



Projected Changes in Wind and Evaporation Patterns of the Caspian Sea under Different Climate Change Scenarios

Neda Rezavand Monfared¹ | Mehdi Mazaheri² | Seyed Mostafa Siadatmosavi³

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: n.rezavand@modares.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: m.mazaheri@modares.ac.ir

3. School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: siadatmosavi@iust.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 6, 2025

Revised: Nov. 29, 2025

Accepted: Dec. 24, 2025

Published online: Feb. 2026

Keywords:

*Caspian Sea,
Climate Change,
Climate Models,
Evaporation,
Wind Pattern*

ABSTRACT

Climate change has profound impacts on hydrological processes, with evaporation and wind patterns playing key and determining roles. In this study, using the outputs of 18 climate models from the CMIP6 project under four emission scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5), the future changes in evaporation and wind over the Caspian Sea during the period 2021–2100 were investigated. In the first step, the models' performance was evaluated against observational data for the baseline period (1980–2020), and error analysis was conducted. Subsequently, two models with the best performance, MPI-ESM1-2-HR and MIROC6, were selected for the final analysis. The results indicate that the annual average evaporation will increase in all scenarios compared to the baseline period, with an increase of approximately 11% in SSP1-2.6, 23% in SSP2-4.5, 26% in SSP3-7.0, and 31% in SSP5-8.5. This increase is more pronounced during warm seasons, especially in summer and early autumn, with monthly growth reaching up to 60% relative to the baseline. Moreover, wind patterns exhibit remarkable changes; the average wind speed in the future is projected to vary between 2 and 6 m/s, while in winter, under the influence of the Siberian high-pressure systems, values exceeding 6 m/s are recorded. These changes, by intensifying evaporation through the replacement of saturated air with dry air, will have significant consequences for hydrodynamics, circulation patterns, water balance, and vulnerable ecosystems such as the Gorgan Bay and Kara-Bukaz-Gol. The findings suggest that the combined effects of increased evaporation and altered wind regimes may seriously threaten the water level and ecological stability of the Caspian Sea. Therefore, considering these developments in regional water resource management and policy-making is essential.

Cite this article: Rezavand Monfared, N., Mazaheri, M., & Siadatmosavi, S. M. (2026). Projected changes in wind and evaporation patterns of the Caspian Sea under different climate change scenarios., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3455-3474. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403700.670021>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403700.670021>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change, as a pervasive global challenge, profoundly affects hydrological systems worldwide. The Caspian Sea, due to its landlocked nature and high sensitivity to climatic variability, is particularly vulnerable. Surface water evaporation and wind vector patterns are critical determinants of its water balance and hydrological budget. Changes in either of these factors can result in significant ecological and economic consequences.

This study aims to provide a comprehensive assessment and projection of evaporation rates and wind speed vectors over the Caspian Sea under four Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) from the CMIP6 project. Unlike previous studies that often focused on a single variable, this research analyzes the combined effects of increased evaporation and changes in wind dynamics on the Caspian Sea's water system stability. The central hypothesis posits that intensified evaporation, coupled with substantial shifts in wind speed and direction, particularly under SSP5-8.5, could lead to a significant water balance deficit and ecological threats.

Using the latest CMIP6 models and a broad ensemble of 18 validated models, this research provides robust long-term projections for 2021–2100, offering a scientific foundation for adaptation strategies and integrated water resource management.

Method

This study employs a quantitative, predictive design using a Multi-Model Ensemble (MME) approach. Data include surface evaporation rates and 10-meter wind vectors extracted from 18 selected GCMs. Analyses were conducted under the four emission scenarios to evaluate near-term (2021–2060) and long-term (2061–2100) projections. Observational data from 1980–2020 (ECMWF-ERA5) were used for model validation with metrics including MAE, Corr, and NSE. The Random Forest method was applied for bias correction and dynamic downscaling. Two models, MPI-ESM1-2-HR and MIROC6, demonstrated the highest accuracy and were selected for ensemble analysis. Periodical mean comparisons were performed across baseline, near-future, and far-future intervals to identify seasonal and long-term trends.

Results

The ensemble projections indicate significant and concerning climatic changes in the Caspian Sea. Annual mean evaporation rates show consistent increases across all SSPs: SSP1-2.6: 11%, SSP2-4.5: 23%, SSP3-7.0: 26%, SSP5-8.5: 31%, with peaks in summer and early autumn reaching 60% above baseline.

Projected wind speeds range from 2–6 m/s, occasionally exceeding 6 m/s in cold seasons due to Siberian high-pressure systems. Interestingly, the near-future period exhibits higher mean wind speeds than the far-future period, reflecting warming-induced weakening of pressure gradients. Wind direction shifts under SSP5-8.5 further amplify evaporation, with northwestern winds increasing up to 40% and southeastern winds up to 34%.

Spatial analysis reveals smaller evaporation patches in the far-future period, linked to the drying of shallow regions, including Gorgan Bay and Ghara-Baghaz Bay. Annual river inflow, notably from the Volga, is projected to decline by 20–30%, exacerbating hydrological stress.

Conclusions and Implications

The combined effects of enhanced evaporation and significant wind dynamics changes impose critical hydrological and ecological pressures. In SSP5-8.5, annual evaporation increases by 31%, peaking at 60%, while wind directional shifts (northwest 40%, southeast 34%) intensify these effects. Reduced relative humidity and enhanced dry air advection disrupt surface circulation and contribute to a serious water balance deficit. Concurrent river inflow reductions amplify desiccation in shallow areas.

Theoretical and practical implications are substantial: decreasing water levels, increasing salinity, and irreversible ecological changes threaten sensitive habitats, regional food security, and economic stability. The study underscores the necessity of active adaptation policies, integrated water management, and marine conservation strategies. Future research should focus on high-resolution Atmosphere-Ocean Coupled Models, local wind effects on evaporation, and ecological impacts on key Caspian Sea species to inform sustainable adaptation strategies.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability

Statement Data available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

پیش‌بینی تغییرات الگوهای باد و تبخیر دریای خزر تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

ندا رضواند منفرد^۱ | مهدی مظاهری^۲ | سید مصطفی سیادت موسوی^۳^۱. دپارتمان مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: n.rezavand@modares.ac.ir^۲. نویسنده مسئول، دپارتمان مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه:m.mazaheri@modares.ac.ir^۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: siadatmosavi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳	
تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: الگوی باد، تبخیر تغییرات اقلیمی، دریای خزر، مدل‌های اقلیمی.	تغییرات اقلیمی تأثیرات عمیقی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی دارد و در این میان، تبخیر و الگوهای بادی دو عامل کلیدی و تعیین‌کننده به‌شمار می‌روند. در این پژوهش، با استفاده از خروجی ۱۸ مدل اقلیمی پروژه CMIP6 و تحت چهار سناریوی انتشار (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5)، تغییرات تبخیر و باد در دریای خزر طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. در گام نخست، عملکرد مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۸۰) مقایسه و خطایابی شدند؛ سپس دو مدل با بهترین عملکرد یعنی MPI-ESM1-2-HR و MIROC6 برای تحلیل‌های نهایی انتخاب شدند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه تبخیر نسبت به دوره پایه مشاهداتی در تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت؛ به‌گونه‌ای که در سناریوی SSP1-2.6 در حدود ۱۱٪، ۲۳٪ در SSP2-4.5، ۲۶٪ در SSP3-7.0 و ۳۱٪ در SSP5-8.5 افزایش پیش‌بینی می‌گردد. این افزایش در فصول گرم، به‌ویژه تابستان و اوایل پاییز، شدیدتر بوده و در برخی ماه‌ها رشد تا ۶۰٪ نسبت به مقدار پایه مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، الگوهای باد نیز تغییرات چشمگیری را نشان می‌دهند. بر اساس سناریوهای مختلف، میانگین سرعت باد در آینده بین ۲ تا ۶ متر بر ثانیه متغیر خواهد بود. در زمستان، با تأثیر سیستم‌های پرفشار سیبری، مقادیر بالاتر از ۶ متر بر ثانیه ثبت می‌شود. این تغییرات، علاوه بر تشدید تبخیر از طریق جایگزینی هوای اشباع با هوای خشک، پیامدهای گسترده‌ای بر هیدرودینامیک، گردش جریانات، بیلان آبی و اکوسیستم‌های حساس همچون خلیج گرگان و خلیج قره‌باز خواهند داشت. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که ترکیب افزایش تبخیر و تغییر الگوهای بادی می‌تواند تراز آبی و پایداری اکولوژیک دریای خزر را به‌طور جدی تهدید کند. بنابراین، توجه به این تحولات در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای ضروری است.

استناد: رضواند منفرد، ندا؛ مظاهری، مهدی؛ سیادت موسوی، سید مصطفی (۱۴۰۴). پیش‌بینی تغییرات الگوهای باد و تبخیر دریای خزر تحت سناریوهای مختلف تغییر

اقلیم، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۴۷۴-۳۴۵۴. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403700.670021>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403700.670021>

مقدمه

گرمایش جهانی به‌طور چشم‌گیری بر عوامل مختلفی که دریای خزر را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌ویژه الگوهای تبخیر و باد، اثرگذار است؛ این اثرات در مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی شده‌اند. دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی محصور در خشکی، نوسانات قابل توجهی در سطح آب تجربه می‌کند و از این‌رو، نسبت به تغییرات اقلیمی بسیار حساس است.

تبخیر یکی از مؤلفه‌های کلیدی تراز آبی دریای خزر است. مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل‌های CMIP6 نشان می‌دهند که نرخ تبخیر به‌واسطه گرمایش جهانی افزایش قابل توجهی خواهد داشت (Samant & Prange, 2023؛ Hoseini et al., 2023). افزایش دما موجب افزایش تبخیر و در نتیجه منفی شدن تراز آبی شده و به کاهش سطح آب دریا منجر می‌شود. در یک مطالعه، با بهره‌گیری از ۱۰ مدل برتر CMIP6، برآوردهای احتمالی از تغییرات آبی تبخیر ارائه شد که نقش مهم تبخیر را به‌عنوان اصلی‌ترین مؤلفه مصرف در تراز آبی دریای خزر برجسته می‌سازد (Hoseini et al., 2023).

الگوهای باد نقش مهمی در هیدرودینامیک و فرآیند تبخیر در دریای خزر دارند؛ تغییرات در گردش جو، مانند تقویت بادهای غربی در تابستان، می‌تواند منجر به افزایش دمای هوا در منطقه دریای خزر و در نتیجه افزایش تبخیر شود. تحلیل تغییرات بین سالیانه پارامترهای اقلیمی از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۵، ارتباط بین تغییرات دریای خزر و اقیانوس‌های اطلس و آرام را نشان می‌دهند (Serykh & Kostianoy, 2020). کاهش قابل توجه سطح دریا در دهه ۱۹۳۰ احتمالاً با تقویت بادهای شرقی ناشی از تضعیف تأثیر اقیانوس اطلس شمالی مرتبط بوده که موجب کاهش بارش در حوزه آبریز دریای خزر شده است (Serykh & Kostianoy, 2020). همچنین مطالعات، کاهش معنادار آماری در سرعت باد، به‌ویژه در بادهای پاییز و زمستان را نشان می‌دهند که این امر موجب کاهش نرخ تبخیر در دوره‌هایی از افزایش سطح آب شده است (Panin & Dzuyba, 2003; Rodionov, 1994). مطالعات (Panin & Dzuyba, 2003; Rodionov, 1994) ارتباط قابل توجهی میان الگوهای گردش جو در مقیاس بزرگ و نوسانات تراز آب دریای خزر شناسایی کردند و تغییرات دهه‌ای در سطح آب را ناشی از دگرگونی در رژیم‌های باد و تبخیر دانستند. در ادامه، پژوهشگران بر نقش سامانه‌های سینوپتیکی مانند پرفشار سیبری و نوسان اطلس شمالی در تنظیم تبخیر و سرعت بادهای فصلی در حوضه خزر تأکید کردند (Serykh & Kostianoy, 2020; Ibrayev et al., 2010). مطالعات جدیدتر در چارچوب مدل‌های CMIP5 از جمله پژوهش‌های (Serykh & Kostianoy, 2020) و (Chen et al., 2021)، نشان دادند که افزایش دما و تغییر گرادیان‌های فشاری می‌تواند موجب تشدید تبخیر و هم‌زمان تضعیف چرخش‌های باد در مقیاس منطقه‌ای گردد؛ با این حال، این مطالعات به دلیل تفکیک مکانی پایین و نبود شبیه‌سازی‌های مدل‌های جو-اقیانوس محدود بوده و از نسل جدید مدل‌های CMIP6 که از لحاظ فیزیکی و دینامیکی دقیق‌تر هستند، استفاده نکرده‌اند.

شرایط باد و موج نیز تأثیر زیادی بر فعالیت‌های طوفانی در دریای خزر دارند نوسانات بلندمدت باد به‌طور مستقیم فعالیت طوفان‌ها را تحت تأثیر قرار داده و فعالیت‌های اقتصادی منطقه را نیز متأثر می‌سازد. نمودارهای گل بادی برای مناطق میانی و جنوبی دریای خزر، جهت‌های غالب باد متفاوتی را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که در دریای خزر میانی، بادهای شمال غربی و در بخش جنوبی، بادهای شمال شرقی غالب هستند (Kruglova & Myslenkov, 2023).

مدل‌های CMIP6 داده‌های حیاتی برای درک و پیش‌بینی اثرات گرمایش جهانی بر دریای خزر فراهم می‌آورند؛ این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی جنبه‌های مختلف تغییرات اقلیمی از جمله دما، بارش و تبخیر هستند و امکان بررسی سناریوهای آبی را برای پژوهشگران فراهم می‌کنند. مدل‌های CMIP6 در کل تخمین‌های مشاهداتی را در محدوده پراکندگی مجموعه مدل‌ها پوشش می‌دهند و برآوردهای واقع‌گرایانه‌ای از حساسیت سطح یخ‌های قطبی به انتشارات CO₂ و گرمایش جهانی ارائه می‌کنند (Notz & Community, 2020). با این حال، در شبیه‌سازی دمای سطح هوا، برخی سوگیری‌ها وجود دارد و در برخی موارد، مدل‌ها افزایش دما را کمتر از واقعیت برآورد می‌کنند (Yang et al., 2023). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 برای بهبود پیش‌بینی‌های اقلیمی و تدوین راهبردهای مؤثر کاهش اثرات و سازگاری با اقلیم ضروری است (Chylek et al., 2024; Eyring et al., 2024). مدل‌سازی اقلیمی چند مقیاسی نسل بعدی با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، مدل‌های سیستم زمین را ارتقا داده و به رفع خطاها و عدم قطعیت‌های موجود کمک می‌کند.

مطالعات مشابه در سامانه‌های آبی دیگر مانند دریاچه آرال (Dero et al., 2020) و خلیج فارس (Yang et al., 2023) اهمیت تحلیل هم‌زمان تبخیر و باد را تأیید می‌کنند. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بازخوردهای میان گردش جو و تبخیر سطحی می‌توانند روند خشکیدگی منطقه‌ای را تشدید کرده و پایداری اکولوژیکی را مختل کنند. با این حال، این سازوکارهای ترکیبی تاکنون برای دریای خزر به‌صورت جامع کمی‌سازی نشده‌اند. افزون بر آن، برآوردهای پیشین عمدتاً بر میانگین چند مدل محدود یا داده‌های بازتحلیل قدیمی متکی بوده و در نتیجه، با عدم قطعیت بالا در پیش‌بینی تبخیر و تغییرات باد همراه بوده‌اند.

آنچه برای دریای خزر اهمیت حیاتی دارد، بررسی این نکته است که آیا تغییرات الگوی باد و افزایش میزان تبخیر تحت تأثیر گرمایش جهانی، به روندهای فعلی شدت خواهند بخشید یا نه. این تغییرات می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در آینده سطح آب و همچنین الگوی تبخیر و گردش هوای منطقه‌ای داشته باشند. واکنش دریای خزر به افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، که به‌ویژه بر جهت و شدت بادهای و نرخ تبخیر اثرگذارند، می‌تواند الگوهای بارندگی و نوسانات اقلیمی را نیز دگرگون سازد. برای برآورد دقیق روندهای آینده، به‌ویژه پیش‌بینی‌های مرتبط با تغییرات تبخیر و جهت باد، استفاده از مدل‌های اقلیمی پیشرفته که شامل سناریوهای گوناگون افزایش دما، تبخیر و بارش هستند، امری ضروری است. این مدل‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره واکنش دریای خزر به این تغییرات اقلیمی فراهم

1 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

2 Coupled Atmosphere-Ocean

3 Wild Rose

کنند و به تصمیم گیران در تدوین سیاست‌های سازگار با محیط‌زیست یاری رسانند.

تأثیرات گرمایش جهانی بر دریای خزر دارای پیامدهای گسترده زیست‌محیطی، اقتصادی و ژئوپلیتیکی است. کاهش سطح آب دریا می‌تواند بر کانال‌های حمل‌ونقل، امنیت زیست‌محیطی و تعادل زیرساخت‌های حمل‌ونقلی تأثیرگذار باشد. ماهیت بسته و منزوی دریای خزر، آن را نسبت به اثرات گرمایش جهانی بسیار آسیب‌پذیر کرده است و منجر به بروز خسارات زیست‌محیطی شدید مانند خشک شدن تالاب‌ها حاشیه‌ای، تخریب پوشش گیاهی و زیرساخت‌های بندری می‌شود. اتخاذ تدابیر مؤثر با در نظر گرفتن ظرفیت‌ها و الزامات منطقه‌ای برای حفظ سطح آب دریای خزر و مقابله با مسائلی نظیر ملی سازی رودخانه ولگا و کانال‌های مرتبط، امری حیاتی است (Dero et al., 2020).

نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های پیشین درباره تغییرات اقلیمی و بیلان آبی دریای خزر قابل مقایسه است. به عنوان نمونه، (Ibrayev et al., 2010) تغییرات سطح آب خزر را تابعی از بارش و رواناب ورودی دانسته‌اند، در حالی که (Chen et al., 2017)، بر نقش بادهای غالب و الگوهای گردش اتمسفری در کنترل تبخیر تأکید کرده است. افزون بر آن، (Hosseini et al., 2021)، در مطالعه‌ای متمرکز بر تبخیر، تغییرات زمانی و مکانی آن را در محدوده جنوبی خزر بررسی کردند؛ اما در پژوهش حاضر، برخلاف مطالعات مذکور، با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی نسل ششم CMIP6 و روش‌های یادگیری ماشین، تغییرات هم‌زمان باد و تبخیر در مقیاس زمانی بلندمدت تحلیل شده است. این رویکرد تلفیقی، علاوه بر دقت بالاتر در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، امکان ارزیابی اثرات متقابل باد و تبخیر را فراهم آورده و نقطه تمایز اساسی این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

با توجه به روندهای کنونی، پژوهش‌های آتی می‌توانند بر چند محور کلیدی تمرکز کنند. بهبود مدل‌های اقلیمی با افزایش دقت مکانی و بازنمایی بهتر ویژگی‌های منطقه‌ای می‌تواند در پیش‌بینی دقیق‌تر واکنش دریای خزر به گرمایش جهانی مؤثر باشند. همچنین، بررسی‌های بیشتر در خصوص برهم‌کنش پیچیده بین تبخیر، الگوهای باد و سایر متغیرهای اقلیمی، به بهبود برآورد تغییرات سطح دریا کمک خواهند کرد.

در این پژوهش، با استفاده از ۱۸ مدل گردش عمومی جو زمین GCM از نسل ششم CMIP6 و تحت چهار سناریوی مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5)، رویکردی جامع و چندمدله را به کار گرفته شده است. این طراحی با بهره‌گیری از روش یادگیری ماشین برای تصحیح بایاس و اعتبارسنجی با داده‌های ERA5، امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر برای دو بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) را فراهم می‌سازند. این مطالعه به صورت هم‌زمان به بررسی فضایی و زمانی تبخیر و باد پرداخته و نشان می‌دهد که چگونه افزایش تبخیر و تغییر جهت باد به طور مشترک بر دینامیک و تراز آبی دریای خزر تأثیر می‌گذارند. تمرکز بر این دو پارامتر کلیدی به همراه بهره‌گیری از مدل‌های با تفکیک بالا مانند MPI-ESM1-2-HR و MIROC6 موجب تمایز چشمگیر این پژوهش از مطالعات پیشین مبتنی بر CMIP5 شده است. تمرکز اصلی بر درک دقیق پیامدهای اقلیمی این عوامل است تا بستر مناسبی برای تدوین راهکارهای سازگاری مؤثر فراهم شود. نتایج حاصل می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای سیاست‌گذاران محیط‌زیستی در مواجهه با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در آینده باشد.

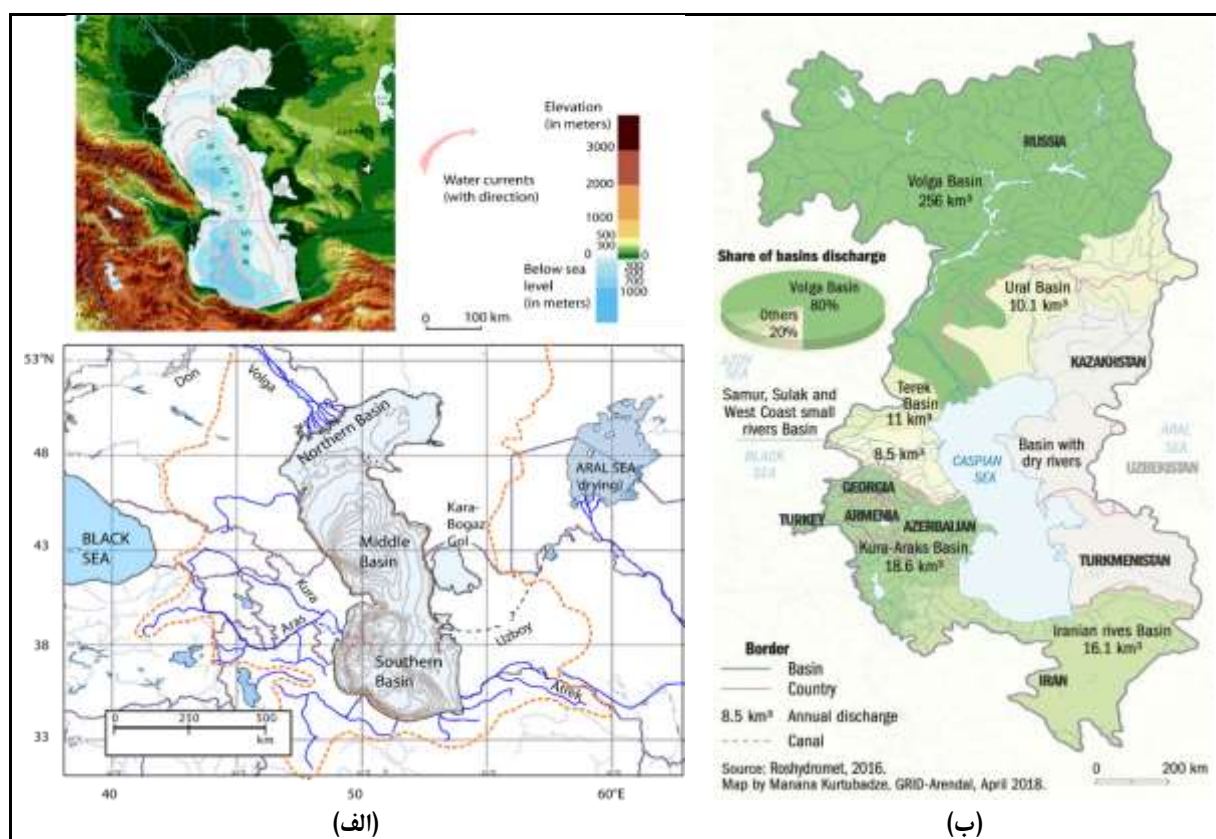
در بسیاری از مطالعات پیشین که معمولاً به یک متغیر منفرد مانند سطح آب یا دمای سطح دریا محدود بوده‌اند، این تحقیق هم‌زمان دو عامل کلیدی و به هم پیوسته یعنی تبخیر و الگوهای بادی را در چارچوب آخرین نسل سناریوهای اقلیمی و با بهره‌گیری از ۱۸ مدل معتبر CMIP6 تحلیل می‌کند. استفاده ترکیبی از این حجم گسترده داده و تفکیک زمانی بلندمدت (۲۰۲۱-۲۱۰۰) امکان ارزیابی دقیق تعاملات جو-اقیانوس در دریای خزر را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، پژوهش حاضر تصویری جامع‌تر و آینده‌نگرانه از تغییرات هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی زیست‌محیطی و تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران منطقه باشد.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مطالعاتی

دریای خزر، بزرگ‌ترین حوضه آبی بسته جهان، در مرز میان قاره‌های آسیا و اروپا واقع شده و کشورهای ایران، جمهوری آذربایجان، روسیه، قزاقستان و ترکمنستان را دربرمی‌گیرد. این دریا فاقد ارتباط هیدرولوژیکی با آب‌های آزاد بوده و سطح آن به طور میانگین ۲۸ متر پایین‌تر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد. محدوده جغرافیایی دریای خزر از شمال به سرزمین‌های روسیه و دشت قزاقستان، از شرق به فلات آسیای مرکزی، از جنوب به رشته کوه البرز و از غرب به کوه‌های قفقاز محدود می‌شود. دریای بسته خزر که هیچ ارتباطی با دریاهای آزاد نداشته

به طوری که سطح آن به طور متوسط ۲۸ متر پایین تر از سطح دریاهای آزاد است حوضه آبریز خزر با مساحتی حدود ۳/۷ میلیون کیلومترمربع، تقریباً ۱۰ برابر بزرگ تر از سطح خود دریای خزر است. دریای خزر، در محدوده عرض جغرافیایی $47^{\circ}N$ - $36^{\circ}N$ و طول جغرافیایی $48^{\circ}E$ - $55^{\circ}E$ واقع شده (Rodionov, 1994). مساحت کل این دریا ۳۸۱۰۰۰ کیلومترمربع بوده که شامل خلیج کارا باغز گل با وسعت ۱۸۰۰۰ کیلومترمربع نیز می شود. حجم دریای خزر حدود ۷۸۰۰۰ کیلومتر مکعب برآورد شده است. خط ساحلی این دریا بالغ بر ۴۴۰۰ کیلومتر است که میان کشورهای حاشیه ای آن تقسیم شده است. این دریا به سه ناحیه شمالی، میانی و جنوبی تقسیم می شود. بخش شمالی، کم عمق ترین ناحیه با عمقی بین ۵ تا ۱۰ متر است و از طریق تپه منگیشلک از ناحیه میانی جدا شده است. حوضه میانی دارای حداکثر عمق ۷۸۸ متر بوده و از طریق تپه آسفرون از حوضه جنوبی تفکیک می شود. در نهایت، ناحیه جنوبی دارای بیشترین عمق، معادل ۱۰۵۲ متر است (شکل ۱-الف) (Kostianoy et al., 2005).



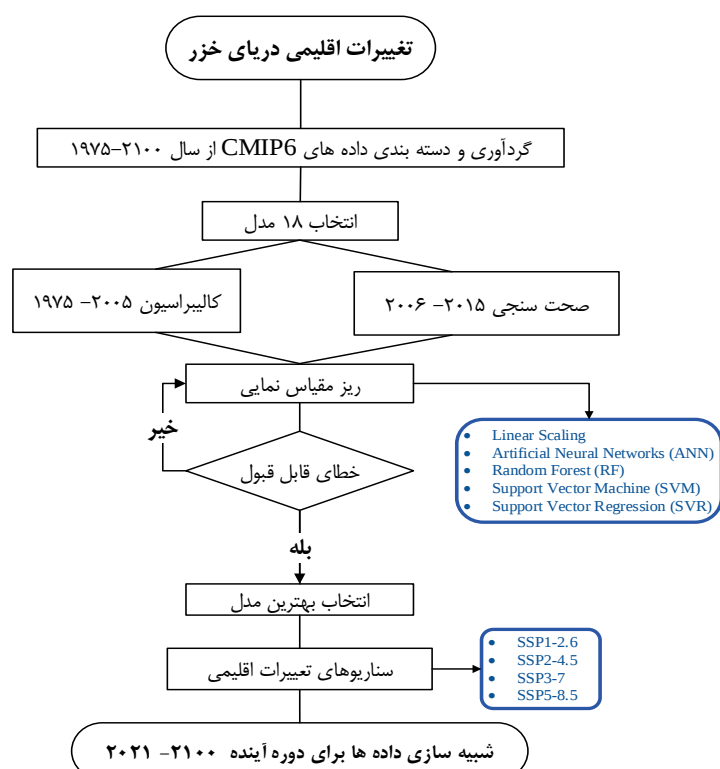
شکل ۱. الف- حوضه شمالی، میانی و جنوبی دریای خزر ب- نمای کلی دریای خزر با پنج کشور اطراف روسیه، آذربایجان، ایران، ترکمنستان و قزاقستان و حجم آب ورودی رودخانه های مهم

دریای خزر از طریق بیش از ۱۳۰ رودخانه مهم تغذیه می شود که در این میان، رودخانه ولگا با تأمین ۸۰ تا ۹۰ درصد از کل رواناب ورودی، مهم ترین منبع آب آن محسوب می شود (شکل ۱-ب) (Mischke et al., 2020). تعادل هیدرولوژیکی این دریا تحت تأثیر ورودی های رودخانه ای، بارش، تبخیر و خروجی آب به خلیج کارا باغز گل قرار دارد که مستقیماً سطح آب دریای خزر را تعیین می کند. حوضه آبریز این دریا، گستره ای از عرض جغرافیایی ۳۲ تا ۶۱ درجه شمالی را شامل شده و از لحاظ اقلیمی، تغییرات فصلی قابل توجهی را تجربه می کند. از این رو، بهره گیری از داده های اقلیمی مجموعه مدل های CMIP6، امکان شبیه سازی دقیق تری از تأثیرات تغییرات اقلیمی بر الگوی جریان باد و نرخ تبخیر در دریای خزر را فراهم می سازد. الگوی جریان باد و شدت تبخیر از عوامل کلیدی در تنظیم توازن آبی حوضه خزر محسوب می شوند که می توانند تحت تأثیر گرمایش جهانی، دچار دگرگونی های چشمگیری شوند. این رویکرد، ابزاری مؤثر برای تحلیل پیامدهای اقلیمی و تدوین راهبردهای مدیریتی جهت سازگاری با تغییرات آبی اقلیم در منطقه فراهم می آورد.

مدل تغییرات اقلیمی

مدل های گردش عمومی زمین GCM به منظور شبیه سازی تغییرات اقلیمی در دوره های مشاهداتی (۱۹۵۰-۲۰۱۴) و پیش بینی آینده

(۲۰۱۵-۲۱۰۰) از طریق پروژه CMIP6 و با استفاده از سناریوهای مختلف اجتماعی-اقتصادی^۱ (SSPs) توسعه داده شده‌اند. سناریوهای اجتماعی-اقتصادی CMIP6 شامل (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 و SSP5-8.5) هستند که هرکدام از آن‌ها مسیرهای متفاوتی از اجبار تابشی تا پایان قرن ۲۱ را توصیف می‌کنند. سناریوی SSP1-2.6 که با عنوان توسعه پایدار شناخته می‌شود، پایین‌ترین سطح تابشی (2.6 Wm^{-2}) را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که SSP5-8.5 که مبتنی بر توسعه فشرده سوخت‌های فسیلی است، بالاترین سطح تابشی (8.5 Wm^{-2}) را در نظر دارد. دیگر سناریوها نیز سطح متوسطی از اجبار تابشی را پیشنهاد می‌دهند. این متغیرها نقش مهمی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و به‌ویژه در برآورد تبخیر از سطح دریای خزر ایفا می‌کنند (O'Neill et al. 2016). در این مقاله، مدل‌های CMIP6 و اطلاعات مربوط به منابع داده‌ها را به تفصیل در (جدول ۱) ارائه شده است. در این پژوهش ۱۸ مدل از ۱۱ موسسه استفاده شده و از سناریوهای مختلف SSP شامل (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7, SSP5-8.5) برای تحلیل آینده اقلیم بررسی شده است. (شکل ۲) فلوچارت مراحل انجام کار را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوچارت مراحل انجام کار

هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی دقیق‌تر و قابل اتکا بر شرایط اقلیمی و هیدرودینامیکی دریای خزر در سناریوهای آینده، با بهره‌گیری از پیشرفته‌ترین ابزارهای علمی و روش‌های آماری بوده است. برای این منظور، تمامی مؤلفه‌های مؤثر بر وضعیت اقلیمی و هیدرولوژیکی دریای خزر از داده‌های مشاهداتی که شامل اطلاعات تبخیر و داده‌های بردار سرعت باد (U_{10} , V_{10}) در ارتفاع ۱۰ متری وضوح ۰/۲۵ درجه و گام زمانی ساعتی از پایگاه ERA5 (ECWMF*) استخراج شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس، این داده‌ها برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان، با خروجی‌های مدل اقلیمی از طریق فرآیند تصحیح و ریزمقیاس‌نمایی، تطبیق داده شدند.

در این پژوهش، روش‌های پیشرفته رگرسیونی برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی GCM مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها، با هدف شناسایی و مدل‌سازی روابط خطی و غیرخطی میان متغیرهای پیش‌بینی‌شونده اقلیمی در مقیاس محلی و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مدل‌های جهانی، به کار گرفته شده‌اند. از جمله روش‌های مورد استفاده، می‌توان به رگرسیون خطی، شبکه‌های عصبی

1 Shared Socio-economic Pathways

2 The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

مصنوعی (ANN)، و جنگل تصادفی اشاره کرد؛ روش‌های مدرن دیگری مانند ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) نیز برای مدل‌سازی غیرخطی داده‌های اقلیمی به کار گرفته شدند. این روش‌ها با توجه به قابلیت‌های پیشرفته خود در پیش‌بینی داده‌های محلی و کاهش خطاهای مدل‌های GCM، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های اقلیمی پیدا کرده‌اند. بعد از ارزیابی مدل‌ها و با در نظر گرفتن خطای هر کدام از مدل‌ها از روش جنگل تصادفی (RF)، برای زیر مقیاس‌نمایی استفاده گردید و شرایط آبی رودخانه‌ها نیز با استفاده از این روش انجام شد. جنگل تصادفی روش یادگیری ترکیبی، با ترکیب پیش‌بینی‌های چندین درخت تصمیم‌گیری، علاوه بر بهبود دقت مدل، از بیش‌برازش نیز جلوگیری می‌کند. جنگل تصادفی با انتخاب تصادفی نمونه داده‌ها و ویژگی‌ها برای هر درخت تصمیم، مجموعه‌ای متنوع از پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهد که در نهایت به یک پیش‌بینی دقیق و پایدار منجر گردیده است.

جدول ۱. فهرست مدل‌های CMIP6 به همراه تفکیک‌پذیری افقی و کشور مبدأ

Models	Institution	Resolution	Reference
ACCESS-CM2 ACCESS-ESM1-5	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی کشورهای مشترک، استرالیا	$1/25^{\circ} \times 1/875^{\circ}$	(Bi et al. 2020)
BCC-CSM2-MR BCC-ESM1	مرکز اقلیم پکن، اداره هواشناسی چین، چین	$1/125^{\circ} \times 1/125^{\circ}$	(Wu et al. 2019)
CanESM5	مرکز کانادایی مدل‌سازی و تحلیل اقلیم، کانادا	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	(Swart et al. 2019)
GFDL-CM4 GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA)، ایالات متحده آمریکا	$1^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	(Dunne 2020)
HadGEM3-GC31-LL HadGEM3-GC31-MM	مرکز هادلی وابسته به اداره هواشناسی بریتانیا (Met Office)، بریتانیا	$1/25^{\circ} \times 1/875^{\circ}$	(Andrews et al. 2020)
IPSL-CM6A-LR IPSL-CM5A2	فرانسه (IPSL) انستیتو پیر-سیمون لاپلاس	$1/26^{\circ} \times 2/5^{\circ}$	(Boucher et al. 2020)
MIROC6	دانشگاه توکیو و سازمان ژاپنی علوم و فناوری دریایی و زمین (JAMSTEC)، ژاپن	$1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$	(Tatebe et al. 2019)
MIROC-ES2L	مؤسسه ملی مطالعات محیط‌زیست و مرکز علوم محاسباتی ریکن، ژاپن	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	(Hajima et al. 2020)
MPI-ESM-1-2-HR MPI-ESM-1-2-LR	مؤسسه ماکس پلانک برای هواشناسی، آلمان	$0/9375^{\circ}$ $\times 0/9375^{\circ}$	(Mauritsen et al. 2019)
MRI-ESM2-0	مؤسسه تحقیقات هواشناسی، ژاپن	$1/125^{\circ} \times 1/125^{\circ}$	(Yukimoto et al. 2019)
NorESM2-LM NorESM2-MM	مدل پیش‌بینی اقلیم نروژ (NorCPM)، نروژ	$1/875^{\circ} \times 2/5^{\circ}$ $0/9375^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	(Seland et al. 2020)

پس از ارزیابی و انتخاب مدل بهینه، از روش جنگل تصادفی برای ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌بینی شرایط آبی رودخانه‌های منتهی به دریای خزر استفاده شد. این تحلیل شامل پنج رودخانه اصلی ولگا، اورال، ترک، سولاک و کورا و همچنین پنج رودخانه جنوبی ایران از جمله سفیدرود، پلرود و حزر بود (مشخصات کامل در جدول ۲ آمده است). با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۲۰) و سناریوهای اقلیمی آینده، میانگین دبی سالانه این رودخانه‌ها برای سه بازه زمانی دوره پایه، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) — برآورد گردید. مؤلفه‌های بیلان آب در دریای خزر، شامل ورود آب رودخانه‌ای، بارش، تبخیر، ورود آب زیرزمینی و خروج آب به خلیج قره‌بغاز است. سهم قابل توجه رودخانه ولگا با سهم ۸۰ درصدی، نشان‌دهنده اهمیت این مؤلفه در پایداری هیدرولوژیکی خزر است. تغییرات کوچک در دبی رودخانه ولگا می‌تواند تأثیرات شدیدی بر نوسانات تراز آب داشته باشد. به دلیل محدودیت داده‌های دبی ورودی رودخانه‌ها و چالش‌های اندازه‌گیری هیدرولوژیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس و سطح زمین ضروری است. مدل GLOFAS^۵، یکی از جدیدترین سیستم‌های پیش‌بینی جهانی، توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی رودخانه‌ها، پیش‌بینی سیلاب و برآورد دبی آبی ماهانه حوضه را داراست. این مدل می‌تواند به‌طور مؤثر در مدیریت منابع آبی خزر و تحلیل تغییرات تراز آب ناشی از ورودی‌های رودخانه‌ای، بارش و تبخیر نقش‌آفرینی کند و ابزاری حیاتی برای تحلیل روندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی این دریا ارائه دهد. در پژوهش حاضر اطلاعات

1 Artificial Neural Networks

2 Support Vector Machine

3 Support vector regression

4 Random Forest

5 Global Flood Awareness System



مشاهداتی دبی رودخانه‌ها تا سال ۲۰۲۰ از ایستگاه‌های اندازه‌گیری مرکز تحقیقات مازندران گردآوری شدند. برای بازه‌های فاقد داده، از داده‌های مدل جهانی GLOFAS استفاده گردید که توانایی شبیه‌سازی دقیق رواناب و دبی ماهانه حوضه را داراست. پس از ارزیابی و انتخاب مدل بهینه، روش جنگل تصادفی برای ریزمقیاس‌نمایی و پیش‌بینی شرایط آبی رودخانه‌ها به کار گرفته شد. این تحلیل پنج رودخانه اصلی (ولگا، اورال، ترک، سولاک و کورا) و پنج رودخانه جنوبی ایران را شامل می‌شود.

جدول ۲. مشخصات داده‌های مشاهداتی: داده‌های ماهانه حجم آب (کیلومتر مکعب، Km³)

حزر رود	چالوس	پلرود	سفیدرود	سولاک	ترک	کورا	اورال	ولگا	رودخانه
۳۶۵۱۷'N	۳۶۵۳۱'N	۳۶۵۶۰'N	۳۷۵۱۷'N	-	-	-	۴۷۵۴۱'N	۴۶۵۴۵'N	مختصات
۵۲۵۲۲'E	۵۱۵۲۰'E	۵۰۵۱۸'E	۴۹۵۵۶'E	-	-	-	۵۱۵۳۵'E	۴۷۵۴۸'E	
Kore Sang	Pole Zoghal	Toollat	Pole Astane	GLOFA S	GLOFA S	-	Makhambet village	V. Lebyazhe	ایستگاه
۱۹۶۰	۱۹۶۰	۱۹۶۰	۱۹۶۰	۱۹۸۰	۱۹۸۰	۱۹۵۰	۱۹۳۸	۱۹۳۸	سال شروع ثبت داده‌ها

در این پژوهش، عملکرد تمامی این روش‌ها با استفاده از داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفت و بهترین روش‌ها برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده انتخاب شدند. در این ارزیابی، معیارهای متعددی مانند ضریب همبستگی (Corr)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، و معیار نش-ساتکلیف (NSE) برای سنجش دقت مدل‌ها استفاده گردید. معیار (Corr) به‌طور خاص برای ارزیابی تطابق داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهداتی، و معیار (NSE) برای سنجش توانایی مدل در پیش‌بینی مقادیر متغیرهای اقلیمی استفاده می‌شود (روابط ۱ تا ۳). این معیارها به دلیل کاربرد گسترده در ارزیابی نتایج مدل‌های GCM، انتخاب شدند (Gupta et al., 2009; Enayati et al., 2021; Salman et al., 2020; Song et al., 2020).

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \times \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط (۱-۳)، x_i و y_i مقدار مشاهداتی داده‌ها، $\bar{x}$ میانگین مشاهداتی و $\bar{y}$ میانگین داده‌های اقلیمی و n تعداد داده‌ها هستند. معیارهای ارزیابی (NSE) و (Corr) به‌ترتیب بین منفی بی‌نهایت تا یک و بین منفی یک تا یک متغیر هستند. هرچه مقدار این شاخص‌ها به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقت و کارایی بالاتر مدل است. همچنین، شاخص (MAE) دارای واحد مشابه متغیر مورد بررسی است و هرچه مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهنده انحراف کمتر مقادیر شبیه‌سازی‌شده از داده‌های مشاهداتی و در نتیجه عملکرد بهتر مدل خواهد بود.

به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل ECMWF (ERA5) در برآورد متغیرهای اقلیمی باد و تبخیر در محدوده دریای خزر، داده‌های مدل با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه سینوپتیک ساحلی بندر انزلی مقایسه گردیدند. به دلیل محدودیت در دسترسی به داده‌های کامل تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک ساحلی حوضه خزر، تنها از داده‌های ایستگاه بندر انزلی به‌عنوان نماینده بخش جنوبی دریای خزر

استفاده شد. مقایسه آماری بین داده‌های مدل و مشاهدات ایستگاهی نشان داد که داده‌های باد ECMWF تطابق نسبتاً مناسبی با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه بندر انزلی دارند، به‌طوری که مقادیر $(Corr > 0.76)$ ، $NSE = 0.81$ و $MAE = 0.60$ محاسبه گردید. بر این اساس، داده‌های ECMWF به‌عنوان منبع معتبر و قابل‌اتکا برای تحلیل‌های اقلیمی و ورودی مدل‌سازی‌های هیدرودینامیکی دریای خزر در مقیاس حوضه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

بحث

ارزیابی مدل‌های اقلیمی و مدل‌های یادگیری ماشین

در این پژوهش، برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی تغییرات آبی تبخیر و باد در دریای خزر، از پنج مدل یادگیری ماشین شامل رگرسیون خطی، جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و شبکه عصبی (ANN) استفاده شد. داده‌ها به دو دوره‌ی کالیبراسیون و اعتبارسنجی تقسیم شدند و شاخص‌های آماری $(Corr)$ ، (NSE) و (MAE) برای ارزیابی دقت مدل‌ها محاسبه گردیدند (جدول ۳).

نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی (RF) با مقادیر $(Corr > 0.9)$ و $(NSE = 0.89)$ بهترین عملکرد را در بازسازی مقادیر مشاهده‌ای داشته است. مدل‌های (SVM) و (ANN) دقت متوسطی نشان دادند، در حالی که مدل‌های (LR) و (SVR) به دلیل ناتوانی در مدل‌سازی روابط غیرخطی، از عملکرد ضعیف‌تری برخوردار بودند. عملکرد برتر مدل (RF) ناشی از توانایی آن در ترکیب تصمیم‌چندین درخت و کاهش بیش‌برازش است که موجب افزایش پایداری و تعمیم‌پذیری مدل می‌شود. بر این اساس، مدل (RF) به عنوان روش بهینه برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی در حوضه‌ی خزر انتخاب گردید.

جدول ۳. نتایج ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی

مدل یادگیری ماشین	دوره داده	Corr	NSE	MAE
رگرسیون خطی (Linear Regression)	کالیبراسیون	۰/۸۴	۰/۷۰	۱/۹
	اعتبارسنجی	۰/۸۲	۰/۶۶	۲/۱
جنگل تصادفی (Random Forest)	کالیبراسیون	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۶
	اعتبارسنجی	۰/۹۲	۰/۸۵	۱/۸
شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	کالیبراسیون	۰/۷۲	۰/۵۰	۱/۷
	اعتبارسنجی	۰/۶۵	۰/۴۰	۱/۸
ماشین بردار پشتیبان (SVM)	کالیبراسیون	۰/۶۷	۰/۴۵	۱/۸
	اعتبارسنجی	۰/۵۴	۰/۳۰	۲/۱
رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)	کالیبراسیون	۰/۶۷	۰/۴۲	۱/۸
	اعتبارسنجی	۰/۶۴	۰/۳۶	۲/۲
شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	کالیبراسیون	۰/۷۸	۰/۶۵	۱/۶
	اعتبارسنجی	۰/۷۱	۰/۵۵	۱/۸

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازنمایی الگوهای باد و تبخیر دریای خزر، از سه شاخص آماری $(Corr)$ ، (NSE) و (MAE) مقایسه گردیدند. نتایج واسنجی (Calibration) و اعتبارسنجی (Validation) در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

بر اساس این نتایج، مدل‌های MIROC6 و MPI-ESM1-2-LR بهترین عملکرد را در میان سایر مدل‌ها نشان دادند. در دوره واسنجی، مدل MIROC6 با مقادیر $(Corr = 0.97)$ و $(NSE = 0.86)$ بالاترین همبستگی و دقت را داشت و مدل MPI-ESM1-2-LR نیز با $(Corr = 0.94)$ و $(NSE = 0.86)$ عملکرد مشابهی ارائه داد. در دوره اعتبارسنجی نیز هر دو مدل، دقت قابل‌قبولی حفظ کردند $(Corr \approx 0.84)$ و $(NSE \approx 0.50)$. در مقابل، مدل‌هایی نظیر ACCESS-ESM1_5 و MRI-ESM2_0 دارای مقادیر منفی برای شاخص



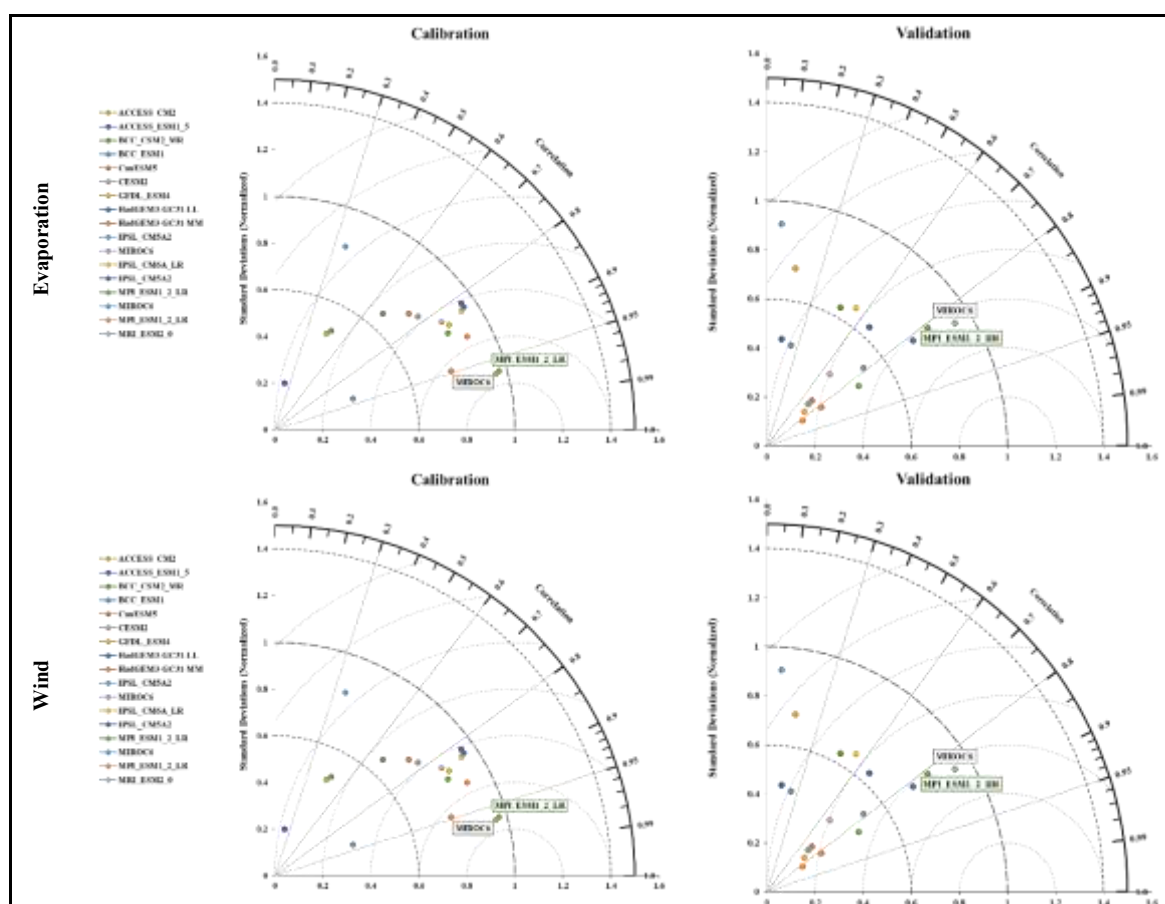
(NSE) بودند که نشان‌دهنده ضعف در بازنمایی نوسانات تبخیر و باد در منطقه خزر است. مقادیر بالای MAE در این مدل‌ها نیز بیانگر خطای زیاد میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است. نتایج کلی نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌ها تا حد زیادی به رزولوشن افقی و نحوه شبیه‌سازی برهم‌کنش جو و سطح دریا وابسته است؛ به‌ویژه مدل‌های دارای تفکیک‌پذیری بالا مانند MIROC6 ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$) و MPI-ESM1-2-HR ($0/93^\circ \times 0/93^\circ$) توانسته‌اند توزیع مکانی دقیق‌تری از باد و تبخیر در سطح دریا ارائه دهند.

جدول ۴. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی ۱۸ مدل اقلیمی CMIP6 بر اساس شاخص‌های آماری

مدل	کالیبراسیون			صحت‌سنجی		
	Corr	NSE	MAE	Corr	NSE	MAE
ACCESS_CM2	۰/۴۶	-۰/۱۵	-۱/۲۲	۰/۱۶	-۰/۴۰	۱/۴۷
ACCESS_ESM1_5	۰/۲۰	-۱/۴۲	-۰/۵۴	۰/۱۴	-۰/۸۲	۰/۸۸
BCC_CSM2_MR	۰/۶۷	۰/۱۱	-۰/۰۵	۰/۴۷	-۰/۱۲	۱/۲۸
BCC_ESM1	۰/۴۸	-۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۳۳	-۰/۳۹	-۰/۸۴
CanESM5	۰/۷۴	-۰/۱۱	۰/۶۱	۰/۷۱	۰/۲۸	۲/۱۶
MPI_ESM1_2_HR	۰/۸۳	۰/۴۷	-۰/۵۱	۰/۸۰	۰/۵۹	۱/۲۹
MPI_ESM1_2_LR	۰/۹۴	۰/۸۶	۰/۱۳	۰/۸۱	۰/۳۷	۰/۲۵
MRI_ESM2_0	۰/۳۵	-۰/۸۷	۰/۵۶	-۰/۰۷	-۱/۴۸	-۱/۰۳
CESM2	۰/۷۷	۰/۴۲	-۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۳۳	۰/۵۵
GFDL_ESM4	۰/۹۵	۰/۴۴	-۰/۱۰	۰/۵۳	۰/۴۵	۰/۹۱
IPSL_CM5A2	۰/۹۴	۰/۸۲	۰/۳۳	۰/۷۷	۰/۵۹	۱/۳۵
IPSL_CM6A_LR	۰/۸۸	۰/۷۰	۱/۸۷	۰/۷۳	۰/۴۷	۳/۴۹
MIROC6	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۱۵	۰/۸۴	۰/۵۰	۰/۰۶
MIROC_ES2L	۰/۸۴	۰/۶۵	۰/۰۹	۰/۶۶	-۰/۰۱	۲/۲۱
NorCPM1	۰/۸۹	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۸۲	۰/۴۵	-۰/۳۶
NorESM2-MM	۰/۸۳	۰/۵۹	-۰/۳۱	۰/۶۶	۰/۳۳	-۰/۷۸
HadGEM3-GC31-LL	۰/۷۵	۰/۳۱	-۳/۰۲۲	۰/۸۱	۰/۲۴	-۱/۷۱
HadGEM3-GC31-MM	۰/۸۴	۰/۳۶	۱/۶۵	۰/۷۶	۰/۱۴	۲/۲۶

برخلاف مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و MIROC6 که عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر تبخیر و باد شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی دارد، مدل ACCESS_ESM1_5 نسبت به سایر مدل‌ها از عملکرد ضعیفی در این دوره برخوردار است. پیش‌بینی تغییرات تبخیر و باد در الگوهای جریان‌های چرخشی و شوری در دریای خزر از اهمیت بالایی در مطالعات اقلیمی و مدیریت منابع آبی برخوردار است. در تحقیقات انجام شده مدل‌های اقلیمی مرحله ششم CMIP6 ابزارهای قدرتمندی برای این منظور ارائه داده‌اند. مدل MIROC6، که توسط مرکز پژوهش‌های مشترک دانشگاه توکیو و موسسه تحقیقات زمین‌شناسی ژاپن توسعه یافته، از تفکیک افقی بالا و شبیه‌سازی دقیق جریان‌های جوی و اقیانوسی بهره می‌برد (Kobayashi et al., 2020). این مدل از شبیه‌سازی دقیق‌تر نسبت به نسخه‌های پیشین خود برخوردار بوده و تأثیر تغییرات اقلیمی بر جریان‌های سطحی و چرخشی دریا را با دقت بیشتری نشان می‌دهد. مدل MPI-ESM1-2-HR نیز که توسط موسسه ماکس پلانک آلمان توسعه یافته است، قابلیت برجسته‌ای در بازنمایی فرایندهای سطحی و زیرسطحی مرتبط با شوری و جریان‌های چرخشی دارد (Mauritsen et al., 2019). این مدل به‌ویژه در شبیه‌سازی تعاملات بین اتمسفر و دریا و اثرات آن‌ها بر شوری میانگین و جریان‌های انتقالی در دریای خزر بسیار کاربردی است. در مطالعات اخیر، نتایج مدل‌های MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به تغییر در شدت و جهت جریان‌های چرخشی و همچنین افزایش ناهمگونی مکانی شوری در مناطق مختلف دریای خزر شود (Chen et al., 2021). این تغییرات می‌توانند اثرات گسترده‌ای بر زیست‌بوم دریایی و فعالیت‌های اقتصادی وابسته به دریا داشته باشند. در مجموع، ترکیب این دو مدل در چارچوب CMIP6، تصویر دقیق‌تری از تغییرات احتمالی در پارامترهای فیزیکی و شیمیایی دریای خزر ارائه می‌دهد و ابزاری ارزشمند برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و پژوهشی محسوب می‌شود. مدل‌های MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR از برجسته‌ترین‌ها هستند. پس از تحلیل و بررسی مدل‌های GCM، این دو مدل دارای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مناسبی بودند. در مجموع، بر اساس مقادیر کمی شاخص‌ها، مدل‌های MIROC6 و MPI-ESM1-2-LR به‌عنوان دو مدل برتر اقلیمی انتخاب شدند و در مراحل بعدی پژوهش برای برآورد تغییرات آینده باد و تبخیر در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰

تحت سناریوهای انتشار مختلف (SSP126، SSP245، SSP370، و SSP585) مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور بررسی جامع تر عملکرد مدل ها، از دیاگرام تیلور استفاده شد که امکان ارزیابی هم زمان سه شاخص آماری انحراف معیار، همبستگی را فراهم می سازد (شکل ۳). در این نمودار، فاصله هر مدل از نقطه مرجع (داده های مشاهداتی) نشان دهنده میزان انحراف مدل از واقعیت است. بررسی نمودار نشان داد که مدل های MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR در نزدیکی نقطه مرجع قرار گرفته اند و دارای بیشترین همبستگی و کمترین RMSD با داده های واقعی هستند. این نتایج با یافته های آماری جدول (۴) سازگار بوده و صحت انتخاب این دو مدل به عنوان مدل های برتر را تأیید می کند. در مقابل، مدل هایی نظیر MRI_ESM2_0، ACCESS_ESM1_5 و HadGEM3-LL فاصله بیشتری از نقطه مشاهداتی دارند که بیانگر خطا و انحراف بیشتر در شبیه سازی پارامترهای اقلیمی منطقه است. این اختلاف می تواند ناشی از رزولوشن پایین تر یا ضعف در بازنمایی پویایی های جو-اقیانوس در نواحی ساحلی باشد.

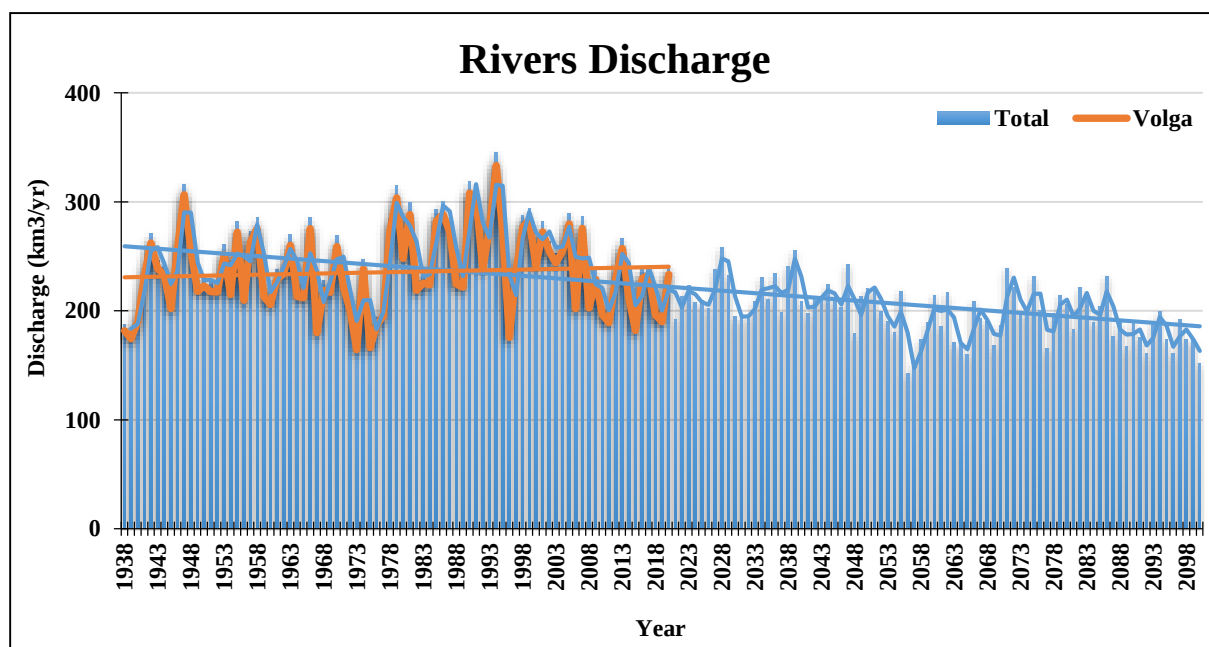


شکل ۳. برآورد خطاها برای هریک مدل های تبخیر و باد بر اساس دیاگرام تیلور

ترکیب یافته های آماری و گرافیکی نشان می دهد که مدل های MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR از دقت و پایداری بالایی در شبیه سازی تبخیر و باد سطحی دریای خزر برخوردارند. علت اصلی برتری این مدل ها را می توان در ساختار دینامیکی پیشرفته تر، الگوریتم های محاسبه تبخیر سطحی، و تعامل دقیق تر بین اقیانوس و اتمسفر جست و جو کرد. در مقابل، مدل های دارای رزولوشن پایین تر یا فاقد پارامترسازی دقیق تبادل انرژی، نتوانسته اند نوسانات اقلیمی منطقه را با دقت کافی بازسازی کنند. این نتایج اهمیت انتخاب دقیق مدل های اقلیمی در مطالعات ناحیه ای را نشان می دهد. با توجه به عملکرد برتر دو مدل مذکور، می توان از خروجی آن ها برای ریزمقیاس نمایی سناریوهای آینده اقلیمی (SSP126، SSP245، SSP370 و SSP585) و برآورد تغییرات تبخیر و باد در دوره های آتی بهره گرفت. در مجموع، یافته ها تأیید می کنند که استفاده از مدل های دارای دقت بالا در تحلیل تغییرات اقلیمی دریای خزر، موجب افزایش اطمینان در شبیه سازی روندهای بلندمدت و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی خواهد گردید.

رودخانه‌های ورودی به دریای خزر

بر اساس داده‌های تاریخی دبی رودخانه‌ها طی دوره‌ی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰، (شکل ۴) روندی کاهشی در مجموع ورودی آب به دریای خزر مشاهده می‌شود. تحلیل آماری نشان می‌دهد که میانگین ورودی سالانه کل رودخانه‌ها طی این بازه کمتر از ۵ درصد کاهش یافته است. در میان رودخانه‌های اصلی، ولگا که بیش از ۸۰ درصد آب ورودی به خزر را تأمین می‌کند، کاهش اندکی در دبی خود نشان داده است. با این حال، بر اساس پیش‌بینی‌های مبتنی بر روش جنگل تصادفی برای دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱)، میانگین دبی تمامی رودخانه‌ها کاهش قابل توجهی خواهد داشت. نتایج بیانگر کاهش ۱۱ درصدی سهم ولگا و ۲۱ درصدی کل ورودی‌ها در آینده نزدیک و کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی آن‌ها تا پایان قرن است. این یافته‌ها نشان‌دهنده تغییرات چشمگیر در رژیم هیدرولوژیکی این منطقه بوده و تأثیرات عمیقی بر منابع آبی دریای خزر خواهد داشت. تدوین استراتژی‌های جامع مدیریت منابع آبی و بهینه‌سازی مصرف آب، به‌ویژه برای مناطقی که به رودخانه‌های کوچک وابسته‌اند، از اهمیت بسیاری برخوردار است. چنین رویکردی می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی، زمینه پایداری اقتصادی و حفظ تعادل اکولوژیکی منطقه را فراهم آورد. این موضوع نیازمند همکاری‌های منطقه‌ای و بین‌المللی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی بلندمدت با هدف مقابله با پیامدهای گرمایش جهانی است.

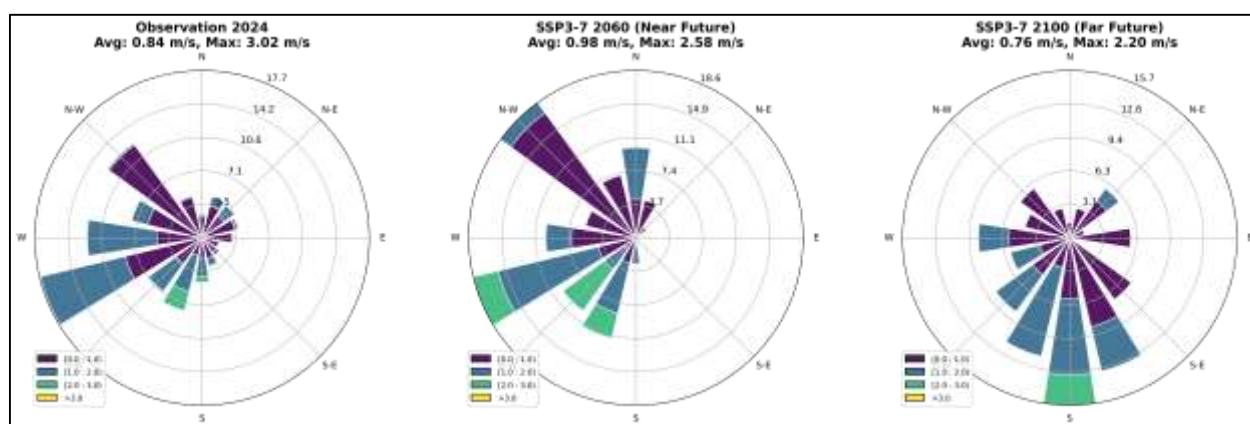


شکل ۴. میانگین سالانه ورودی رودخانه‌های دریای خزر
تحلیل آینده الگوی وزش باد دریای خزر در پاسخ به سناریوهای اقلیمی CMIP6

بررسی داده‌های مشاهداتی دوره‌ی پایه (۱۹۸۰-۲۰۲۰) نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد در دریای خزر بین ۴ تا ۶ متر بر ثانیه متغیر بوده و الگوی غالب آن تحت تأثیر سامانه‌های پرفشار سیبری و اروپای شرقی قرار دارد. در تابستان بیشترین سرعت باد در بخش شرقی و شمالی دریا مشاهده می‌شود، در حالی که در زمستان با استقرار پرفشار سیبری، بادهای شمالی و شمال‌شرقی شدت می‌یابند و مقادیر بالاتر از ۶٫۵ متر بر ثانیه در برخی نواحی ثبت شده است. (شکل ۵) بررسی تغییرات گلباد دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) نسبت به دوره پایه مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۲۰) تحت سناریوهای انتشار SSP مدل گردش عمومی جو، این نکته را آشکار می‌سازد تحت سناریوهای شدیدتر تغییرات اقلیمی مانند SSP5-8.5، که الگوی باد دستخوش تغییرات اساسی در دریای خزر می‌گردد.

پیش‌بینی‌های اقلیمی مبتنی بر مدل‌های CMIP6 در بازه ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهند که شدت و جهت باد در آینده دچار نوسانات محسوسی خواهد شد؛ به‌طوری‌که در برخی سناریوها بادهای شمال‌غربی با سهم ۴۰٪ و در برخی دیگر بادهای جنوب‌شرقی با سهم ۳۴٪ غالب می‌شوند. میانگین سرعت باد بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه متغیر بوده و در زمستان تحت سلطه سامانه پرفشار سیبری به بیش از ۶ متر بر

ثانیه می‌رسد. این تغییرات در الگوی وزش باد نه تنها بر سیرکولیشن و دینامیک آبی اثرگذارند، بلکه پیامدهای مستقیم بر تبخیر، بالا آمدگی، پایداری اکولوژیک نیز دارند.



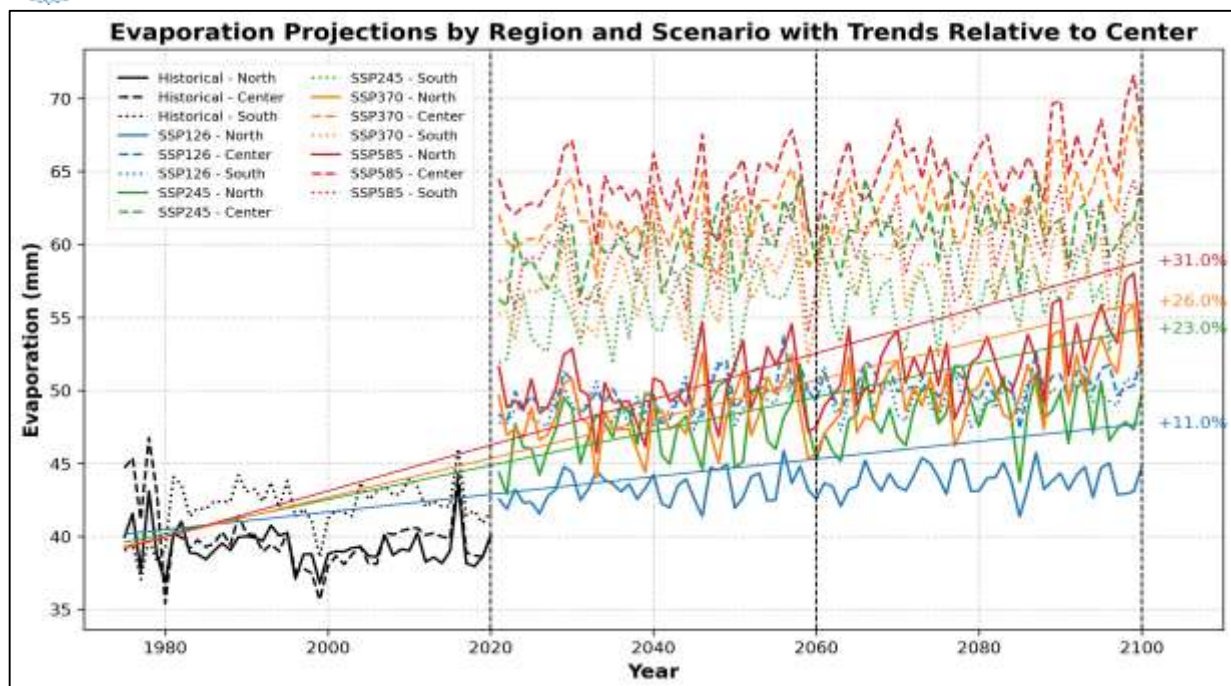
شکل ۵. گلباد دریای خزر تحت مدل CMIP6 تا افق ۲۱۰۰

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که الگوی وزش باد در دریای خزر تحت سناریوهای اقلیمی مختلف دستخوش تغییرات قابل توجهی در جهت و شدت خواهد شد. این تغییرات، اهمیت تحلیل دقیق الگوهای باد را در حوزه‌هایی چون مدیریت نوابری، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، پیش‌بینی بلایای طبیعی و سیاست‌گذاری زیست‌محیطی دوچندان می‌سازد.

تحلیل و پیش‌بینی آینده الگوی تبخیر دریای خزر در پاسخ به سناریوهای اقلیمی CMIP6

الگوی تبخیر در دریای خزر از توزیع نامتوازی برخوردار است، به‌طوری‌که در نواحی جنوبی و غربی این دریاچه، میزان تبخیر به‌مراتب بالاتر از سایر مناطق گزارش شده است. بیشینه تبخیر سالانه معمولاً در فصل پاییز، به‌ویژه در ماه سپتامبر رخ می‌دهد. بررسی داده‌های بازتحلیل ECMWF نشان‌دهنده همبستگی معناداری میان این داده‌ها و داده‌های مشاهداتی است که اعتبار آن‌ها را برای استفاده در مطالعات اقلیمی و پیش‌بینی‌های آینده تأیید می‌کند. (شکل ۶) بررسی نمودار تغییرات تبخیر دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۲۰) تحت سناریوهای انتشار SSP تغییرات شدید تبخیر از دریای خزر را نمایش می‌دهد.

بر اساس داده‌های مشاهداتی، میانگین سالانه تبخیر در منطقه برابر با ۴۹۳ میلی‌متر بوده است. مقایسه این مقدار با خروجی مدل‌های اقلیمی مختلف نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها، تبخیر افزایش یافته است. به‌طور مشخص، در سناریوی شدید SSP5-8.5 میانگین سالانه تبخیر به ۶۷۰ میلی‌متر رسیده که معادل ۳۴٪ افزایش نسبت به مقدار مشاهداتی است. تحلیل سناریوهای اقلیمی حاکی از آن است که در تابستان و پاییز، تبخیر افزایش قابل توجهی دارد و در برخی ماه‌ها تا ۶۰٪ نسبت به مقدار پایه رشد نشان می‌دهد. در ارزیابی تغییرات میانگین سالانه تبخیر تا سال ۲۱۰۰، نتایج نشان می‌دهد که این مقدار در سناریوهای مختلف به‌ترتیب برابر با ۵۵۰، ۶۰۵، ۶۲۰ و ۶۵۰ میلی‌متر برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 خواهد بود. این روند افزایشی معادل ۱۱٪، ۲۳٪، ۲۶٪ و ۳۱٪ نسبت به مقدار پایه مشاهداتی است. به‌طور کلی، سناریوهای شدیدتر مانند SSP5-8.5 بیشترین رشد در تبخیر را نشان می‌دهند، که بیانگر اثرات فزاینده تغییرات اقلیمی بر تعادل آبی منطقه است.



شکل ۶. نمودار سناریوی روند تغییرات تبخیر دریای خزر تحت مدل CMIP6 تا افق ۲۱۰۰

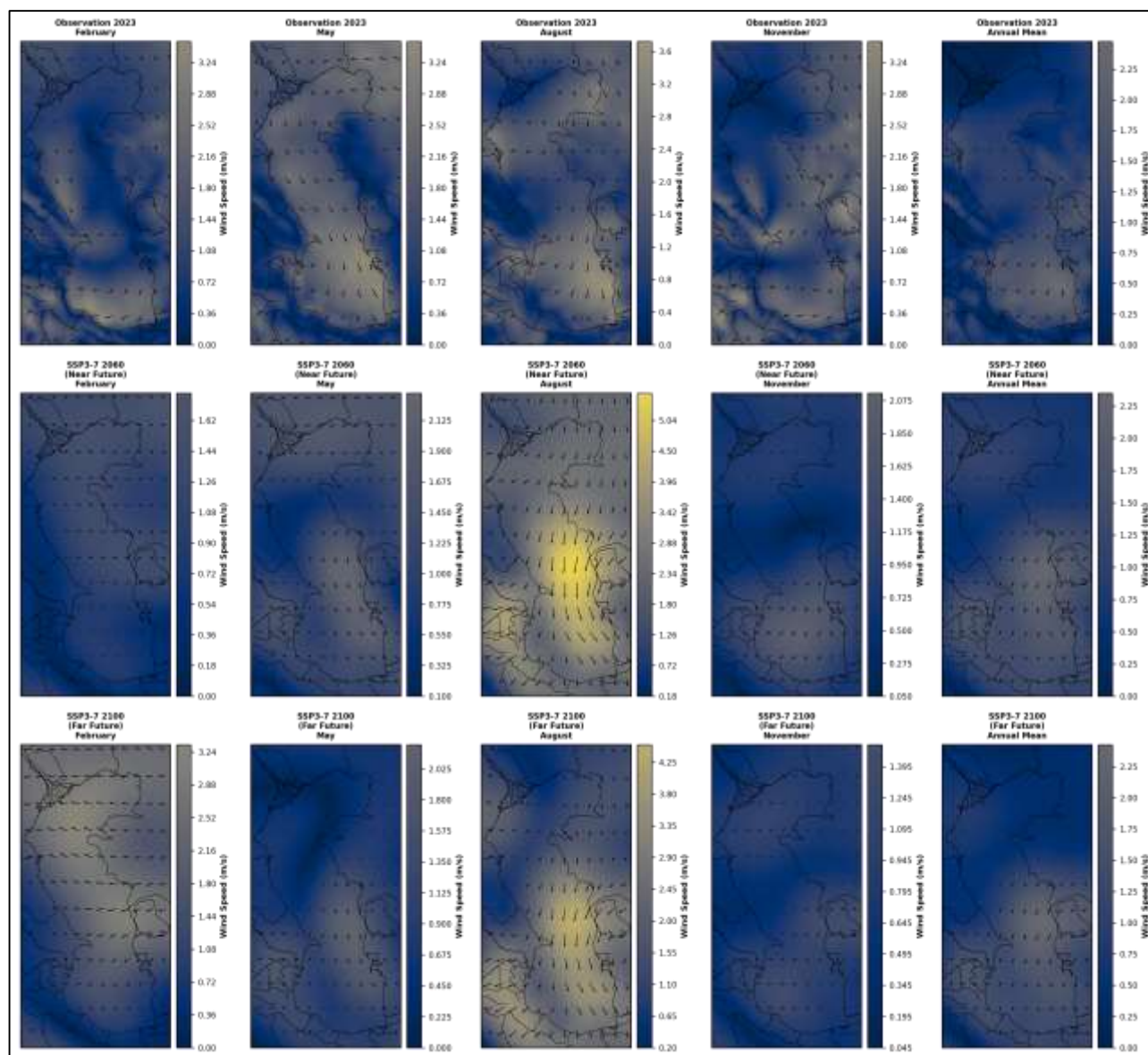
افزایش تبخیر نه تنها موجب کاهش سطح آب و برهم خوردن بیلان آبی دریای خزر می شود، بلکه آثار قابل توجهی بر هیدرودینامیک و اکولوژی آن دارد. کاهش تراز آبی ناشی از تبخیر بیشتر، شدت نوسانات سطح دریا را افزایش داده و جریان های هیدرودینامیکی را دچار تغییر می کند؛ این امر می تواند الگوهای سیرکولاسیون آب، انتقال رسوب و توزیع شوری را به طور اساسی تحت تأثیر قرار دهد. در نواحی کم عمق و حساس همچون خلیج گرگان، افت سطح آب به همراه افزایش شوری می تواند زیستگاه های ارزشمند آبزیان و پرندگان مهاجر را تهدید کرده و خطر خشکیدگی بخش هایی از این پهنه آبی را افزایش دهد. از سوی دیگر، در خلیج قره باغ که به طور طبیعی دارای شوری بسیار بالا است، تشدید تبخیر سبب افزایش غلظت نمک و تشدید جدایی هیدرولوژیکی آن از بدنه اصلی دریای خزر خواهد شد. این تحولات نه تنها بر اکوسیستم های محلی اثر گذارند، بلکه می توانند پیامدهای منطقه ای گسترده ای در زمینه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی برجای گذارند.

تحلیل و پیش بینی آینده الگو و جهت وزش باد در میزان تبخیر از سطح دریای خزر در پاسخ به سناریوهای اقلیمی CMIP6 الگوهای تبخیر در دریای خزر به شدت تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی شامل دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و به ویژه سرعت باد قرار دارند. همان گونه که در (شکل ۷) مشاهده می شود، الگوهای باد نشان دهنده تغییرات فصلی و مکانی جریان های جوی در منطقه هستند. در دوره پایه (سال ۲۰۲۳)، بادهای با شدت متوسط تا زیاد در بخش های مرکزی و جنوبی دریا غالب اند و همبستگی روشنی میان این نواحی و بیشینه های تبخیر در شکل دوم قابل شناسایی است. این هم راستایی بیانگر نقش کلیدی باد در افزایش تبخیر است، زیرا باد با برهم زدن لایه اشباع شده نزدیک سطح آب و جایگزینی آن با هوای خشک تر، گرادیان رطوبتی را تشدید کرده و تلفات آبی را به طور قابل توجهی افزایش می دهد.

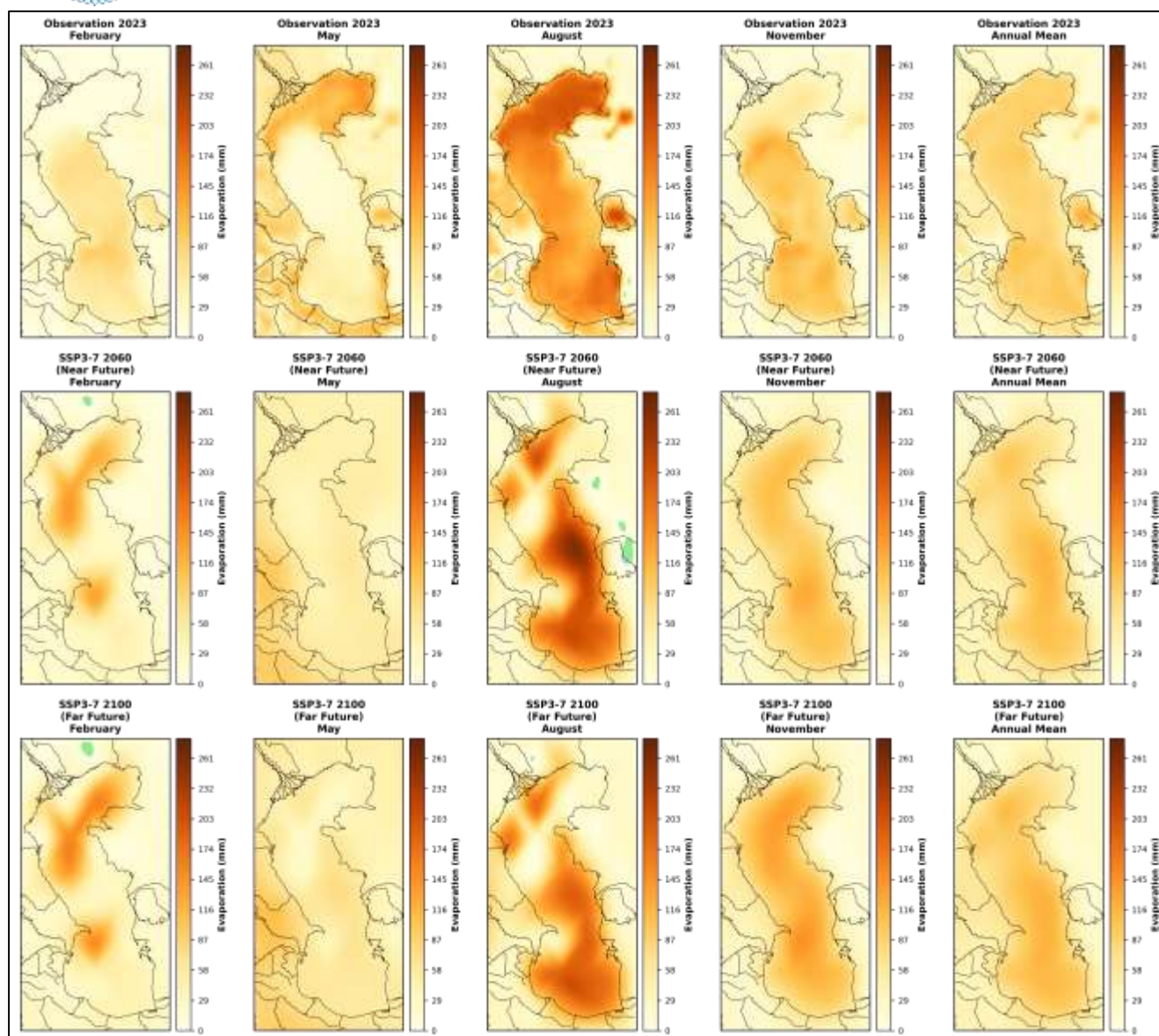
مقایسه دو دوره آینده نزدیک (۲۰۶۰) و آینده دور (۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه، تفاوت های چشمگیری را آشکار می سازد. در آینده نزدیک، شدت بادهای به طور میانگین بالاتر از آینده دور پیش بینی می شود. این پدیده عمدتاً ناشی از تداوم تضادهای حرارتی منطقه ای و وجود گرادیان های فشار محسوس تر در نیم قرن اول است. در نتیجه، نقش باد به عنوان محرک تبخیر در این بازه همچنان برجسته باقی می ماند و منجر به گسترش لکه های تبخیری با شدت بالا در بخش های وسیعی از دریا می شود.

در مقابل، در آینده دور با افزایش بیشتر دما و گرمایش عمومی جو، اختلافات حرارتی و در نتیجه گرادیان های فشار کاهش یافته و شدت بادهای روندها کاهش پیدا می کند. این تضعیف دینامیک بادی به معنای کاهش نقش مستقیم باد در تبخیر است. با این حال، دمای بالاتر به خودی خود موجب افزایش نرخ تبخیر می شود، اما توزیع فضایی آن دستخوش تغییر می گردد. همان گونه که در (شکل ۸) مشاهده

می‌شود، لکه‌های تبخیر شدید در آینده دور کوچک‌تر و متمرکزتر شده‌اند. علت اصلی این پدیده خشک‌شدن تدریجی برخی نواحی و عقب‌نشینی سطح آب خزر است؛ مناطقی که پیش‌تر دارای سطح آبی فعال بودند به خشکی تبدیل می‌شوند و از چرخه تبخیر خارج می‌گردند. برآیند این تغییرات حاکی از یک گذار اقلیمی هیدرولوژیک است؛ در آینده نزدیک، تبخیر بیشتر تحت کنترل دینامیک باد است، در حالی که در آینده دور نقش غالب به افزایش دما و کاهش سطح آب انتقال می‌یابد. این الگو نشان‌دهنده تعامل پیچیده بین اقلیم منطقه‌ای و فرآیندهای درون‌حوضه‌ای بوده و پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی تراز آبی دریای خزر دارد. به‌ویژه، نتایج تأکید می‌کنند که کاهش سطح آب در آینده دور نه تنها میزان تبخیر کل را تحت تأثیر قرار می‌دهد بلکه توزیع مکانی و پویایی آن را نیز بازتعریف می‌کند.



شکل ۷. الگوی فصلی باد در دریای خزر تحت سناریوی اقلیمی CMIP6 تا سال ۲۱۰۰



شکل ۸. تغییرات فصلی تبخیر در دریای خزر تحت سناریوی اقلیمی CMIP6 تا سال ۲۱۰۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مطالعه حاضر با استفاده از ۱۸ مدل اقلیمی پروژه CMIP6 و تحت چهار سناریوی مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5، تغییرات آینده الگوهای بادی و تبخیر دریای خزر در بازه ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ را ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند که دریای خزر، به دلیل ویژگی‌های خاص هیدرودینامیکی و حساسیت شدید به تغییرات اقلیمی، با تغییرات قابل توجهی در تعادل آبی مواجه خواهد شد.

یافته‌ها حاکی از آن است که تبخیر سالانه نسبت به مقدار پایه مشاهداتی (۴۹۳ میلی‌متر) در تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت، به‌طوری‌که در SSP1-2.6 این افزایش ۱۱٪ (۵۵۰ میلی‌متر)، در SSP2-4.5 معادل ۲۳٪ (۶۰۵ میلی‌متر)، در SSP3-7.0 برابر با ۲۶٪ (۶۲۰ میلی‌متر)، و در SSP5-8.5 به حداکثر مقدار ۳۱٪ (۶۷۰-۶۵۰ میلی‌متر) می‌رسد. این روند افزایشی به‌ویژه در فصول گرم‌تر (تابستان و پاییز) برجسته‌تر بوده و در برخی ماه‌ها تا ۶۰٪ بالاتر از دوره پایه مشاهده می‌شود.

در بخش بادی، تحلیل‌ها نشان داد که در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) سرعت باد به‌طور متوسط بالاتر از آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۰) است. علت این تفاوت به افزایش چشمگیر دمای منطقه در دوره آینده دور بازمی‌گردد، زیرا گرمایش شدید باعث کاهش شیب‌های فشاری و در نتیجه تضعیف سرعت باد می‌شود. با این حال، در سناریوهای شدیدتر مانند SSP5-8.5، تغییرات جهت باد (افزایش سهم بادهای

شمال غربی تا ۴۰٪ یا جنوب شرقی تا ۳۴٪) نقش مهمی در تشدید تبخیر ایفا می‌کند. همچنین، الگوهای مکانی تبخیر نشان می‌دهند که در آینده دور لکه‌های تبخیر کوچک‌تر شده‌اند که ناشی از خشک‌شدن تدریجی برخی نواحی کم‌عمق مانند خلیج گرگان و خلیج قره‌بغاز است.

این نتایج نشان می‌دهند که افزایش تبخیر و تغییرات باد می‌تواند به کاهش سطح آب، تغییر در بیلان آبی، افزایش شوری و دگرگونی‌های اکولوژیکی در دریای خزر منجر شود. بر این اساس، توصیه می‌شود در مطالعات آینده بر توسعه مدل‌های جو-اقیانوس با وضوح بالاتر، بررسی دقیق‌تر نقش بادهای محلی در دینامیک تبخیر، و تحلیل اثرات بر زیستگاه‌های حساس تمرکز شود. همچنین، این یافته‌ها می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری در سیاست‌های مدیریتی منطقه‌ای، به‌ویژه در زمینه سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب، قرار گیرند.

این پژوهش بر حساسیت بالای دریای خزر به تغییرات اقلیمی تأکید دارد. اهداف آینده شامل بهبود مدل‌سازی الگوهای بادی و تبخیر، با تمرکز بر تعاملات هوا-دریا و ضرایب تبادل دقیق‌تر است. پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات تبخیر و الگوهای بادی، به‌ویژه در مناطق کم‌عمق و شرقی، برای مدیریت منابع آبی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی ضروری است. این تحلیل‌ها می‌توانند مبنایی برای کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های آتی فراهم کن

REFERENCES

- Akbari, M., Baubekova, A., Roozbahani, A., Gafurov, A., Shiklomanov, A., Rasouli, K., & Haghighi, A. T. (2020). Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Journal of Coastal Research*, 36(3), 555–568. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00111.1>
- Andrews, T., Slingo, J., McDonald, A., & Williams, K. D. (2020). HadGEM3-GC31 climate model: Configuration and performance. *Geoscientific Model Development*, 13(5), 2103–2125. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2103-2020>
- Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Rashid, H., Uotila, P., ... & Puri, K. (2020). The ACCESS-CM2 coupled climate model description, control climate and evaluation. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 1–47. <https://doi.org/10.1071/ES19040>
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ... & Vuichard, N. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>
- Chen, J., Wang, Q., & Liu, Y. (2021). Impacts of climate change on Caspian Sea salinity and circulation: (CMIP6) model projections. *Journal of Marine Systems*, 221, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103799>
- Chylek, P., Lohmann, U., & Kiehl, J. T. (2024). Evaluation of (CMIP6) models for climate projections. *Climate Dynamics*, 62(3-4), 1455–1473. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07050-5>
- Dero, M., Gharbi, A., & Tarchouna, R. (2020). Environmental and geopolitical implications of Caspian Sea water level decline. *Environmental Science and Policy*, 106, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.012>
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., ... & Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model version 4 (GFDL-ESM4). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(1), e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Enayati, H., Kashi, H., & Khatibi, R. (2021). Comparative analysis of machine learning models for streamflow prediction in arid basins. *Environmental Earth Sciences*, 80, 512.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2024). Overview of (CMIP6) experimental design and climate projections. *Geoscientific Model Development*, 17(2), 879–911. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-879-2024>
- Gupta, S., Sinha, S., & Sharma, A. (2009). Climate model evaluation and applications. *Atmospheric Science Letters*, 10(3), 157–162. <https://doi.org/10.1002/asl.198>
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., Abe, M., ... & Tachiiri, K. (2020). Description of the MIROC-ES2L Earth system model and evaluation of its climate–biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*, 13(5), 2197–2244. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>
- Hosseini, S. M., Ahmadi, M., & Mohammadi, F. (2020). Assessment of evaporation changes in the Caspian Sea using satellite-based models. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1234–1245.



- Hoseini, S. M., Soltani, M., & Enayati, M. H. (2023). Projected changes in evaporation over the Caspian Sea using (CMIP6) models. *Journal of Hydrology*, 625, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.127140>
- Ibrayev, R. A., Özsoy, E., & Yetimoglu, S. (2010). *Modeling circulation and hydrography of the Caspian Sea*. Ocean Science, 6, 311–329
- Kobayashi, S., Ota, Y., & Onogi, K. (2020). MIROC6 climate model: Development and evaluation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 98(1), 1–28. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-001>
- Kruglova, O., & Myslenkov, A. (2023). Wind rose analysis for the Caspian Sea: Implications for regional hydrodynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 455. <https://doi.org/10.3390/jmse11040455>
- Mauritsen, T., Bader, J., Behrens, J., & Brokopf, R. (2019). ((MPI-ESM1-2-HR)) model description and evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 998–1034. <https://doi.org/10.1029/2018MS001400>
- Notz, D., & Community, C. (2020). Evaluation of (CMIP6) models for polar sea ice sensitivity. *Geophysical Research Letters*, 47(8), e2020GL087123. <https://doi.org/10.1029/2020GL087123>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Zwiers, F. (2016). *The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*. Geoscientific Model Development, 9(9), 3461–3482.
- Panin, G. N., & Dzyuba, A. V. (2003). *Long-term changes in the Caspian Sea level and their causes*. Water Resources, 30(5), 496–505.
- Salman, A. A., Ismail, T., & Abubakar, S. D. (2020). *Evaluation of CMIP6 GCMs for temperature and precipitation projections over the Middle East*. Theoretical and Applied Climatology, 142, 1829–1844.
- Serykh, I. V., & Kostianoy, A. G. (2020). *Climate change impact on the hydrology of the Caspian Sea region*. Continental Shelf Research, 198, 104115
- Song, S., Chen, D., & Chen, H. (2020). *Evaluation of CMIP6 models for climate simulation over Asia*. Climate Dynamics, 55, 173–187.
- Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., ... & Christian, J. R. (2019). *The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5)*. Geoscientific Model Development, 12(11), 4823–4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., ... & Ishii, M. (2019). *Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6*. Geoscientific Model Development, 12(7), 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., ... & Zhang, F. (2019). *The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6*. Geoscientific Model Development, 12(4), 1573–1600. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1573-2019>
- Wu, T., Zhou, T., & Bi, D. (2019). BCC-CSM2-MR and BCC-ESM1 climate models: Description and evaluation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(9), 1057–1074. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8276-3>
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., ... & Tsujino, H. (2019). *The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and evaluation of the physical component*. Journal of the Meteorological Society of Japan, 97(5), 931–965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Yang, Y., Zhang, L., & Li, X. (2023). Biases in (CMIP6) surface air temperature simulations over Eurasia. *Climate Research*, 86(2), 101–118. <https://doi.org/10.3354/cr01671>
- Samant, R., & Prange, M. (2023). Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from (CMIP6) projections. *Communications Earth & Environment*, 4, 357. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8>