

Assessment of Climate Change and Its Hydrological Impacts in the Maharloo Wetland Basin

Zahra Kheirandish¹, Mohammad Kaboli^{2*}, Behzad Rayegani³, Ali Akbar Nazari Samani⁴,
Bahman Jabbarian Amiri

1. Ph.D. Student, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Associate Professor, Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran.

4. Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

5. Associate Professor, Department of Regional Economics and the Environment, Faculty of Economics and Sociology, the University of Lodz, Poland.

*Corresponding Author: mkaboli@ut.ac.ir

Received date: 25/10/2025

Accepted date: 16/12/2025



[10.22034/jdmal.2025.2075714.1515](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2075714.1515)

Abstract

Climate change poses a critical challenge in arid and semi-arid regions, primarily through its adverse effects on the hydrological cycle and water availability. This study investigates historical trends in temperature and precipitation, evaluates changes in annual Water Yield (WY), and projects future climate conditions in the Maharloo Wetland Basin, Fars Province, Iran. For the historical period (1991–2022), we employed ERA5-Land and TerraClimate reanalysis datasets. Future climate projections (2021–2040) were derived from downscaled outputs of selected CMIP6 models under two Shared Socioeconomic Pathways: SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Trend analysis using the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator revealed a significant warming trend (1 °C to 3 °C) across all temperature indices—both extreme and mean—over the past three decades. Nighttime and winter warming were dominant, leading to a noticeable reduction in diurnal and seasonal temperature ranges. Annual precipitation exhibited a declining trend, with the most pronounced decrease observed in the Gharb-e-Daryacheh sub-basin, which serves as the primary water supply zone for the wetland. In this sub-basin, the reduction in annual WY was substantially greater than the decrease in precipitation, suggesting that changes in rainfall intensity and temporal distribution, along with increased evapotranspiration, have aggravated water loss. Satellite-derived imagery further corroborated the progressive shrinkage of the wetland water body area. Future climate projections indicate continued warming, ranging from 1.1 °C to 1.5 °C, alongside a slight increase in annual precipitation (3 %–6 %). However, unlike the historical period, future warming is expected to be more pronounced during daytime and summer months. If the current trajectory persists, the wetland faces an elevated risk of complete desiccation, increased saline dust storms, and accelerated land degradation. These findings underscore the urgent need for targeted climate adaptation strategies to mitigate impending environmental and socio-economic impacts in the region.

Keywords: Reanalysis data, CMIP6 models, Temperature and Precipitation, Water Yield.

How to cite this article

Kheirandish, Z. Kaboli, M. Rayegani, B. Nazari Samani, AA and Jabbarian Amiri, B. (2026). Assessment of Climate Change and Its Hydrological Impacts in the Maharloo Wetland Basin. *Desert Management*, 13(4), 47-70. DOI: [10.22034/jdmal.2025.2075714.1515](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2075714.1515)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Extended Abstract

Introduction

Climate change is a major challenge of the 21st century, impacting arid and semi-arid regions through rising temperatures, altered precipitation, and dwindling water resources (12). Reanalysis datasets like ERA5-Land and TerraClimate, known for their spatial accuracy and long-term coverage, are valuable tools for analyzing past trends in these areas (1, 18). Additionally, downscaled General Circulation Models (GCMs) enable localized climate forecasting (4, 5, 7). The IPCC Sixth Assessment Report emphasizes the importance of such data for developing adaptation strategies (16, 19). Research shows that climate warming, reduced rainfall, lower runoff, and increased evapotranspiration threaten ecological stability and water supplies (3, 8, 13, 22, 25). The Maharloo Wetland Basin, with its arid climate, reliance on seasonal rainfall, and sensitive wetland ecosystem, is highly vulnerable to these changes. Declines in water levels could cause serious environmental and human issues, including saline dust storms and desertification (10, 12, 20). This study analyzes climate trends (temperature and precipitation) from 1991 to 2022 using ERA5-Land and TerraClimate data, and evaluates future scenarios (2021–2040) based on downscaled CMIP6 model outputs, aiming to present a comprehensive view of climate impacts on Maharloo Wetland's runoff and water area.

Material and Methods

This study was carried out in the Maharloo Wetland basin in Fars Province, southern Iran (Fig. 1). To examine historical climate patterns, we used monthly precipitation and temperature data from the ERA5-Land and TerraClimate reanalysis datasets spanning 1991–2022 (18,1). These datasets were obtained through Google Earth Engine, bias-corrected with data from the Shiraz synoptic station, and compiled into annual time series. Additionally, monthly discharge data from Pol-e-Fasa hydrometric station were used to estimate annual water yield. We created annual series for precipitation, temperature, and water yield. To assess changes in the wetland's water body area, Landsat images from January or February of selected years were analyzed. Climate trends were tested using the Mann–Kendall test (Equations 1–2) for significance (24, 6, 14,15), while Sen's slope estimator (Equations 3–4) determined the rate of change (21). Future climate projections for 2021–2040 were obtained from CMIP6 GCMs under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios (11). Downscaling employed the change factor method (2), applying the differences between the baseline period (1995–2014) and future periods to bias-corrected ERA5-Land (~9 km) and TerraClimate (~4 km) data. Equations (5) and (6) were used to adjust temperature and precipitation, respectively.

Results

Analysis of the Maharloo Wetland Basin's time series from 1991 to 2022 shows a distinct warming trend paired with decreasing precipitation. The annual maximum of daily maximum temperature (TXx) increased by + 0. 0216 ° C/year, rising from 37 ° C in 1996 to nearly 41 ° C in 2022 (Fig. 2 a). Similarly, the annual minimum of daily minimum temperature (TNn) grew by + 0. 0742 ° C/year, from -11 ° C to -2 ° C (Fig. 2 b). The mean annual temperature (Tmean) also rose by + 0. 0494 ° C/year, from 16. 5 ° C to above 19. 5 ° C (Fig. 2 c). The annual mean of daily maximum and minimum temperatures (TXmean and TNmean) increased by + 0. 0527 and + 0. 0639 ° C/year, respectively, with TNmean showing the most consistent trend ($r^2 = 0. 53$) (Figs. 2 d, 2 e). Conversely, annual total precipitation (PR) decreased by - 3. 84 mm/year, from approximately 350 mm to 120–80 mm during dry years (Fig. 2 f). Sub-basin analysis revealed that Gharb- e- Daryacheh has cooler temperatures, whereas Sarvestan is warmer (Figs. 3 a, 3 c–3 e), though Goshnegan recorded higher TNn values (Fig. 3 b). Gharb- e- Daryacheh is the wettest in terms of PR, Goshnegan the driest, with Sarvestan intermediate (Fig. 3 f). Runoff decreased annually by 2. 5%, twice the rate of precipitation decline (~1. 2%), and the water body area of Maharloo Wetland shrank from 23, 000 ha (1996) to less than 16, 16,000 ha (2022) (Fig. 4, Table 1). Mann–Kendall and Sen's tests confirmed significant warming: TXx increased up to + 2. 44 ° C in the northwest, TNn up to + 3. 1 ° C in the southeast (Figs. 5 a, 5b), Tmean from + 0. 79 to + 2. 36 ° C (Fig. 5 c), and TXmean and TNmean by + 1. 93 ° C and + 2. 0 ° C, respectively (Figs. 5 d, 5 e). The sharpest PR declines occurred in Gharb-e- Daryacheh's northern and western regions (up to - 208 mm) (Fig. 5 f). Future projections under SSP 2- 4. 5 and SSP 5- 8. 5 suggest continued warming: TXx might increase by + 1. 3 to + 1. 5 ° C, especially in southern Sarvestan and the northwest of Gharb- e- Daryacheh (Fig. 6 a, Table 2). TNn is expected to rise by + 1 ° C, with the most intense warming in central and southeastern parts (Fig. 6 b, Table 2). Tmean could increase by + 1 to + 1. 2 ° C, with Sarvestan experiencing the highest warming (Fig. 6 c, Table 2). Similarly, TXmean and TNmean may go up by up to + 1. 3 ° C and + 1. 2 ° C, respectively. Sarvestan remains the warmest area, while Gharb-

e- Daryacheh remains the coolest (Figs. 6 d, 6 e, Table 2). Precipitation might slightly increase by about 6% under SSP 2- 4. 5 and around 3% under SSP 5- 8. 5, mainly in the northwest. The southeast and Goshnegan are projected to stay the driest regions (Fig. 6 f, Table 2).

Discussion and Conclusion

The findings from this study in the Maharloo wetland basin show that from 1991 to 2022, the region experienced a steady increase in temperature by 1 to 3°C and a decrease in annual rainfall by about 25% to over 73% compared to the long-term average of the study period. All temperature indicators showed upward trends, confirmed by the Mann–Kendall test and Sen's slope estimator. Notably, TNmean demonstrated consistent nighttime warming, reducing the diurnal temperature range—a pattern also observed in other semi-arid regions (13, 22, 17). In the Gharb-e-Daryacheh sub-basin, despite a 1.2% annual decrease in precipitation, runoff decreased more sharply by 2.5% annually, indicating high sensitivity to climate change. Satellite data reveal the wetland's water area shrank from 23,000 hectares in 1996 to under 16,000 hectares in 2022. Projections for 2021–2040, based on the 1995–2014 baseline, confirm ongoing warming. Under SSP2-4.5, temperatures are expected to rise by 1.0 to 1.1°C, and under SSP5-8.5, by approximately 1.2 to 1.5°C. Interestingly, future warming is predicted to be more pronounced during the day, in contrast to historical trends in which nighttime warming prevailed—this aligns with findings from similar studies (10, 12, 25). Total annual precipitation may increase by about 6% under SSP2-4.5 and by around 3% under SSP5-8.5. Overall, if current trends persist, the region's climate is becoming warmer and drier, potentially causing further declines in water levels in the Maharloo Wetland, increased salt dust, and intensified desertification in southern Iran.

Keywords: Reanalysis data; CMIP6 models; Temperature and precipitation; Water Yield.

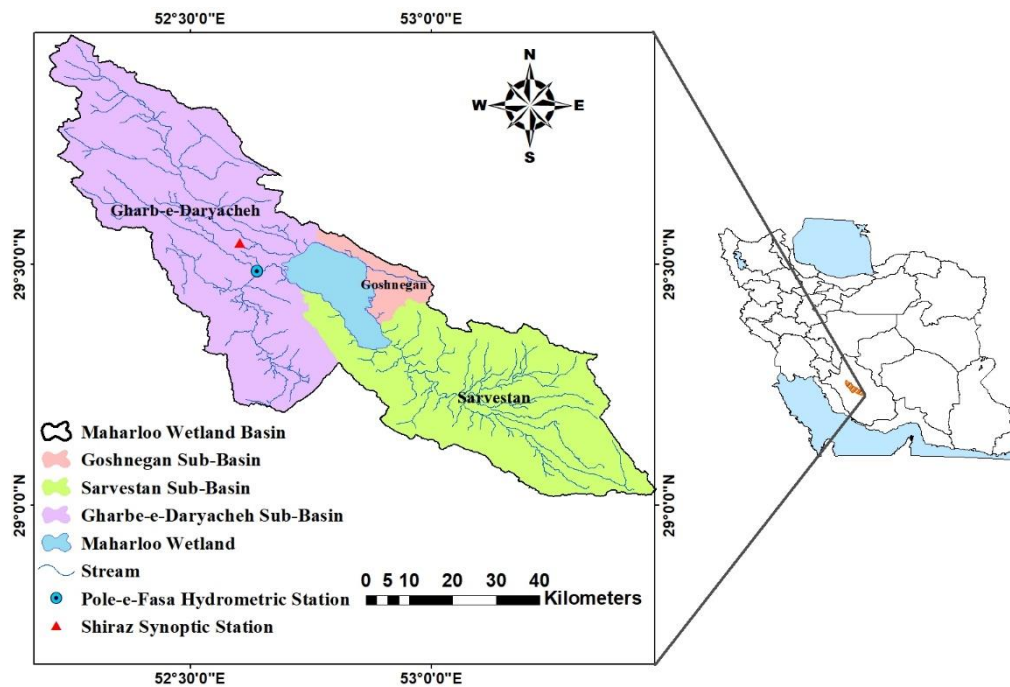


Fig 1. Location of the study area

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\binom{n}{2}} = \frac{n_c - n_d}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad \text{Equation (1)}$$

$$Z = \tau \times \sqrt{\frac{n(n-1)}{\tau(\tau n + \delta)}} \quad \text{Equation (2)}$$

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad 1 \leq k < j \leq n \quad \text{Equation (3)}$$

$$Q_{\text{Sen}} = \text{Median}(Q_i) \quad \text{Equation (4)}$$

$$T_{\text{future, downscaled}} = T_{\text{baseline, obs}} + \Delta T_{\text{GCM}} \quad \text{Equation (5)}$$

$$P_{\text{future, downscaled}} = P_{\text{baseline, obs}} \times \left(1 + \frac{\Delta P_{\text{GCM}}}{100} \right) \quad \text{Equation (6)}$$

τ : Kendall's rank correlation coefficient, n_c : Number of concordant pairs, n_d : Number of discordant pairs, n : Total number of observations, Z : Standardized test statistic, τ : Kendall's rank correlation coefficient, n : Total number of observations, Q_i : Slope between time points j and k ($^{\circ}\text{C}/\text{year}$ or mm/year), x_j : Value of the climatic variable in year j ($^{\circ}\text{C}$ or mm), x_k : Value of the climatic variable in year k ($^{\circ}\text{C}$ or mm), n : Total number of years, Q_{Sen} : Sen's slope estimator ($^{\circ}\text{C}/\text{year}$ or mm/year), $\text{Median}(Q_i)$: Median of all calculated slopes Q_i (same unit as Q_i), $T_{\text{future, downscaled}}$: Downscaled future temperature ($^{\circ}\text{C}$), $T_{\text{baseline, obs}}$: Bias-corrected observed baseline temperature ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_{GCM} : Absolute change in temperature between future and baseline periods from the GCM ($^{\circ}\text{C}$), $P_{\text{future, downscaled}}$: Downscaled future precipitation (mm), $P_{\text{baseline, obs}}$: Bias-corrected observed baseline precipitation (mm), ΔP_{GCM} : Relative change in precipitation between future and baseline periods from the GCM (%).

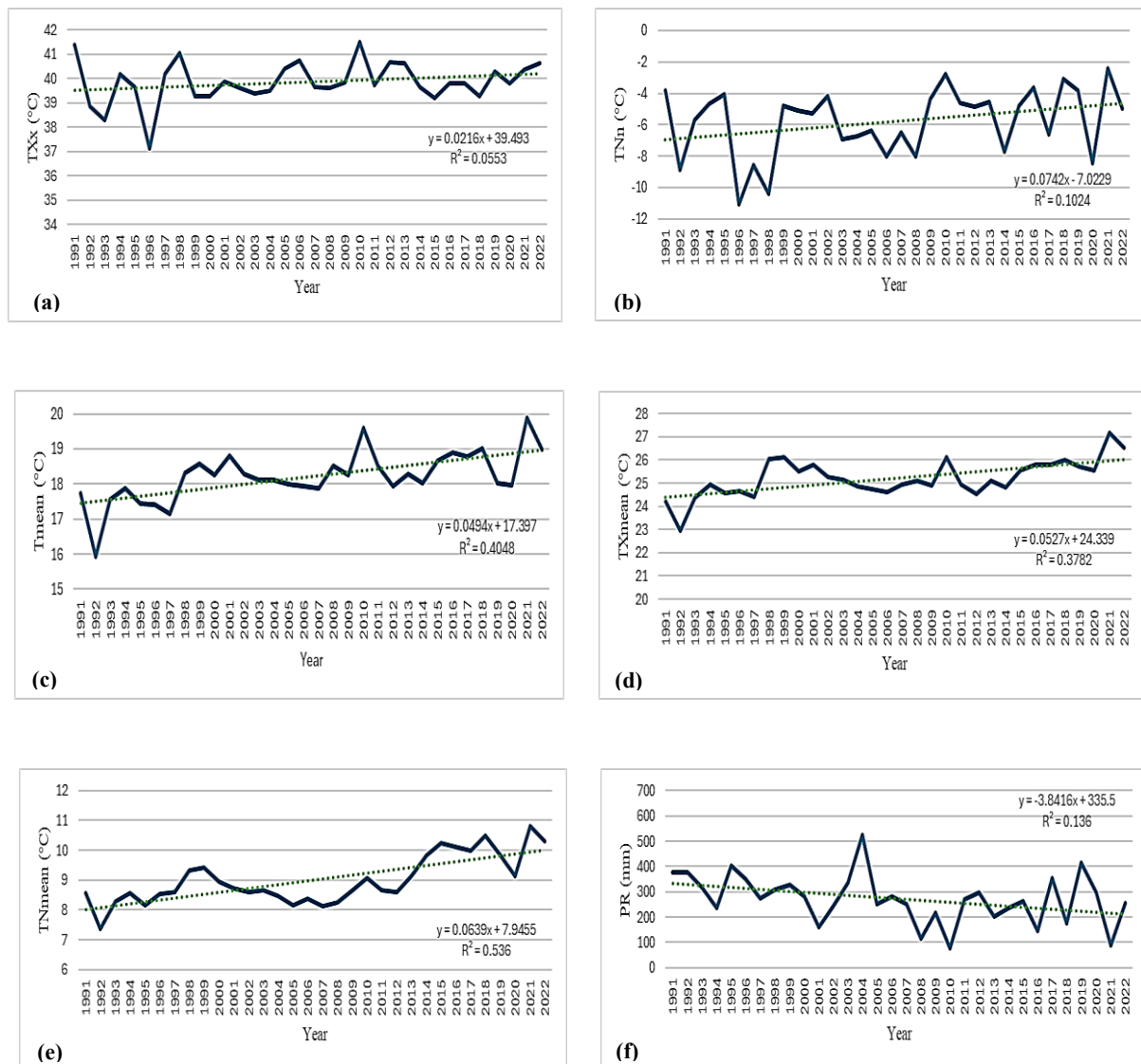


Fig 2. Time series of (a) annual maximum of daily maximum temperature (TXx), (b) annual minimum of daily minimum temperature (TNn), (c) annual mean temperature, (d) annual mean of daily maximum temperature (TXmean), (e) annual mean of daily minimum temperature (TNmean) and (f) annual total precipitation (PR) in the Maharloo Wetland Basin during 1991–2022



Fig 3. Time series of (a) annual maximum of daily maximum temperature (TXx), (b) annual minimum of daily minimum temperature (TNn), (c) annual mean temperature, (d) annual mean of daily maximum temperature (TXmean), (e) annual mean of daily minimum temperature (TNmean) and (f) annual total precipitation (PR) in the Gharb-e-Daryacheh, Sarvestan, and Goshnegan sub-basins during 1991–2022

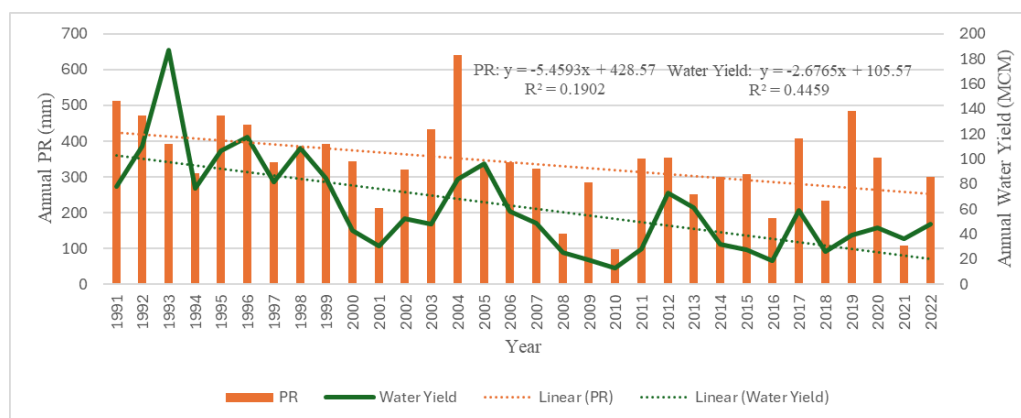


Fig 4. Time series and comparative analysis of Annual Precipitation (PR) and Annual Water Yield in the Gharb-e-Daryacheh sub-basin during 1991–2022

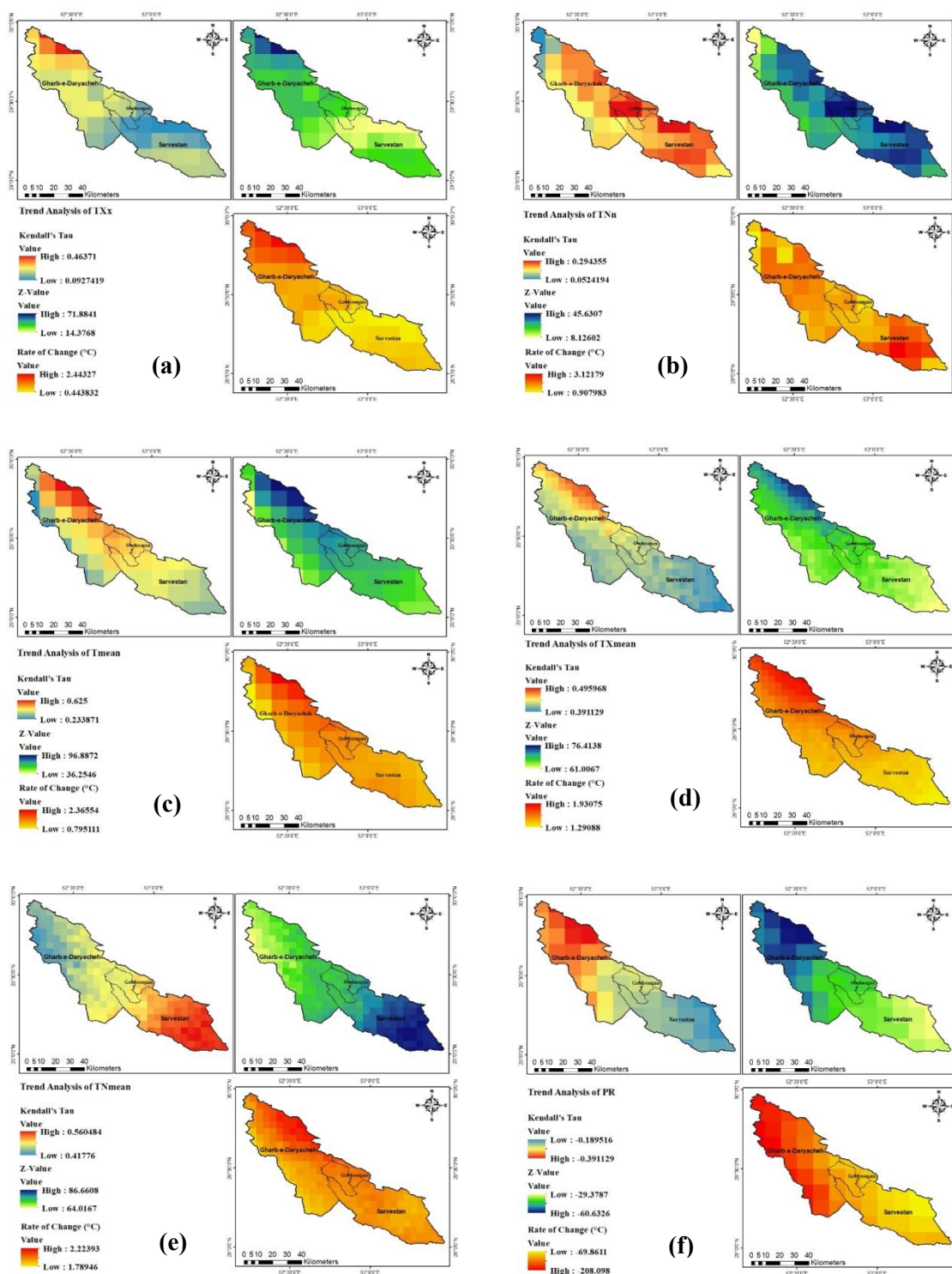


Fig 5. Trend, statistical significance, and rate of change in (a) annual maximum of daily maximum temperature (TXx), (b) annual minimum of daily minimum temperature (TNn), (c) annual mean temperature, (d) annual mean of daily maximum temperature (TXmean), (e) annual mean of daily minimum temperature (TNmean) and (f) annual total precipitation (PR) based on the Mann–Kendall and Sen’s slope tests during 1991–2022

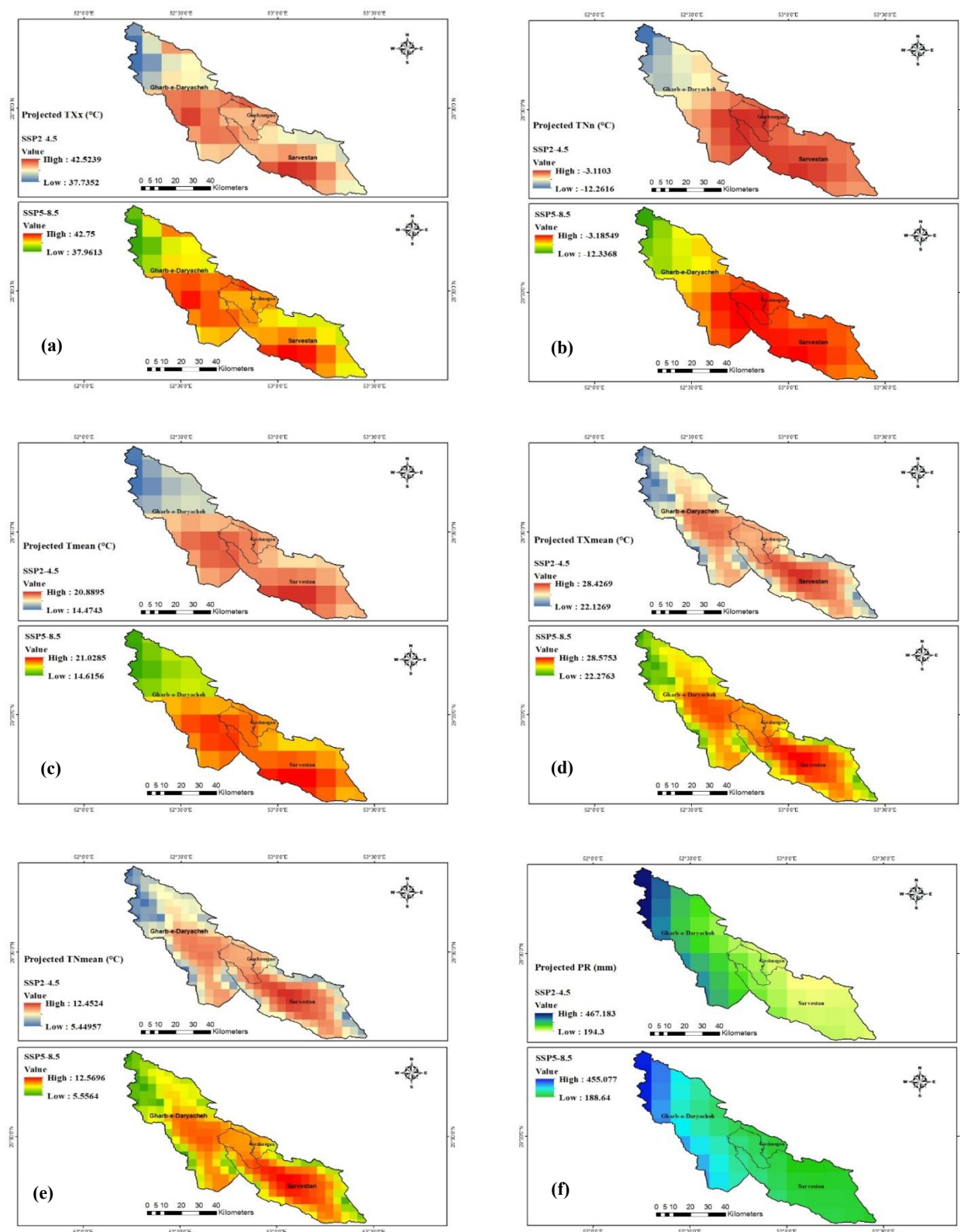


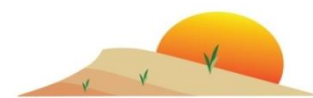
Fig 6. Projected (a) annual maximum of daily maximum temperature (TXx), (b) annual minimum of daily minimum temperature (TNn), (c) annual mean temperature, (d) annual mean of daily maximum temperature (TXmean), (e) annual mean of daily minimum temperature (TNmean) and (f) annual total precipitation (PR) over the Maharloo Wetland Basin for the next 20 years, based on downscaled climate model outputs under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

Table 1. water body area of Maharloo Wetland in selected years during 1991–2022

Year	water body area (ha)
1996	23114
2002	20662
2007	19568
2013	17299
2022	15886

Table 2. Projected changes in temperature and precipitation variables over the next 20 years under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emission scenarios

Emission Scenario	TXx (°C)	TNn (°C)	Tmean (°C)	TXmean (°C)	TNmean (°C)	PR (%)
ssp2-4.5	1.294 - 1.336	1.006 - 1.047	1.074 - 1.075	1.106 - 1.143	1.077 - 1.095	5.919 - 6.157
ssp5-8.5	1.520 - 1.553	0.907 - 0.931	1.213 - 1.214	1.255 - 1.291	1.184 - 1.212	3.064 - 3.174



بررسی تغییر اقلیم و پیامدهای هیدرولوژیک آن در حوزه آبخیز تالاب مهارلو

زهرا خیراندیش^۱، محمد کابلی^{۲*}، بهزاد رایگانی^۳، علی اکبر نظری سامانی^۴، بهمن جباریان امیری^۵

۱. دانشجو دکتری گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. استاد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. دانشیار، گروه پژوهشی ارزیابی و مخازات محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران.

۴. استاد، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۵. دانشیار، گروه اقتصاد منطقه‌ای و محیط زیست، دانشکده اقتصاد و جامعه‌شناسی، دانشگاه لودز، لهستان.

* نویسنده مسئول: mkaboli@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵



[10.22034/jdmal.2025.2075714.1515](https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2075714.1515)

چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با برهم زدن چرخه آب، منابع آبی را به شدت زیر تأثیر قرار می‌دهد. هدف پژوهش حاضر، تحلیل روند گذشته دما و بارش، ارزیابی تغییرات حجم آبدی سالانه و بررسی چشم‌انداز اقلیم آینده در حوزه آبخیز تالاب مهارلو استان فارس است. با بررسی روند اقلیم گذشته توسط داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و TerraClimate در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱) و ریزمقیاس‌نمایی آنها، خروجی مدل‌های منتخب CMIP6 برای آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (۱۴۰۰-۱۴۱۹) زیر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شد. آزمون‌های من-کندال و شیب سن نشان دادند که تمامی شاخص‌های دمایی شامل حدی و میانگین در سه دهه گذشته روند افزایشی بین ۱°C تا ۳°C داشته‌اند. در این میان، گرمایش شبانه و زمستانی غالب بود و موجب کاهش دامنه دمایی شبانه‌روزی و فصلی شده است. بارش سالانه نیز کاهشی بود و بیشترین افت در زیرحوضه غرب دریاچه، به عنوان منطقه اصلی تأمین‌کننده آب تالاب مهارلو، برآورد شد. در این بخش، کاهش حجم آبدی سالانه نسبت به کاهش بارش محسوس‌تر بود، که می‌تواند ناشی از تغییر در شدت و توزیع زمانی بارش‌ها و افزایش تبخیر و تعرق باشد. بررسی تصاویر ماهواره‌ای نیز روند کاهش سطح پیکره آبی تالاب را تأیید می‌کند. پیش‌بینی‌های اقلیمی، تداوم گرمایش بین ۱/۱°C تا ۱/۵°C و افزایش جزئی بارش بین ۳٪ تا ۶٪ را نشان می‌دهند، با این تفاوت که در آینده گرمایش روزانه و تابستانی شدیدتر خواهد بود. تداوم روند فعلی می‌تواند به خشکیدگی تالاب، افزایش گردوغبار شور و تشدید تخریب‌سرزمین در منطقه شود و لزوم تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمی را دوچندان می‌کند.

واژگان کلیدی: داده‌های بازتحلیل؛ مدل‌های اقلیمی نسل ششم؛ دما و بارش؛ حجم آبدی.

استناد به این مقاله

خیراندیش، زهرا، کابلی، محمد، رایگانی، بهزاد، نظری سامانی، علی اکبر و جباریان امیری، بهمن. (۱۴۰۴). بررسی تغییر اقلیم و پیامدهای هیدرولوژیک آن در حوزه آبخیز تالاب مهارلو. مدیریت بیابان، ۱۳(۴)، ۴۷-۷۰. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2071597.1511](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2071597.1511)



■ مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن بیست و یکم، پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی و بوم‌سازگان‌ها دارد. افزایش میانگین دمای جهانی حدود $1/1^{\circ}\text{C}$ از دوران پیش‌صنعتی تاکنون و احتمال عبور آن از $2/5^{\circ}\text{C}$ تا پایان قرن، همراه با نوسانات در الگوی بارش، نشان‌دهنده ابعاد فراگیر و پیچیده این پدیده در مقیاس جهانی است (۱۲).

در سال‌های اخیر، داده‌های بازتحلیل^۱ اقلیمی مانند ERA5-Land و TerraClimate، که بر پایه ترکیب مشاهدات و مدل‌سازی عددی تولید می‌شوند، به عنوان منابعی قابل اعتماد برای بررسی ویژگی‌های اقلیمی در مقیاس محلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. ERA5-Land با وضوح مکانی حدود ۹km و داده‌های زمانی از دهه‌های اخیر، امکان تحلیل روندهای دما و بارش را در مناطق دارای کمبود داده فراهم می‌کند (۱۸). همچنین، داده‌های TerraClimate با وضوح بیشتر حدود ۴km، قابلیت زیادی در بازنمایی الگوهای اقلیمی گذشته دارند (۱).

برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده، مدل‌های گردش عمومی جو^۲ ابزار اصلی است (۷). هرچند وضوح مکانی به نسبت اندک این مدل‌ها محدودیت‌هایی برای تحلیل‌های محلی ایجاد می‌کند، اما استفاده از خروجی‌های تعدیل‌شده و بومی‌سازی‌شده آنها امکان بررسی روندهای اقلیمی در مقیاس حوضه ای و محلی را فراهم کرده‌است (۴، ۵). گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۳ نیز در آخرین ارزیابی خود، ضمن ارائه تصویری جامع از روندهای جهانی، استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی را برای تدوین سیاست‌های سازگاری اقلیمی ضروری می‌داند (۱۶، ۱۹). از طرف دیگر پژوهش‌های پیشین در زمینه تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک نشان‌دهنده افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش و این تغییر نه تنها تهدیدی برای تعادل بوم‌شناختی این مناطق است، بلکه با کاهش رواناب سطحی و افزایش تبخیر و تعرق، پیامدهای مستقیمی بر کشاورزی، امنیت غذایی و منابع آب خواهد

داشت (۳، ۸، ۱۳، ۲۲، ۲۵). همچنین تغییر الگوی بارش به سمت رخداد‌های کوتاه‌مدت و شدید، خطر وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد و با تشدید خشکی و کاهش بارش‌های مؤثر، زمینه برای تخریب زیست‌بوم‌ها و تخریب سرزمین فراهم می‌کند (۱۰، ۱۲، ۲۰). این شرایط اهمیت بررسی دقیق روندهای اقلیمی در مقیاس حوزه‌های آبخیز را دوچندان می‌سازد تا به توان با شناخت واقع‌بینانه از گذشته و آینده، راهکارهای سازگاری مؤثر را طراحی کرد.

حوزه آبخیز تالاب مهارلو در استان فارس، با توجه به اقلیم خشک، وابستگی شدید منابع آبی به بارش‌های فصلی و وجود تالاب پلایایی مهارلو، یکی از مناطق آسیب‌پذیر در برابر تغییرات اقلیمی است. کاهش بارش و افزایش دما می‌تواند تراز آبی تالاب را به شدت زیر تأثیر قرار دهد. افت سطح آب تالاب، با توجه به ماهیت شور آن، قابلیت زیادی برای تولید گردوغبار شور، تخریب پیرامون و ایجاد بحران‌های محیط‌زیستی و بهداشتی دارد.

هدف پژوهش حاضر، تعیین تغییر در متغیرهای دما و بارش و پیامد آن بر مقدار رواناب تولیدی در حوزه آبخیز تالاب مهارلو است. بدین منظور، از تحلیل داده‌های ERA5-Land و TerraClimate برای دوره تاریخی ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰) و از ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های منتخب پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم^۴ تحت سناریوهای مختلف برای پیش‌بینی‌های آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (۱۴۱۹-۱۴۰۰) بهره‌گیری شد. این رویکرد ترکیبی، با تلفیق داده‌های مشاهداتی با کیفیت و خروجی‌های گروهی مدل‌های CMIP6، تحلیل جامعی از تغییرات اقلیم و پیامدهای آن بر حجم آبدی و کاهش سطح پیکره آبی تالاب مهارلو ارائه می‌دهد تا مبنای علمی معتبری را برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری اقلیمی در این حوزه آبخیز حساس فراهم کند.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

حوزه آبخیز تالاب مهارلو در استان فارس، با مساحتی حدود ۴۲۶۹km^۲، در فاصله عرض جغرافیایی

^۱ Reanalysis Dataset^۲ General Circulation Models (GCMs)^۳ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)^۴ Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

استفاده از داده مشاهداتی در ریز مقیاس نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی، داده‌های ماهانه پس از تصحیح اریبی به مقیاس زمانی سالانه تبدیل شدند.

همچنین از داده‌های دبی رودخانه باباجی در ایستگاه هیدرومتری پل فسا واقع در زیرحوضه غرب دریاچه استفاده شد. این داده‌ها به صورت ماهانه در دسترس بودند و پس از تجمیع زمانی به داده‌های سالانه تبدیل شدند تا امکان مقایسه با بارش سالانه و تحلیل حجم آبدی سالانه فراهم شود.

داده‌های اقلیم آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (۱۴۱۹-۱۴۰۰)

برای پیش‌بینی آینده، از داده‌های دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به عنوان یا انتشار میانگین و خیلی زیاد مدل‌های اقلیمی نسل ششم یعنی CMIP6 که در اطلس تعاملی IPCC ارائه شده‌اند، استفاده شد (۱۱). این داده‌ها به صورت میانگین چندمدلی یا رویکرد گروهی، با هدف کاهش عدم قطعیت مدل‌ها آماده شده‌اند. در این پایگاه، متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (۱۴۱۹-۱۴۰۰) نسبت به دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ (۱۳۹۳-۱۳۷۴) به صورت تغییر نسبت به دوره پایه، محاسبه و ارائه شده‌اند. خروجی مربوط به دما به صورت اختلاف مطلق بر حسب °C و برای بارش به صورت تغییرات نسبی بر حسب % است.

تحلیل اقلیم گذشته

بررسی سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی بارش و دما

به منظور بررسی سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی در مقیاس‌های مختلف مکانی، داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و TerraClimate در سطح کل حوزه آبخیز تالاب مهارلو به صورت شبکه‌ای بررسی شد و سپس برای هر سال، میانه مکانی متغیرها در کل حوضه و همچنین در هر یک از زیرحوضه‌های فرعی (غرب دریاچه، سروستان و گشنگان) محاسبه شد. در پایان، سری‌های زمانی سالانه برای کل حوضه و زیرحوضه‌ها استخراج شد تا روند کلی تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های مختلف مکانی قابل ارزیابی

۲۹°۵۸'۴۸" تا ۲۹°۰۱'۳۷" شمالی و طول جغرافیایی ۵۳°۲۷'۵۸" تا ۵۳°۱۵'۰۷" شرقی قرار دارد و از نظر اقلیمی، در محدوده کمربند خشک و بیابانی نیمکره شمالی قرار گرفته است. وابستگی منابع آب سطحی و زیرزمینی به بارش‌های فصلی و تغییرات دمایی، اهمیت پایش و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در این منطقه را دوچندان کرده است. بر اساس تقسیم‌بندی ارائه‌شده توسط وزارت نیرو، این حوضه شامل سه زیرحوضه اصلی با نام‌های گشنگان، سروستان و غرب دریاچه است که در پژوهش حاضر به صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفتند. تنها ایستگاه همدیدی (سینوپتیک) فعال با داده‌های کامل و بلندمدت ایستگاه شیراز و تنها ایستگاه هیدرومتری دارای داده‌های پیوسته دبی ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۳۷۰-۱۴۰۱) پل فسا است (شکل ۱).

داده‌ها

داده‌های تاریخی ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)

برای تحلیل اقلیم گذشته، داده‌های ماهانه بارش و دما ERA5-Land و TerraClimate در دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰) از طریق سامانه Google Earth Engine استخراج شد. ERA5-Land محصول مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی^۱ با وضوح مکانی حدود ۹km و بازه زمانی ساعتی تا ماهانه است (۱۸). TerraClimate پایگاه داده ماهانه با وضوح مکانی تقریباً ۴km است که داده‌های بازتحلیل را با مشاهدات ایستگاهی و داده‌های ماهواره‌ای ترکیب می‌کند (۱).

داده‌های بازتحلیل مورد استفاده، پیش از تحلیل با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک شیراز، صحت‌سنجی و تصحیح اریبی شدند. داده‌های ماهانه دما شامل میانگین دما، کمینه و بیشینه مطلق از پایگاه ERA5-Land و میانگین بیشینه و کمینه دما از پایگاه TerraClimate هستند. برای متغیر بارش نیز، از داده‌های ماهانه پایگاه ERA5-Land بهره‌گیری شد. در پایان، برای تحلیل روند اقلیم، بررسی سری‌های زمانی و همچنین

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

باشد.

$$Z = \tau \times \sqrt{\frac{9n(n-1)}{2(2n+5)}} \quad (2)$$

که در آن Z آماره آزمون معنی‌داری، τ ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال و n تعداد داده‌های سری زمانی است.

نرخ تغییرات سالانه دما و بارش با روش شیب سن^۲

برای برآورد نرخ تغییرات سالانه متغیرهای اقلیمی، پس از تعیین معنی‌داری روند، از برآوردگر شیب سن به صورت شبکه‌ای استفاده شد. این روش ناپارامتری، نرخ تغییرات خطی سری زمانی را تخمین می‌زند (۲۱). ابتدا شیب همه جفت نقاط زمانی محاسبه می‌شود (رابطه ۳):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad 1 \leq k < j \leq n \quad (3)$$

که در آن Q_i شیب بین دو نقطه j و k بر حسب $^{\circ}\text{C}/\text{year}$ یا mm/year ، مقدار در سال j بر حسب $^{\circ}\text{C}$ یا mm ، مقدار در سال k بر حسب $^{\circ}\text{C}$ یا mm و n تعداد کل سال‌ها است.

سپس مقدار میانه این شیب‌ها به عنوان نرخ تغییر انتخاب می‌شود (رابطه ۴):

$$Q_{\text{Sen}} = \text{Median}(Q_i) \quad (4)$$

که در آن Q_{Sen} نرخ تغییر برآوردی و $\text{Median}(Q_i)$ میانه تمام شیب‌ها بر حسب $^{\circ}\text{C}/\text{year}$ یا mm/year است.

پیش‌بینی اقلیم آینده و ریزمقیاس‌نمایی

برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های آینده و انطباق پیش‌بینی‌های اقلیمی با مقیاس محلی، از روش آماری عامل تغییر^۳ استفاده شد (۹، ۲۴). در این روش، تغییرات پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های اقلیمی جهانی بین دوره آینده نزدیک ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۱۴۱۹-۱۴۰۰) و دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵ (۱۳۹۳-۱۳۷۴) محاسبه و به داده‌های اقلیمی با وضوح زیاد که داده‌های تصحیح اریبی شده ERA5-Land و TerraClimate هستند، اعمال می‌شود.

تغییرات بارش، آبدهی و سطح پیکره آبی تالاب مهارلو

برای مقایسه روند بارش و حجم آبدهی، از داده‌های دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری پل فسا که بر روی رودخانه باباجی در زیرحوضه غرب دریاچه واقع شده و داده‌های بازتحلیل بارش سالانه همان زیرحوضه در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱) بهره‌گیری شد. حجم آبدهی سالانه، از تبدیل داده‌های دبی با واحد m^3/s به حجم سالانه آبدهی با واحد MCM محاسبه شد. همچنین برای بررسی تغییرات مساحت پیکره آبی تالاب مهارلو، از تصاویر ماهواره‌ای لندست‌های ۵، ۷ و ۸ ماه‌های ژانویه یا فوریه (دی یا بهمن) برای دوره مطالعاتی استفاده شد. این ماه‌ها به طور معمول بالاترین سطح آب تالاب را در طول سال ثبت می‌کنند.

روند تغییرات دما و بارش با آزمون من-کندال^۱

برای شناسایی روندهای یکنواخت در سری‌های زمانی سالانه، از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد (۱۴، ۱۵). محاسبه ضریب τ در محیط Google Earth Engine انجام شد، که در آن متغیر مستقل زمان (به صورت رتبه‌های متوالی) و متغیر وابسته دما و بارش بود. اساس کار آزمون بر شمارش جفت‌های هم‌سو و ناهم‌سو استوار است؛ به‌طوری‌که مقدار τ مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی یا غلبه جفت‌های هم‌سو و مقدار τ منفی نشان‌دهنده روند کاهشی یا غلبه جفت‌های ناهم‌سو است (رابطه ۱). سپس مقدار τ به آماره استاندارد شده Z تبدیل می‌شود تا معنی‌داری آماری روند ارزیابی شود (رابطه ۲، ۶، ۲۴).

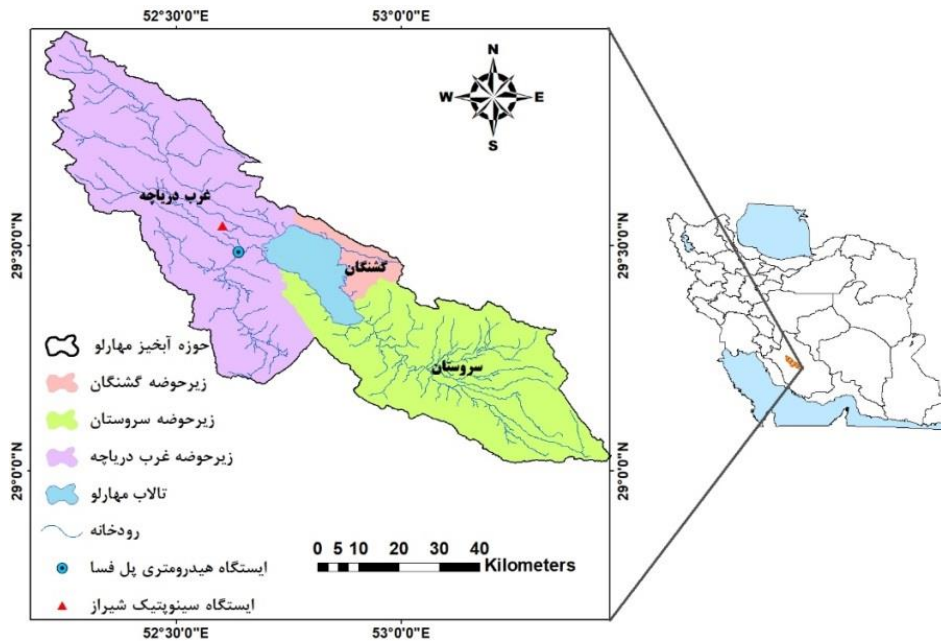
$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\binom{n}{2}} = \frac{n_c - n_d}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (1)$$

که در آن τ ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال، n_c تعداد جفت داده‌های هم‌سو، n_d تعداد جفت داده‌های غیرهم‌سو و n تعداد کل داده‌ها است.

^۲ Sen's Slope

^۳ Change Factor or Delta Method

^۱ Mann-Kendall trend test



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

وضوح حدود ۹km برای داده های ERA5-Land و حدود ۴km برای داده های TerraClimate تولید شد.

■ نتایج

بررسی سری های زمانی متغیرهای دما و بارش

بررسی سری زمانی حداکثر دمای مطلق نشان داد که در کل حوزه آبخیز تالاب مهارلو طی سه دهه اخیر روندی مثبت و افزایشی با مقدار شیب مثبت $0.216^{\circ}\text{C}/10$ در سال وجود داشته است. دامنه تغییرات واقعی این شاخص بین حدود 37°C به عنوان کمینه ثبت شده در سال ۱۹۹۶ (۱۳۷۵) تا حدود 40°C - 41°C در سال های اخیر متغیر بوده است (شکل ۲- الف). در مقیاس زیرحوضه ای نیز، زیرحوضه غرب دریاچه به طور معمول خنک تر و دارای مقادیر پایین تر حداکثر دمای مطلق نسبت به سایر بخش ها بوده است، در حالی که زیرحوضه های سروستان و گشنگان گرم تر بوده و در برخی سال ها دماهای بالاتر از 41°C را تجربه کرده اند (شکل ۳- الف).

در متغیر کمینه دمای مطلق، نتایج نشان دهنده گرم تر شدن شب های بسیار سرد طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۹۱ (۱۴۰۱-۱۳۷۰) با شیب مثبت $0.742^{\circ}\text{C}/10$ در سال است. پایین ترین مقدار در سال های ۱۹۹۶

مزیت این روش، سادگی محاسبه، نیاز به داده های کم و حفظ ویژگی های آماری داده های پایه است، هرچند فرض می کند که تغییر اقلیمی آینده به صورت خطی به داده های پایه اضافه یا ضرب می شود (۲).

معادلات روش عامل تغییر برای دما و بارش به صورت زیر است (معادلات ۵ و ۶):

$$\text{برای دما به صورت تغییر مطلق بر حسب } ^{\circ}\text{C} \text{ (رابطه ۵):}$$

$$T_{\text{future, downscaled}} = T_{\text{baseline, obs}} + \Delta T_{\text{GCM}} \quad (5)$$

که در آن $T_{\text{future, downscaled}}$ مقدار دمای آینده ریزمقیاس شده بر حسب $^{\circ}\text{C}$ ، $T_{\text{baseline, obs}}$ مقدار دمای پایه (داده مشاهداتی تصحیح شده) بر حسب $^{\circ}\text{C}$ و ΔT_{GCM} تغییر دما بین آینده و پایه از مدل GCM بر حسب $^{\circ}\text{C}$ است. برای بارش به صورت تغییر نسبی بر حسب % (رابطه ۶):

$$P_{\text{future, downscaled}} = P_{\text{baseline, obs}} \times \left(1 + \frac{\Delta P_{\text{GCM}}}{100}\right)$$

که در آن $P_{\text{future, downscaled}}$ مقدار بارش آینده ریزمقیاس شده بر حسب mm، $P_{\text{baseline, obs}}$ مقدار بارش پایه (داده مشاهداتی تصحیح شده) بر حسب mm و ΔP_{GCM} تغییر بارش بین آینده و پایه از مدل GCM بر حسب % است.

خروجی پایانی پیش بینی ها به صورت ریزمقیاس شده با

شبانه‌روزی دما یکی از ویژگی‌های بارز اقلیم اخیر حوضه است (شکل ۲- ث). در سطح زیرحوضه‌ها، سروستان بیشترین مقادیر میانگین دمای کمینه و غرب دریاچه پایین‌ترین را داشته است که نشان‌دهنده‌ی شب‌های معتدل‌تر در سروستان و شب‌های سردتر در غرب دریاچه است (شکل ۳- ث).

برخلاف شاخص‌های دمایی، بارش سالانه روند کاهشی را در سطح کل حوضه نشان داد و مقدار شیب $3/84 \text{ mm}$ در سال برآورد شد. این ارقام بیانگر کاهش تدریجی بارش سالانه طی دوره است، هرچند نوسان سالانه بارش زیادست. مقدار بارش در آغاز دوره حدود 350 mm بود، بیشینه برجسته در حوالی سال 2004 (1383) به مقدار حدود 530 mm مشاهده می‌شود، اما کمینه‌های بارش در سال‌های خشک 2008 (1387)، 2010 (1389) و 2021 (1400) به حدود 80 mm - 120 رسیده است (شکل ۲- ج). همچنین زیرحوضه غرب دریاچه و گشنگان به ترتیب پربارش‌ترین و کم‌بارش‌ترین است (شکل ۳- ج).

تغییر بارش، آبدهی و سطح پیکره آبی تالاب مهارلو

بررسی نمودار روند تغییرات بارش سالانه و حجم آبدهی سالانه در دوره ۱۹۹۱ تا 2022 ($1401-1370$) نشان می‌دهد که هر دو متغیر در این بازه زمانی دارای روند کاهشی بوده‌اند؛ با این حال، نرخ کاهش حجم آبدهی به صورت نسبی، بیشتر از بارش است. محاسبه درصد کاهش نسبت به سال‌های آغازین دوره نشان می‌دهد که کاهش سالانه حجم آبدهی در حدود $2/5\%$ ، تقریباً دو برابر کاهش بارش سالانه در حدود $1/2\%$ است (شکل ۴).

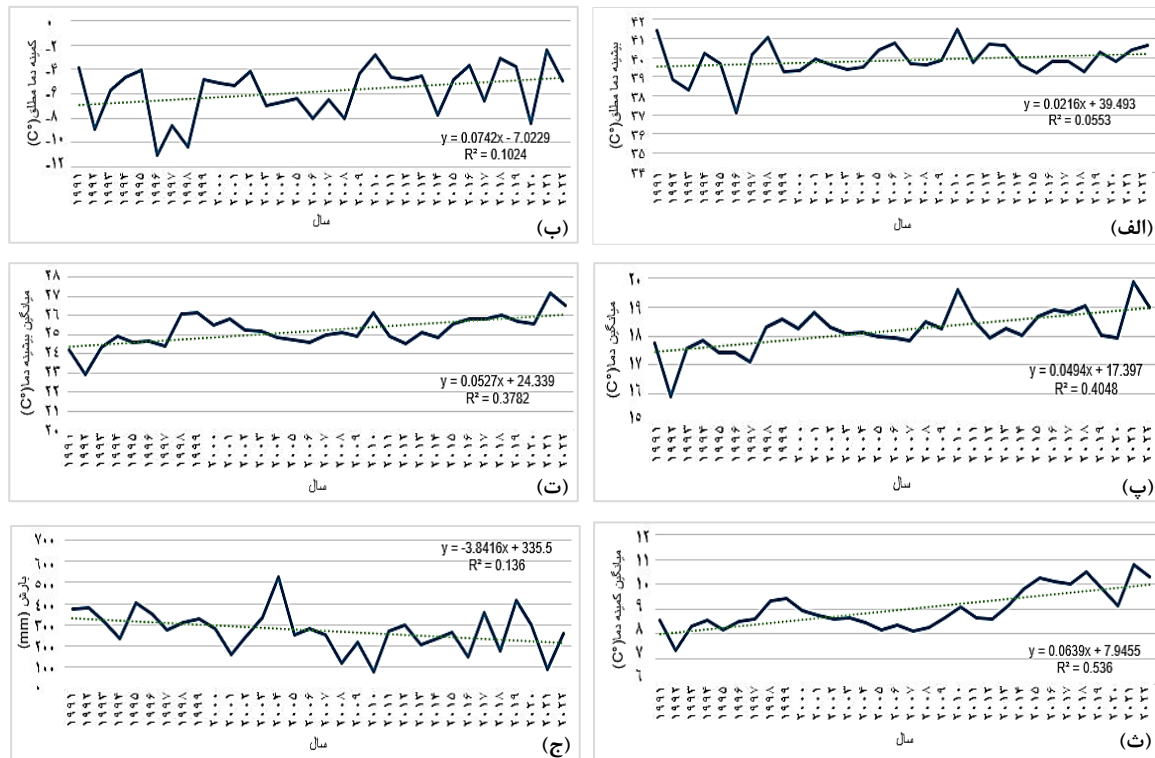
مقدار مساحت پیکره آبی تالاب مهارلو از تصاویر ماهواره‌ای لندست ژانویه یا فوریه (دی یا بهمن) برای پنج سال منتخب دوره مطالعاتی استخراج گردید (جدول ۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود، مساحت پیکره آبی تالاب مهارلو کاهش شدیدی داشته‌است که همراستا با کاهش حجم آبدهی و افزایش دما در منطقه است.

(1375) و 1998 (1377) حدود 10°C - تا 11°C - ثبت شده است. در سال 2021 (1400) مقدار به نزدیک 2°C - رسید که یکی از گرم‌ترین سال‌های دوره است. بنابراین ضمن وجود نوسان‌های شدید، روند کلی به سمت گرم‌تر شدن شب‌ها و زمستان‌ها است (شکل ۲- ب). زیرحوضه غرب دریاچه معمولاً پایین‌ترین دماهای حداقلی را داشت و سردترین بخش حوضه است، درحالی‌که سروستان و به‌ویژه گشنگان دماهای حداقلی بیشتری را ثبت کرده‌اند و شب‌های گرم‌تری را تجربه می‌کنند (شکل ۳- ب).

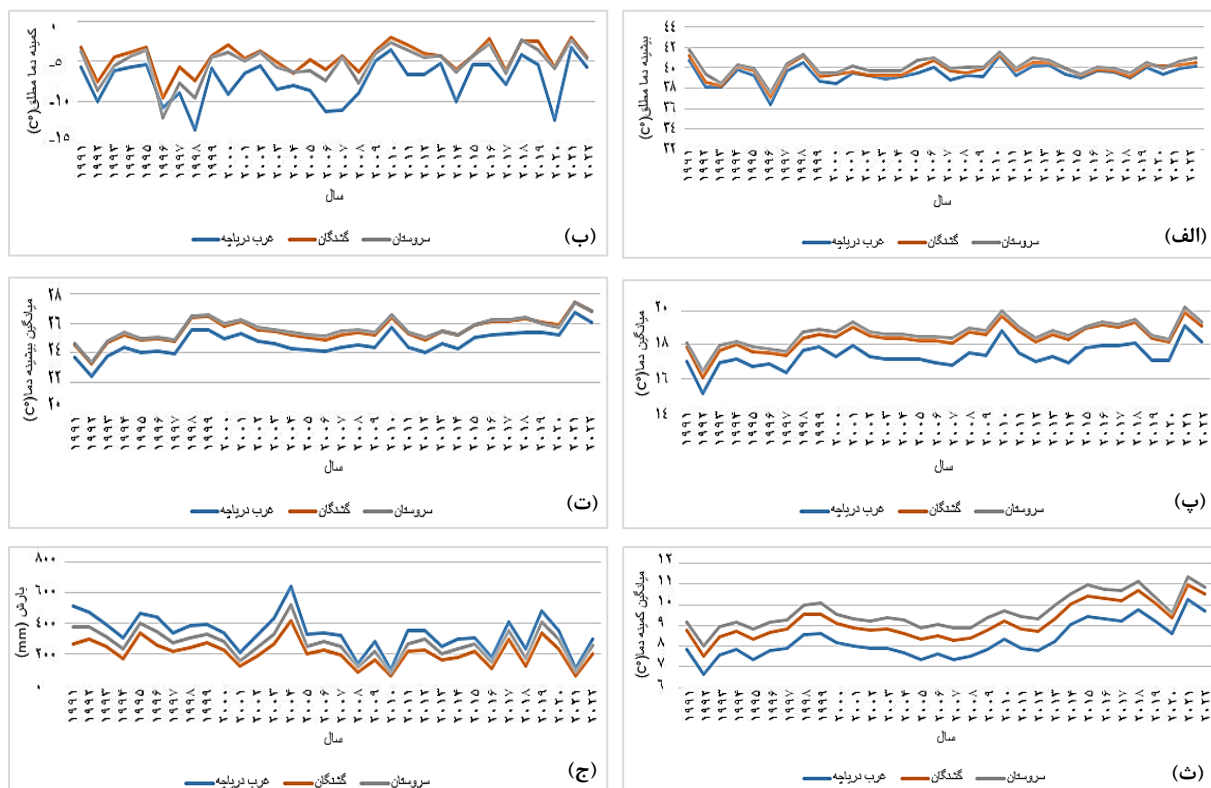
میانگین سالانه دما نیز در کل حوضه روندی افزایشی و پایدار داشته است. مقدار شیب $0/0494^{\circ}\text{C}$ در سال بوده‌است. دامنه تغییر میانگین دما طی دوره از حدود $16-17^{\circ}\text{C}$ در اوایل دهه 1991 (1370) تا نزدیک به $19-20^{\circ}\text{C}$ در سال‌های پایانی افزایش یافته‌است (شکل ۲- پ). همچنین زیرحوضه غرب دریاچه همواره خنک‌تر، گشنگان در جایگاه میانی و سروستان گرم‌ترین بخش حوضه بوده است (شکل ۳- پ).

میانگین بیشینه دما روندی مثبت با شیب $0/0527^{\circ}\text{C}$ در سال نشان داد. دامنه تغییرات این شاخص از حدود 23°C تا 24°C در اوایل دهه 1991 (1370) تا حدود 27°C در سال‌های اخیر متغیر بوده است (شکل ۲- ت). درمقیاس زیرحوضه‌ای، سروستان و گشنگان دماهای میانگین بیشینه بیشتری نسبت به غرب دریاچه داشته‌اند و به عنوان گرم‌ترین زیرحوضه‌ها شناخته می‌شوند (شکل ۳- ت).

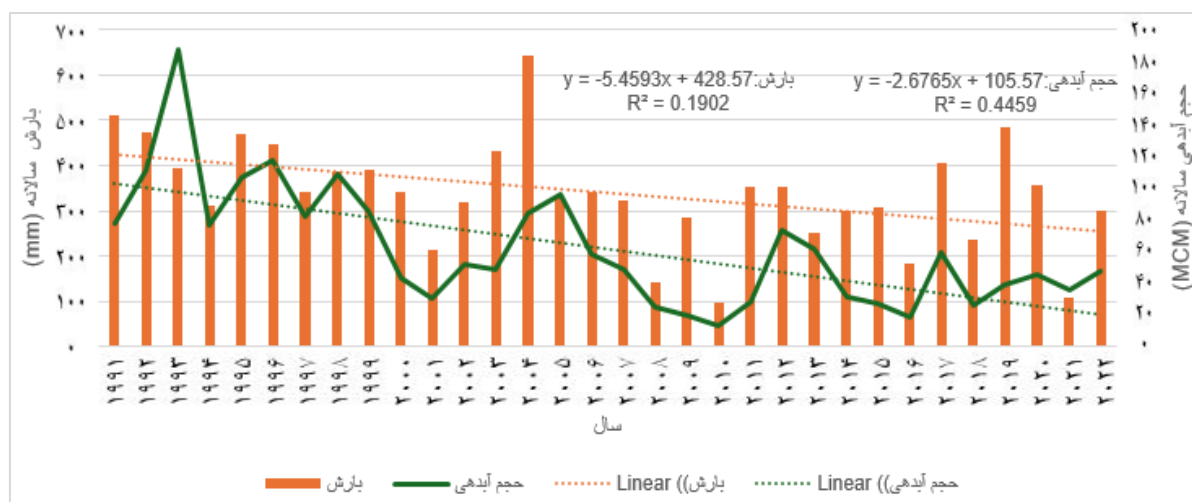
میانگین کمینه دما نیز به‌طور مشخص روندی افزایشی را طی سه دهه اخیر نشان داد. مقدار شیب $0/0639^{\circ}\text{C}$ در سال و ضریب تعیین $0/53$ بود. این متغیر بالاترین مقدار ضریب تعیین را در میان متغیرهای دمایی دارد، به‌طوری‌که نشان‌دهنده‌ی پایدارترین و منسجم‌ترین روند افزایشی است. دامنه تغییرات از حدود $7-8^{\circ}\text{C}$ در اوایل دوره تا $10-11^{\circ}\text{C}$ در سال‌های اخیر افزایش یافته که بیانگر افزایش محسوس دماهای شبانه در منطقه است. این نتایج نشان می‌دهد که گرمایش شبانه سریع‌تر و برجسته‌تر از گرمایش روزانه بوده و کاهش دامنه



شکل ۲. سری‌های زمانی (الف) بیشینه دمای مطلق سالانه، (ب) کمینه دمای مطلق سالانه، (پ) میانگین دمای سالانه، (ت) میانگین بیشینه دما سالانه، (ث) میانگین کمینه دما سالانه و (ج) بارش سالانه در کل حوزه آبخیز تالاب مهارلو طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)



شکل ۳. سری‌های زمانی (الف) بیشینه دمای مطلق سالانه، (ب) کمینه دمای مطلق سالانه، (پ) میانگین دمای سالانه، (ت) میانگین بیشینه دما سالانه، (ث) میانگین کمینه دما سالانه و (ج) بارش سالانه در زیرحوضه‌های غرب دریاچه، سروستان و گشنگان طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)



شکل ۴. نمودار سری زمانی و مقایسه روند بارش و حجم آبدهی سالانه در زیرحوضه غرب دریاچه طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)

بیشترین افزایش در شمال غرب حوضه یا بخش‌های شمالی زیرحوضه غرب دریاچه با مقادیر نزدیک به $2/5^{\circ}\text{C}$ ثبت شده است، درحالیکه در زیرحوضه‌های شرقی و جنوب شرقی یعنی گشنگان و سروستان تغییرها حدود $0/4^{\circ}\text{C}$ تا $0/7^{\circ}\text{C}$ است. این الگو نشان می‌دهد که اوج‌های سالانه به‌ویژه در زیرحوضه غرب دریاچه به‌طور محسوسی گرم‌تر شده‌اند (شکل ۵- الف).

در مورد کمینه دمای مطلق سالانه، روند τ همه‌جا مثبت و پیوسته است و نشان می‌دهد که حدهای سرد طی دوره، کمتر سرد شده‌اند. دامنه τ در این شاخص بین $0/05$ تا $0/29$ قرار دارد. شدت روند در گشنگان و بخش‌هایی از سروستان بیشتر است، درحالیکه در زیرحوضه غرب دریاچه روند مثبت ولی ضعیف‌تر است. مقدار تغییر این متغیر بین $0/90^{\circ}\text{C}$ تا $3/12^{\circ}\text{C}$ قرار دارد. بیشترین افزایش در جنوب شرق حوضه یعنی جنوب سروستان با تغییرات حدود 3°C مشاهده شده است، درحالیکه در شمال غرب حوضه تغییر حدود 1°C است. برداشت از این شاخص، چنین است که گرم‌شدن سردترین‌های سال در شرق و جنوب شرق حوضه بارزتر است و سردترین‌های سال در جنوب شرق حوضه بیشترین گرمایش را تجربه کرده‌اند و این موضوع در کنار ملایم‌تر بودن رشد بیشینه‌ها یا بیشینه مطلق در همان نواحی، نشانه‌ای از کاهش دامنه شبانه‌روزی و فصلی دما در این بخش‌ها است (شکل ۵- ب).

جدول ۱. مساحت پیکره آبی تالاب مهارلو در سال‌های مختلف

سال	مساحت پیکره آبی (ha)
۱۹۹۶ (۱۳۷۵)	۲۳۱۱۴
۲۰۰۲ (۱۳۸۱)	۲۰۶۶۲
۲۰۰۷ (۱۳۸۶)	۱۹۵۶۸
۲۰۱۳ (۱۳۹۲)	۱۷۲۹۹
۲۰۲۲ (۱۴۰۱)	۱۵۸۸۶

تحلیل روند و میزان تغییر متغیرهای دما و بارش

نتایج آزمون من-کندال برای کل حوزه آبخیز تالاب مهارلو طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲ (۱۳۷۰ تا ۱۴۰۱) نشان‌داد که تمامی متغیرها در سطح‌های 1% و 5% دارای روندهای معنی‌دار هستند. این نتایج حاکی از آن است که تغییر اقلیمی حوضه به‌طور معنی‌داری در حال وقوع است و جهت روندها در شاخص‌های دمایی و بارش به‌طور کامل مشخص است.

بیشینه دمای مطلق سالانه در کل حوضه روندی مثبت داشته‌است، به این معنا که ویدادهای حدی گرم، گرم‌تر شده‌اند. دامنه τ در این شاخص از حدود $0/09$ تا $0/46$ متغیر است. بیشترین شدت روند در شمال غرب حوضه یا بخش‌های شمال زیرحوضه غرب دریاچه مشاهده می‌شود و با حرکت به سمت مرکز و جنوب شرق حوضه یعنی زیرحوضه‌های گشنگان و سپس سروستان شدت روند کاهش می‌یابد. مقدار تغییر این متغیر بر اساس شیب سن بین $0/44^{\circ}\text{C}$ تا $2/44^{\circ}\text{C}$ طی ۳۲ سال متغیر است.

۱/۹°C را تجربه کرده است. بنابراین، گرمایش شبانه در جنوب شرق حوضه پایدارتر اما ملایم تر و در شمال غرب شدیدتر بوده است. این الگو در کنار روند به نسبت ضعیف افزایش دمای بیشینه در جنوب شرق حوضه، بیانگر کاهش دامنه شبانه روزی دما در این بخش از حوضه است (شکل ۵-ث).

در مقابل، بارش سالانه روندی منفی در کل حوضه داشته است و نشان می دهد که بارش سالانه به طور پیوسته کاهش یافته است. دامنه τ این شاخص از حدود ۰/۱۹- تا ۰/۳۹- متغیر است. بیشترین شدت روند کاهشی در بخش های شمالی و غربی زیرحوضه غرب دریاچه مشاهده می شود، در حالی که در شرق و جنوب شرق حوضه شدت کاهشی ضعیف تر است. این نشان می دهد که زیر حوضه غرب دریاچه کانون اصلی افت بارش است. مقادیر شیب سن در این شاخص از ۶۹mm- تا ۲۰۸mm- طی ۳۲ سال متغیر است. بیشترین کاهش در بخش های شمالی و غربی زیر حوضه غرب دریاچه با مقادیر بیش از ۲۰۰mm ثبت شده است، درحالی که در جنوب شرق حوضه کاهش ملایم تر و در حدود ۷۰mm تا ۸۰mm گزارش شده است. برداشت کلی از این شاخص چنین است که کل حوضه به سمت خشک تر شدن پیش رفته است، با برجستگی بیشتر در زیرحوضه غرب دریاچه (شکل ۵-ج).

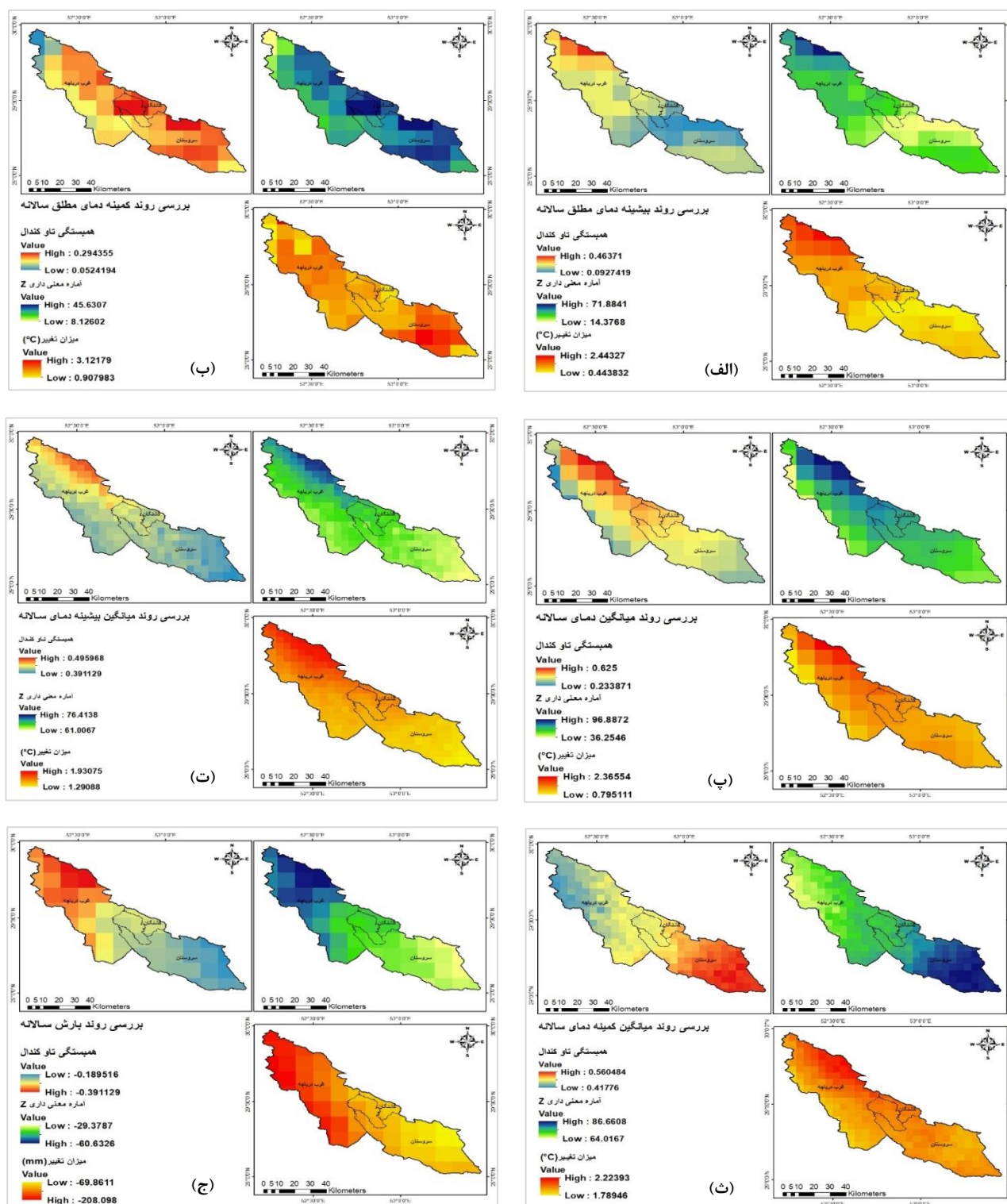
پیش بینی های اقلیمی آینده ۲۰۴۰

بر اساس یافته ها، بیشینه دمای مطلق سالانه در سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب حدود ۱/۳°C و ۱/۵°C گرم تر می شود (جدول ۲). مقدار نهایی این متغیر در سال ۲۰۴۰ در کل حوضه از حدود ۳۷/۵°C تا ۴۲/۵°C در SSP2-4.5 و از حدود ۳۸°C تا نزدیک به ۴۳°C در SSP5-8.5 متغیر خواهد بود. بخش های شمال غربی زیرحوضه غرب دریاچه خنک ترین نواحی هستند و دماهای پایین تری را نسبت به سایر بخش ها تجربه می کنند. در مقابل، بیشترین مقادیر در جنوب زیرحوضه سروستان مشاهده می شود که بیشترین سطوح گرما را نشان می دهد. زیرحوضه گشنگان نیز در موقعیت میانی قرار گرفته و دماهایی بین این دو محدوده را ثبت می کند (شکل ۶-الف).

میانگین دمای سالانه نیز روندی مثبت در کل حوضه داشته است و بیانگر افزایش کلی دما طی سال های مورد بررسی است. دامنه τ در این متغیر بین ۰/۲۳ تا ۰/۶۲ قرار دارد. بیشترین شدت روند در شمال زیر حوضه غرب دریاچه و پهنه های مرکزی دیده می شود، در حالی که در جنوب شرق حوضه یعنی سروستان و بخش های غربی و جنوبی زیرحوضه غرب دریاچه شدت آن کمتر اما همچنان مثبت باقی می ماند. مقدار شیب سن در این شاخص بین ۰/۷۹°C تا ۲/۳۶°C متغیر است. بیشترین افزایش در شمال غرب حوضه یا شمال زیر حوضه غرب دریاچه با مقدار بیش تر از ۲°C دیده می شود. در جنوب شرق حوضه و غرب و جنوب غرب حوضه تغییرات کمتر و در حدود ۰/۹°C تا ۱/۴°C گزارش شده است. این نتایج نشان دهنده گرمایش عمومی در کل حوضه با تمرکز شدیدتر در نیمه شمال غربی حوضه است (شکل ۵-پ).

در بررسی میانگین دمای بیشینه سالانه، روند τ در همه نقاط مثبت و افزایشی بوده است. این بدان معنی است که دماهای روزانه به طور کلی در طول سال گرم تر شده اند. دامنه τ در این شاخص در حدود ۰/۳۹ تا ۰/۴۹ است که نشان دهنده یک روند به نسبت پایدار و همگن است. بیشترین شدت روند در شمال زیر حوضه غرب دریاچه ثبت شده و به سمت گشنگان و سروستان روند همچنان مثبت ولی ملایم تر می شود. میزان تغییر این متغیر بین ۱/۲۹°C تا ۱/۹۳°C برآورد شده است. بیشترین افزایش در شمال و شمال غرب حوضه نزدیک به ۱/۹°C و کمترین تغییر در شرق و جنوب شرق حوضه در حدود ۱/۲°C رخ داده است. این نتایج نشان می دهد که افزایش دماهای روزانه به طور عمده در نیمه شمال غربی حوضه بارزتر بوده است (شکل ۵-ت).

میانگین دمای کمینه سالانه در کل حوضه روندی افزایشی دارد که از منظر زمانی، حتی پایدارتر از دمای بیشینه است؛ به طوریکه ضرایب τ بین ۰/۴۲ تا ۰/۵۶ نشان دهنده انسجام بیشتر گرمایش شبانه است. بیشترین پایداری روند در جنوب شرق حوضه یا سروستان است. با این حال، از منظر مقدار عددی تغییر، بیشترین افزایش در شمال غرب حوضه با مقدار بیش تر از ۲°C ثبت شده است، درحالی که جنوب شرق حوضه گرمایشی حدود ۱/۸°C تا



شکل ۵. روند، معنی‌داری آماری و نرخ تغییر (الف) بیشینه دمای مطلق سالانه، (ب) کمینه دمای مطلق سالانه، (پ) میانگین دمای سالانه، (ت) میانگین بیشینه دمای سالانه، (ث) میانگین کمینه دمای سالانه و (ج) بارش سالانه بر اساس آزمون من-کندال و شیب سن طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۹۱ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)

در SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تغییر می‌کند و سردترین شب‌ها همچنان در شمال غرب زیرحوضه غرب دریاچه باقی خواهند ماند، درحالی‌که مرکز و جنوب‌شرق حوضه،

کمینه دمای مطلق سالانه نیز در سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 حدود 1°C افزایش خواهد یافت (جدول ۲). مقدار پیش‌بینی‌شده این شاخص از حدود -12°C تا -3°C

سروستان خواهد بود. این الگو نشان می‌دهد که همانند شرایط کنونی، بخش‌های مرتفع و شمال‌غربی حوضه خنک‌تر و نواحی پست‌تر در جنوب‌شرق حوضه یعنی مرکز سروستان گرم‌تر باقی خواهند ماند. افزایش بیشتر در جنوب‌شرق حوضه بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها و زمستان‌ها در این مناطق است (شکل ۶-ث).

همچنین نتایج پیش‌بینی بارش سالانه نشان می‌دهد که این شاخص در آینده نزدیک تغییرات مثبت و افزایشی خواهد داشت. در سناریوی SSP2-4.5، بارش سالانه در بازه‌ای حدود ۱۹۴mm تا ۵۱۹mm پیش‌بینی شده است. افزایش نسبی بارش (نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵) در کل حوضه در این سناریو حدود ۶٪ برآورد شده است. در سناریوی SSP5-8.5، مقدار بارش در محدوده ۱۸۸/۵mm تا ۴۵۵mm قرار می‌گیرد. میزان افزایش نسبی بارش در این سناریو کمتر از SSP2-4.5 و در حدود ۳٪ گزارش شده است. بیشترین مقدار بارش در شمال‌غرب حوضه یعنی ارتفاعات پیرامون زیرحوضه غرب دریاچه مشاهده می‌شود، در حالی که سروستان و گشنگان مقادیر کمتری دارند (جدول ۲، شکل ۶-ج).

■ بحث و نتیجه گیری

تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و توسعه‌ای مطرح بوده است و درک الگوهای گذشته و آینده آن در مقیاس‌های محلی و حوضه‌ای اهمیت فراوانی برای مدیریت منابع آب و سازگاری با شرایط جدید دارد. نتایج پژوهش حاضر در حوزه آبخیز تالاب مهارلو تصویری روشن از روندهای اقلیمی گذشته و پیش‌بینی‌های آینده ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده تداوم گرمایش و تغییرات بارشی در منطقه است.

یعنی جنوب زیرحوضه غرب دریاچه و جنوب سروستان افزایش قابل‌توجهی در دماهای شبانه تجربه خواهد کرد (شکل ۶-ب).

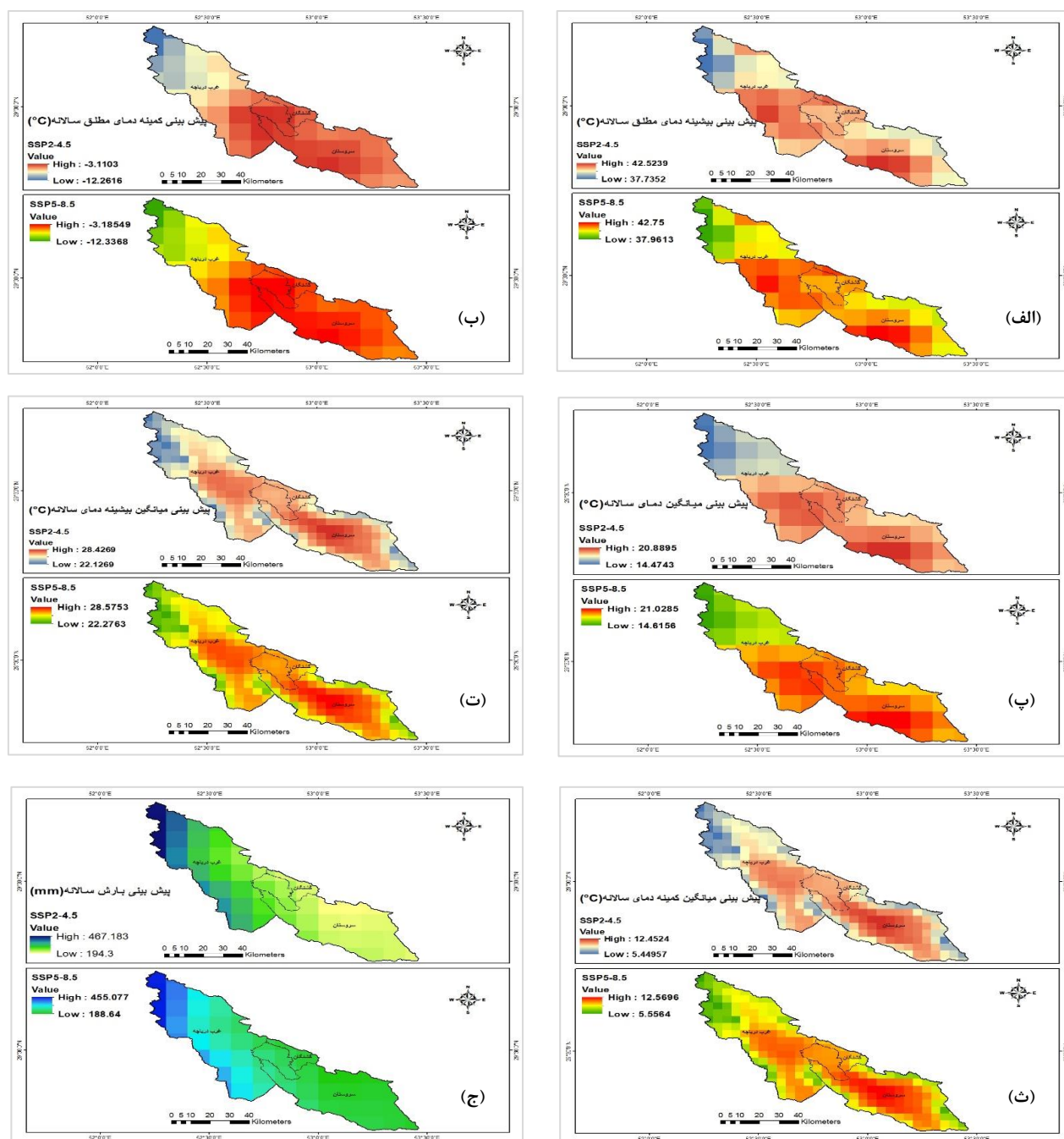
در میانگین دمای سالانه میزان افزایش تحت سناریوی SSP2-4.5 حدود 1°C و تحت سناریوی SSP5-8.5 تقریباً $1/2^{\circ}\text{C}$ خواهد بود (جدول ۲). مقدار پیش‌بینی این متغیر در محدوده‌ی تقریبی $14/5^{\circ}\text{C}$ تا $20/8^{\circ}\text{C}$ در سناریو SSP2-4.5 و $14/6^{\circ}\text{C}$ تا 21°C در سناریو SSP5-8.5 قرار می‌گیرد. بیشترین گرمایش در جنوب سروستان و کمترین در شمال غرب زیرحوضه غرب دریاچه رخ خواهد داد (شکل ۶-پ).

نتایج مربوط به میانگین بیشینه دما نیز نشان می‌دهد که مقدار این متغیر در سناریو SSP2-4.5 در محدوده $22/1^{\circ}\text{C}$ تا $28/4^{\circ}\text{C}$ قرار خواهد گرفت. میزان تغییرات نسبت به دوره پایه حدود $1/1^{\circ}\text{C}$ است. در سناریو SSP5-8.5، مقادیر میانگین بیشینه دما کمی بالاتر رفته و در بازه $22/2^{\circ}\text{C}$ تا $28/5^{\circ}\text{C}$ قرار گرفته است. میزان تغییرات در این سناریو افزایش بیشتری نسبت به SSP2-4.5 دارد و تا نزدیک به $1/3^{\circ}\text{C}$ برآورد شده است. خنک‌ترین نواحی در شمال‌غرب و جنوب غرب زیرحوضه غرب دریاچه و ارتفاعات زیرحوضه سروستان واقع شده است، درحالی‌که بیشترین مقادیر در مرکز زیرحوضه سروستان است (جدول ۲، شکل ۶-ت).

در مورد میانگین کمینه دما نیز نتایج نشان‌دهنده افزایش بین $1/1^{\circ}\text{C}$ در SSP2-4.5 تا $1/2^{\circ}\text{C}$ در SSP5-8.5 بود و مقدار آن از $5/4^{\circ}\text{C}$ تا $12/4^{\circ}\text{C}$ در سناریو SSP2-4.5 و $5/5^{\circ}\text{C}$ تا $12/5^{\circ}\text{C}$ در سناریو SSP5-8.5 پیش‌بینی شده است (جدول ۲). کمترین مقدار در ارتفاعات زیرحوضه غرب دریاچه و ارتفاعات سروستان و بیشترین مقدار در بخش‌های مرکزی

جدول ۲. میزان تغییر پیش‌بینی شده متغیرهای دما و بارش در دو سناریو انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ۲۰ سال آتی

سناریو انتشار	میانگین کمینه دما ($^{\circ}\text{C}$)	میانگین بیشینه دما ($^{\circ}\text{C}$)	میانگین دما ($^{\circ}\text{C}$)	کمینه دمای مطلق ($^{\circ}\text{C}$)	بیشینه دمای مطلق ($^{\circ}\text{C}$)	بارش سالانه (mm)
ssp2-4.5	۱/۰۸-۱/۱۰	۱/۱۱-۱/۱۴	۱/۰۷-۱/۰۸	۱/۰۱-۱/۰۵	۱/۲۹-۱/۳۴	۵/۹۲-۶/۱۶
ssp5-8.5	۱/۱۸-۱/۲۱	۱/۲۶-۱/۲۹	۱/۲۱	۰/۹۱-۰/۹۳	۱/۵۲-۱/۵۵	۳/۰۶-۳/۱۷



شکل ۶. نقشه‌های پیش‌بینی (الف) بیشینه دمای مطلق سالانه، (ب) کمینه دمای مطلق سالانه، (پ) میانگین دمای سالانه، (ت) میانگین بیشینه دما سالانه، (ث) میانگین کمینه دما سالانه و (ج) بارش سالانه در سال ۲۰۴۰ حوزه آبخیز تالاب مهارلو بر اساس خروجی ریزمقیاس شده مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

کندال و شیب سن تأیید کردند که گرمایش اقلیمی در این حوضه نه تنها معنی‌دار، بلکه پایدار و مداوم بوده است. با اینحال، باید توجه داشت که مقدار حدی به دلیل وقوع احتمالی تنها یک بار در سال، به طور معمول با ضرایب تعیین پایین‌تر و گاهی غیرمعنی‌دار همراه‌اند؛ زیرا بروز یک رویداد منفرد می‌تواند به‌طور چشمگیری مقدار سالانه را زیر تأثیر قرار دهد. حال آنکه، شاخص‌های میانگین دما

بررسی تغییرات سه دهه گذشته (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و Terraclimate نشان داد که تمامی متغیرهای دمایی، اعم از حدها شامل بیشینه و کمینه مطلق و شاخص‌های میانگین شامل میانگین دما، میانگین بیشینه و میانگین کمینه، روندی مثبت و افزایشی در حدود 1°C تا 3°C داشته‌اند. بررسی‌های سری زمانی و مقادیر آزمون من-

است. این روند در کاهش سطح آب تالاب نیز به وضوح مشهود است. به طوری که تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهند که مساحت پیکره آبی تالاب طی سال‌های گذشته کاهش پیوسته‌ای را تجربه کرده و از حدود ۲۳,۰۰۰ ha در سال ۱۹۹۶ (۱۳۷۵) به کمتر از ۱۶,۰۰۰ ha در سال ۲۰۲۲ (۱۴۰۱) رسیده است.

پیش‌بینی‌های اقلیمی برای آینده نزدیک ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (۱۴۱۹-۱۴۰۰) نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵ (۱۳۹۳-۱۳۷۴) بر اساس داده‌های ریزمقیاس‌شده زیر دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داد که روند گرمایش ادامه خواهد یافت و این افزایش هم در حدها و هم در میانگین‌های دما مشاهده می‌شود. در سناریوی میانی SSP2-4.5 میانگین افزایش دما در شاخص‌های مختلف حدود 1°C تا $1/1^{\circ}\text{C}$ برآورد شده است، درحالی‌که در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5 این افزایش به حدود $1/2^{\circ}\text{C}$ تا $1/5^{\circ}\text{C}$ می‌رسد. در هر دو سناریو میزان افزایش گرمایش روزانه و دماهای بیشینه اندکی بیشتر از دماهای کمینه برآورد شده است. این یافته در تضاد با الگوی گذشته است؛ چرا که طی سه دهه اخیر ۲۰۲۲-۱۹۹۱ (۱۴۰۱-۱۳۷۰)، گرمایش شبانه و زمستانی شدیدتر از گرمایش روزانه و تابستانی بود و کاهش دامنه شبانه‌روزی دما یکی از ویژگی‌های بارز اقلیم حوضه است. بنابراین، می‌توان گفت که گرمایش آینده نزدیک، علاوه بر تداوم روند افزایشی، در الگوی خود نیز دچار تغییر خواهد شد و برخلاف گذشته، روزها و فصل‌های گرم سهم بیشتری از افزایش دما را تجربه خواهند کرد. این نتیجه با بررسی‌های جهانی IPCC و پژوهش Zittis و همکاران در سال ۲۰۲۱ (۱۴۰۰) در خاورمیانه و شمال آفریقا مطابقت دارد که نشان می‌دهند در آینده، گرمایش روزانه و بیشینه در بسیاری از مناطق غالب خواهد شد (۱۰، ۱۲، ۲۵). در کنار این گرمایش، بارش سالانه افزایش اندکی در حدود ۳٪ در سناریو SSP5-8.5 تا ۶٪ در سناریو SSP2-4.5 نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵ (۱۳۹۳-۱۳۷۴) نشان می‌دهد. بیشترین مقدار بارش همچنان در شمال غرب حوضه دیده می‌شود و شرق و جنوب شرق حوضه خشک‌تر باقی می‌مانند.

بازتاب‌دهنده تداوم شرایط اقلیمی در طول سال هستند و از اینرو، روندها را بهتر و پایدارتر نشان می‌دهند. به‌ویژه میانگین کمینه دما که بیشترین میزان ضریب تعیین را در میان همه شاخص‌ها داراست، نمایی روشن از شدت و پایداری گرمایش شبانه و زمستانی ارائه می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که شب‌ها و زمستان‌ها با سرعت بیشتری نسبت به روزها و تابستان‌ها گرم‌تر شده‌اند؛ تغییری که در پایان موجب کاهش دامنه شبانه‌روزی و فصلی دما شده و در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک مشابه نیز گزارش شده است (۱۳، ۲۲، ۱۷).

در مقابل، بارش سالانه طی سه دهه گذشته (۲۰۲۲-۱۹۹۱)، کاهش یافت و حدود ۲۵٪ تا بیش از ۷۳٪ افت را نسبت به میانگین بلندمدت بارش سالانه دوره مطالعاتی تجربه کرده است. علی‌رغم اینکه زیرحوضه غرب دریاچه به دلیل ارتفاع بالاتر همواره پربارش‌ترین منطقه بوده است، روند کاهشی بارش در این بخش شدیدتر بود و افت نسبی محسوس‌تر به چشم آمده است. شرق و جنوب شرق حوضه نیز دارای بارش کمتری بوده‌اند؛ هرچند کاهش ملایم‌تری ثبت شده، همین شرایط پایه خشک‌تر آنها را آسیب‌پذیرتر ساخته است. ترکیب این نتایج نشان می‌دهد که اقلیم گذشته حوضه با گرمایش سریع و کاهش بارش سالانه مشخص می‌شود؛ الگویی که به سمت شرایط خشک‌تر و گرم‌تر حرکت و فشار مضاعفی بر منابع آبی و بوم‌سازگان‌های منطقه وارد کرده است.

همچنین نتیجه مقایسه بارش و حجم آبدهی سالانه در زیرحوضه غرب دریاچه نشان داد که اگرچه بارش روند کاهشی (۱/۲٪) داشته است، اما کاهش حجم آبدهی محسوس‌تر بوده است (۲/۵٪). این تفاوت دوبرابری می‌تواند بیانگر تأثیر همزمان چند عامل از جمله تغییر در شدت و الگوی زمانی بارش‌ها و افزایش تبخیر و تعرق باشد، هرچند بررسی دقیق این روابط نیازمند تحلیل رخدادهای بارش است. افزایش پایدار دما طی سه دهه گذشته به‌ویژه در شب‌ها و فصول سرد، موجب افزایش چشمگیر تبخیر و تعرق در حوضه شده است. در نتیجه، بخشی از بارش دریافتی پیش از شکل‌گیری رواناب از سامانه خارج می‌شود و سهم آب ورودی به تالاب مهارلو به شدت کاهش یافته

می‌تواند دقت آنها را برای تحلیل‌های حوضه‌ای کاهش دهد. بنابراین، آنچه طی سه دهه اخیر به‌صورت بالفعل در داده‌های بازتحلیل اقلیمی مشاهده‌شد، شاخص‌تر و مستندتر از پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی است و تصویر دقیق‌تری از روندهای تهدیدکننده در حوزه آبخیز تالاب مهارلو ارائه می‌دهد. تداوم این روندهای مشاهده‌شده می‌تواند آینده این حوضه را با بحران جدی منابع آب، خشکیدگی تالاب مهارلو، گسترش سطوح خشک‌شده و تولید گردوغبار شور مواجه سازد. در صورت عدم مداخله و مدیریت مؤثر، این شرایط می‌تواند به تشدید بیابان‌زایی منطقه‌ای و افزایش ناپایداری محیطی در جنوب ایران منجر شود. در انتها لازم به ذکر است که برای به تصویر کشیدن دلیل تغییر رواناب نیازمند بررسی همزمان دیگر عامل‌های مؤثر به‌ویژه تغییر کاربری اراضی می‌باشد.

■ سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو، به‌ویژه شرکت مدیریت منابع آب ایران، به دلیل در اختیار قراردادن داده‌های مورد نیاز قدردانی می‌کنند.

در مجموع، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که حوزه آبخیز تالاب مهارلو طی سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۲۲ (۱۴۰۱-۱۳۷۰) با روندی پایدار از گرمایش و کاهش بارش روبه‌رو بوده است؛ روندی که چهره اقلیم منطقه را به‌سوی شرایطی گرم‌تر و خشک‌تر سوق داده است. بیشترین شدت افت بارش در زیرحوضه غرب دریاچه ثبت شده است؛ جایی که رودخانه‌های اصلی و آورد عمده تالاب مهارلو نیز در آن قرار دارند. استمرار این وضعیت، با توجه به افزایش همزمان دما و تبخیر و تعرق، می‌تواند منابع آبی ورودی به تالاب را به‌شدت کاهش داده و افت مداوم سطح آب تالاب را به‌دنبال داشته باشد. در چنین شرایطی، بستر خشک‌شده تالاب به پهنه وسیع نمکی و مستعد تولید گردوغبار شور تبدیل خواهد شد که می‌تواند خطرهای گسترده‌ای برای سلامت انسان، اراضی کشاورزی اطراف و پایداری سکونتگاه‌های پایین‌دست ایجاد کند. هرچند پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش عمومی اقلیم CMIP6 از افزایش اندک بارش در آینده نزدیک حکایت دارند، اما این مدل‌ها در مقیاس محلی با محدودیت‌هایی همراه هستند؛ چراکه وضوح مکانی پایین در حدود ۱۰۰km و وابستگی به دوره پایه کوتاه‌مدت ۱۹۹۵-۲۰۱۴ (۱۳۹۳-۱۳۷۴)

■ References

1. 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, 170191. doi: 10.1038/sdata.2017.191
2. Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D. C., Schneiderman, E. M., Zion, M. S., Lounsbury, D., & Matonse, A. H. (2011). Examination of Change Factor Methodologies for Climate Change Impact Assessment. *Water Resources Research*, 47(3), W03501. doi: 10.1029/2010WR009104
3. Asadollah, S. B. H. S., Sharafati, A., & Shahid, S. (2022). Application of Ensemble Machine Learning Model in Downscaling and Projecting Climate Variables over Different Climate Regions in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 17260-17279. doi: 10.1007/s11356-021-16964-y
4. Fan, L., Fu, C., & Chen, D. (2005). Review on Creating Future Climate Change Scenarios by Statistical Downscaling Techniques. *Advances in Earth Science*, 20(3), 320-329.
5. Fasbender, D., & Ouarda, T. B. M. J. (2010). Spatial Bayesian Model for Statistical Downscaling of AOGCM to Minimum and Maximum Daily Temperatures. *Journal of Climate*, 23(19), 5222-5242. doi: 10.1175/2010JCLI3415.1
6. Gilbert, R. O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
7. Grotch, S. L., & MacCracken, M. C. (1991). The Use of General Circulation Models to Predict Regional Climatic Change. *Journal of Climate*, 4(3), 286-303. doi: 10.1175/1520-0442(1991)004<0286:TUOGCM>2.0.CO;2

8. Hassan, W. H., Nile, B. K., Kadhim, Z. K., Mahdi, K., Riksen, M., & Thiab, R. F. (2023). Trends, Forecasting and Adaptation Strategies of Climate Change in the Middle and West Regions of Iraq. *SN Applied Sciences*, 5, Article 312. doi: [10.1007/s42452-023-05544-z](https://doi.org/10.1007/s42452-023-05544-z)
9. Hay, L. E., Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutowski, W. J., Leavesley, G. H., Pan, Z., Arritt, R. W., & Takle, E. S. (2002). Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(5), 571–590. doi: [10.1175/1525-7541\(2002\)003<0571:UORCMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0571:UORCMO>2.0.CO;2)
10. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
11. IPCC. (2021). *Interactive Atlas. Sixth Assessment Report*, Retrieved October 5, 2025, from <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
12. 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*. Geneva: IPCC.
13. Kamali, S., Fattahi, E., & Habibi, M. (2025). Investigating the Trend Changes in Temperature Extreme Indices in Iran. *Atmosphere*, 16(4), 483. doi: [10.3390/atmos16040483](https://doi.org/10.3390/atmos16040483)
14. Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London: Charles Griffin.
15. Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. doi: [10.2307/1907187](https://doi.org/10.2307/1907187)
16. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.). (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. (pp. 3-32). Cambridge: Cambridge University Press. doi: [10.1017/9781009157896.001](https://doi.org/10.1017/9781009157896.001)
17. Mohammadi, M., & Forouzan Fard, M. (2024). Evaluating ERA5 Reanalysis for Climate Trend Analysis in Sistan and Baluchestan, Iran. *Journal of Climate Change Research*, 5(19), 37-54. doi: [10.30488/CCR.2024.458748.1218](https://doi.org/10.30488/CCR.2024.458748.1218) [In Persian]
18. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349-4383. doi: [10.5194/essd-13-4349-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021)
19. O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21st Century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. doi: [10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004)
20. Rayegani, B., Barati Qahfarokhi, S., & Hosseini Tayefe, F. (2025). Assessment of the Intensity and Extent of Climate Change in Various Regions of Iran over the Next Two Decades. *Environment and Interdisciplinary Development*, 10(88), 19-33. doi: [10.22034/envj.2025.506657.1470](https://doi.org/10.22034/envj.2025.506657.1470) [In Persian]
21. Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. doi: [10.1080/01621459.1968.10480934](https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934)
22. Tabari, H., & Talaee, P. H. (2011). Analysis of Trends in Temperature Data in Arid and Semiarid Regions of Iran. *Global and Planetary Change*, 79(1–2), 1-10. doi: [10.1016/j.gloplacha.2011.07.008](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.008)
23. Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
24. Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). Power of the Mann–Kendall and Spearman's Rho Tests for Detecting Monotonic Trends in Hydrological Series. *Journal of Hydrology*, 259(1-4), 254-271. doi: [10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7)

25. Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Almazroui, M., Bucchignani, E., Driouech, F., El Rhaz, K., Kurnaz, L., Nikulin, G., Ntoumos, A., Ozturk, T., Proestos, Y., Stenchikov, G. L., Zaaboul, R., & Lelieveld, J. (2021). Business-as-usual will lead to super and ultra-extreme heatwaves in the Middle East and North Africa. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4, 20. [doi: 10.1038/s41612-021-00178-7](https://doi.org/10.1038/s41612-021-00178-7)