Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146

Homepage: https://khu.ac.ir

Impacts Of Climate Change On Wetland Hydrology: A Case Study With Global Implications

Behzad Rayegani [1]✉ | Susan Barati [2] | Mona Izadian [3]

1. Corresponding Author, Environmental Assessment and Research Group, Institute for Environment and Sustainable Development, Environmental Protection Organization, Tehran, Iran. E-mail: bhz.ray@gmail.com
2. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran. E-mail: s_barati@areeo.ac.ir
3. Biodiversity and Biosafety Research Group, Institute for Environment and Sustainable Development, Environmental Protection Organization, Tehran, Iran. E-mail: izadian.mona@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 May 2025
Accepted 19 October 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
Wetlands,
Evapotranspiration,
Climate Change,
Remote Sensing,
Water Resource Management.

ABSTRACT

Objective: Climate change stands out as one of the most pressing environmental challenges of the modern era, exerting profound impacts on aquatic ecosystems—particularly wetlands. This study investigates the influence of climate change on three wetlands in Chaldoran County, West Azerbaijan Province—Pir-Ahmadkandi, Naver, and Zavieh-ye Sofla—spanning the period from 1984 to 2023.

Methods: To achieve this, climate data were obtained from the TerraClimate database and CMIP6 model outputs under four emission scenarios. Landsat and Sentinel-2 satellite imagery, along with JRC/GSW data, were processed to evaluate changes in wetland surface areas. Annual wetland extents were extracted and compared against climatic parameters (temperature, precipitation, actual evapotranspiration, and snow water equivalent) using time-series analysis, Pearson correlation, and multivariate regression. Additionally, the Delta Method was employed for downscaled climate data to project possible trends over the next 20 years.

Results: The results indicate that rising temperatures and evapotranspiration constitute the primary drivers of wetland shrinkage. Pir-Ahmadkandi and Naver have lost over 27% and around 20% of their surface area, respectively, whereas Zavieh-ye Sofla exhibits an irregular, seasonal reduction due to human interventions and agricultural runoff. Projections suggest that wetland surfaces—especially in Pir-Ahmadkandi and Naver—will continue to decline, potentially exacerbating drought conditions, diminishing biodiversity, and reducing water quality.

Conclusions: These findings underscore the necessity of implementing sustainable water resource policies, controlling evaporation, and incorporating human impact assessments into conservation measures. Moreover, harnessing advanced hydrological modeling techniques and integrating remote sensing data with machine learning approaches may offer more effective strategies for safeguarding these vital wetland ecosystems.

Cite this article: Rayegani, B., Barati, S., & Izadian, M. (2025). Impacts Of Climate Change On Wetland Hydrology: A Case Study With Global Implications. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (3), 23-38. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.4

© The Author(s)

Publisher: Kharazmi University

DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.4

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change is recognized as one of the most critical environmental challenges of our time, significantly influencing the structure and functions of wetlands. Rising global temperatures, changes in precipitation patterns, and an increased frequency of extreme events such as droughts directly impact these ecosystems. Wetlands serve essential roles in hydrological regulation, carbon storage, flood control, and water purification; yet, when their water levels decrease or they dry out completely, they lose these vital services and may even become net emitters of greenhouse gases. Investigating the impacts of climate change on wetlands not only aids in resource management but also provides valuable insights at a global scale regarding the future of aquatic ecosystems. In this context, the present study focuses on the influence of climate change on three wetlands—Pir-Ahmadkandi, Naver, and Zavieh-ye Sofla—in the Chaldoran region (in West Azerbaijan Province, Iran) between 1984 and 2023. Given the importance of these transboundary wetlands in local water supply and biodiversity conservation, they serve as an appropriate case to evaluate both climatic and anthropogenic effects on hydrological stability.

Methods

In this study, climate data were obtained from the TerraClimate database (spanning 1958 to present) and from CMIP6 model outputs under four emission scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5). Changes in wetland areas were derived using JRC/GSW data and Landsat imagery (1984–2021), while Sentinel-2 images and the Scene Classification Layer (SCL) were employed for 2021–2023 to enhance water-surface detection accuracy. After data preprocessing, annual wetland extents were quantified and analyzed using time-series methods, Pearson correlation, and multiple linear regression (MLR). These techniques evaluated the relationship between climate variables (temperature, precipitation, evapotranspiration, and snow water equivalent) and wetland surface area. To project future trends, the Delta Method was applied to downscale CMIP6 climate projections, and regression models derived from historical data were used to estimate wetland extent changes over the next 20 years.

Results

Findings indicate that rising temperatures and increased actual evapotranspiration are the primary contributors to wetland shrinkage across the three sites, while precipitation has shown no significant trend. Pir-Ahmadkandi Wetland lost over 27% of its area, Naver Wetland around 20%, and Zavieh-ye Sofla Wetland displayed irregular seasonal fluctuations. Correlation analyses revealed that actual evapotranspiration exerts the strongest influence on Pir-Ahmadkandi, whereas mid-year temperature has the most pronounced effect on Naver. In Zavieh-ye Sofla, anthropogenic factors—especially artificial inflows from agricultural runoff—have complicated straightforward climate-driven patterns. According to scenario-based projections, Pir-Ahmadkandi may lose an additional 3% of its area over the next two decades, and Naver could face up to a 10% reduction. Predicting changes in Zavieh-ye Sofla remains challenging due to the significant role of human interventions. These findings are consistent with other global studies emphasizing the vulnerability of wetlands to elevated temperatures and evapotranspiration. Effective resource management and the adoption of strategies to mitigate evaporative losses and human encroachments are therefore essential for safeguarding these ecosystems.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

Conclusion

Long-term observations (1984–2023) underscore that climate change—especially rising temperatures and evapotranspiration—significantly contributes to the decline of these critical wetland systems. If current trends persist, these wetlands are likely to experience intensified drought conditions, posing threats such as reduced biodiversity, degraded water quality, and disruptions in carbon sequestration. Future research should consider sub-surface water tables, water quality changes, and geomorphological dynamics for a more comprehensive assessment. Employing advanced hydrological models like SWAT or VIC, alongside machine learning approaches, can further refine wetland predictions and management strategies. Finally, this study highlights the urgent need for sustainable water-resource policies and climate-mitigation actions to protect and preserve these vulnerable aquatic habitats.

Keywords: Wetlands, Evapotranspiration, Climate Change, Remote Sensing, Water Resource Management.

Author Contributions

First author: Preparation of data and information and field visits. Modeling, performing software analysis and writing the initial version of the article.
Second author: Performing software analysis, Controlling the results.
Third author: Cooperation in the preparation and Manuscript editing. Cooperation in the preparation and discharge information and related information analysis

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Acknowledgements

The esteemed reviewers are sincerely thanked for their constructive structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding

This article has received no financial support.

Conflict of interest

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

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: **۵۱۴۶– ۲۵۸۸**

Homepage: https://khu.ac.ir

تأثیرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی تالاب‌ها: یک مطالعه موردی با پیامدهای جهانی

بهزاد رایگانی[۱] ✉| سوسن براتی[۲] | منا ایزدیان[۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه پژوهشی ارزیابی و مخارات محیطزیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: bhz.ray@gmail.com

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: s_barati@areeo.ac.ir

۳. گروه پژوهشی تنوع‌زیستی و ایمنی‌زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران. رایانامه: izadian.mona@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
تالاب،
تبخیر و تعرق،
تغییر اقلیم،
سنجش از دور،
مدیریت منابع آب.

هدف: تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیطزیستی قرن حاضر، تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌های آبی ازجمله تالاب‌ها دارد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر سه تالاب پیراحمدکندی، ناور و زاویه سفلی در شهرستان چالدران (آذربایجان غربی) طی دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ است.

روش پژوهش: به این منظور، داده‌های اقلیمی پایگاه TerraClimate و خروجی مدل‌های CMIP6 تحت چهار سناریوی انتشار گردآوری شد. جهت ارزیابی تغییرات سطح آب، تصاویر ماهواره‌ای Landsat، Sentinel-2 و داده‌های JRC/GSW پردازش گردید. مساحت سالانه تالاب‌ها استخراج و با پارامترهای اقلیمی (دما، بارش، تبخیر و تعرق واقعی و آب معادل برف) از طریق تحلیل سری‌های زمانی، همبستگی پیرسون و رگرسیون چندمتغیره مقایسه شد. همچنین، با استفاده از روش عامل تغییر در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، تغییرات احتمالی تا ۲۰ سال آینده پیش‌بینی گردید.

یافته‌ها: نتایج حاکی از آن است که افزایش دما و تبخیر و تعرق، مهم‌ترین عوامل کاهش سطح تالاب‌ها بوده‌اند. تالاب پیراحمدکندی بیش از ۲۷ درصد و ناور حدود ۲۰ درصد از مساحت خود را از دست داده‌اند، در حالی که در زاویه سفلی به دلیل دخالت‌های انسانی و ورود پساب کشاورزی، الگوی کاهش فصلی و نامنظمی مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری: تحلیل‌های پیش‌بینی نیز نشان می‌دهد در صورت تداوم روندهای اقلیمی کنونی، دو تالاب پیراحمدکندی و ناور ممکن است تا ۱۰ درصد دیگر از مساحت خود را از دست بدهند. این یافته‌ها بر اهمیت کنترل تبخیر و تعرق و مداخلات انسانی در مدیریت پایدار منابع آب تالاب‌ها تأکید می‌کند.

استناد: رایگانی، بهزاد؛ براتی، سوسن؛ و ایزدیان، منا (۱۴۰۴). تأثیرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی تالاب‌ها: یک مطالعه موردی با پیامدهای جهانی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۳)، ۲۳-۳۸. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.3.4

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده تالاب‌ها محسوب می‌شود، زیرا تغییر در الگوهای بارش و افزایش دما می‌تواند باعث تغییرات قابل‌توجهی در هیدرولوژی این اکوسیستم‌ها شود. تغییرات بیوشیمیایی ناشی از دگرگونی در سطح آب، می‌تواند برخی از خدمات زیست‌محیطی تالاب‌ها، از جمله تصفیه آب و ذخیره‌سازی کربن را تحت تأثیر قرار دهد (سلیمی، الموکتار و اسشولز[۱]، ۲۰۲۱). افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات کاربری زمین در نتیجه فعالیت‌های انسانی از عوامل اصلی تغییر اقلیم به شمار می‌روند. این تغییرات می‌توانند منجر به افزایش تبخیر، تغییر در میزان روان‌آب و در نتیجه کاهش سطح آب تالاب‌ها شوند (وپراسکاس، اسکاجز و کالدول[۲]، ۲۰۲۰). این تغییرات باعث کاهش وسعت تالاب‌ها و تغییر مرزهای آن‌ها خواهد شد که اثرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌های وابسته به این زیستگاه‌ها خواهد داشت. تالاب‌ها نقش مهمی در تنظیم چرخه‌های هیدرولوژیکی، ذخیره‌سازی کربن، کنترل سیلاب و تصفیه آب دارند، اما تغییر اقلیم می‌تواند باعث کاهش حجم آب و افزایش غلظت نمک در آن‌ها شود که به کاهش کیفیت آب و تغییر ترکیب زیستی اکوسیستم‌های وابسته منجر خواهد شد (نادری، ساعتساز[۳]، ۲۰۲۰). با توجه به نقش کلیدی تالاب‌ها در حفظ تعادل زیست‌محیطی، بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر این اکوسیستم‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. کاهش سطح آب تالاب‌ها و افزایش دما می‌تواند باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از تالاب‌ها شده و به جای آنکه این اکوسیستم‌ها به عنوان مخزن کربن عمل کنند، به منبع انتشار تبدیل شوند (گدنی، رودرف و بتس[۴]، ۲۰۲۴). تحقیقات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث کاهش آب ورودی، افزایش دمای سطحی و تغییر در زیستگاه‌های گونه‌های وابسته به این اکوسیستم‌ها شود (کارترایت و ولف[۵]، ۲۰۲۱). مدل‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که تالاب‌ها ممکن است در طول زمان به‌طور قابل‌توجهی خشک شوند، که این امر پیامدهای جبران‌ناپذیری برای حیات‌وحش و جوامع محلی خواهد داشت.

یکی از منابع مهم برای بررسی تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر محیط‌زیست، پایگاه‌های داده‌ی اقلیمی مانند TerraClimate هستند. این پایگاه‌ها داده‌های دقیق و بلندمدت دما، بارندگی و سایر پارامترهای اقلیمی را در مقیاس جهانی ارائه می‌دهند و به پژوهشگران امکان تحلیل دقیق تغییرات آب‌وهوایی و ارتباط آن با تغییرات سطح تالاب‌ها را می‌دهند (ابازوقلو[۶] و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های گذشته‌ی اقلیمی، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای پیش‌بینی تغییرات سطح تالاب‌ها در آینده است. این روش شامل بررسی همبستگی میان تغییرات اقلیمی گذشته و نوسانات سطح آب تالاب‌ها، و سپس اعمال این الگوها برای پیش‌بینی آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای است (سلیمی، الموکتار و اسشولز، ۲۰۲۱؛ کوی[۷] و همکاران، ۲۰۲۱؛ زو[۸] و همکاران، ۲۰۲۲)

هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) در گزارش ششم خود (AR6) تأکید کرده است که تغییرات اقلیمی به‌طور قطع ناشی از فعالیت‌های انسانی است و تأثیرات آن شامل افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش و افزایش وقوع پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و سیل می‌شود (کلوین[۹] و همکاران، ۲۰۲۳). سناریوهای انتشار (SSP) ارائه شده در این گزارش، مسیرهای مختلفی را برای آینده تغییرات اقلیمی تحت شرایط انتشار متفاوت ارائه می‌دهند. این سناریوها شامل مسیرهای انتشار پایین (SSP1-2.6) تا مسیرهای انتشار بسیار بالا (SSP5-8.5) هستند (کیکسترا[۱۰] و همکاران، ۲۰۲۲) که پیامدهای متفاوتی برای اقلیم و اکوسیستم‌های طبیعی از

[1] - Salimi, Almuktar, Scholz
[2] - Vepraskas, Skaggs, Caldwell
[3] - Naderi, Saatsaz
[4] - Gedney, Rudorff, Betts
[5] - Cartwright, Wolfe
[6] - Abatzoglou
[7] - Cui
[8] - Zou
[9] - Calvin
[10] - Kikstra

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

جمله تالاب‌ها دارند. معمولاً جهت تصویرسازی وضعیت آتی تالاب‌ها از سناریوهای انتشار گزارش‌های IPCC استفاده می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که تغییرات اقلیمی و افزایش سطح گازهای گلخانه‌ای منجر به کاهش چشمگیر وسعت تالاب‌ها خواهد شد، به‌ویژه در مناطقی که تحت تأثیر خشکسالی و افزایش دما قرار دارند. پیش‌بینی‌ها بر اساس سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهند که کاهش سطح تالاب‌ها می‌تواند تا ۲۸ درصد در برخی مناطق از جمله آمازون برسد (هاردوین[1] و همکاران، ۲۰۲۴). گزارش IPCC همچنین نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌سازی بر اساس سناریوهای انتشار (بودرو، رابینسون و فاروقی[2]، ۲۰۲۲)، برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی بر سطح تالاب‌ها می‌تواند ابزار مفیدی باشد (ایواجنسیک و کالیگاریک، ۲۰۱۴؛ زو و همکاران، ۲۰۱۷).

این مدل‌ها به درک بهتر تغییرات احتمالی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای کاهش پیامدهای منفی تغییر اقلیم کمک می‌کنند. بررسی‌های انجام‌شده حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی تا پایان قرن حاضر تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش سطح تالاب‌های جهان خواهد داشت. برآوردهای انجام‌شده در سناریوهای میانه نشان می‌دهد که این کاهش در مقیاس جهانی حدود ۵ درصد خواهد بود، درحالی‌که در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر از ۵۰ درجه شمالی، میزان کاهش به طور متوسط به حدود ۱۳ درصد می‌رسد (هاردوین و همکاران، ۲۰۲۴).

مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های آبی ازجمله تالاب‌ها پرداخته‌اند و عمدتاً کاهش بارندگی یا افزایش تبخیر و تعرق را به‌عنوان عوامل اصلی در افت سطح آب معرفی کرده‌اند، بااین‌حال، بسیاری از این مطالعات یا در مقیاس‌های بسیار کلان انجام شده‌اند، یا به بررسی روند تاریخی بدون تحلیل دقیق پیوند میان پارامترهای اقلیمی و مساحت تالاب پرداخته‌اند. از سوی دیگر، تلفیق داده‌های بلندمدت اقلیمی با داده‌های سنجش از دور، همراه با ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های آینده‌نگر اقلیمی مانند CMIP6 در بسیاری از مناطق مرزی ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است .

از این‌رو، هدف اصلی این تحقیق، پر کردن این شکاف با بررسی جامع اثرات تغییر اقلیم بر سه تالاب مرزی در شهرستان چالدران طی دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳، با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی، مدل‌سازی آماری، ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای اقلیمی و تلفیق داده‌های TerraClimate، Landsat، Sentinel-2 و JRC/GSW است. این پژوهش با ارائه پیش‌بینی‌های دقیق از روند آینده، می‌تواند مبنای تدوین راهبردهای مدیریتی برای حفظ تالاب‌های آسیب‌پذیر در برابر تغییر اقلیم باشد.

روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

این پژوهش در استان آذربایجان غربی، واقع در شمال غرب ایران، انجام شده است. این استان با مساحت ۳۷،۴۱۲ کیلومترمربع (بدون احتساب دریاچه ارومیه) بین طول‌های جغرافیایی ′۳ °۴۴ تا′۲۴ °۴۷ شرقی و عرض‌های′۵ °۳۶ تا ′ ۴۶ °۳۹ شمالی قرار دارد. از شمال با جمهوری خودمختار نخجوان و ترکیه، از شرق با استان آذربایجان شرقی، از جنوب با استان کردستان و از غرب با ترکیه و عراق هم‌مرز است. ناهمواری‌های عمده این استان در بخش‌های غربی آن واقع شده و به‌عنوان بخشی از رشته‌کوه‌های ارمنستان و امتداد کوه‌های زاگرس شمالی شناخته می‌شوند.

این پژوهش بر سه تالاب پیراحمدکندی، ناور و زاویه سفلی در شهرستان چالدران متمرکز است که از لحاظ محیط‌زیستی و اکولوژیکی دارای اهمیت بالایی هستند. این تالاب‌ها در نقطه صفر مرزی ایران و ترکیه قرار دارند و نقش مهمی در تأمین منابع آبی، پایداری اکوسیستم‌های محلی و حفظ تنوع زیستی دارند (شکل ۲).

تالاب پیراحمدکندی: این تالاب با مساحت حدود ۴۳ هکتار و حوزه آبخیز ۲،۸۴۴ هکتار، دارای پوشش گیاهی شامل گونه‌هایی مانند بوریا، شیشه‌شور مردابی و قاشق شیطان است. دمای متوسط سالانه آن از حدود ۱۱- تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد و میزان بارش متوسط سالانه حدود ۳۶۷ میلی‌متر است.

[1] - Hardouin

[2] - Boudreau, Robinson, Farooqi

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

تالاب ناور: مساحت این تالاب در حدود ۸۰ هکتار بوده و در ارتفاع ۲،۴۱۶ متری قرار دارد. میزان بارندگی سالانه آن در حدود ۴۹۳ میلی‌متر و دمای متوسط بین ۱۱- تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد است.

تالاب زاویه سفلی: این تالاب دارای مساحت ۲۴ هکتار بوده و در ارتفاع ۱،۸۰۷ متری قرار دارد. بارندگی سالانه آن ۳۴۴ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه بین ۱۰- تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است.

۲. داده‌ها و روش کار

در این مطالعه، داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و سنجش از دور از منابع معتبر گردآوری شده است. داده‌های مورد استفاده در دو دسته کلی شامل داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌سازی شده قرار می‌گیرند.

۲-۱. داده‌های اقلیمی

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش از پایگاه معتبر TerraClimate استخراج شده است (ابازوقلو و همکاران، ۲۰۱۸).

داده‌های TerraClimate شامل متغیرهایی مانند دما، بارش، آب معادل برف، تبخیر و تعرق واقعی و مرجع است که با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر از سال ۱۹۵۸ تاکنون در دسترس قرار دارد.

داده‌های مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوسی (AOGCM) از پروژه CMIP6 به‌منظور بررسی تغییرات اقلیمی آینده مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، خروجی‌های مدل‌های CMIP6 در چارچوب سناریوهای انتشار اجتماعی-اقتصادی (SSP) تحلیل شده است. در این پژوهش، چهار سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به‌عنوان مبنای تحلیل تغییرات اقلیمی آینده انتخاب شده است (کلوین و همکاران، ۲۰۲۳؛ کیکسترا و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۲. داده‌های سنجش از دور و هیدرولوژیکی

به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب تالاب‌ها، از داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر Landsat و Sentinel-2 استفاده شده است. داده‌های JRC/GSW نیز برای استخراج تغییرات سالانه سطح آب تالاب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (پکل[1] و همکاران، ۲۰۱۶).

تصاویر Landsat: این تصاویر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ برای استخراج محدوده‌های آبی تالاب‌ها بررسی شده است.

تصاویر Sentinel-2: این تصاویر با قدرت تفکیک ۱۰ متر، برای به‌روزرسانی داده‌های تالاب‌ها تا پایان سال ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفته است.

داده‌های JRC/GSW: این مجموعه داده، تغییرات تاریخی سطح آب تالاب‌ها را با استفاده از تصاویر Landsat ارائه می‌دهد و امکان استخراج تغییرات فصلی و سالانه را فراهم کرده است (پکل و همکاران، ۲۰۱۶).

۲-۳. روش تحلیل داده‌ها

به‌منظور بررسی روند تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر هیدرولوژی تالاب‌ها، روش‌های مختلفی شامل تحلیل سری‌های زمانی، مدل‌سازی آماری و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی به کار گرفته شده است.

۲-۳-۱. تحلیل روند تغییرات اقلیمی از گذشته تاکنون

روند تغییرات اقلیمی شامل دما، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، با استفاده از روش رگرسیون خطی به روش حداقل مربعات (Ordinary Least Squares - OLS) تحلیل شده است. علاوه بر این، جهت بررسی معناداری تغییرات، آزمون من-کندال (Mann-Kendall Test) و آزمون سن (Sen's Slope Estimator) و همبستگی پیروسن (P-Value) اجرا شده است. به منظور تصویرسازی تغییرات هر پارامتر اقلیمی ابتدا مقدار شیب خط رگرسیون برای هر پیکسل از هر متغیر اقلیمی بدست آمده است سپس

[1] - Pekel

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

این شیب در طول دوره آماری ضرب شد تا تخمینی از میزان تغییرات بدست آید در نهایت به کمک آزمون‌های معنی‌داری فقط نواحی که تغییرات معنی‌دار آماری نشان داده‌اند برای روی نقشه قبلی ماسک شده است (اسواد، یوسف و ابراهیم[۱]، ۲۰۲۰؛ سام، نواگزی و ایکبود[۲]، ۲۰۲۲).

۲-۳-۲. تحلیل تغییرات سطح آب تالاب‌ها

برای بررسی سطح آب ابتدا داده‌هایJRC/GSW به کمک گوگل ارث انجین از ۱۹۸۴ تا پاسان سال ۲۰۲۱ بدست آمد. با توجه به ابهاماتی در مورد این داده وجود داشت از تصاویر لندست همزمان جهت صحت سنجی اطلاعات داده‌های JRC/GSW استفاده شد. در طول دوره به‌منظور استخراج سطح آب تالاب‌ها از داده‌های لندست، شاخص نرمال‌شده تفاضلی آب (NDWI) و روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده (Supervised Classification) بر روی تصاویر Landsat (فنگ [۳]و همکاران، ۲۰۱۶؛ فیکاس[۴]، ۲۰۱۴؛ شن و لی[۵]، ۲۰۱۰) اعمال گردید. برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ داده‌هایJRC/GSW موجود نبود بنابراین جهت تکمیل این دوره از تصاویر سنتینل ۲ استفاده گردید. در مورد داده‌های سنتینل ۲ از باند SCL (Scene Classification Layer) استفاده گردید. این باند اطلاعاتی جامع از نوع پوشش زمین را ارائه داده و امکان تفکیک دقیق پیکسل‌های مربوط به آب، پوشش گیاهی، خاک، برف، ابر، سایه و سایر ویژگی‌های سطحی را فراهم می‌کند. به‌دلیل دقت بالای این باند در جداسازی مناطق آبی، از آن برای تشخیص و کمی‌سازی مساحت سالانه تالاب‌ها بهره گرفته شده است (لسکو [۶]و همکاران، ۲۰۲۱).

پس از پردازش اولیه، نتایج استخراج‌شده از باند SCL با داده‌های JRC/GSW همگن‌سازی شد تا تغییرات سطح آب تالاب‌ها از ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ به‌صورت سالیانه ثبت و تحلیل شود. این روش، علاوه بر کاهش خطای استخراج سطح آب، امکان مقایسه داده‌های تاریخی و اخیر را نیز فراهم آورده است.

۲-۳-۳. مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم بر سطح آب تالاب‌ها

جهت بررسی رابطه بین تغییرات اقلیمی و تغییرات سطح آب تالاب‌ها، از تحلیل همبستگی پیرسون (Pearson Correlation Analysis) و رگرسیون چندمتغیره (Multiple Linear Regression - MLR) استفاده شده است. این تحلیل‌ها به‌منظور بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی شامل دما، بارش، آب معادل برف و تبخیر و تعرق بر سطح آب تالاب‌ها اجرا شده است. علاوه بر این، به‌منظور بررسی اثر تأخیری (Lag Effect) تغییرات اقلیمی، تحلیل همبستگی در بازه‌های یک‌ساله و دوساله انجام شده است.

۲-۳-۴. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و تأثیر آن بر تالاب‌ها

به‌منظور تصویرسازی شرایط اقلیمی آینده، از داده‌های مدل‌شده CMIP6 و روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر (Delta Method) استفاده شده است.

ابتدا، خروجی‌های مدل‌های CMIP6 برای هر سناریو انتشار و دوره زمانی آینده۲۰۲۱–۲۰۴۰ استخراج شده است. سپس، با استفاده از روش عامل تغییر ساده(Simple Delta Method) ، مقادیر تغییرات دما و بارش در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۵–۲۰۱۴ محاسبه شده است.

در نهایت، این تغییرات به داده‌های تاریخی مشاهداتی TerraClimate اعمال شده و نقشه‌های پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در آینده تولید شده است.

[1] - Aswad, Yousif, Ibrahim
[2] - Sam, Nwaogazie, Ikebude
[3] - Feng
[4] - Fickas
[5] - Shen, Li
[6] - Lasko

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

پس از پیش‌بینی تغییرات دما و بارش، معادلات رگرسیونی به‌دست‌آمده از تحلیل‌های گذشته برای پیش‌بینی تغییرات سطح تالاب‌ها در دوره آینده به کار گرفته شده است. این پیش‌بینی‌ها بر اساس چهار سناریوی انتشار مختلف انجام شده و نتایج آن در بخش یافته‌ها ارائه شده است.

۲-۴. روند اجرای پژوهش

این پژوهش در چندین مرحله به‌صورت سیستماتیک انجام شده است که هر مرحله بر مبنای روش‌های علمی و داده‌های معتبر اجرا گردیده است. شکل ۱جریان کلی فرآیند پژوهش را نشان می‌دهد. گام‌های اجرای پژوهش به شرح زیر است:

۲-۴-۱. جمع‌آوری داده‌های اقلیمی و سنجش از دور

با توجه به کمبود ایستگاه‌های اقلیمی فعال در محدوده مورد مطالعه و نیز نواقص و گسست‌های زمانی در داده‌های ایستگاهی منطقه چالدران، استفاده مستقیم از داده‌های زمینی با دقت و پوشش مناسب ممکن نبود. ازاین‌رو، برای تحلیل پارامترهای اقلیمی از داده‌های پایگاه جهانی TerraClimate استفاده شد که داده‌های ماهانه با قدرت تفکیک مکانی حدود ۴ کیلومتر از سال ۱۹۵۸ تاکنون ارائه می‌دهد. صحت و قابلیت اعتماد این داده‌ها در پژوهش‌های مختلف تأیید شده و در مطالعه رایگانی و همکاران (۱۴۰۴) نیز در مقایسه با داده‌های ایستگاهی ایران عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است، به‌ویژه در تحلیل تغییرات دما و بارش در مقیاس ملی.

داده‌های مربوط به متغیرهای اقلیمی شامل دما، بارش، تبخیر و تعرق و آب معادل برف از پایگاه داده TerraClimate استخراج شد. علاوه بر این، داده‌های مدل‌سازی اقلیمی آینده از پروژه CMIP6 برای سناریوهای انتشار مختلف مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب تالاب‌ها، داده‌های JRC/GSW از تصاویر Landsat تا سال ۲۰۲۱ و Sentinel-2 برای تکمیل داده‌ها تا سال ۲۰۲۳ به کار گرفته شد.

۲-۴-۲. تحلیل روند تغییرات اقلیمی

روند تغییرات متغیرهای اقلیمی شامل دما، بارش، آب معادل برف و تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های سری زمانی، رگرسیون خطی به روش حداقل مربعات خطا (OLS) و آزمون‌های آماری من-کندال و شیب سن تحلیل شد. این روندها به‌صورت مکانی و زمانی بررسی و نقشه‌های تغییرات هر متغیر اقلیمی تهیه گردید.

۲-۴-۳. استخراج سطح آب تالاب‌ها و تحلیل تغییرات آن

محدوده‌های سطح آب تالاب‌ها از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای و اعمال روش‌های طبقه‌بندی نظارتی و شاخص نرمال‌شده تفاضلی آب (NDWI) استخراج شد. داده‌های تاریخی JRC/GSW با داده‌های تصاویر Landsat صحت‌سنجی گردید و برای دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳، داده‌های باند SCL سنجنده Sentinel-2 به کار گرفته شد. در این مرحله، همگن‌سازی داده‌های منابع مختلف نیز انجام شد تا دقت تحلیل‌ها افزایش یابد.

۲-۴-۴. بررسی ارتباط بین تغییرات اقلیمی و سطح آب تالاب‌ها

رابطه بین متغیرهای اقلیمی (دما، بارش، تبخیر و تعرق و آب معادل برف) و تغییرات سطح آب تالاب‌ها با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون و رگرسیون چندمتغیره (MLR) بررسی شد. تأخیر احتمالی اثرات اقلیمی بر سطح آب تالاب‌ها نیز با تحلیل لگ‌های زمانی یک‌ساله و دوساله ارزیابی گردید.

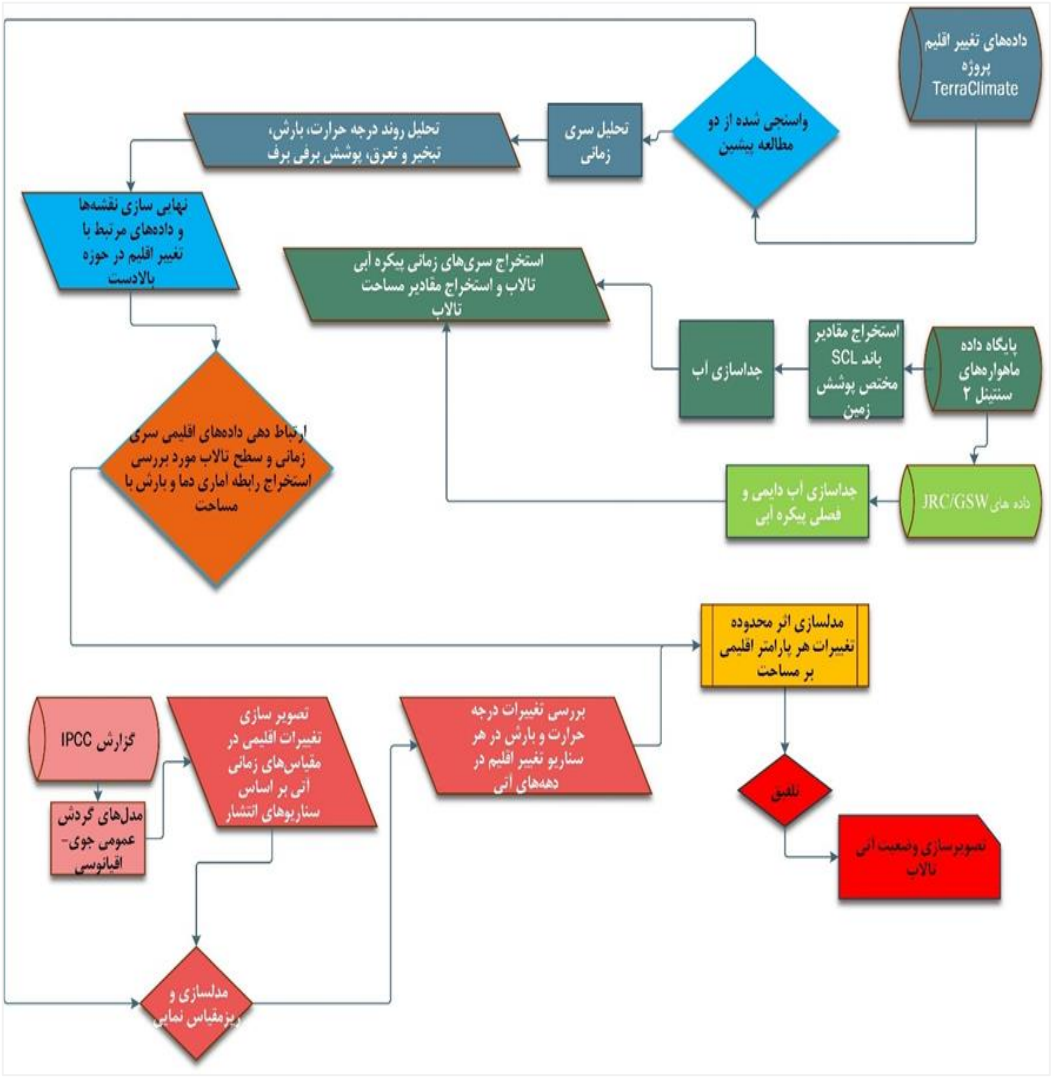
۲-۴-۵. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و اثر آن بر تالاب‌ها

برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده، داده‌های مدل‌های CMIP6 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ استخراج و با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی عامل تغییر (Delta Method) پردازش شد. تغییرات دما و بارش بر اساس دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ محاسبه گردید و نقشه‌های اقلیمی آینده تهیه شد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

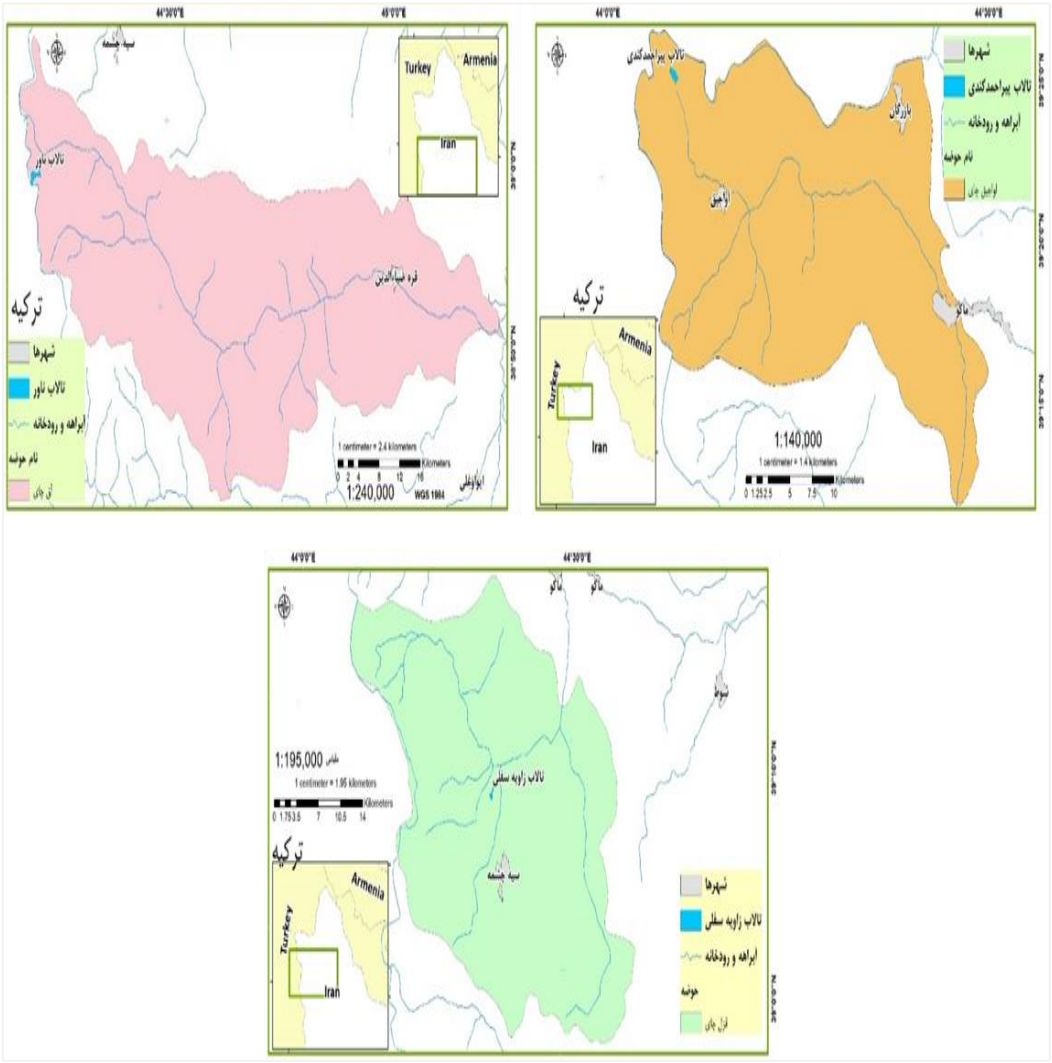
۲-۴-۶. مدل‌سازی تغییرات سطح آب تالاب‌ها در آینده

از معادلات رگرسیونی حاصل از تحلیل‌های آماری گذشته برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب تالاب‌ها تحت شرایط اقلیمی آینده استفاده شد. این مدل‌ها برای چهار سناریوی انتشار مختلف (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) اجرا شده و میزان کاهش یا افزایش سطح آب تالاب‌ها در آینده برآورد گردید.



شکل ۱. فرآیندکلی روش کار

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]



شکل ۲. موقعیت و وضعیت هیدرولوژی سه تالاب ناور، پیراحمدکندی و زاویه سفلی

یافته‌های پژوهش

در این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های اقلیمی و سنجش از دور ارائه شده و اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی تالاب‌های مورد مطالعه بررسی می‌شود. تحلیل‌ها شامل روند تغییرات دما، بارش، تبخیر و تعرق، آب معادل برف و سطح آب تالاب‌ها در گذشته و پیش‌بینی‌های آینده بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم است. در ادامه، هر یک از این نتایج به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

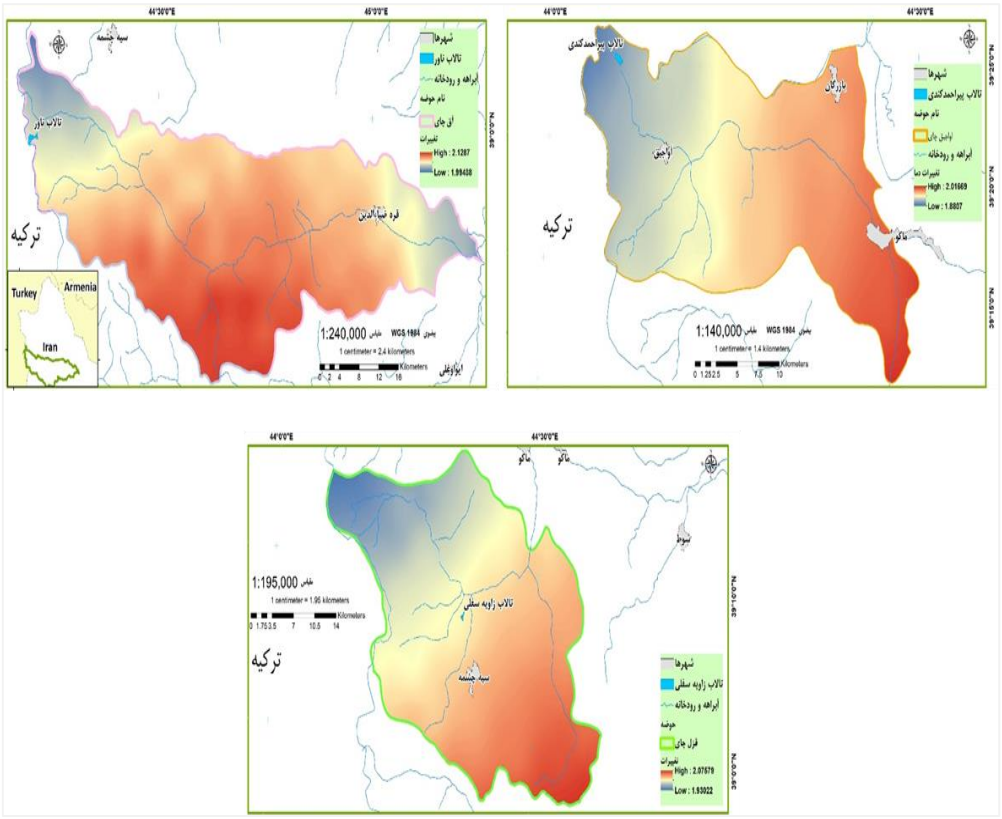
۱. تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه

نتایج تحلیل سری‌های زمانی داده‌های دما (دمای کمینه، بیشینه، متوسط و میانه) در مورد داده‌های TerraClimate نشان داد که طی چند دهه گذشته، در تمامی حوضه های آبخیز این سه تالاب دمای سالانه روند افزایشی داشته است. در بخش اعظم زیرحوضه‌ی آواجیق چای تالاب پیراحمد کندی (شکل ۲)، درجه حرارت کمینه ماهیانه تغییر معنی‌دار افزایشی داشته است، این عدد ۲/۳۳ تا ۲/۶۸ درجه سلسیوس متغیر بوده است. کل زیرحوضه‌ی آق چای تالاب ناور، افزایش معنی‌دار درجه حرارت کمینه سالیانه نشان می‌دهند و این عدد بین ۲/۳۵ تا ۳/۲۲ درجه سلسیوس متغیر است. همچنین کل زیرحوضه‌ی قزل چای تالاب زاویه سفلی، افزایش معنی‌دار درجه حرارت کمینه سالیانه نشان می‌دهند و این عدد بین ۲/۳۳ تا ۲/۹۴ درجه سلسیوس متغیر است. به طور کلی در هر سه زیر حوضه افزایش معنی‌دار دمای کمینه سالیانه مشاهده می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

در مورد دمای بیشینه نیز در هر سه حوضه آبخیز سه تالاب مورد مطالعه، افزایش معنی‌دار دیده می‌شود. این افزایش برای زیرحوضه‌ی آواجیق چای تالاب پیراحمدکندی بین ۲/۱۱ تا ۲/۴۹ درجه سلسیوس، حوضه آق چای در تالاب ناور بین ۱/۷۷ تا ۲/۴۳ درجه سلسیوس و حوضه قزل چای در تالاب زاویه سفلی بین ۲/۱۲ تا ۲/۳۸ درجه سلسیوس نشان داده شده است. در مورد دمای متوسط و میانه سالیانه نیز در تمامی زیر حوضه‌ها در تمامی بخش‌ها افزایش معنی‌دار دما مشاهده می‌شود (شکل ۳).

بررسی داده‌های TerraClimate از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳ نشان داد (شکل ۳) که میانگین دمای سالانه در کل منطقه در حدود ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. آزمون من–کندال و شیب سن بر روی این داده‌ها نشان داد که این روند در سطح ۹۹ درصد اطمینان معنی‌دار است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین (کوی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هاردوین و همکاران، ۲۰۲۴) همخوانی دارد که نشان داده‌اند مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان بیشترین افزایش دما را تجربه کرده‌اند.



شکل ۳. تغییرات دمای متوسط سالیانه در زیرحوضه های سه تالاب ناور، پیراحمدکندی و زاویه سفلی (منبع: یافته‌های تحقیق)

۲. تغییرات بارش و تأثیر آن بر روان‌آب تالاب‌ها

تحلیل روند بارش در منطقه نشان داد که بارش تجمعی سالانه تغییرات محسوسی نداشته و همچنین بررسی توزیع زمانی بارش در فصل‌های مختلف نیز بررسی شد و در هیچکدام از فصول، بارش تجمعی فصلی تغییر روند نشان نداده است.

۳. تغییرات آب معادل برف

بررسی روند آب معادل برف نشان داد تنها در ارتفاعات تالاب ناور کاهش این پارامتر اقلیمی مشاهده می‌شود. این کاهش بین ۳۰ تا ۱۸۶ میلی‌متر متغیر نشان داده است. البته بخش عمده‌ای از ارتفاعات کاهش ناچیزی داشته‌اند.

۴. تغییرات تبخیر و تعرق

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

نتایج نشان داد (جدول ۱) که میزان تبخیر و تعرق مرجع[۱] (ET0) در منطقه روندی افزایشی دارد. میانگین سالانه تبخیر و تعرق از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ در این حوضه‌ها بین ۸ تا حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است.

جدول ۱. متوسط درصد تغییر تبخیر و تعرق پن–من

آواجیق چای	۸/۱۶۵
آق چای	۹/۸۳۲
قزل چای	۸/۷۹۸

۵. تغییرات مساحت تالاب‌ها در بازه ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳

۵–۱. تغییرات مساحت تالاب پیراحمدکندی

تصاویر لندست ۵، ۷، ۸ و ۹ از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۱ برای بررسی تغییرات سطح آب تالاب پیراحمدکندی به‌کار گرفته شد. از آن‌جایی که در تحلیل‌های اولیه مشخص شد که شاخص‌های طیفی مانند NDWI به دلیل وجود پوشش گیاهی و اندازه کوچک تالاب، دقت کافی ندارند، از داده‌های JRC/GSW برای استخراج مساحت سطح آبی استفاده شد. برای دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳، این داده‌ها با باند SCL سنجنده Sentinel-2 ترکیب شده و مساحت سالیانه تالاب استخراج گردید.

نتایج نشان داد که مساحت تالاب پیراحمدکندی در دوره مطالعه بیش از ۲۷ درصد کاهش یافته است. این تالاب نوسانات شدیدی را تجربه کرده و در چندین دوره تا مرز خشک شدن کامل پیش رفته است. نمودار تغییرات مساحت تالاب نشان داد که این نوسانات به‌صورت دوره‌های ۱۰ ساله اتفاق می‌افتد، به این معنا که در هر دهه، تالاب تا مرز خشکی پیش رفته و سپس مجدداً احیا شده است. سال ۲۰۲۳ کمترین مساحت تالاب را از سال ۲۰۱۴ تاکنون ثبت کرده است که نشان‌دهنده وجود دوره‌های خشکسالی ده‌ساله است.

۵–۲. تغییرات مساحت تالاب ناور

نتایج حاصل از داده‌های JRC/GSW و Sentinel-2 نشان داد که تالاب ناور طی بازه ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ حدود ۲۰ درصد از مساحت خود را از دست داده است. با بررسی سری‌های زمانی مشخص شد که این تالاب دو دوره بحرانی کاهش مساحت را تجربه کرده است:

دوره اول: بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ که بیشترین کاهش مساحت ثبت شده است.

دوره دوم: از ۲۰۱۳ تاکنون که این روند کاهش با شدت کمتری ادامه داشته است.

نتایج نشان داد که این تالاب به‌ویژه در سال‌های کم‌بارش، کاهش شدیدی در سطح آب خود نشان می‌دهد، بنابراین به خشکسالی حساس است.

۵–۳. تغییرات مساحت تالاب زاویه سفلی

نتایج تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که تالاب زاویه سفلی دارای رفتار فصلی بوده و بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ شرایط نسبتاً پایداری داشته است. با این حال، در سال‌های اخیر، این تالاب روندی نزولی را طی کرده و از سال ۲۰۲۱ کاهش چشمگیری در سطح آب آن مشاهده شده است. بررسی‌های میدانی و استعلام از کارشناسان محیط‌زیست نشان داد که این تالاب به‌صورت مصنوعی از پساب‌های کشاورزی تغذیه می‌شود. این مداخله انسانی می‌تواند عاملی برای ایجاد نوسانات نامنظم در سطح آب آن باشد.

۶. بررسی رابطه تغییر پارامترهای اقلیمی و سطح آب تالاب‌ها

[۱] – تبخیر و تعرق مرجع (ETo) شاخصی استاندارد برای برآورد نیاز آبی گیاهان است که بیانگر مقدار تبخیر از سطح آزاد آب و تعرق از گیاه مرجع (چمن کوتاه یکنواخت) تحت شرایط اقلیمی مشخص می‌باشد. در داده‌های TerraClimate، این شاخص بر اساس معادله‌ی اصلاح‌شده پنمن–مانتیث FAO محاسبه شده و به صورت ماهانه در مقیاس جهانی ارائه می‌گردد. این داده‌ها امکان بررسی تغییرات مکانی و زمانی نیاز آبی گیاهان را در ارتباط با تغییرات اقلیم فراهم می‌سازد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

۶-۱. تالاب پیراحمدکندی

تحلیل همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه تغییرات اقلیمی و سطح آب تالاب پیراحمدکندی در زیرحوضه آبخیز آواجیق چای نشان داد که تبخیر و تعرق واقعی مهم‌ترین عامل کاهش سطح آب این تالاب است.

جدول همبستگی پیرسون بین پارامترهای اقلیمی و تغییرات مساحت تالاب پیراحمدکندی نشان داد (جدول ۲) که تبخیر و تعرق واقعی دارای رابطه معکوس و معنی‌دار (r = -0.610, P-Value = 0.012) با سطح آب تالاب است. در اینجا پارامترهای بارشی و دمایی همبستگی قابل‌توجهی نشان ندادند.

مدل رگرسیونی خطی که به کمک نرم‌افزار SPSS اجرا شد، نشان داد که بیش از ۵۶ درصد از تغییرات مساحت این تالاب را می‌توان با دو متغیر تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل توضیح داد که نشان‌دهنده تأثیر بالای این پارامترها در کاهش سطح آب است.

جدول ۲. همبستگی پیرسون میان تغییرات سالیانه آب تالاب پیراحمدکندی و پارامترهای اقلیمی در زیر حوضه آواجیق چای

		مساحت	تبخیر و تعرق واقعی	تعرق و تبخیر من-پن	بارش تجمعی سالیانه	آب معدل برف	متوسط دمای سالیانه	میانه دمای سالیانه	دمای کمینه	دمای بیشنه
مساحت	Pearson Correlation	۱	-.۶۱۰*	-.۰۱۱	-.۴۲۰	.۰۲۶	.۱۰۳	.۰۶۹	.۰۸۵	-.۱۴۳
	Sig. (2-tailed)		.۰۱۲	.۹۶۷	.۱۰۵	.۹۲۳	.۷۰۳	.۷۹۸	.۷۵۵	.۵۹۸
عدد همبستگی بدون ستاره یعنی روند معنی‌دار مشاهده نشده، یک ستاره یعنی در سطح پنج درصد و دو ستاره یعنی در سطح یک درصد روند تغییرات پارامتر معنی دار است.										

۶-۲. تالاب ناور

در زیرحوضه آبخیز آق چای، تحلیل همبستگی نشان داد که دمای میانه سالیانه (r = -0.614, P-Value = 0.002) بیشترین تأثیر را در کاهش سطح آب تالاب ناور دارد (جدول ۳). علاوه بر این، دمای بیشینه و تبخیر و تعرق پتانسیل نیز همبستگی منفی قابل‌توجهی با سطح آب تالاب داشتند.

مدل رگرسیونی نشان داد که ۳۷ درصد از تغییرات مساحت تالاب ناور تنها بر اساس تغییرات دمای میانه سالیانه قابل پیش‌بینی است. این نتیجه بیانگر این است که افزایش دما به‌طور مستقیم باعث کاهش سطح آب این تالاب شده است.

جدول ۳. همبستگی پیرسون میان تغییرات سالیانه آب تالاب ناور و پارامترهای اقلیمی در زیر حوضه آق چای

		مساحت	تبخیر و تعرق واقعی	تعرق و تبخیر من-پن	بارش تجمعی سالیانه	آب معدل برف	متوسط دمای سالیانه	میانه دمای سالیانه	دمای کمینه	دمای بیشنه
مساحت	Pearson Correlation	۱	.۱۰۲	-.۴۷۷*	.۲۳۱	.۲۵۷	-.۵۵۰**	-.۶۱۴**	-.۲۶۱	-.۴۷۷*
	Sig. (2-tailed)		.۶۵۰	.۰۲۵	.۳۰۲	.۲۴۸	.۰۰۸	.۰۰۲	.۲۴۰	.۰۲۵
عدد همبستگی بدون ستاره یعنی روند معنی‌دار مشاهده نشده، یک ستاره یعنی در سطح پنج درصد و دو ستاره یعنی در سطح یک درصد روند تغییرات پارامتر معنی دار است.										

۶-۳. تالاب زاویه سفلی

بررسی‌های انجام‌شده در زیرحوضه آبخیز قزل چای نشان داد که دمای کمینه سالیانه دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار (r = 0.642, p = 0.007) با سطح آب تالاب زاویه سفلی است (جدول ۴). این رابطه از نظر تئوری غیرمنطقی است، اما بررسی‌های کارشناسی نشان داد که این تالاب به‌طور مصنوعی تغذیه شده و افزایش دمای کمینه ممکن است با افزایش حجم روان‌آب‌های حاصل از ذوب برف در این منطقه ارتباط داشته باشد. به هر حال به دلیل مداخله انسانی در آبگیری تالاب تحلیل درصد اثر اقلیم در این تالاب مشکل است.

جدول ۴. همبستگی پیرسون میان تغییرات سالیانه آب تالاب زاویه سفلی و پارامترهای اقلیمی در زیر حوضه قزل چای

	مساحت	تبخیر و تعرق واقعی	تعرق و تبخیر من-پن	بارش تجمعی سالیانه	آب معدل برف	متوسط دمای سالیانه	میانه دمای سالیانه	دمای کمینه	دمای بیشنه

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

مساحت	Pearson Correlation	۱	.۱۶۴	.۲۲۸	.۰۳۲	-.۲۵۴	.۴۵۸	.۰۳۱	.۶۴۲**	.۳۰۸
	Sig. (2-tailed)		.۵۴۵	.۳۹۶	.۹۰۷	.۳۴۳	.۰۷۵	.۹۱۰	.۰۰۷	.۲۴۶
عدد همبستگی بدون ستاره یعنی روند معنی‌دار مشاهده نشده، یک ستاره یعنی در سطح پنج درصد و دو ستاره یعنی در سطح یک درصد روند تغییرات پارامتر معنی دار است.										

۷. پیش‌بینی تغییرات ۲۰ سال آینده

۷-۱. پیش‌بینی تغییرات تالاب پیراحمدکندی

در این تالاب تبخیر و تعرق بر مساحت اثرگذار بود بنابراین امکان استفاده مستقیم از داده‌های گزارش IPCC ششم وجود نداشت بنابراین، به‌منظور پیش‌بینی تغییرات سطح تالاب پیراحمدکندی، از معادله هارگریوز–سامانی برای تخمین تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد (گنتیلوسی[1] و همکاران، ۲۰۲۱؛ هارگریوز و سامانی[2]، ۱۹۸۵؛ لطفی[3] و همکاران، ۲۰۲۰).

$$ET_0 = 0.0023 \times (T_{\text{mean}} + 17.8) \times (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} \times R_a$$

جایی‌که:

T_{mean}: دمای متوسط

T_{max}: دمای بیشینه

T_{min}: دمای کمینه

R_a: تشعشات

ET_0: تبخیر و تعرق

تشعشع خورشیدی فرازمینی (R_a) نشان‌دهنده انرژی خورشیدی موجود برای فرآیند تبخیر و تعرق است. این پارامتر وابسته به موقعیت جغرافیایی و فصل است و معمولاً از جداول استاندارد به‌دست می‌آید. با توجه به این‌که ناحیه مطالعاتی در اینجا ثابت است با فرض عدم تغییر در میزان تشعشع خورشیدی فرازمینی، بر اساس تغییرات در دمای کمینه، بیشینه و میانگین، مقدار تغییر در تبخیر و تعرق پتانسیل برآورد شد. مقدار افزایشی که ما در پتانسیل تبخیر و تعرق بدست آمد در حدود ۴/۹۸ درصد بود. به عبارت بهتر در ۲۰ سال آتی مقدار تبخیر و تعرق پتاسیل در حدود ۵ درصد افزایش خواهد یافت. بر اساس مدل‌های رگرسیونی، این افزایش می‌تواند موجب کاهش ۱/۹ درصدی مساحت تالاب پیراحمدکندی شود. در بدترین سناریو، این مقدار به ۲/۸ درصد کاهش خواهد رسید.

۷-۲. پیش‌بینی تغییرات تالاب ناور

نتایج نشان داد که در ۲۰ سال آینده، دمای میانه سالیانه در منطقه تالاب ناور بین ۱۳ تا ۱۶ درصد افزایش خواهد یافت. با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، تخمین زده شد که:

۸ درصد از مساحت تالاب ناور در سناریوی میانه از دست خواهد رفت.

در بدترین سناریو (SSP5-8.5)، این کاهش به ۹/۸۴ درصد خواهد رسید.

۷-۳. پیش‌بینی تغییرات تالاب زاویه سفلی

با توجه به این‌که تغییرات مساحت تالاب زاویه سفلی تا حد زیادی وابسته به مداخلات انسانی است، پیش‌بینی تغییرات آتی آن بر اساس سناریوهای اقلیمی دارای عدم قطعیت بالا است و نمی‌توان تخمین دقیقی ارائه داد

بحث و نتیجه‌گیری

[1] - Gentilucci

[2] - Hargreaves, Samani

[3] - Lotfi

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

تالاب پیراحمدکندی تحت تأثیر افزایش تبخیر و تعرق واقعی قرار داشته و در ۲۰ سال آینده ممکن است در حدود ۳ درصد از سطح خود را از دست بدهد.

تالاب ناور تحت تأثیر افزایش دمای میانه سالیانه است و ممکن است تا حدود ۱۰ درصد از مساحت خود را از دست بدهد. تالاب زاویه سفلی به دلیل تأثیرات انسانی، پیش‌بینی‌پذیری پایینی دارد و تغییرات آن نیازمند مطالعات بیشتر است. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب تالاب‌ها و کنترل تبخیر و تعرق برای حفظ این اکوسیستم‌های ارزشمند ضروری است.

یافته‌های این مطالعه نشان داد که تالاب‌های پیراحمدکندی، ناور و زاویه سفلی طی دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ با کاهش قابل‌توجه مساحت مواجه بوده‌اند؛ به‌طوری‌که تالاب پیراحمدکندی بیش از ۲۷ درصد، تالاب ناور حدود ۲۰ درصد و تالاب زاویه سفلی کاهش نامنظم و نوسانات فصلی را تجربه کرده‌اند. این کاهش سطح عمدتاً تحت تأثیر افزایش دما و تبخیر و تعرق واقعی رخ داده است، درحالی‌که تغییرات بارشی نقش کمتری داشته است. افزایش تبخیر و تعرق در تالاب پیراحمدکندی، افزایش دمای میانه سالیانه در تالاب ناور و عوامل انسانی در تالاب زاویه سفلی از مهم‌ترین دلایل تفاوت در الگوهای کاهش مساحت هستند. این نتایج با مطالعات گذشته (بودرو، رابینسون و فاروقی، ۲۰۲۲؛ کوی و همکاران، ۲۰۲۱؛ هاردوین و همکاران، ۲۰۲۴؛ ایوانجنسیک و کالیگاریک[1]، ۲۰۱۴؛ ژو[2] و همکاران، ۲۰۱۷) همخوانی دارد و بر اهمیت نقش دما و تبخیر و تعرق به‌عنوان عوامل کلیدی در کاهش مساحت تالاب‌ها تأکید می‌کند.

این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بلندمدت (پروژه JRC/GSW و Sentinel-2) و روش‌های آماری معتبر (تحلیل همبستگی پیرسون، رگرسیون چندمتغیره و آزمون من–کندال)، تصویری دقیق از روند تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیک تالاب‌ها ارائه داد. بااین‌حال، برآورد تبخیر و تعرق بر اساس معادله هارگریوز–سامانی می‌تواند حاوی عدم قطعیت باشد و اثرات انسانی بر تالاب زاویه سفلی و همچنین تغییرات ژئومورفولوژیک در همه تالاب‌ها به‌طور کامل در نظر گرفته نشده است. این عوامل می‌توانند در مطالعات آتی برای بهبود صحت نتایج مدنظر قرار گیرند.

از آن‌جاکه بررسی‌ها در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد افزایش دما و کاهش منابع آبی سطحی موجب تسریع فرآیند خشک‌سالی در تالاب‌ها می‌شود (هاردوین و همکاران، ۲۰۲۴؛ کارترایت و ولف، ۲۰۲۱؛ بودرو، رابینسون و فاروقی، ۲۰۲۲)، یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای ارزیابی پیامدهای جهانی تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی مورداستفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، نقش آبخوان‌های زیرسطحی و تأثیر کیفیت آب نیز بررسی شود و از مدل‌های هیدرولوژیکی دقیق‌تری مانند SWAT یا VIC و همچنین روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و مدیریت بهتر تالاب‌ها بهره گرفته شود. این مطالعه تأکید می‌کند که مدیریت صحیح منابع آب، کنترل مصرف آب در حوضه‌های آبریز و کاهش تبخیر و تعرق می‌تواند نقش مهمی در حفاظت از تالاب‌ها در برابر تأثیرات منفی تغییر اقلیم داشته باشد. درنهایت، اتخاذ سیاست‌های پایدار در زمینه کاهش اثرات تغییر اقلیم و تقویت اقدامات حفاظتی برای تالاب‌ها، امری ضروری برای حفظ این اکوسیستم‌های ارزشمند است

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان در انجام و انتشار این پژوهش علمی، اصول اخلاقی را رعایت کرده‌اند و این امر مورد تأیید آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نگارش پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

[1] - Ivajnsic, Kaligarič

[2] - Zhu

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

مقاله حاضر از حمایت مالی هیچ سازمان و یا موسسه‌ای برخوردار نبوده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

References

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & 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.

Aswad, F., Yousif, A., & Ibrahim, S. (2020). *Trend Analysis Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Test for Annual and Monthly Rainfall for Sinjar District, Iraq*.

Boudreau, K., Robinson, M., & Farooqi, Z. (2022). IPCC Sixth Assessment Report. *Canadian Journal of Emergency Management*. https://doi.org/10.25071/6sw6za31

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C.,…Ha, M. (2023). 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 [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647

Cartwright, J. M., & Wolfe, W. J. (2021). Increasing Hydroperiod in a Karst-depression Wetland Based on 165 Years of Simulated Daily Water Levels. *Wetlands*, *41*(6), 75. https://doi.org/10.1007/s13157-021-01474-x

Cui, Q., Ammar, M. E., Iravani, M., Kariyeva, J., & Faramarzi, M. (2021). Regional wetland water storage changes: The influence of future climate on geographically isolated wetlands. *Ecological Indicators*, *120*, 106941. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106941

Feng, M., Sexton, J. O., Channan, S., & Townshend, J. R. (2016). A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic–spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, *9*(2), 113-133. https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420

Fickas, K. C. (2014). *Landsat-based monitoring of annual wetland change in the main-stem Willamette River floodplain of Oregon, USA from 1972 to 2012* [Masters Thesis, Oregon State University]. ScholarsArchive@OSU. Willamette Explorer

Gedney, N., Rudorff, C., & Betts, R. A. (2024). Future amazon basin wetland hydrology under projected climate change. *PLOS Water*, *3*(9), e0000225.

Gentilucci, M., Bufalini, M., Materazzi, M., Barbieri, M., Aringoli, D., Farabollini, P., & Pambianchi, G. (2021). Calculation of Potential Evapotranspiration and Calibration of the Hargreaves Equation Using Geostatistical Methods over the Last 10 Years in Central Italy. *Geosciences*, *11*(8), 348. https://www.mdpi.com/2076-3263/11/8/348

H. Hargreaves, G., & A. Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, *1*(2), 96-99. https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.26773

Hardouin, L., Decharme, B., Colin, J., & Delire, C. (2024). Climate-Driven Projections of Future Global Wetlands Extent. *Earth's Future*. https://doi.org/10.1029/2024ef004553

Ivajnsic, D., & Kaligarič, M. (2014). How to Preserve Coastal Wetlands, Threatened by Climate Change-Driven Rises in Sea Level. *Environmental management*, *54*. https://doi.org/10.1007/s00267-014-0244-8

Kikstra, J., Nicholls, Z., Smith, C., Lewis, J., Lamboll, R., Byers, E., Sandstad, M., Meinshausen, M., Gidden, M., Rogelj, J., Kriegler, E., Peters, G., Fuglestvedt, J., Skeie, R., Samset, B., Wienpahl, L., Van Vuuren, D., Van Der Wijst, K.-I., Khourdajie, A. A.,…Riahi, K. (2022). The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures. *Geoscientific Model Development*. https://doi.org/10.5194/gmd-15-9075-2022

Lasko, K., Maloney, M. C., Becker, S. J., Griffin, A. W. H., Lyon, S. L., & Griffin, S. P. (2021). Automated Training Data Generation from Spectral Indexes for Mapping Surface Water Extent with Sentinel-2 Satellite Imagery at 10 m and 20 m Resolutions. *Remote Sensing*, *13*(22), 4531. https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4531

Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H., & Varshavian, V. (2020). Study on the impact of climate change on evapotranspiration in west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(15), 722. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05715-x

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]

Naderi, M., & Saatsaz, M. (2020). Impact of climate change on the hydrology and water salinity in the Anzali Wetland, northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(4), 552-570. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1704761

Rayegani, B., Barati, S. and Hosseini Tayefeh, F. (2025). Assessment of the Intensity and Extent of Climate Change in Various Regions of Iran over the Next Two Decades. (e218195). *Environment and Interdisciplinary Development*, *10*(88), e218195 doi: 10.22034/envj.2025.506657.1470

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, *540*(7633), 418-422. https://doi.org/10.1038/nature20584

Salimi, S., Almuktar, S. A. A. A. N., & Scholz, M. (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, *286*, 112160. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160

Sam, M., Nwaogazie, I., & Ikebude, C. (2022). Climate Change and Trend Analysis of 24-Hourly Annual Maximum Series Using Mann-Kendall and Sen Slope Methods for Rainfall IDF Modeling. *International Journal of Environment and Climate Change*, 44-60. https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i230628

Shen, L., & Li, C. (2010, 18-20 June 2010). Water body extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm. 2010 18th International Conference on Geoinformatics,

Vepraskas, M. J., Skaggs, R. W., & Caldwell, P. V. (2020). Method to Assess Climate Change Impacts on Hydrologic Boundaries of Individual Wetlands. *Wetlands*, *40*(2), 365-376. https://doi.org/10.1007/s13157-019-01183-6

Zhu, J., Sun, G., Li, W., Zhang, Y., Miao, G., Noormets, A., McNulty, S. G., King, J. S., Kumar, M., & Wang, X. (2017). Modeling the potential impacts of climate change on the water table level of selected forested wetlands in the southeastern United States. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *21*(12), 6289-*6305*. https://doi.org/10.5194/hess-21-6289-2017

Zou, J., Ziegler, A. D., Chen, D., McNicol, G., Ciais, P., Jiang, X., Zheng, C., Wu, J., Wu, J., Lin, Z., He, X., Brown, L. E., Holden, J., Zhang, Z., Ramchunder, S. J., Chen, A., & Zeng, Z. (2022). Rewetting global wetlands effectively reduces major greenhouse gas emissions. *Nature Geoscience*, *15*(8), 627-632. https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.3.2.3]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.3.4]