دوره‌ای و افزایش میانگین دمای سالانه در آینده است. نتایج مدل‌سازی‌ها تحت سناریوهای مختلف SSP نشان می‌دهند که افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به افزایش شدت و تواتر بارندگی‌های حدی و همچنین تشدید دوره‌های خشکسالی در مناطق مختلف جهان شود (Zou and Zhou, 2021). بر این اساس، در این پژوهش پس از صحت‌سنجی داده‌ها و تحلیل تغییرات اقلیمی گذشته، با استفاده از روش عامل تغییر (Change Factor) داده‌های دمایی و بارشی تحت چهار سناریوی منتخب از AR6 ریزمقیاس (Downscale) شد تا تصویری دقیق از وضعیت آینده‌ی پارامترهای اقلیمی ترسیم گردد. روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری مانند عامل تغییر، از تکنیک‌های پرکاربرد در مطالعات اقلیمی هستند که با اعمال اصلاحات آماری بر روی مدل‌های جهانی گردش عمومی (GCMs)، امکان تحلیل تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای را فراهم می‌کنند (Diaz-Nieto and Wilby, 2005).

بدیهی است که خروجی این تحلیل‌های هیدرواقلیمی در حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان، صرفاً محدود به یافته‌های علمی نخواهد بود و می‌تواند در تصمیم‌سازی مسئولان و دست‌اندرکاران اجرایی برای حفاظت از تالاب و سازگاری با تغییرات اقلیمی نقش بسزایی ایفا کند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌سازی‌های هیدرواقلیمی و پیش‌بینی تغییرات منابع آب، می‌تواند سیاست‌گذاران را در اتخاذ تصمیمات بهینه برای حفظ عملکرد اکوسیستم‌های تالابی یاری رساند. به‌عنوان نمونه، اصلاح الگوی کشت، مدیریت تخصیص منابع آب در حوزه‌های بالادست، احیای پوشش گیاهی و کنترل برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی، از جمله سیاست‌هایی هستند که با اتکا به نتایج مطالعات اقلیمی می‌توانند مسیر پایداری اکوسیستم تالاب را هموار سازند (Shin *et al.*, 2023).

بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی روند تاریخی پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان با استفاده از داده‌های تراکلایمت در یک دوره‌ی ۶۴ ساله و سپس شبیه‌سازی تغییرات آتی تحت سناریوهای گزارش ششم پنل بین‌المللی تغییر اقلیم بود. نتایج این ارزیابی، ضمن تبیین شدت و جهت تغییرات اقلیمی گذشته، چشم‌اندازی از پیامدهای دگرگونی دما و بارش در آینده را فراهم ساخت که می‌تواند بستر تصمیم‌سازی‌های پایدار در زمینه‌ی حفاظت و مدیریت تالاب را تقویت نماید.

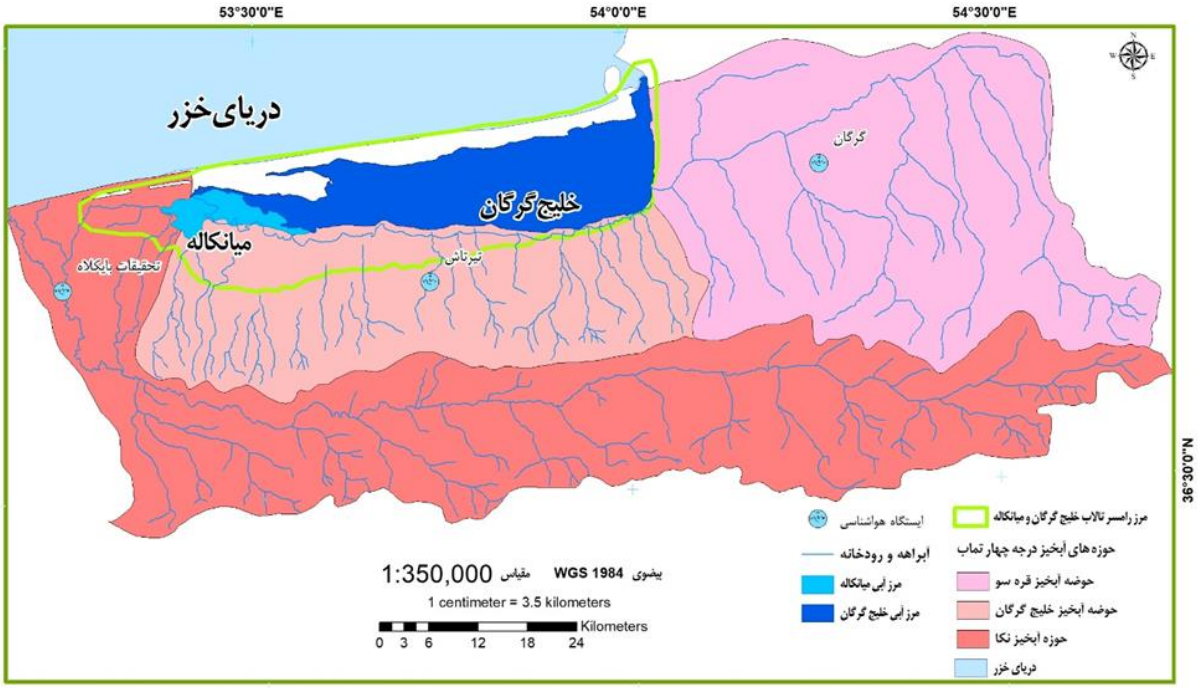
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان است که در بخش جنوب شرقی دریای خزر واقع شده و ارتباط مستقیم با اکوسیستم‌های حساس و باارزشی همچون شبه‌جزیره میانکاله و تالاب گمیشان دارد (شکل ۱). تالاب خلیج گرگان با برخورداری از مساحتی متغیر در بازه‌های زمانی مختلف - متأثر از نوسانات تراز دریای خزر (Khoshravan *et al.*, 2021) و آورد رودخانه‌ای - یکی از مهم‌ترین پیکره‌های آبی

سواحل جنوبی این دریا به‌شمار می‌رود. حوزه‌های آبخیز بالادست این تالاب شامل زیرحوضه‌های متعددی است که بخش قابل‌توجهی از رواناب‌های فصلی و سالانه را تأمین می‌کنند و بر روند تأمین آب تالاب تأثیرگذار هستند.

به‌طور کلی، اقلیم این منطقه تحت تأثیر همزمان جریان‌های مرطوب دریای خزر و توده هوای خشک‌تر آسیای مرکزی قرار دارد، به‌نحوی‌که تغییرات میانگین دما و بارش در این حوضه‌ها از تنوع قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است. مطالعات نشان داده‌اند که رشد بی‌رویه‌ی فعالیت‌های کشاورزی و توسعه‌ی زیرساخت‌های آبی در حوزه‌های بالادست، همراه با تغییرات اقلیمی اخیر و بخصوص نوسانات دریای کاسپین (Khoshravan *et al.*, 2021) منجر به کاهش سطوح آبی این تالاب و در برخی مواقع تشدید پدیده‌ی خشکسالی در تالاب خلیج گرگان شده است. منطقه‌ی مطالعاتی از نظر اکولوژیک و اقتصادی نیز دارای اهمیت بالایی است؛ چراکه گذشته از تنوع زیستی قابل‌توجه، ماهیگیری، پرورش آبزیان و گردشگری از جمله فعالیت‌های اقتصادی پراهمیت وابسته به عملکرد مطلوب تالاب به شمار می‌رود.



شکل Error! No text of specified style in document.**۱- موقعیت و وضعیت هیدرولوژی سه زیر حوضه آبخیز منتهی به تالاب خلیج گرگان و میانکاله**

Fig. 1- Location and hydrological status of the three sub-watersheds draining into the Gorgan Bay and Miankaleh Wetland

روش‌کار

برای دستیابی به هدف اصلی پژوهش - یعنی ارزیابی روند تاریخی پارامترهای اقلیمی حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان و شبیه‌سازی تغییرات آتی آن - گام‌های اصلی زیر طراحی و اجرا شد:

گردآوری داده‌های اقلیمی:

در گام نخست، داده‌های دما، بارش، تبخیر و تعرق، آب معادل برف، کمبود آب اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی از پایگاه **TerraClimate** برای دوره‌ی ۶۴ ساله (۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱) دریافت شد. این پایگاه داده، اطلاعات اقلیمی را در مقیاس جهانی با تفکیک مکانی مناسب (حدود ۴ کیلومتر) فراهم می‌کند که امکان استخراج و تحلیل سری‌های زمانی عناصر اقلیمی حوزه‌های بالادست تالاب را ممکن می‌سازد (Abatzoglou *et al.*, 2018; Hanchane *et al.*, 2023). کمبود آب اقلیمی (Climatic water deficit (DEF)) از تفاضل تبخیر و تعرق پتانسیل (Potential

(Evapotranspiration (PET از تبخیر و تعرق واقعی بدست می‌آید ((Actual Evapotranspiration (AET و شاخصی است که رابطه بین بارش (آب) و دما (انرژی) را نشان می‌دهد (Stephenson, 1998). این پارامتر نیز از مدل تک بعدی توازن آب-خاک بدست آمده و به صورت ماهیانه با مقیاس ۰/۱ در پایگاه تراکلایمت گزارش شده است و نشان می‌دهد بر اساس وضعیت اقلیمی چقدر نقصان آب وجود دارد.

اعتبارسنجی و پیش‌پردازش داده‌ها:

پیش از آغاز تحلیل، داده‌های تراکلایمت با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی مرجع در داخل منطقه‌ی مطالعاتی (ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی) مقایسه شد (شکل ۱). به‌منظور ارزیابی میزان همخوانی، از آزمون‌های آماری نظیر ضریب همبستگی پیرسون و شاخص‌های خطا (RMSE, MAE) استفاده گردید. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که داده‌های تراکلایمت در مقایسه با مشاهدات ایستگاهی دقت بالایی داشته و می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب در تحلیل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گیرند، هرچند در برخی مناطق دارای اختلافات جزئی با داده‌های زمینی هستند (Arias and Barriga, 2022; Rachidi *et al.,* 2023).

داده‌های پرت یا مقادیر مشکوک با روش‌های معمول سری‌های زمانی بررسی و در صورت عدم امکان اصلاح از پایگاه داده حذف شدند. سپس، میانگین مقادیر رسترشده‌ی تراکلایمت در محدوده‌ی هر زیرحوضه استخراج گردید تا برای تحلیل‌های بعدی در سطح حوزه‌ی بالادست مورد استفاده قرار گیرد.

آنالیز روند و معناداری تغییرات اقلیمی گذشته:

در این مرحله، به‌منظور شناسایی جهت و شدت تغییرات دما، بارش و سایر شاخص‌های اقلیمی در طول دوره‌ی ۶۴ ساله، از روش من–کندال (Mann-Kendall) به‌عنوان یک آزمون غیرپارامتری رایج برای تحلیل روند استفاده شد. این روش، نسبت به ناهمگنی داده‌ها و حضور داده‌های پرت حساسیت کمتری دارد. علاوه بر آن، ضریب همبستگی پیرسون و رگرسیون کمترین مربعات خطا (OLS) برای تخمین شیب و سنجش میزان معناداری آماری روند به‌کار گرفته شد (Agbo *et al.,* 2020; Muhammad *et al.,* 2024).

با ترکیب نتایج این روش‌ها، ضمن ارزیابی تاریخی تغییرات دما و بارش، روند شاخص‌های خشکسالی، تبخیر و تعرق و آب معادل برف نیز بررسی گردید تا درک جامعی از رفتار اقلیمی منطقه حاصل شود.

ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی آینده:

برای پیش‌بینی تغییرات آتی، از خروجی مدل‌های گردش عمومی (GCMs) معتبر گزارش ششم پنل بین‌المللی تغییر اقلیم (AR6) بهره گرفته شد. چهار سناریوی اصلی مسیرهای انتشار (SSP) در نظر گرفته شد تا عدم قطعیت مربوط به سطوح مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای پوشش داده شود. این سناریوها شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 هستند که گستره‌ای از سناریوهای کاهش شدید انتشار تا افزایش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بر می‌گیرند (Hamed *et al.,* 2021; Lu *et al.,* 2022).

سپس به کمک روش عامل تغییر (Change Factor)، مقادیر دمایی و بارشی مدل‌های GCM برای محدوده‌ی مطالعاتی ریزمقیاس شدند. این روش با اعمال ضرایب تصحیح بر اساس اختلاف میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (یا در این‌جا تراکلایمت) و مدل‌های جهانی، مجموعه‌ای از سناریوهای اقلیمی محلی را برای افق‌های زمانی مختلف تولید می‌کند. روش عامل تغییر به دلیل سادگی و قابلیت کاربرد در مناطق مختلف، به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی در تحلیل‌های ریزمقیاس‌سازی آماری برای بررسی تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sahoo and Panda, 2020; Tabari *et al.,* 2021).

خروجی این مرحله، سنجش احتمالی روند و میزان تغییر دما و بارندگی در دوره‌های آتی (مثلاً تا سال ۲۰۵۰ یا ۲۰۷۰) و تفکیک آن به تفاریق فصلی یا سالانه خواهد بود

که مبنای ارزیابی مدیریت منابع آب در حوزه‌های بالادست تالاب خلیج گرگان قرار می‌گیرد.

تحلیل و تفسیر نتایج و پیشنهاد راهکارهای مدیریتی:

در پایان، یافته‌های مربوط به روند تاریخی و پیش‌بینی آتی اقلیم در مناطق بالادست، در کنار تحلیل‌های هیدرولوژیک تالاب خلیج گرگان تفسیر شد و بر اساس مطالعات قبلی و سناریوهای ارائه‌شده، راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع آب، احیای تالاب و سازگاری با تغییرات اقلیمی مطرح گردید.

نتایج و بحث

بررسی صحت داده‌های تراکلایمت

مطابق شکل ۱ سه ایستگاه هواشناسی در محدوده حوزه‌های آبخیز بالادست خلیج گرگان قرار داشت. آمار این ایستگاه‌ها به صورت ماهیانه با داده‌های تراکلایمت به کمک همبستگی پیرسون جهت برآورد همبستگی و معنی‌داری بررسی شد. همچنین روند تغییرات این دوره از آمار بین داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها و داده‌های تراکلایمت مقایسه گردید (جدول ۱). در مورد تمامی پارامترهای اقلیمی بین داده مشاهداتی و داده تراکلایمت در سطح ۱ درصد همبستگی معنی‌دار مشاهده شد. بجز بارش در ایستگاه گرگان در تمامی موارد روندهای سری زمانی این دو داده با یکدیگر مشابه بودند. به دلیل شبکه‌ای بودن آمار بارش در تراکلایمت و نقطه‌ای بودن ایستگاه و تأثیر تغییرات ارتفاعی در مقیاس محلی این اختلاف توجیه پذیر است.

جدول ۱- خروجی همبستگی پیرسون بین داده اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های پروژه تراکلایمت

Table 1. Pearson correlation results between climatic data from meteorological stations and data from the TerraClimate database.

نام ایستگاه	حوضه آبخیز تالاب	دمای بیشینه				دمای کمینه				بارش			
		ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری	ضریب تعیین (درصد)	*مقایسه* روند	ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری	ضریب تعیین (درصد)	*مقایسه* روند	ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری	ضریب تعیین (درصد)	*مقایسه* روند
گرگان	خلیج گرگان	۰/۸۹۴	۰/۰۱	۷۹/۸	روند مشابه	۰/۹۶۵	۰/۰۱	۹۳/۱	روند مشابه	۰/۷۳۳	۰/۰۱	۵۳/۸	ایستگاه روندکاهشی دارد، ترا بدون روند است
تیرتاش	خلیج گرگان	۰/۸۹۴	۰/۰۱	۷۹/۹	روند مشابه	۰/۹۸۶	۰/۰۱	۹۷/۲	روند مشابه	۰/۵۸۴	۰/۰۱	۳۴/۱	روند مشابه
تحقیقات بایکلاه	خلیج گرگان	۰/۸۷۸	۰/۰۱	۷۷/۱	روند مشابه	۰/۹۷۴	۰/۰۱	۹۴/۸	روند مشابه	۰/۷۰۹	۰/۰۱	۵۰/۳	روند مشابه

روندهای تاریخی اقلیم در حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان

نخستین بخش از تحلیل‌ها به شناسایی و ارزیابی روند پارامترهای اقلیمی (دما، بارش، تبخیر و تعرق، شاخص خشکسالی و آب معادل برف) در دوره‌ی ۶۴ ساله (۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱) اختصاص یافت. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که:

دما:

- دمای کمینه، بیشینه، میانگین و میانه سالانه در تمامی زیرحوضه‌های مورد مطالعه، دارای روند افزایشی معنادار ($p < 0.05$) بود. دمای میانگین و میانه سالیانه به طور متوسط در حدود ۱/۵ درجه

و دمای کمینه و بیشینه تا حدود ۲/۵ درجه در طول ۶۴ سال در زیرحوزه‌ها افزایش نشان دادند.

- بررسی ضریب همبستگی پیرسون بین دما (تمامی پارامترهای بیشینه، کمینه، متوسط و میانه) و زمان (سال) نیز همخوانی بالایی با نتایج من-کندال داشت و در اغلب نواحی، مقادیر r در محدوده‌ی ۰/۴ تا بیش از ۰/۷ به‌دست آمد که بیانگر همبستگی متوسط تا قوی بین افزایش دما و گذر زمان در دوره‌ی مطالعه است.

بارش:

- روند بارش در سطح حوزه‌های بالادست خلیج گرگان الگوی یکنواختی نداشت. فقط در زیرحوزه قره‌سو، به‌ویژه بخش‌های شرقی، روند کاهشی خفیف مشاهده شد (کمتر از ۴۰ میلی‌متر در کل دوره ۶۴ سال) که از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد اطمینان، معنادار گزارش گردید. در مقابل، در زیر حوزه‌های دیگر، روند کاهشی بارش یا ناچیز بود یا از معناداری لازم برخوردار نبود.
- شیب خط رگرسیون کمترین مربعات خطا (OLS)در محدوده‌ی اغلب زیرحوضه‌ها کوچک و در حد کسری از میلی‌متر در سال برآورد شد. این امر حاکی از آن است که کاهش بارش در سطح منطقه مشهود نیست و دامنه‌ی تغییر آن در این بازه‌ی زمانی بالا نبوده است.

شاخص خشکسالی:

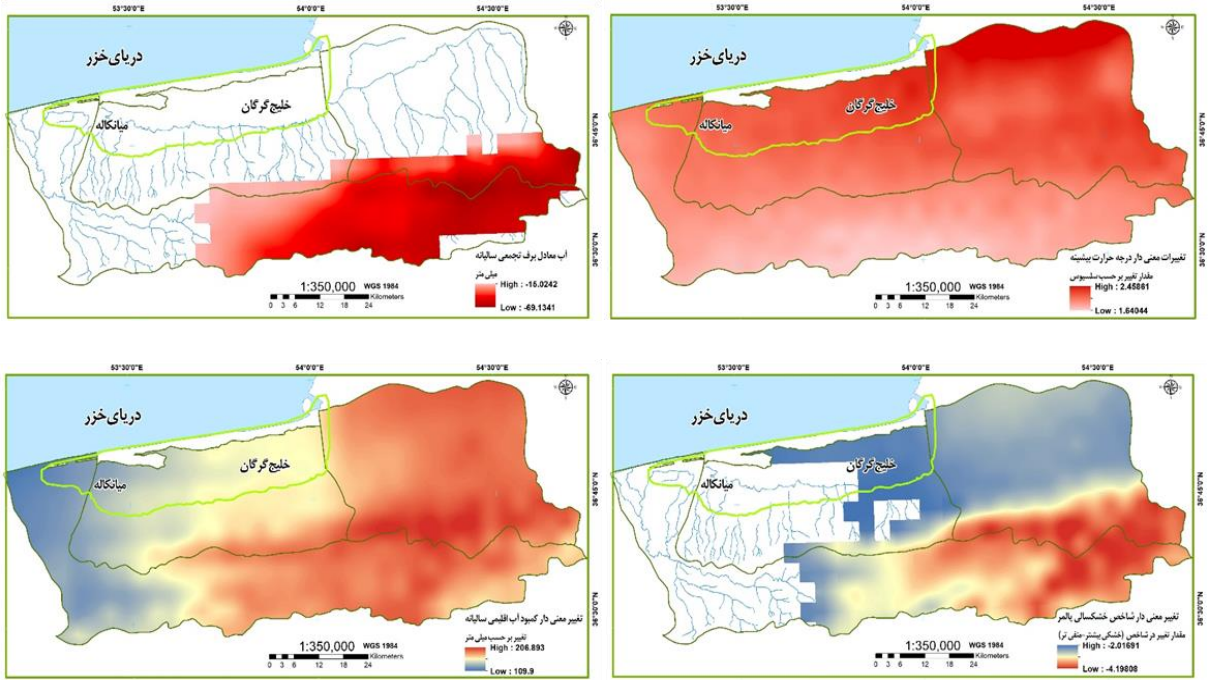
- شاخص‌هایی نظیر **PDSI** (شاخص خشکسالی پالمر) و کمبود آب اقلیمی در بازه‌های ماهانه و سالانه، طی دهه‌های اخیر نوسانات قابل‌توجهی نشان دادند. اغلب زیرحوضه‌های غربی، به دلیل افزایش دما، دچار روند منفی در رطوبت خاک و در نتیجه تشدید خشکسالی‌های متناوب شده‌اند. بنابراین در کل زیر حوزه‌های آبخیز شاخص خشکسالی پالمر به سمت بدتر شدن حرکت کرده است (شکل ۲) و در بخش شرقی حوزه‌های آبخیز روند تشدید کمبود آب اقلیمی مشاهده شد (شکل ۲).
- آزمون من-کندال دلالت بر افزایش فراوانی سال‌های خشک، به‌ویژه از دهه‌ی ۱۹۹۰ به بعد داشت. این یافته‌ها هم‌راستا با مطالعاتی است که در حوضه‌های مشابه شمال ایران، تشدید تدریجی خشکسالی‌های دوره‌ای و اثر آن پوشش گیاهی را گزارش کرده‌اند (Bagherzadeh *et al.,* 2020).

تبخیر و تعرق و آب معادل برف:

- تبخیر و تعرق مرجع یا پن-من سالانه در کل منطقه روند افزایشی داشته است که بخشی از آن با افزایش دما توجیه می‌شود. بالا رفتن تبخیر و تعرق واقعی می‌تواند به کاهش رواناب سطحی و در نتیجه کاهش تغذیه‌ی تالاب بینجامد.
- روند آب معادل برف به‌خصوص در بالادست زیر حوزه آبخیز نکا روند کاهشی داشته (شکل ۲) و از نظر آماری در برخی مناطق از دیگر زیرحوضه‌ها معنادار گزارش شده است ($p < 0.05$). این پدیده به‌ویژه در مناطق کوهستانی که منبع تأمین رواناب از طریق ذوب برف محسوب می‌شوند، اهمیت دارد و کاهش تدریجی آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر رژیم آبدهی رودخانه‌های منتهی به تالاب تأثیرگذار باشد. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی منجر به کاهش ذخیره‌ی برف و تسریع در ذوب آن شده که این امر منجر به تغییر الگوی جریان‌های فصلی و کاهش دسترسی به آب در تالاب‌های پایین‌دست می‌شود (Elias *et al.,* 2021; Nury *et al.,* 2022).

به‌طور کلی، افزایش دما و تبخیر و تعرق در کنار کاهش یا نوسان کاهشی آب معادل برف در برخی زیرحوضه‌ها، منجر به احتمال افت رواناب ورودی به تالاب در دهه‌های اخیر شده است. این روند می‌تواند بخش مهمی از دلایل افت

سطح و حجم آب تالاب را طی این دوره تبیین کند (Khoshravan *et al.*, 2021).



شکل Error! No text of specified style in document.**۲- بررسی روند تغییر پارامترهای اقلیمی در سه زیر حوضه آبخیز منتهی به تالاب خلیج گرگان و میانکاله**

Fig. 2- Trend analysis of climatic parameters in the three sub-watersheds draining into the Gorgan Bay and Miankaleh Wetland.

پیش‌بینی تغییرات آتی تحت سناریوهای گزارش ششم IPCC

در گام دوم، به‌منظور شناسایی آثار بالقوه‌ی تغییرات اقلیمی در آینده، داده‌های مدل‌های گردش عمومی مرتبط با گزارش ششم پنل بین‌المللی تغییر اقلیم (AR6) در چهار سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5با استفاده از روش عامل تغییر (Change Factor)ریزمقیاس شدند. نتایج اصلی این مرحله عبارت‌اند از:

روند آتی دما:

- در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، به طور متوسط دمای بیشینه سالانه در افق آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بین ۱ تا ۱/۵درجه‌ی سلسیوس نسبت به دوره‌ی پایه (۱۹۵۸-۲۰۲۱) افزایش می‌یابد. این عدد برای دمای بیشینه سالیانه بین ۱/۲ تا ۱/۴ درجه سلسیوس است.
- در سناریوهای بینابینی SSP2-4.5 و SSP3-7.0، رشد دمای کمینه و بیشینه سالانه بین حدود ۰/۱ تا ۰/۲ بیشتر از سناریو خوش‌بینانه برآورد می‌شود.
- در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، افزایش دما نسبت به حالت قبلی اندکی بیشتر و در حدود ۰/۱ درجه بیشتر است. در کل وقوع چنین افزایش‌هایی نه‌تنها اثرات شدیدی بر تبخیر و تعرق و مصرف آب کشاورزی خواهد داشت، بلکه می‌تواند خشکسالی‌های شدیدتری را در منطقه رقم بزند (Zou and Zhou, 2021).

روند آتی بارش:

- در سناریوهای کم‌انتشار نظیر SSP1-2.6، شواهدی از کاهش شدید بارش مشاهده نشد؛ بااین‌حال، پراکندگی فصلی بارش و رخداد بارندگی‌های حدی با تغییراتی همراه است که

نیازمند بررسی دقیق‌تر در مطالعات آینده است.

- سناریوهای پرانتشار SSP3-7.0 و SSP5-8.5، به‌رغم پیش‌بینی احتمال افزایش بارش در برخی ماه‌های سال، افزایش سریع تبخیر و تعرق و تغییر در توزیع زمانی بارش موجب شده است که اثر خالص بر رواناب مثبت نباشد و در برخی مدل‌ها حتی کاهشی در رواناب فصلی و سالانه مشاهده شود. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی تحت این سناریوها می‌تواند باعث افزایش شدت و تناوب بارش‌های حدی شود، اما درعین‌حال، تبخیر و تعرق بالا و تغییرات در چرخه آب می‌توانند اثرات منفی بر میزان رواناب و ذخایر آبی داشته باشند (Kodihal *et al.,* 2024; Wang *et al.,* 2022).

شاخص خشکسالی و آب معادل برف:

- در گزارش ششم پایگاه مدل‌سازی شده شاخص خشکسالی و آب معادل برف وجود ندارد. با این وجود، نتایج حاکی از آن است که در سناریوهای با افزایش شدید دما، احتمال بروز دوره‌های خشکسالی شدید و تداوم بیشتر آن بالا می‌رود. کاهش بارش برف و افزایش دمای زمستانی می‌تواند ذخایر برفی را محدودتر سازد و درنتیجه بخش مهمی از تأمین آب در فصول بهار و تابستان مختل شود. مطالعات نشان داده‌اند که تحت سناریوهای با انتشار بالا (SSP5-8.5)، کاهش آب معادل برف (SWE) می‌تواند به بیش از ۵۰٪ در برخی مناطق برسد که این امر تأثیر مستقیمی بر رواناب و ذخیره آب تالاب‌ها خواهد داشت (Shrestha *et al.,* 2021; Cowherd *et al.,* 2023).
- در صورت تحقق مسیرهای انتشار بالا، شاخص‌های خشکسالی در منطقه به‌ویژه در دهه‌های میانی قرن حاضر (۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰) وارد محدوده‌ی هشداردهنده‌تری خواهند شد. این امر، ضمن تهدید منابع آب تالاب، می‌تواند فشار بر اکوسیستم‌های کشاورزی و آبزی‌پروری را تشدید کند.

تفسیر نتایج و پیشنهادهای مدیریتی

ترکیب روندهای تاریخی و پیش‌بینی‌های آینده نشان می‌دهد که تالاب خلیج گرگان در معرض پیامدهای همزمان ناشی از افزایش دما، نوسانات بارش، کاهش آب معادل برف و تشدید خشکسالی قرار دارد. با توجه به نقش حیاتی این تالاب در تنظیم چرخه‌های اکولوژیک و معیشت جوامع منطقه، توجه به موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

تغییر الگوی کشت و بهینه‌سازی مدیریت آب کشاورزی

- به‌دلیل روند افزایشی دما و تبخیر و تعرق در محدوده‌ی بالادست تالاب، اعمال روش‌های نوین آبیاری (قطره‌ای، بارانی کم‌فشار و هوشمند) و انتخاب گونه‌های زراعی کم‌آب‌بر می‌تواند از برداشت بی‌رویه آب سطحی و زیرزمینی بکاهد و مانع افت بیشتر سطح آب تالاب شود. مطالعات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی روش‌های آبیاری و تغییر الگوی کشت می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری منابع آبی داشته باشد؛ به‌ویژه در مناطقی که با کاهش منابع آب ناشی از تغییرات اقلیمی مواجه هستند، استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند و تکنیک‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، نظیر مالچ‌پاشی و تناوب کشت، می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری و پایداری کشاورزی شود (Makar *et al.,* 2022; Yu *et al.,* 2021).

تخصیص حقآبه محیط‌زیستی و حفاظت از رودخانه‌های بالادست

- با توجه به نتایج سناریوهای SSP پرانتشار، ضرورت دارد که سهم مشخصی از آبدهی فصلی

رودخانه‌ها به‌عنوان نیاز محیط‌زیستی تالاب لحاظ شود تا در سال‌های کم‌بارش، تالاب در معرض خشکیدگی کامل قرار نگیرد. ایجاد سدها و بندهای ذخیره آب نیز باید با ارزیابی دقیق آثار اکولوژیک و اجتماعی صورت پذیرد. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی و افزایش تبخیر و تعرق تحت سناریوهای انتشار بالا (مانند SSP5-8.5) می‌توانند به کاهش دسترسی به منابع آب سطحی و افزایش فشار بر اکوسیستم‌های وابسته به تالاب‌ها منجر شوند. ازاین‌رو، اجرای سیاست‌های پایدار تخصیص آب، از جمله در نظر گرفتن حداقل جریان‌های محیط‌زیستی، برای حفظ پایداری تالاب‌ها ضروری است (Charron *et al.*, 2021; Da Silva *et al.*, 2023).

حفاظت از پوشش گیاهی و جنگل‌کاری در اراضی شیب‌دار

- افزایش دما و کاهش بارش برف، خاک را در برابر فرسایش و رواناب مخرب آسیب‌پذیرتر می‌کند. احیا و تقویت پوشش گیاهی مراتع و جنگل‌کاری در مناطق بالادست، ضمن جلوگیری از فرسایش، سبب تقویت ذخیره آب در خاک می‌شود و به تعادل چرخه‌ی هیدرولوژیک منطقه کمک می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش پوشش گیاهی می‌تواند اثرات مخرب فرسایش ناشی از تغییر اقلیم را تعدیل کند و موجب کاهش نرخ از بین رفتن خاک شود. علاوه بر این، برنامه‌های احیای جنگل‌ها و مراتع در مناطق آسیب‌دیده توانسته‌اند روند کاهش منابع آبی را کند کرده و پایداری اکوسیستم‌های حساس را تقویت کنند (De Vente and Eekhout, 2021; Wang *et al.*, 2021).

پایش مداوم و پژوهش‌های آینده

- تداوم پایش‌های دوره‌ای و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی پیشرفته‌تر (نظیر رویکردهای ریزمقیاس‌سازی ترکیبی یا روش‌های شبکه عصبی) برای بهبود دقت برآورد تغییرات اقلیمی در سطح محلی پیشنهاد می‌شود. همچنین، توجه به عدم‌قطعیت مدل‌ها و روش‌های تصحیح میانگین‌های فصلی و ماهانه، در برآوردهای بلندمدت الزامی است. مطالعات نشان داده‌اند که روش‌های نوین مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی (CNNs) و یادگیری عمیق، دقت بالاتری در ریزمقیاس‌سازی متغیرهای اقلیمی دارند و می‌توانند در بهبود مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرند (Baghanam *et al.*, 2024; Baño-Medina *et al.*, 2021).

در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش نسبی بارش، افزایش دما، افت آب معادل برف و تشدید خشکسالی، در کنار روند آتی احتمالی گرمایش جهانی، سهم قابل‌توجهی در تهدید پایداری تالاب خلیج گرگان خواهد داشت. از این‌رو، تلفیق اقدامات مدیریتی کوتاه‌مدت (کنترل و پایش مصرف آب) و راهبردهای بلندمدت (توسعه سامانه‌های آبخیزداری، بازنگری الگوی کشت و حفاظت از جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها) برای جلوگیری از بروز فاجعه‌ی اکولوژیک و تداوم کارکردهای اجتماعی-اقتصادی تالاب، اجتناب‌ناپذیر است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان طی دهه‌های اخیر، با روند افزایشی دما در تمام پارامترهای دمایی (کمینه، بیشینه، میانگین و میانه) مواجه بوده و بارش در اغلب زیرحوضه‌ها روند کاهشی معناداری نداشته است. بااین‌حال، افزایش دما و تبخیر و تعرق، در کنار کاهش آب معادل برف در برخی نقاط، سبب افزایش کمبود آب اقلیمی و تشدید خشکسالی‌های دوره‌ای شده است. به‌ویژه از دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی به بعد، فراوانی

و شدت سال‌های خشک بیشتر شده است که می‌تواند بخشی از علت کاهش آوردهای سطحی به تالاب را تبیین کند. بررسی چشم‌اندازهای آتی بر اساس سناریوهای گزارش ششم IPCC نیز بیانگر آن است که با تداوم یا افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، دمای منطقه احتمالاً به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت و این امر، در کنار الگوهای ناپایدار بارش و کاهش ذخایر برفی، می‌تواند فشار بر منابع آبی و کارکردهای کلیدی تالاب را تشدید نماید (Xi *et al.,* 2020; Cowherd *et al.,* 2023).

به‌طور کلی، یافته‌های مربوط به شبیه‌سازی سناریوهای آتی بیانگر آن است که حوزه‌های آبخیز بالادست تالاب خلیج گرگان با سناریوی افزایشی دما مواجه‌اند؛ درحالی‌که رفتار بارش دستخوش تغییرات زمانی و مکانی متعددی خواهد بود. ازاین‌رو، توجه به رویکردهای مدیریت مصرف آب و برنامه‌ریزی برای الگوهای جدید کشت، به‌ویژه در صورت تحقق سناریوهای میان‌انتشار تا پرانتشار، ضروری به نظر می‌رسد. مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به کاهش رواناب در برخی حوضه‌های آبخیز شده و در عین حال، افزایش شدت بارش‌های حدی ممکن است سیلاب‌های ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی را تشدید کند (Rashid *et al.,* 2021; Tarekegn *et al.,* 2021).

در مجموع، نتایج مطالعه حاضر بر اهمیت برنامه‌ریزی دقیق و تطبیق راهبردهای مدیریتی با سناریوهای مختلف اقلیمی تأکید دارد. برای حفظ پایداری تالاب خلیج گرگان، به‌کارگیری تدابیری نظیر اصلاح الگوی کشت، بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی، تخصیص حقآبه محیط‌زیستی و اجرای طرح‌های احیای مراتع و جنگل‌کاری در مناطق بالادست ضروری به‌نظر می‌رسد (Shin *et al.,* 2023). همچنین ادامه پایش مستمر پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیک در حوضه‌های بالادست، به‌همراه توسعه مدل‌های پیشرفته ریزمقیاس‌سازی و در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های محتمل در داده‌ها، می‌تواند در بهبود تصمیم‌سازی‌های مدیریتی مؤثر باشد (Bagherzadeh *et al.,* 2020; Baño-Medina *et al.,* 2021). افزون بر این، پرداختن به رویکردهای بین‌رشته‌ای (نظیر مدیریت جامع سرزمین، مدل‌های اقتصاد-محیط زیست، و سنجش هزینه-فایده راهکارهای تطبیقی) زمینه را برای ساماندهی پایدارتر فعالیت‌های انسانی و کاهش آسیب‌پذیری تالاب فراهم خواهد ساخت.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی معاونت محیط زیست طبیعی سازمان حفاظت محیط زیست، دفتر حفاظت و احیای تالاب‌ها که بخشی از هزینه‌های این پژوهش را تأمین نموده‌اند، صمیمانه قدردانی نمایند.

منابع

Arias, E. C., and Barriga, J. C. (2022). Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin. Geocarto International, 37, 17382-17402. https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2129816

Baghanam, A. H., Nourani, V., Bejani, M., and Ke, C.-Q. (2024). Improving the statistical downscaling performance of climatic parameters with convolutional neural networks. Journal of Water and Climate Change. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.592

Bagherzadeh, A., Hoseini, A. V., and Totmaj, L. H. (2020). The effects of climate change on normalized difference vegetation index (NDVI) in the Northeast

References

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., and Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. Scientific data, 5(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191

Agbo, E., Ekpo, C., and Edet, C. (2020). Trend Analysis of Meteorological Parameters, Tropospheric Refractivity, Equivalent Potential Temperature for a Pseudoadiabatic Process and Field Strength Variability, Using Mann Kendall Trend Test and Sens Estimate. arXiv: Atmospheric and Oceanic Physics. https://consensus.app/papers/trend-analysis-of-meteorological-parameters-agbo-ekpo/33ff3e984a3b5fa7b0dc56d90fc13fff/

of Iran. Modeling Earth Systems and Environment, 6, 671-683.

Baño-Medina, J., Manzanas, R., and Gutiérrez, J. M. (2021). On the suitability of deep convolutional neural networks for continental-wide downscaling of climate change projections. Climate Dynamics, 57(11), 2941-2951.

Cassatt, M. S., and Wilcox, D. (2020). Potential effects of climate change on NRCS Wetland Restoration Easements: An ecohydrological assessment. Ecohydrology, 13. https://doi.org/10.1002/eco.2183

Charron, C., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B., and Van Den Heuvel, M. R. (2021). Water temperature and hydrological modelling in the context of environmental flows and future climate change: Case study of the Wilmot River (Canada). Water, 13(15), 2101.

Da Silva, M. V. M., Lima, C. E. S., and Silveira, C. (2023). Impact of Climate Change and Consumptive Demands on the Performance of São Francisco River Reservoirs, Brazil. Climate. https://doi.org/10.3390/cli11040089

De Vente, J., and Eekhout, J. (2021). The impact of climate change on soil erosion: a systematic review. https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU21-5008

Diaz-Nieto, J., and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69(2), 245-268. https://doi.org/10.1007/s10584-005-1157-6

Elias, E., James, D., Heimel, S., Steele, C., Steltzer, H., and Dott, C. (2021). Implications of observed changes in high mountain snow water storage, snowmelt timing and melt window. Journal of Hydrology: Regional Studies, 35, 100799. https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2021.100799

Hamed, K., and Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 204, 182-196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

Hamed, M., Nashwan, M. S., and Shahid, S. (2021). A novel selection method of CMIP6 GCMs for robust climate projection. International Journal of Climatology, 42, 4258-4272. https://doi.org/10.1002/joc.7461

Hanchane, M., Kessabi, R., Krakauer, N., Sadiki, A., Kassioui, J. E., and Aboubi, I. (2023). Performance Evaluation of TerraClimate Monthly Rainfall Data after Bias Correction in the Fes-Meknes Region (Morocco). Climate. https://doi.org/10.3390/cli11060120

Jan, K. A., Rather, A. A., Balaji, R., Ali, K., and Jan. (2023). The Path to Climate Sustainability: A Review of IPCC 2022. Global Sustainability Research. https://doi.org/10.56556/gssr.v2i1.429

Khoshravan, H., Alinejad-Tabrizi, T., and Naqinezhad, A. (2021). Hydromorphology and environmental restoration of Gorgan Bay, the Southeast Caspian Sea. https://consensus.app/papers/hydromorphology-and-environmental-restoration-of-gorgan-khoshravan-alinejad-tabrizi/e38e9bf0342752f988630cea140fcac7/

Kodihal, S., Akhtar, M., and Maurya, S. (2024). Hydroclimatic projection: statistical learning and downscaling model for rainfall and runoff forecasting. Journal of Water and Climate Change. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.562

Lu, K., Arshad, M., Xieyao, Ullah, I., Wang, J., and Shao, W. (2022). Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs. International Journal of Climatology, 42, 7703-7729. https://doi.org/10.1002/joc.7673

Makar, R., Shahin, S., El-Nazer, M., Wheida, A., and El-Hady, M. A. (2022). Evaluating the Impacts of Climate Change on Irrigation Water Requirements. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su142214833

Massmann, C. (2020). Evaluating the Suitability of Century-Long Gridded Meteorological Datasets for Hydrological Modeling. Journal of Hydrometeorology. https://doi.org/10.1175/jhm-d-19-0113.1

Muhammad, M., Azmi, M. A. F., and Zawawi, M. A. M. (2024). Rainfall trend analysis using the Mann-Kendall test with pyMannKendall: A case study of Jeli, Kelantan. BIO Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/bioconf/202413105018

Nayak, S. (2022). Factoring Climate Change Risks in the Wetland Ecosystems Governance: A Policy Look Ahead+. Environmental Policy and Law. https://doi.org/10.3233/epl-219036

Nury, A., Sharma, A., Mehrotra, R., Marshall, L., and Cordery, I. (2022). Projected Changes in the Tibetan Plateau Snowpack Resulting From Rising Global Temperatures. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127. https://doi.org/10.1029/2021JD036201

Rachidi, S., Mazoudi, E. E., Alami, J. E., Jadoud, M., and Er-Raki, S. (2023). Assessment and Comparison of Satellite-Based Rainfall Products: Validation by Hydrological Modeling Using ANN in a Semi-Arid Zone. Water. https://doi.org/10.3390/w15111997

Rashid, H., Yang, K., Zeng, A., Ju, S., Rashid, A., Guo, F., and Lan, S. (2021). Predicting the Hydrological Impacts of Future Climate Change in a Humid-Subtropical Watershed. Atmosphere. https://doi.org/10.3390/atmos13010012

Sahoo, S. P., and Panda, K. C. (2020). Prediction of Climate Change Using Statistical Downscaling Techniques. 311-328. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1322-0_19

Salimi, S., and Scholz, M. (2021). Impact of future climate scenarios on peatland and constructed wetland water quality: A mesocosm experiment within climate chambers. Journal of Environmental Management, 289, 112459. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112459

Shin, S., Her, Y., and Khare, Y. (2023). Evaluation of impacts of climate change on natural and managed wetland basins. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 59, 1549-1568. https://doi.org/10.1111/1752-1688.13140

Stephenson, N. (1998). Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. Journal of biogeography, 25(5), 855-870.

Tabari, H., Paz, S. M., Buekenhout, D., and Willems, P. (2021). Comparison of statistical downscaling methods for climate change impact analysis on precipitation-driven drought. Hydrology and Earth System Sciences. https://doi.org/10.5194/hess-25-3493-2021

Tarekegn, N., Abate, B., Muluneh, A., and Dile, Y. (2021). Modeling the impact of climate change on the hydrology of Andasa watershed. Modeling Earth Systems and Environment, 8, 103-119. https://doi.org/10.1007/s40808-020-01063-7

Wang, A., Miao, Y., Kong, X., and Wu, H. (2022). Future Changes in Global Runoff and Runoff Coefficient From CMIP6 Multi-Model Simulation Under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 Scenarios. Earth's Future, 10. https://doi.org/10.1029/2022EF002910

Wang, H., Zhao, W., Li, C., and Pereira, P. (2021). Vegetation greening partly offsets the water erosion risk in China from 1999 to 2018. Geoderma, 401, 115319. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115319

Xi, Y., Peng, S., Ciais, P., and Chen, Y. (2020). Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands. Nature Climate Change, 11, 45-51. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00942-2

Yu, L., Zhao, X., Gao, X., Jia, R., Yang, M., Yang, X., Wu, Y., and Siddique, K. (2021). Effect of natural factors and management practices on agricultural water use efficiency under drought: A meta-analysis of global drylands. Journal of Hydrology, 594, 125977. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.125977

Zou, L., and Zhou, T. (2021). Mean and extreme precipitation changes over China under SSP scenarios: results from high-resolution dynamical downscaling for CORDEX East Asia. Climate Dynamics. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05947-x