Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 16, Issue 1, 2025 p: 14-26

OPEN ACCESS

Research Paper

Evaluation of the Climate Change Effect on Minimum and Maximum Temperatures and the Reference Evapotranspiration in the Lake Urmia Basin Using CMIP6 Models

Ameneh Yahyavi Dizaj[1], Tayebeh Akbari Azirani[2] and Khadijeh Javan[3]

1- Ph.D. Student in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, (Corresponding Author: t_akbari@sbu.ac.ir)
3- Associate Professor of Geography, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 25 April 2024 Revised: 28 Agusut 2024 Accepted: 19 September 2024

Extended Abstract

Background: Climate change as an influential phenomenon causes changes in climate systems, increasing both the temperature and the moisture capacity of the atmosphere so that the increase in global temperature has increased the evaporation from the surface and the atmosphere water content. Therefore, an increase in temperature and the moisture capacity of the air, when there is a moisture source, increases the specific humidity of the air and decreases relative humidity. This causes the total water vapor in the atmosphere to rise, and water vapor, as a greenhouse gas, causes global warming. In this regard, one of the most important consequences of climate change is its influence on factors affecting the hydrological status of basins, such as temperature, precipitation, and reference evapotranspiration (ET). Therefore, knowing the rate of evapotranspiration in each point, especially in arid and semi-arid regions such as Iran, and more specifically in the Lake Urmia basin, where its activities are mainly related to agriculture, is very important for determining the water needs of plants and managing water resources, hence the study of ET is more necessary under the influence of climate change. Therefore, climate change is a phenomenon affecting reference ET as the most important part of the hydrological cycle because climate changes can have significant effects on the biosphere.

Methods: In this research, the effect of climate change on minimum and maximum temperatures and average reference evapotranspiration in the Lake Urmia basin was evaluated on a monthly scale with CMIP6 climate models in mm per month using the observation data of Urmia, Tabriz, and Saghez synoptic stations. The minimum and maximum temperatures on a monthly scale and for the statistical period of 1975 to 2014 were received from the IRAN Meteorological Organization (IRIMO). The second category is the data of CMIP6 climate models in the historical period of the model, which have a common period with the observation period (1975-2014), the periods of the near future (2020-2059), and the far future (2060-2099). Sixth report models were obtained from historical and future periods on a monthly scale. Two climate models (CESM2 and IPSL-CM6A-LR) under the optimistic SSP1-2.6 and pessimistic SSP5-8.5 scenarios in the near future (2020-2059) and far future (2060-2099) were used to investigate the effects of climate change and predict minimum and maximum temperature changes as well as changes in reference ET on a monthly scale. Downscaling was done using the LS method, and climate models were validated using R2 and MAE statistics. Finally, the crop reference ET was calculated for basic, near, and far future by Makkink and Turc methods.

Results: In the present study, the results of CESM2 and IPSL-CM6A-LR models using R2 and MAE for the future period compared to the base period showed that the optimistic scenario would perform better in the near future in both models. In the mentioned models and in Urmia, Tabriz, and Saghez stations, the optimistic scenario showed the proper performance of the models with a high R2 (0.99, 0.99, and 0.99 for Tmin and 0.99, 0.99, and 1.00 for Tmax) and a low MAE (1.48, 1.27, and 1.37 for Tmin and 1.54, 1.49, and 1.55 for Tmax), respectively. The results of examining the changes in minimum and maximum temperatures and reference ET were presented in different tables and graphs. Accordingly, the minimum and maximum temperature ranges and, accordingly, the reference ET obtained from the Makkink and Turc methods will increase in optimistic and pessimistic scenarios and in the near and far future periods in Urmia, Tabriz, and Saghez stations. According to the results, the average minimum and maximum temperatures will

Copyright ©2025 Yahyavi Dizaj et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

increase in future periods and under both scenarios. Moreover, the average minimum and maximum temperatures will increase in the investigated stations according to optimistic and pessimistic scenarios. An effect of climate change is the increase in temperature, and one of its consequences is the increase in ET and the water requirement of plants. Furthermore, the main part of activities in the Lake Urmia basin is focused on agriculture and plays an important role in the employment and economy of this region. Therefore, climate change will cause many environmental problems by affecting the temperature and reference ET in the coming years.
Conclusion: To know the average minimum and maximum temperature changes and reference ET in the study area, the effect of climate change on minimum and maximum temperatures and reference ET in the Lake Urmia basin was evaluated using CMIP6 models. The mentioned variables were predicted using the observation data of Urmia, Tabriz, and Saghez stations as well as CESM2 and IPSL-CM6A-LR models of the sixth report. Downscaling was done by the LS method during the base period (1975-2014) and two future periods (2020-2059 and 2060-2099) under optimistic and pessimistic scenarios. R2 and MAE statistics were used to validate climate models. Finally, the Makkink and Turc methods were used to calculate reference ET. The results indicate that the minimum temperature will increase from 0.05 to 3.02 and 0.60 to 4.31 ℃, and the maximum temperature will increase from 0.25 to 3.84 and 0.55 to 5.41 ℃ in the near and far future compared to the base period, respectively. Moreover, the average reference ET will increase from 0.72 to 4.68 and 0.08 to 4.80 mm/month by the Makkink method and from 0.24 to 5.23 and 0.71 to 5.59 mm/month by the Turc method in the near and far future, respectively.

Keywords: Climate change, Lake Urmia basin, Makkink, Reference evapotranspiration, Turc

How to Cite This Article: Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., & Javan, Kh. (2025). Evaluation of the Climate Change Effect on Minimum and Maximum Temperatures and the Reference Evapotranspiration in the Lake Urmia Basin Using CMIP6 Models. *J Watershed Manage Res*, 16(1), 14-26. DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6

آمنه یحیوی دیزج[۱]، طیبه اکبری ازیرانی[۲] و خدیجه جوان[۳]

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (نویسنده مسوول: t_akbari@sbu.ac.ir)
۳- دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹
صفحه۱۴ تا ۲۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: تغییر اقلیم به‌عنوان پدیده‌ی تأثیرگذار بر تغییر در سامانه‌های اقلیمی و افزایش دما، افزایش ظرفیت رطوبتی جو است به‌طوری که افزایش دمای جهانی باعث افزایش تبخیر از سطح و محتوای آب موجود در جو شده است. بنابراین، افزایش دما و بالا رفتن ظرفیت رطوبتی هوا، در صورت وجود منبع رطوبت، رطوبت ویژه هوا را افزایش و رطوبت نسبی را کاهش می‌دهد. این امر موجب بالا رفتن بخار آب کلی جو می‌شود و بخار آب در نقش یک گاز گلخانه‌ای، خود موجب تشدید گرمایش جهانی می‌گردد. در این رابطه، یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم، تأثیرگذاری بر مؤلفه‌های مؤثر بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز همچون دما، بارش و تبخیر تعرق است. بنابراین، اطلاع از میزان تبخیر تعرق هر نقطه به‌ویژه درمناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران و به‌طور ویژه‌تر حوضه دریاچه ارومیه، که عمده‌ی فعّالیت‌های آن وابسته به کشاورزی است، برای تعیین نیاز آبی گیاهان و مدیریت منابع آب حائز اهمیت فراوانی است و ضرورت مطالعه‌ی آن تحت تأثیر تغییر اقلیم بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو، تغییر اقلیم پدیده‌ای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع، به‌عنوان مهم‌ترین بخش چرخه هیدرولوژی است زیرا تغییرات اقلیمی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر زیست‌کره داشته باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر دماهای کمینه، بیشینه و متوسط تبخیر تعرق مرجع حوضه دریاچه ارومیه در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 به‌صورت میلی‌متر بر ماه مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تبریزو سقز استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای متغیرهای دمای کمینه و بیشینه به‌صورت ماهانه، برای دوره آماری ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی دریافت شد. دسته‌ی دوم داده‌های مدل‌های اقلیمی را در برمی‌گیرند که برای صحت‌سنجی متغیرهای مورد بررسی مدل‌های اقلیمی CMIP6 در دوره‌ی تاریخی مدل که دارای دوره‌ی مشترک با دوره‌ی مشاهداتی هستند (۲۰۱۴-۱۹۷۵)، مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی وضعیت آتی دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز از مدل‌های اقلیمی CMIP6 استفاده شد. از این‌رو، مدل‌های اقلیمی گزارش ششم برای دوره‌های تاریخی و آینده مدل تحت سناریوهای مورد نظر پژوهش حاضر در مقیاس ماهانه استخراج شدند. دو مدل اقلیمی (CESM2 و IPSL-CM6A-LR) گزارش ششم تحت سناریوهای خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) برای بررسی اثرات تغییر اقلیم و پیش‌بینی تغییرات متوسط دمای کمینه و بیشینه و همچنین تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع در مقیاس ماهانه با استفاده از روش LS ریزمقیاس‌سازی و سپس صحت‌سنجی مدل‌های اقلیمی با استفاده از سنجه‌های آماری R2 و MAE انجام شد. در نهایت تبخیر تعرق مرجع برای دوره‌های پایه، آینده‌ی نزدیک و دور به روش‌های ماکینگ و تورک محاسبه گردید.

یافته‌ها: در پژوهش حاضر، نتایج مدل‌های CESM2 و IPSL-CM6A-LR نسبت به دوره پایه با استفاده از R^2 و MAE برای دوره‌ی آتی نشان داد که در هر دو مدل، سناریوهای خوش‌بینانه در آینده نزدیک عملکرد بهتری دارند. در مدل‌های مذکور و در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز، سناریوی خوش‌بینانه در دوره‌های موردنظر به‌ترتیب با R^2 بالا (۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ برای دمای کمینه و ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۱/۰۰ برای دمای بیشینه) و MAE پایین (۱/۴۸، ۱/۲۷ و ۱/۳۷ برای دمای کمینه و ۱/۵۴، ۱/۴۹ و ۱/۵۵ برای دمای بیشینه) عملکرد مناسب مدل‌ها را نشان داد. نتایج بررسی تغییرات دماهای کمینه و بیشینه و تبخیر تعرق به‌صورت جداول و نمودارهای مختلف ارائه شدند. با توجه به آن‌ها می‌توان دریافت که در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز به‌ترتیب دامنه‌ی تغییرات دمای کمینه و بیشینه و به تبع آن تبخیر تعرق مرجع حاصل از روش‌های ماکینگ و تورک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه و در دوره‌های آینده نزدیک و دور افزایشی خواهد بود. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، در ایستگاه‌های مورد بررسی مطابق سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در دوره‌های آتی متوسط دماهای کمینه و بیشینه افزایش خواهد یافت. یکی از اثرات تغییر اقلیم افزایش دما است که از پیامدهای آن می‌توان به افزایش تبخیر تعرق مرجع و نیاز آبی گیاهان اشاره نمود. همچنین، بخش عمده‌ی فعّالیت‌های حوضه دریاچه ارومیه بر کشاورزی متمرکز است و نقش حائز اهمیتی در اشتغال و اقتصاد این منطقه دارد. تغییر اقلیم با تأثیر بر دما و تبخیر تعرق مرجع در سال‌های آتی مشکلات زیست‌محیطی بسیاری را خواهد داشت.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش، به‌منظور آگاهی از تغییرات متوسط دمای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع در منطقه‌ی مورد مطالعه، اقدام به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 شد. جهت پیش‌بینی متغیرهای مذکور از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز و مدل‌های CESM2 و IPSL-CM6A-LR گزارش ششم استفاده شد. ریزمقیاس‌سازی با روش LS طی دوره‌ی پایه (۲۰۱۴-۱۹۷۵) و دو دوره‌ی آتی (۲۰۵۹-۲۰۲۰ و ۲۰۹۹-۲۰۶۰) تحت سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه انجام شد. جهت صحت‌سنجی مدل‌های اقلیمی از سنجه‌های R^2 و MAE استفاده شد. در نهایت جهت محاسبه‌ی تبخیر تعرق مرجع از روش‌های ماکینگ و تورک استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که متوسط دمای کمینه در ایستگاه‌های مورد بررسی در آینده‌ی نزدیک و دور بین ۰/۰۵ تا ۳/۰۲ و ۰/۶۰ تا ۴/۳۱ $^{\circ}C$ و دمای بیشینه بین ۰/۲۵ تا ۳/۸۴ و ۰/۵۵ تا ۵/۴۱ $^{\circ}C$ نسبت به دوره‌ی پایه افزایش خواهد داشت. همچنین مقادیر تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع در آینده‌ی نزدیک و آینده‌ی دور در روش‌های ماکینگ بین ۰/۷۲ تا ۴/۶۸ و ۰/۰۸ تا ۴/۸۰ و تورک ۰/۲۴ تا ۵/۲۳ و ۰/۷۱ تا ۵/۵۹ میلی‌متر بر ماه افزایش خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: تبخیر حوضه دریاچه ارومیه، تعرق مرجع، تغییر اقلیم، تورک، ماکینگ

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

مقدمه

اقلیم بیانگر شرایط جوی غالب در یک مکان گسترده است که حاصل تعامل پیچیده‌ی سامانه‌های هواکره، آب کره، زیست‌کره، یخ‌کره و سنگ‌کره است. تغییرات بلندمدّت میانگین‌های شرایط جوی، تغییر اقلیم نامیده می‌شود که میانگین متغیرهای اقلیمی در مکان‌های مختلف بر اثر تغییر اقلیم تغییر می‌کند. به‌گونه‌ای که اگر دمای هوا به‌عنوان یک متغیر از هوا کره تغییر یابد، می‌تواند تغییر در بسیاری از متغیرها و مؤلفه‌های سامانه‌های مذکور را داشته باشد (Zarrin *et al*., 2022). در این رابطه، گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC[1]) حاکی از آن است که انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جو سبب گرم شدن مؤلفه‌های سامانه‌های اقلیمی می‌شود که این رویداد در مناطق خشک و نیمه‌خشک قاره‌ی آسیا اثرات منفی قابل‌توجهی خواهد داشت (IPCC, 2014). بر اساس چهارمین گزارش IPCC در طول ۱۰۰ سال گذشته، متوسط دمای کره‌ی زمین ۰/۷۴ °C افزایش یافته است و طبق پیش‌بینی‌ها این افزایش تا سال ۲۱۰۰ به ۱/۸ تا ۴ °C می‌رسد (Niggli *et al*., 2009). با توجه به پنجمین گزارش IPCC، متوسط سالانه‌ی دمای جهانی در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۲-۱۸۸۰ به‌میزان ۰.۸۵ °C افزایش یافته است (Roshani & Hamidi, 2022). در ششمین گزارش IPCC، طی دهه‌ی گذشته (۲۰۲۰-۲۰۱۱) متوسط دمای جهانی ۱/۰ ± ۱/۱ °C نسبت به آغاز انقلاب صنعتی (۱۹۰۰-۱۸۵۰) بالاتر بوده است (IPCC., 2021).

از جمله پیامدهای تغییر در سامانه‌های اقلیمی و افزایش دما، افزایش ظرفیت رطوبتی جو است به طوری که افزایش دمای جهانی باعث افزایش تبخیر از سطح و محتوای آب موجود در جو شده است (IPCC, 2021). افزایش دما و بالا رفتن ظرفیت رطوبتی هوا، در صورت وجود منبع رطوبت، رطوبت ویژه‌ی هوا را افزایش و رطوبت نسبی را کاهش می‌دهد و موجب بالا رفتن بخار آب کلی جو می‌شود و بخار آب در نقش یک گاز گلخانه‌ای، خود موجب تشدید گرمایش جهانی می‌گردد (Dehghani *et al*., 2017). در این رابطه، یکی از مهم‌ترین پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، تأثیرگذاری بر مؤلفه‌های مؤثر بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز هم‌چون دما، بارش و تبخیر تعرق[2] است (Shenbin *et al*., 2006). در حال حاضر، بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر نیاز آبی بخش کشاورزی بسیار حائز اهمیت است و در مطالعات تغییر اقلیم، اخیراً تبخیر تعرق به‌عنوان سومین عامل اقلیمی مهم مرتبط کننده‌ی سه سامانه‌ی هواکره، آب‌کره و زیست‌کره به شمار می‌آید (Shenbin *et al*., 2006). براساس استاندارد سازمان کشاورزی ملل متحد (فائو[3]) ، تبخیر تعرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن سبز) در یک دوره‌ی زمانی مشخص مصرف نماید به طوری که گیاهان آن مزرعه در طول دوره‌ی رشد با هیچ‌گونه تنش آبی مواجه نباشند، به‌عنوان تبخیر تعرق مرجع نامیده شده، با علامت اختصاری $ET0$[4] نشان داده می‌شود (Allen *et al*., 1998).

تبخیر تعرق گیاه مرجع در هر منطقه گویای شرایط اقلیمی آن منطقه است و تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی مانند دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی در بازه‌ی زمانی مورد نظر می‌باشد (Yahyavi Dizaj *et al.,* 2023). همچنین، با توجه به فصل سال و ناهمواری منطقه‌ی مطالعاتی، نقش هریک از عوامل مذکور بر میزان تبخیر تعرق مرجع بیشتر یا کمتر مشاهده می‌شود (Yahyavi Dizaj *et al.,* 2023).

ایساکا و همکاران (Issaka *et al.,* 2017) به تجزیه و تحلیل روابط تجربی برآورد تبخیر تعرق مرجع در قطر پرداختند. آنها روش‌های بلانی کریدل، هارگریوز سامانی، جنسن هیز، لاینکر و روش تورک را در مقایسه با مدل فائو پنمن مانتیث مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که از بین روش‌های مذکور، روش تورک با بهره‌گیری از سه فراسنجه هواشناسی (دما، تابش و رطوبت نسبی) دارای بیشترین تطابق با روش استاندارد فائو پنمن مانتیث است (Issaka *et al.,* 2017). در مطالعه‌ای دیگر، لانگ و همکاران (Lang *et al.,* 2017) هشت روش تخمین تبخیر تعرق مرجع را با روش فائو پنمن مانتیث، در جنوب غرب چین مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان دادند که عملکرد روش‌ها در هر منطقه متناسب با نوع اقلیم آن متنوع بود. با این وجود، از بین روش‌های مورد بررسی، روش ماکینگ بهترین عملکرد را داشت (Lang *et al.,* 2017). بنا بر این، اطلاع از میزان تبخیر تعرق هر نقطه به ویژه درمناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند ایران و به‌طور ویژه‌تر حوضه دریاچه ارومیه، که عمده‌ی فعّالیت‌های آن وابسته به کشاورزی است، برای تعیین نیاز آبی گیاهان و مدیریت منابع آب حائز اهمیت فراوانی است و ضرورت مطالعه‌ی آن تحت تأثیر تغییر اقلیم بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو، تغییر اقلیم پدیده‌ای مؤثر بر تبخیر تعرق مرجع، یکی از مهم‌ترین بخش‌های چرخه‌ی هیدرولوژی است زیرا تغییرات اقلیمی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر زیست‌کره داشته باشد (Azizzadeh & Javan, 2015; Almazroui *et al.,* 2020). همچنین این تغییرات می‌تواند خسارات اقتصادی زیادی را بر جوامع بشری به بار آورد (Kim *et al*., 2021). در این راستا، IPCC در گزارش ششم خود به افزایش مخاطرات طبیعی تحت تأثیر تغییر اقلیم اشاره و هشدارهایی در این زمینه ارائه کرده‌است (IPCC, 2021). کشور ایران نیز از این مخاطرات به‌دور نیست و در سال‌های اخیر مخاطرات طبیعی متأثر از تغییر اقلیم، به‌عنوان مثال سیل فروردین ماه، خشکسالی بی‌سابقه، بارش‌های سیل‌آسای تابستان و امواج گرمایی بی‌سابقه‌ی تابستان را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۹۹، ۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، تجربه نموده است.

بنابراین، آگاهی از تغییرات اقلیم آینده جهت ارائه راهکارهای سازگارانه و کنترلی مخاطرات طبیعی مستلزم پیش‌بینی‌ها و پیش‌نگری‌های آینده‌ی اقلیم است و ضرورت مطالعات گسترده را در نقاط مختلف جهان می‌طلبد. امروزه، به‌منظور دستیابی به این امر مهم (اثرات تغییرات اقلیمی) از مدل‌های اقلیمی Global Circulation Model استفاده می‌شود که این مدل‌ها

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Evapotranspiration
3. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO)
4. Reference Evapotranspiration

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

سه بعدی هستند و قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره‌ی بلندمدّت بزرگ مقیاس (جهانی یا قارّه‌ای) با استفاده از سناریوهای (SSP[5]) مختلف اقلیم آینده را شبیه‌سازی و مدل‌سازی نمایند (Chen *et al*., 2019). مدل‌های گزارش ششم (CMIP6[6]) نسخه‌های به‌روز شده‌ی مدل‌های اقلیمی GCM در راستای گزارش ششم IPCC هستند که به همراه مجموعه‌ای از سناریوهای جدیدی SSP در بین سال‌های ۲۰۱۸–۲۰۲۱ منتشر شده‌اند (IPCC., 2021). سناریوهای SSP در ترکیب با مدل‌های CMIP6 عمل پیش‌نگری را تا سال ۲۱۰۰ میلادی به‌عنوان اهداف بلندمدّت اقلیمی به انجام خواهند رساند (Karimi *et a*l., 2023). در این رابطه، باتوجه به نقش اساسی و قابل ملاحظه‌ای که تبخیر تعرق مرجع از طریق چرخه‌ی هیدرولوژی در اقلیم جهانی ایفا می‌کند، بسیاری از پژوهشگران (Sutapa *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2020; Jerin *et al*., 2021; Liu *et al*., 2021; Li *et al*., 2022; Zhao *et al*., 2022; Ghafouri-Azar & Lee, 2023; Modaresi & Araghi, 2023) در نقاط مختلف جهان این مسئله مهم را مورد توجه قرار داده‌اند.

جمع‌بندی پیشینه‌ی پژوهش حاضر حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین مسائل سامانه‌های پنج‌گانه‌ی مذکوردر قرن حاضر هستند. از سویی دیگر، مرور منابع مختلف بیانگر آن است که تغییرات اقلیمی با تأثیر بر دمای هوا سبب افزایش دما در برخی از نقاط جهان شده است که پیامد آشکار آن افزایش میزان تبخیر تعرق مرجع در دوره‌های آتی است. از آنجایی‌که بیشتر فعّالیت‌های استان آذربایجان غربی، به‌ویژه حوضه دریاچه ارومیه، وابسته به کشاورزی است و با در نظر گرفتن این نکته‌ی مهم که با کم آب شدن دریاچه ارومیه طی سال‌های گذشته مشکلات زیادی از نظر منابع آب و کشاورزی بوجود آمده است، تغییرات اقلیمی با تأثیر بر منابع آب و به‌ویژه کشاورزی شهر ارومیه در آینده، سبب تشدید تنش و نیاز آبی محصولات کشاورزی این شهر خواهد شد. لذا، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی اثر تغییر اقلیم بردماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 است. از این‌رو، نتایج شبیه‌سازی دو مدل CESM2 و IPSL-CM6A-LR از مجموعه مدل‌های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌ترتیب خوش‌بینانه و بدبینانه در دو دوره‌ی آینده‌ی نزدیک و دور انجام خواهدگرفت. هدف بعدی، ارائه اطلاعات کاربردی جهت دستیابی به راهکارهای سازگارانه و کنترلی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب، کشاورزی و به‌ویژه نیاز آبی گیاهان به برنامه‌ریزان و مدیران در دو دوره‌ی ۴۰ ساله آینده‌ی نزدیک ۲۰۵۹–۲۰۲۰ و دور ۲۰۹۹–۲۰۶۰ نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۱۴–۱۹۷۵) در حوضه دریاچه ارومیه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش با تمرکز بر حوضه دریاچه ارومیه (شکل۱) انجام شده است که این حوضه دارای اقلیم نیمه‌خشک و کوهستانی است و تقریباً بین ارتفاع ۱۲۰ تا ۳۷۰۰ متر قرار دارد. جمعیت این حوضه به‌عنوان بزرگترین مراکز جمعیتی شمال غرب ایران عمدتاً به فعّالیت‌های کشاورزی اشتغال دارند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های ایستگاهی (مشاهداتی)

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم و محاسبه دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق گیاه مرجع از دو دسته داده استفاده شد. دسته‌ی اول شامل داده‌های ایستگاهی است که در پژوهش حاضر از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای متغیرهای دمای کمینه و بیشینه به‌صورت ماهانه، برای دوره‌ی آماری ۴۰ ساله از ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. دسته‌ی دوم داده‌های مدل‌های اقلیمی را در برمی‌گیرد که برای صحّت‌سنجی متغیرهای مورد بررسی مدل‌های اقلیمی CMIP6 در دوره‌ی تاریخی مدل که دارای دوره‌ی مشترک با دوره مشاهداتی هستند (۲۰۱۴–۱۹۷۵)، مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های مدل‌های اقلیمی (گزارش ششم)

برای بررسی وضعیت آتی دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع در حوضه دریاچه ارومیه، از مدل‌های اقلیمی CMIP6 با توجه به در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز دوره‌های پایه و آتی در زمان انجام پژوهش حاضر استفاده شد. از این‌رو، مدل‌های اقلیمی گزارش ششم از نشانی https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6 برای دوره‌های تاریخی (historical) و آینده مدل تحت سناریوهای (SSP) موردنظر پژوهش حاضر در مقیاس ماهانه استخراج شد. ابتدا، با در نظر داشتن دوره‌ی مشترک با دوره‌ی مشاهداتی، یک دوره تاریخی ۴۰ ساله از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ برای دوره‌ی گذشته و دو دوره‌ی ۴۰ ساله شامل آینده نزدیک ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۹ و آینده دور ۲۰۶۰ تا ۲۰۹۹ برای دوره‌ی آتی مدل‌های CESM2 و IPSL-CM6A-LR جدول ۱ برای پیش‌بینی تبخیر تعرق مرجع انتخاب شد. سپس، برای دوره‌های پیش‌بینی آینده دو سناریوی خط سیر مشترک اجتماعی–اقتصادی (SSP) استفاده شد که این سناریوها عبارت‌اند از سناریوی توسعه پایدار، SSP1-2.6 درحالت خوش‌بینانه و سناریوی توسعه سوخت‌های فسیلی SSP5-8.5 در شرایط بدبینانه (Eyring *et al.*, 2016).

ریزمقیاس‌سازی مدل‌های اقلیمی CMIP6

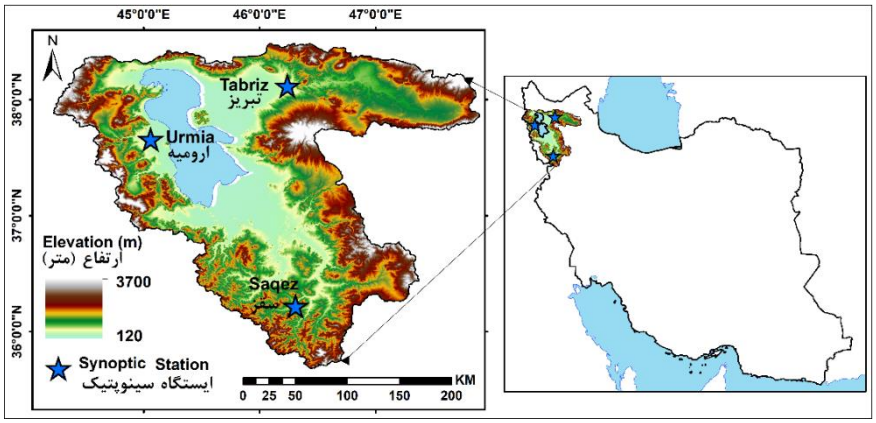
از آنجایی‌که مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) بزرگ‌مقیاس هستند و نسبت به داده‌های ایستگاهی وضوح کمتری دارند، در نتیجه در مقیاس ایستگاهی قابل استفاده‌ی مستقیم نیستند. برای رفع این محدودیت و قابل استفاده شدن مدل‌های اقلیمی نیاز به ریزمقیاس‌سازی تا سطح ایستگاهی و منطقه‌ی مورد مطالعه دارند.

5. The Shared Socioeconomic Pathways

6. Coupled Model Inter Comparison Phase 6

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]



شکل۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Location of the Study Area

جدول۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 منتخب پژوهش حاضر
Table 1. Characteristics of selected CMIP6 models in this study

مدل Model	کشور Country	مرکز پژوهشی Research Center	دقّت مکانی (درجه) Precision place (grade)
CESM2	USA	Community Earth System Model Contributors	1.25° × 0.94°
IPSL-CM6A-LR	France	Institut Pierre-Simon Laplace	2.5° × 1.26°

روش تصحیح اریبی Linear Scaling

در پژوهش حاضر ابتدا در محیط ArcMap 10.8.1 داده‌های بزرگ مقیاس CMIP6 که دارای فرمت nc. بودند استخراج شدند و سپس به‌منظور تصحیح اریبی داده‌های دمای کمینه و بیشینه‌ی برونداد مدل‌های اقلیمی از روش Linear Scaling (LS) (additive) استفاده شد (معادله۱). در روش LS، تفاوت متوسط ماهانه‌ی داده‌های مشاهداتی ایستگاه و تاریخی مدل اقلیمی طی دوره‌ی آماری مشترک (در پژوهش حاضر ۴۰ ساله) به سری داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی آتی اعمال می‌شود (Mendez *et al*., 2020).

$$T_{cor,m,d} = T_{raw,m,d} + \mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{raw,m}) \quad (1)$$

در معادله‌ی ۱، T دمای میانگین، μ میانگین داده‌ها و obs، raw، cor، m و d داده‌های مشاهداتی، داده‌های خام، داده‌های اصلاح اریبی‌شده، ماه و روز هستند. در این پژوهش، معادله‌ی ۱ برای دوره‌های پایه و آتی مورد استفاده قرارگرفت.

ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی منتخب

در پژوهش حاضر، به‌منظور دستیابی به شباهت بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌های اقلیمی و ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی منتخب در قالب مقادیر آماری، از سنجه‌های R^2 و MAE استفاده شد. در این رابطه، R^2 میزان دقّت مدل و همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی را نشان می‌دهد. دقّت مدل‌های اقلیمی نیز با استفاده از MAE تعیین می‌شود که مقدار صفر آن نشان‌دهنده‌ی دقّت ۱۰۰ درصدی است و هرچه مقدار آن از صفر فاصله بگیرد حاکی از کم‌شدن دقّت مدل اقلیمی است (Jahangir & Piran, 2022). سنجه‌های آماری R^2 و MAE براساس معادله‌های ۲ و ۳ حاصل می‌شوند.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|(xi - yi)|}{n} \quad (3)$$

در معادله‌های ۲ و ۳، x_i و y_i به‌ترتیب i امین داده‌ی مشاهداتی و داده‌ی مدل، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین کل داده‌های x_i و y_i در جامعه‌ی آماری و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی هستند (Jokar Sarhangi *et al*., 2022).

محاسبه‌ی تبخیر تعرق مرجع

روش ماکینگ (Makkink)

برای محاسبه‌ی تبخیر تعرق مرجع، با استفاده از روش ماکینگ می‌توان مقدار متوسط تبخیر تعرق ماهانه را از معادله‌ی ۴ به‌دست آورد.

$$ET_0 = 0.61\frac{\Delta}{\Delta + r} \cdot \frac{R_s}{2.45} - 0.12 \quad (4)$$

در معادله‌ی ۴، ET_0 تبخیر تعرق مرجع، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع بر حسب میلی‌بار بر درجه سلسیوس، r ثابت سایکرومتری بر حسب میلی‌بار بر درجه سلسیوس و R_s بر حسب کالری بر سانتی‌متر مربع هستند (Makkink, 1957).

روش تورک (Turc)

محاسبه‌ی تبخیر تعرق مرجع، با استفاده از روش تورک به‌صورت معادله‌های ۵ و ۶ حاصل می‌شود.

$$ET_0 = 0.013 \times \frac{T_{mean}}{(T_{mean} + 15)} \times (R_S + 50)\ if\ RH >= 50 \quad (5)$$

$$ET_0 = 0.013 \times \frac{T_{mean}}{(T_{mean} + 15)} \times (R_s + 50) \times [1 + (50 - RH)/70]\ if\ RH < 50 \quad (6)$$

در معادله‌های ۵ و ۶، T_{mean} میانگین دما بر حسب درجه سلسیوس، R_S مقدار کل تابش خورشیدی بر حسب کالری بر سانتی‌متر مربع، و RH میانگین رطوبت نسبی به درصد هستند (Turc, 1961).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی منتخب

در پژوهش حاضر، نتایج ارزیابی مدل CESM2 در جدول۲ آورده شده‌اند. همان طور که قابل مشاهده است، دوره‌های مورد بررسی در مقیاس ماهانه برای آینده نزدیک از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۹ و آینده دور از سال ۲۰۶۰ تا ۲۰۹۹ را شامل می‌شوند. با توجه به آن در بررسی متغیر دمای کمینه، سناریوی خوش‌بینانه در دوره آینده نزدیک با بیشترین R^2 (۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۸) و کمترین MAE (۱/۳۷، ۱/۲۷ و ۱/۴۸) عملکرد بهتری را در مقایسه با آینده دور و سناریوی بدبینانه از خود نشان داده‌است. همچنین، در ارزیابی دمای بیشینه مدل CESM2، سناریوی خوش‌بینانه در آینده نزدیک با داشتن R^2 (۱، ۰/۹۹ و ۰/۹۹) و MAE (۱/۵۵، ۱/۴۹ و۱/۵۴)عملکرد مناسبی دارد. نتایج بررسی مدل IPSL-CM6A-LR در جدول۳ نشان می‌دهند که این مدل، به‌ترتیب با داشتن R^2 بیشتر (۱، ۰/۹۸ و ۰/۹۹) و MAE (۱/۱۵، ۵/۹۸ و ۱/۹۵) کمتر نسبت به سایر موارد مورد بررسی در سناریوی خوش‌بینانه و آینده نزدیک برای دمای کمینه عملکرد بهتری را دارا است. بررسی دمای بیشینه در مدل IPSL-CM6A-LR حاکی از آن است که این مدل در سناریوی خوش‌بینانه و آینده نزدیک با R^2(۱، ۱ و۱) و MAE (۱/۸۲، ۱/۷۳ و ۱/۶۳) عملکرد مناسبی دارد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های مورد بررسی در سناریوی خوش‌بینانه و آینده نزدیک عملکرد بهتری دارند.

جدول۲- نتایج سنجه‌های R^2 و MAE برای ارزیابی عملکرد مدل CESM2 در دوره‌ی آتی

Table 2. The results of R^2 and MAE statistics to evaluate the performance of the CESM2 model in the future period

ردیف Row	مدل Model	متغیر Variable	R^2 ارومیه Urmia	R^2 تبریز Tabriz	R^2 سقز Saqez	MAE ارومیه Urmia	MAE تبریز Tabriz	MAE سقز Saqez	سناریو Scenario	دوره Period
1	CESM2	دمای کمینه Tmin	0.98	0.99	0.99	1.48	1.27	1.37	SSP1-2.6	2020-2059
2	CESM2	دمای کمینه Tmin	0.98	0.99	0.98	1.86	1.77	1.98	SSP5-8.5	2020-2059
3	CESM2	دمای کمینه Tmin	0.99	0.99	0.99	1.85	1.57	1.77	SSP1-2.6	2060-2099
4	CESM2	دمای کمینه Tmin	0.98	0.97	1.00	3.02	4.45	1.10	SSP5-8.5	2060-2099
5	CESM2	دمای بیشینه Tmax	0.99	0.99	1.00	1.54	1.49	1.55	SSP1-2.6	2020-2059
6	CESM2	دمای بیشینه Tmax	0.99	0.99	1.00	2.33	2.32	2.30	SSP5-8.5	2020-2059
7	CESM2	دمای بیشینه Tmax	0.99	0.99	1.00	2.11	3.07	2.14	SSP1-2.6	2060-2099
8	CESM2	دمای بیشینه Tmax	0.99	0.98	0.99	3.09	5.94	5.85	SSP5-8.5	2060-2099

جدول ۳- نتایج سنجه‌های R^2 و MAE برای ارزیابی عملکرد مدل IPSL-CM6A-LR در دوره‌ی آتی

Table 3. The results of R^2 and MAE statistics to evaluate the performance of the IPSL-CM6A-LR model in the future period

ردیف Row	مدل Model	متغیر Variable	R^2 ارومیه Urmia	R^2 تبریز Tabriz	R^2 سقز Saqez	MAE ارومیه Urmia	MAE تبریز Tabriz	MAE سقز Saqez	سناریو Scenario	دوره Period
1	IPSL-CM6A-LR	دمای کمینه Tmin	0.99	0.98	1.00	1.95	5.98	1.15	SSP1-2.6	2020-2059
2	IPSL-CM6A-LR	دمای کمینه Tmin	1.00	1.00	1.00	2.67	2.41	2.53	SSP5-8.5	2020-2059
3	IPSL-CM6A-LR	دمای کمینه Tmin	0.98	0.99	1.00	3.19	5.49	2.19	SSP1-2.6	2060-2099
4	IPSL-CM6A-LR	دمای کمینه Tmin	0.98	0.99	0.98	4.21	5.60	5.77	SSP5-8.5	2060-2099
5	IPSL-CM6A-LR	دمای بیشینه Tmax	1.00	1.00	1.00	1.63	1.73	1.82	SSP1-2.6	2020-2059
6	IPSL-CM6A-LR	دمای بیشینه Tmax	1.00	1.00	1.00	2.18	2.32	2.71	SSP5-8.5	2020-2059
7	IPSL-CM6A-LR	دمای بیشینه Tmax	1.00	1.00	1.00	2.28	3.21	2.67	SSP1-2.6	2060-2099
8	IPSL-CM6A-LR	دمای بیشینه Tmax	1.00	1.00	1.00	2.93	5.75	5.91	SSP5-8.5	2060-2099

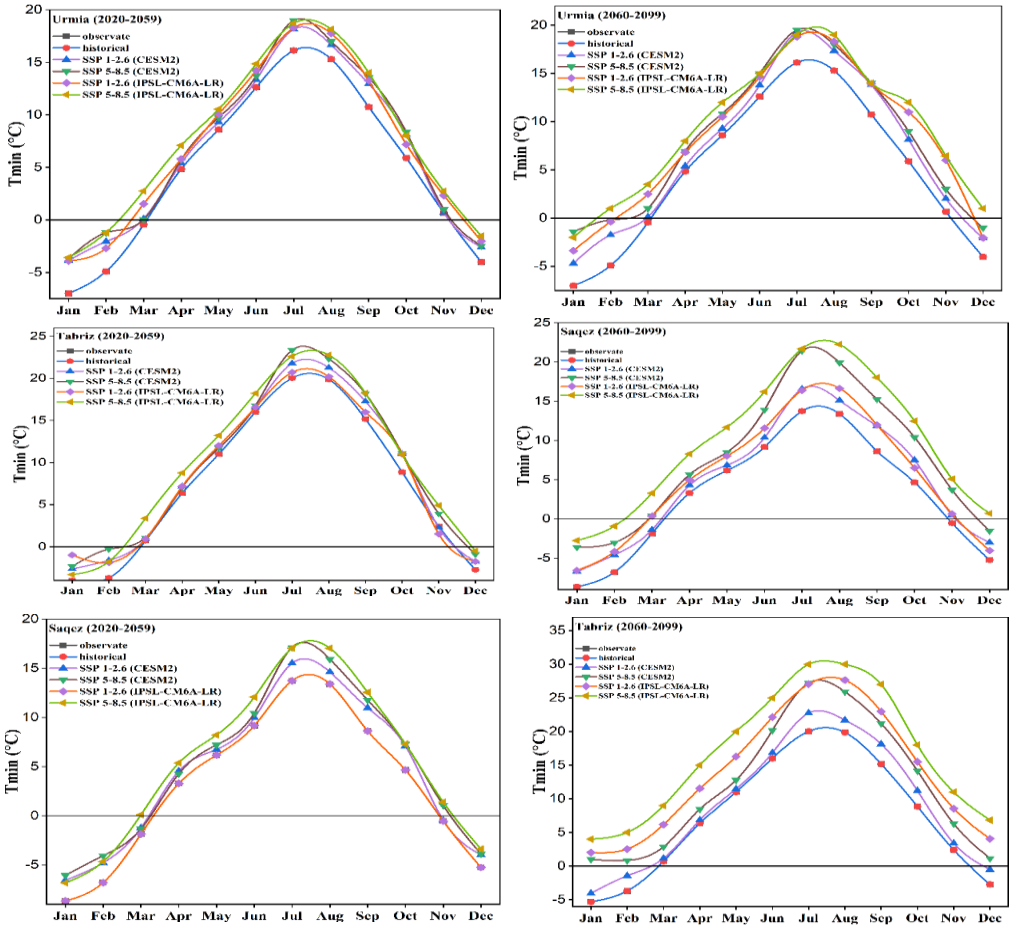
نتایج تغییرات متوسط دمای کمینه طی دوره‌های آتی

نتایج ارزیابی تغییرات متوسط دمای کمینه در شکل۲ حاکی از آن است که متوسط دمای کمینه در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) بر اساس سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در ایستگاه سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز در تمامی ماه‌ها نسبت به دوره‌ی پایه افزایشی خواهد بود. براساس

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

برونداد مدل CESM2 و IPSL-CM6A-LR در این شکل و در دوره‌ی ۴۰ ساله آتی، کمترین میزان تغییرات به ترتیب در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز با دامنه‌ی تغییرات متوسط دمای کمینه (۰/۱۷ — ۲۳/۱۳، ۰/۰۳ — ۲/۶۸ و ۰/۰۵ — ۲/۱۰) و بیشترین میزان تغییرات به ترتیب با میزان (۰/۴۳ — ۲/۹۰، ۰/۳۸ — ۲/۱۵ و ۰/۰۸ — ۲/۲۸) رخ خواهند داد.

بر اساس شکل۲ برای مدل‌های CESM2 و-IPSL CM6A-LR، می‌توان تغییرات متوسط دمای کمینه را در دوره‌ی آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) پیش‌بینی نمود. مطابق شکل مذکور، در تمامی ماه‌ها در دوره‌ی ۴۰ ساله آینده دور در سناریوهای مورد بررسی متوسط دمای کمینه افزایش خواهد یافت. این تغییرات به ویژه در ماه ژانویه چشم‌گیر بوده‌اند. در نهایت براساس (شکل۲)، که بیانگر نتایج حاصل از برونداد مدل IPSL-CM6A-LR در دوره آینده دور است، تغییرات متوسط دمای کمینه نسبت به دوره‌ی پایه در همه‌ی ماه‌ها محسوس است، به ویژه در ماه ژانویه در حالت بدبینانه و آینده‌ی دور تغییرات ۵/۶۰ °C خواهد بود. نتایج به‌طور کلی بیانگر آن هستند که در دوره‌ها و مدل‌های مورد بررسی و همچنین سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه، متوسط دمای کمینه در دوره‌ی آتی افزایشی خواهد بود.



شکل۲- متوسط ماهانه‌ی دمای کمینه ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز در آینده‌ی نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و آینده‌ی دور (۲۰۶۰-۲۰۹۹) نسبت به دوره‌ی مشاهداتی و تاریخی

Figure 2. Monthly average minimum temperature of Urmia, Tabriz, and Saqez stations in the near future (2059-2020) and the far future (2099-2060) compared to the observate and historical periods

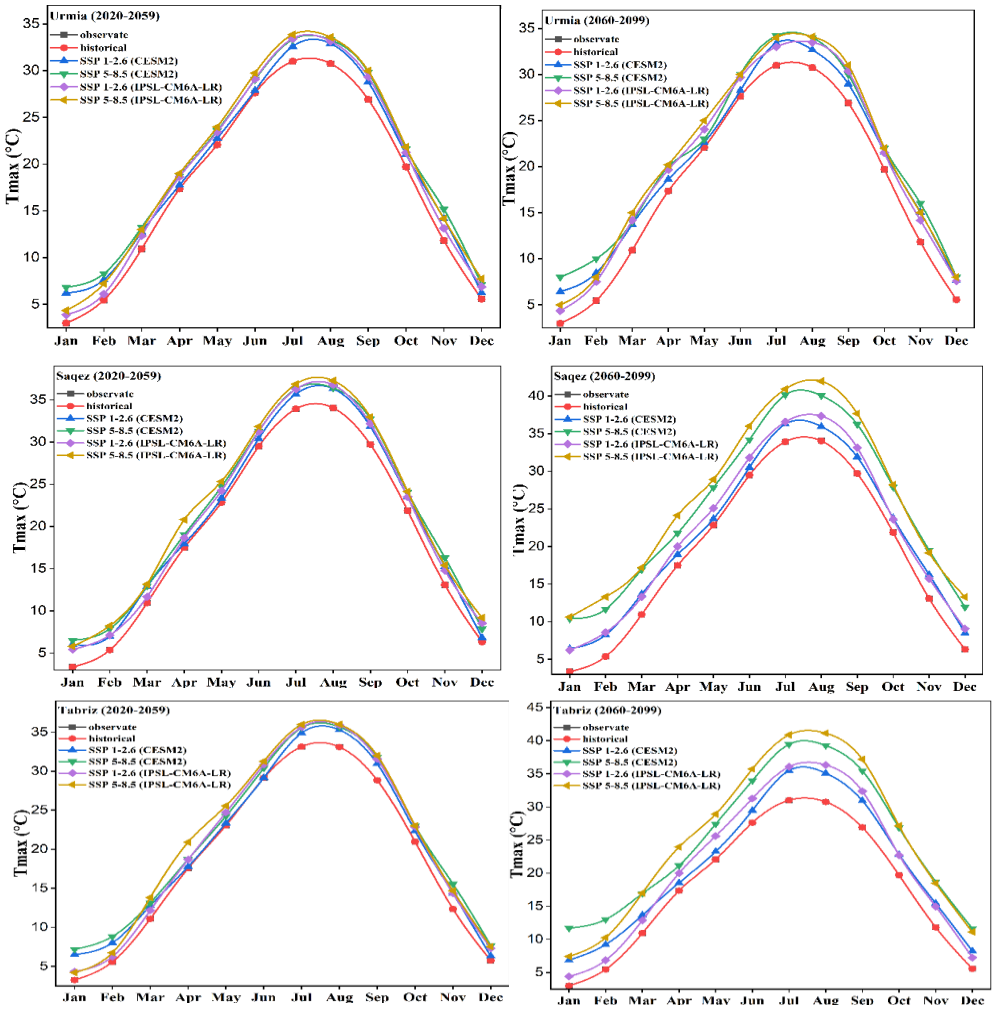
نتایج تغییرات متوسط دمای بیشینه طی دوره‌های آتی

براساس شکل۳، که نتایج حاصل از بررسی تغییرات متوسط دمای بیشینه مدل CESM2 در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک یعنی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۹ را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در ایستگاه‌های مورد بررسی در همه‌ی ماه‌ها نسبت به دوره‌ی پایه متوسط دمای بیشینه را افزایشی پیش‌بینی نموده‌اند. با توجه به (شکل۳)، در دوره‌ی ۴۰ ساله آینده بیشترین میزان تغییرات مربوط به ماه ژانویه با میزان ۰/۲۵ °C سناریوی خوش‌بینانه در ماه ژوئن به خود اختصاص داده است. در این رابطه، با تو جه به (شکل۳)، مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR بیشترین میزان تغییرات را با ۳/۰۶ °C در سناریوی بدبینانه در آینده نزدیک و در ماه سپتامبر نشان می‌دهد. همچنین، بر اساس پیش‌بینی مدل مذکور در شرایط خوش‌بینانه در ماه فوریه، تغییرات متوسط دمای بیشینه با میزان ۰/۶۳ °C افزایشی خواهند بود.

۳.۸۴ در سنایوی بدبینانه است و کمترین آن را با میزان

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

مطابق با شکل۳، نتایج مدل CESM2 حاکی از تغییرات متوسط دمای بیشینه در دوره‌ی آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) هستند. با توجه به شکل۳، ماه‌های مختلف دوره‌ی موردنظر طبق سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در آینده‌ی دور متوسط دمای بیشینه افزایش خواهند داشت. این تغییرات در ماه ژانویه قابل توجه هستند و در سناریوی بدبینانه این تغییرات نسبت به دوره‌ی پایه به‌میزان ۴/۰۱ °C افزایش خواهند یافت. در سناریوی خوش‌بینانه، تغییرات متوسط دمای بیشینه در ماه می به میزان ۰/۵۵ °C افزایشی پیش‌بینی می‌شود. شکل ۳ نتایج مدل IPSL-CM6A-LR را در دوره آینده دور نشان می‌دهند که طبق پیش‌بینی مدل مذکور، افزایش میزان متوسط دمای بیشینه نسبت به دوره‌ی پایه در تمامی ماه‌ها قابل مشاهده است. این افزایش در ماه سپتامبر در سناریوی بدبینانه و آینده‌ی دور به‌میزان ۴/۰۹ °C رخ خواهد داد. در سناریوی خوش‌بینانه، برونداد این مدل تغییرات را در ماه ژانویه به‌میزان ۱/۳۷ °C پیش‌بینی می‌کند. نتایج این بخش از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین (Dehghani *et al*., 2017; Roshani and Hamidi., 2022; Zarrin *et al*., 2022; Karimi *et al*., 2023) مطابقت دارند.



شکل۳- متوسط ماهانه‌ی دمای بیشینه ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز در آینده‌ی نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و آینده‌ی دور (۲۰۶۰-۲۰۹۹) نسبت به دوره‌ی مشاهداتی و تاریخی

Figure 3. Monthly average maximum temperature of Urmia, Tabriz, and Saqez stations in the near future (2059-2020) and the far future (2099-2060) compared to the observate and historical periods

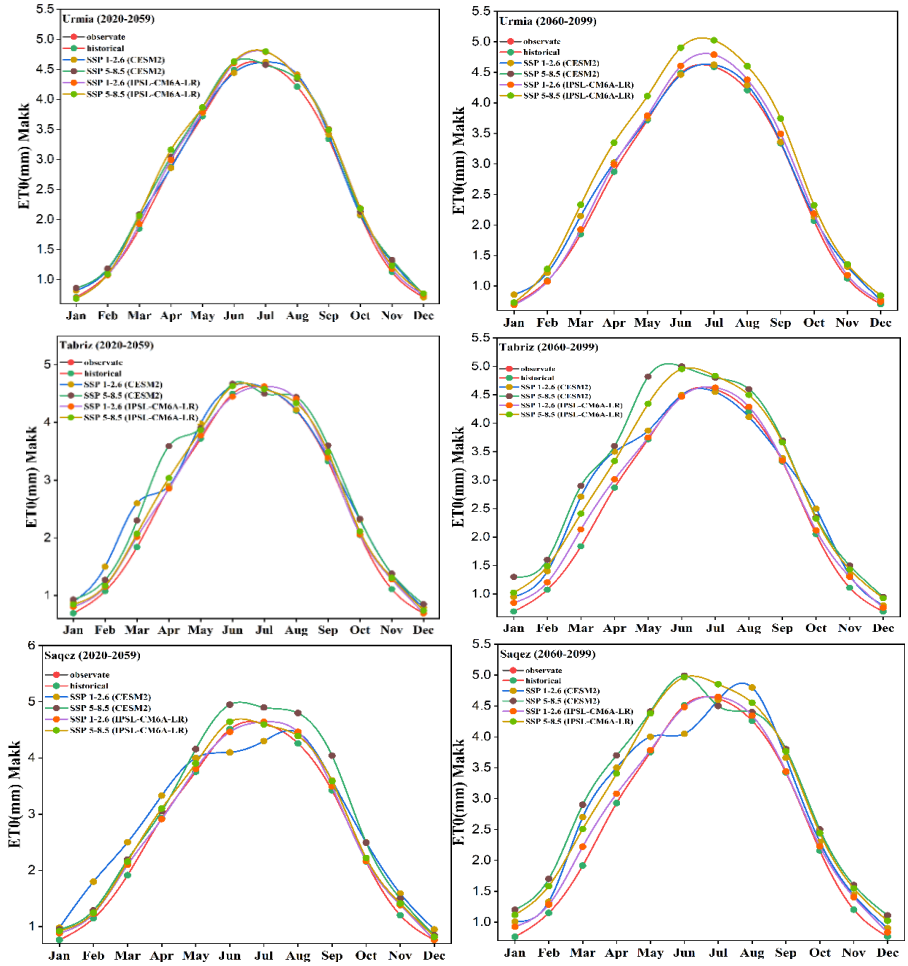
نتایج تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع طی دوره‌های آتی (با استفاده از روش‌های ماکینگ و تورک)

شکل۴ نتایج ارزیابی تغییرات متوسط ماهانه‌ی تبخیر تعرق مرجع حاصل از مدل CESM2 دوره‌ی آینده نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز را نشان می‌دهد. در سناریوی بدبینانه، بیشترین تغییرات افزایشی تبخیر تعرق نسبت به دوره‌ی پایه در ماه جولای با در روش ماکینگ با مقدار عددی ۶/۵۳ و مطابق (شکل ۵) در روش تورک این میزان به ۷/۱۴ میلی‌متر بر ماه در دوره‌ی ۴۰ ساله آتی پیش‌بینی شده است. در مقابل، کمترین میزان تغییرات افزایشی متوسط تبخیر تعرق مرجع ماهانه نسبت به دوره پایه در حالت خوش‌بینانه به مقادیر عددی ۰/۷۰ و ۰/۰۷ میلی‌متر بر ماه در

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

ماه می به‌روش‌های مذکور رخ خواهد داد. در شکل ۴، مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR نتایج تغییرات متوسط ماهانه‌ی تبخیر تعرق مرجع در بدبینانه‌ترین شرایط در ماه جولای به‌میزان ۵.۶۹ و در شکل ۵ همین ماه به‌میزان ۶.۲۴ میلی‌متر بر ماه برای دوره‌ی آینده‌ی نزدیک رخ خواهد داد. همچنین، مدل مذکور در همین ماه و در شرایط خوش‌بینانه میزان تغییرات را ۵.۹۲ میلی‌متر بر ماه در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک در منطقه مورد مطالعه خواهد داشت.

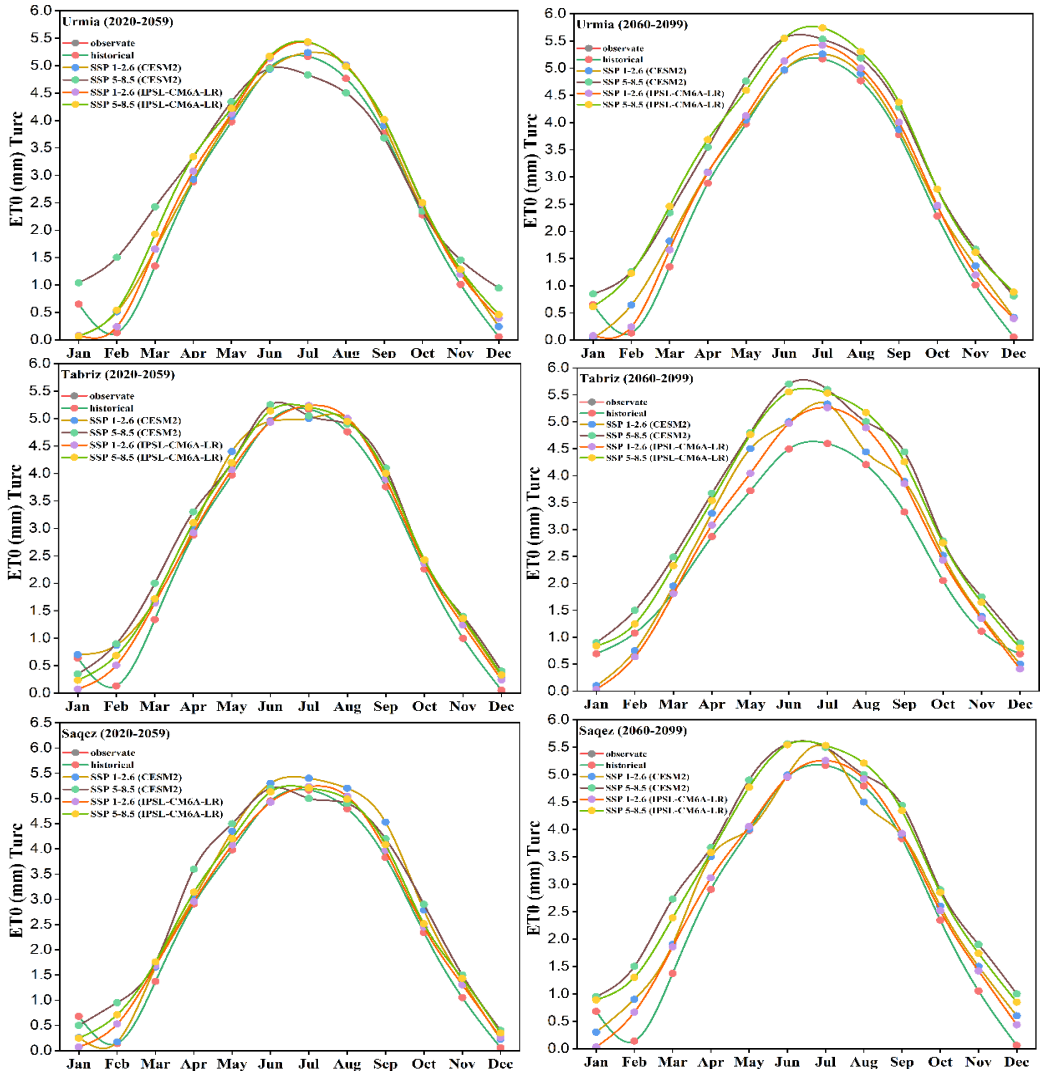
مطابق شکل‌های ۴ و ۵، در روش‌های ماکینگ و تورک در مدل CESM2، تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع ماهانه در آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) افزایشی پیش‌بینی شده است. به‌ویژه سناریوی بدبینانه که میزان تغییرات را ۶/۵۳ و ۷/۱۴ میلی‌متر بر ماه در ماه جولای نشان داده است. این مدل در سناریوی خوش‌بینانه در آینده دور تغییرات را در ماه می به میزان ۰/۸۵ در شکل ۴ و در شکل ۵، ۰.۳۰ میلی‌متر بر ماه پیش‌بینی کرده است. در شکل‌های ۴ و ۵، برونداد مدل IPSL-CM6A-LR قابل مشاهده است. بر اساس این شکل‌ها، بیشترین میزان متوسط تغییرات تبخیر تعرق مرجع ماهانه طبق سناریوی بدبینانه و دوره آینده دور در ماه آگوست به‌میزان ۶/۷۲ و ۶/۵۰ میلی‌متر بر ماه به‌ترتیب در روش‌های مورد بررسی رخ خواهد داد. طبق سناریوی خوش‌بینانه، کمترین میزان متوسط تبخیر تعرق مرجع را ماه ژانویه با میزان ۰/۷۹ و ۰/۱۷ میلی‌متر بر ماه در دوره‌ی آینده‌ی دور به خود اختصاص داده است. نتایج این بخش از پژوهش حاضر با پژوهش‌های قبلی (Kheyri *et al.*, 2022) که در دوره‌ی آتی تبخیر تعرق را افزایشی بیان نموده‌اند، مطابقت دارند.



شکل۴- متوسط ماهانه‌ی تبخیرتعرق مرجع (ماکینگ) ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز در آینده‌ی نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) نسبت به دوره‌ی مشاهداتی و تاریخی

Figure 4. Monthly average ET0 (Makkink) of Urmia, Tabriz, and Saqez stations in the near future (2059-2020) and the far future (2099-2060) compared to the observate and historical periods

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]



شکل ۵- متوسط ماهانه‌ی تبخیرتعرق مرجع (تورک) ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز در آینده‌ی نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و آینده‌ی دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) نسبت به دوره‌ی مشاهداتی و تاریخی

Figure 5. Monthly average ET0 (Turc) of Urmia, Tabriz, and Saqez stations in the near future (2059-2020) and the far future (2099-2060) compared to the observate and historical periods

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر متوسط ماهانه دماهای کمینه، بیشینه و تبخیر تعرق مرجع ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز و سقز در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 به‌صورت میلی‌متر بر ماه مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، از داده‌های مشاهداتی (دمای کمینه و بیشینه به درجه سلسیوس) بلندمدّت سازمان هواشناسی کشور در ایستگاه‌های مذکور از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ جهت استفاده‌ی آن برای صحّت‌سنجی مدل‌های اقلیمی و همچنین مقایسه‌ی آن با دوره‌ی تاریخی آن‌ها استفاده شد. علاوه بر آن، دو مدل اقلیمی (CESM2 و IPSL-CM6A-LR) گزارش ششم تحت سناریوهای خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۹-۲۰۲۰) و دور (۲۰۹۹-۲۰۶۰) برای بررسی اثرات تغییر اقلیم و پیش‌بینی تغییرات متوسط دمای کمینه و بیشینه و همچنین تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع در مقیاس ماهانه با استفاده از روش LS تصحیح اریبی و سپس به روش‌های مک کنیگ و تورک مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، صحّت‌سنجی مدل‌های اقلیمی با استفاده از سنجه‌های آماری R^2 و MAE انجام شد.

نتایج مدل‌های CESM2 و IPSL-CM6A-LRنسبت به دوره پایه با استفاده از R^2 و MAE برای دوره‌ی آتی نشان می‌دهند که در هر دو مدل، سناریوهای خوش‌بینانه در آینده نزدیک عملکرد بهتری دارند. در مدل‌های مذکور و در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز و سقز، سناریوی خوش‌بینانه در دوره‌های مورد نظر به‌ترتیب با بیشترین R^2 (۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۹) و کمترین MAE (۱/۴۸، ۱/۲۷ و ۱/۳۷) در متغیر دماهای کمینه و بیشینه R^2 (۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۱) و MAE (۱/۵۴، ۱/۴۹ و ۱/۵۵) عملکرد مناسب مدل‌ها را نشان داد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

نتایج بررسی تغییرات دماهای کمینه و بیشینه و تبخیر تعرق به‌صورت جداول و نمودارهای مختلف ارائه شده‌اند. با توجه به آن‌ها می‌توان دریافت که در حوضه دریاچه ارومیه میزان تغییرات متوسط دمای کمینه و بیشینه و به‌تبع آن تبخیر تعرق مرجع حاصل از روش‌های ماکینگ و تورک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه همچنین در دوره‌های آینده نزدیک و دور افزایشی پیش‌بینی شده‌است. در مدل‌های مذکور، در آینده نزدیک و دور به‌ترتیب نتایج دامنه‌ی تغییرات متوسط دماهای کمینه بین ۰/۰۵ تا ۳/۰۲ و ۰/۶۰ تا ۴/۳۱ ^{o}C و دمای بیشینه بین ۰/۲۵ تا ۳/۸۴ و ۰/۵۵ تا ۵/۴۱ ^{o}C نسبت به دوره‌ی پایه و مشاهداتی افزایشی خواهند بود. همچنین مقادیر تغییرات متوسط تبخیر تعرق مرجع در آینده‌ی نزدیک و دور در روش‌های ماکینگ بین ۰/۷۲ تا ۴/۶۸ و ۰/۰۸ تا ۴۰/۸۰ و تورک ۰/۲۴ تا ۵/۲۳ و ۰/۷۱ تا ۵/۵۹ میلی‌متر بر ماه در خوش‌بینانه و بدبینانه‌ترین حالت متغیر خواهند بود. با توجه به این که یکی از اثرات منفی تغییر اقلیم افزایش دما است که از پیامدهای آن می‌توان به افزایش تبخیر تعرق مرجع و نیاز آبی گیاهان اشاره نمود، در نتیجه تغییر اقلیم در قرن حاضر به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی بشر است. از آن جایی که بخش عمده‌ی فعّالیت‌های حوضه دریاچه ارومیه بر کشاورزی متمرکز است و نقش حائز اهمیتی در اشتغال و اقتصاد این منطقه دارد، تغییر اقلیم با تأثیر بر دما و تبخیر تعرق مرجع در سال‌های آتی مشکلات زیست‌محیطی بسیاری را از نظر کشاورزی خواهد داشت. با توجه به نتایج پژوهش حاضرف مطابق با سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در دروه‌های آتی، متوسط دماهای کمینه و بیشینه افزایش خواهد یافت. بنابراین، ارائه راهکارهای مناسب جهت مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های سازگارانه با تغییر اقلیم به‌وجود آمده در منطقه‌ی مورد مطالعه این پژوهش ضروری است. بررسی روش‌های مختلف تخمین تبخیر تعرق مرجع در زمان‌های مختلف، به‌ویژه در دوره‌ی آتی پیش‌نگری اقلیم آینده با استفاده از مدل‌های CMIP6 برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

References

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56(97), e156.

Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment,* 4, 455-475.

Azizzadeh, M., & Javan, K. (2015). Analyzing trends in reference evapotranspiration in northwest part of Iran. *Journal of Ecological Engineering,* 16(2), 1-12.

Chen, C., Kalra, A., & Ahmad, S. (2019). Hydrologic responses to climate change using downscaled GCM data on a watershed scale. *Journal of Water and Climate Change,* 10(1), 63-77.

Dehghani, T., Seseh, M., & Alijani, B. (2017).The effect of climate change on the distribution of specific humidity in the northern coasts of the Persian Gulf. *Natural Geography*, 11(39), 33-46.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development,* 9(5), 1937-1958.

Ghafouri-Azar, M., & Lee, S. I. (2023). Meteorological Influences on reference evapotranspiration in different geographical Regions. *Water*, 15(3), 454.

IPCC,(2014). Summary for policymakers.In: Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, *Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*. 1-32.

IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, et al. (Eds.), 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 University Press*. 3–32.

Issaka, A. I., Paek, J., Abdella, K., Pollanen, M., Huda, A. K. S., Kaitibie, S., Goktepe, I., Haq, M. M., & Moustafa, A. T. (2017). Analysis and calibration of empirical relationships for estimating evapotranspiration in Qatar: Case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(2), 05016013.

Jahangir, Mohammad Hossein and Piran, Morteza. (2022). Exponential scaling of climate parameters under CanESM2 model based on different scenarios (case study of Qazvin station), 4th Iranian National Hydrology Conference, Shahrekord,

Jerin, J. N., Islam, A. R. M., Al Mamun, M., Mozahid, M., & Ibrahim, S. M. (2021). Climate change effects on potential evapotranspiration in Bangladesh. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(8), 1-15.

Jokar Sarhangi, E., & Dehghan Chachkami, M. (2022). Efficiency Evaluation of RUSLE and ICONA models in erosion zoning of Baladeh watershed, Mazandaran province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 159-178.

Karimi, S. R., nasrolahi, A., & iranshahi, M. (2023). Investigating the effects of climate change on reference evaporation and transpiration based on the scenarios of the sixth climate change report (case study: Khorramabad station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1759-1777.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]

Kheyri, R., Mojarrad, F., Farhadi, B., & Masompour Samakoosh, J. (2022). Investigation of Evapotranspiration Changes of Autumn Irrigated Wheat in Iran under Climate Change Conditions. *Journal of Geography and Regional Development*, 20(1), 248-215.

Kim, J. H., Sung, J. H., Chung, E. S., Kim, S. U., Son, M., & Shiru, M. S. (2021). Comparison of Projection in Meteorological and Hydrological Droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5. *Sustainability*, 13(4), 2066.

Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., & Zhang, M. (2017). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in southwestern China. *Water*, 9(10), 734.

Liu, Z., Lu, J., Huang, J., Chen, X., & Zhang, L. (2021). Projection of reference crop evapotranspiration under future climate change in Poyang Lake watershed, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(1), 05020042.

Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. Journal of the Institution of Water Engineerrs, 11, 277-288.

Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L. F. (2020). Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*, 12(2), 482.

Modaresi, F., & Araghi, A. (2023). Projecting future reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(1), 101-112.

Niggli, U., Fließbach, A., Hepperly, P., & Scialabba, N. (2009). Low greenhouse gas agriculture: mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. *Ökologie & Landbau*, 141, 32-33.

O'Neill, B C., Kriegler, E., Ebi, K L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D S. & Solecki, W .(2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180.

Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). Water and Irrigation Management, 11(4), 781-795. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920

Heydari Tasheh Kaboud, S., & Khoshkhoo, Y. (2019). Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the West of Iran under RCP emission scenarios. *Applied researches in Geographical Sciences,* 19(53), 157-176.

Shenbin, C., Yunfeng, L., & Thomas, A. (2006). Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000. *Climatic change*, 76(3-4), 291-319.

Sutapa, I. W., & Wicana, S. (2020). Sensitivity of methods for estimating potential evapotranspiration to climate change. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Scienc,* 437(1), 012039.

Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agron .12, 13-49.

Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, S., & Javan, K. (2023). Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN. *Water and Soil*, 37(4), 643-657.

Yahyavi Dizaj, A., Javan, K., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. (2023). Evaluation of Changes in Reference Evapotranspiration in Iran Over the Last Decades. *Desert Management*, 11(1), 39-58.

Zarrin, A., Yazdany, D., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Projection of minimum and maximum temperatures in cold regions of Iran using SDSM statistical downscaling model. *Climate Change Research*, 3(10), 19-32.

Zhang, H., Hu, Y., Cai, J., Li, X., Tian, B., Zhang, Q., & An, W. (2020). Calculation of evapotranspiration in different climatic zones combining the long-term monitoring data with bootstrap method. *Environmental Research*, 191, 110200.

Zhao, F., Ma, S., Wu, Y., Qiu, L., Wang, W., Lian, Y., Chen, J., & Sivakumar, B. (2022). The role of climate change and vegetation greening on evapotranspiration variation in the Yellow River Basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316, 108842.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.61882/jwmr.2024.1269]