



Institute of Geography



Evaluation of Monthly Reference Evapotranspiration in Iran Based on the Output of CORDEX-MNA Project Downscaled Dynamic Models

Ali Sadeghi ^{a*}, Hamzeh Ahmadi^b.

^a. Assistant Professor, Department of Humanities and Social Sciences, Farhangian University, Tehran, Iran

^b. PhD in Climatology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Extended Abstract

Introduction

The evapotranspiration, as one of the important meteorological variables and the relation between the land surface and the atmosphere, is important to the study of drought and the allocation of water resources. The relationship of this climatic variable with land indices as well as water supply planning reveals its importance. Due to the high relationship between this variable and air temperature, changes in air temperature patterns in global warming and climate change will have a high impact on its behavior and distribution. The relationship and entanglement of this hydro-climatic variable with climate change, especially temperature, has caused that with any fluctuation and change in the behavior of temperature patterns, its value and distribution will also change. Iran as a country located in the arid areas of the planet earth; is currently heavily involved in water stress. This water stress will be exacerbated by climate change, rising temperatures and increased evapotranspiration. Examining the impacts of climate change can be a roadmap for environmental management in this area. The aim of the present study is to reveal the behavior of this climatic parameter in the future period compared to the historical period and its spatial distribution based on the data network.

Materials and Methods

In the present study, using the output of downscaled dynamic models of the CORDEX-MNA project for North Africa and the Middle -East under (RCP8.5 and RCP4.5) scenarios. For the historical period (1980 – 2005), reference evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith, FAO method. The NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M regional climate models (RCMs) as the dynamic model output projection was used for the future to mid century (2025-2050). In this study, RCP4.5 & RCP8.5 representative concentration pathway scenarios were selected, as these two scenarios are used to further investigate climate change vulnerabilities and subsequent climate change responses. The CORDEX-MNA data with 0.22 spatial resolution, RCA4 model for RCM, were used. For the future period, the ETo value is obtained directly from the output of the CORDEX-MNA coordinated project models. In fact, the reference evapotranspiration value is part of the simulation of these models. Statistical criteria are used for the correction of the models to show the similarity between the observed and modeled data in the form of statistical values.

*. Corresponding author (a.sadeghi@cfu.ac.ir)

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.332856.1007652>

Received: 25 March 2022; Received in revised form: 24 May 2022; Accepted: 27 July 2022

Copyright © 2022 The Authors. Published by University of Tehran. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Results and Discussion

The results showed that in the future period, based on CORDEX-MNA coordinated project simulations for North Africa and the Middle-East, downscaled dynamics models; the amount of reference evapotranspiration as one of the most important components of the hydrological cycle will increase compared to the historical period (1980-2005). In terms of temporal variation, the highest changes will occur in mid-winter to early autumn. Under the RCP scenario, the ETo will increase to 34 mm in the hot months such as August. Under the mid-term scenario, the ETo value will increase compared to the historical period, but this increasing will be less than the upper limit scenario. Spatially, the main foci of high reference evapotranspiration are located in the central areas around Kavir and Lut plains, Jazmourian areas and the southern half of the Iran. The results showed that in the context of climate change and based on the downscaled data of the CORDEX -MNA project; the range of high potential evapotranspiration in the Iran will increase. In fact, high latitudes will experience an increase in the amount of ETo due to changes in air temperature and precipitation patterns and increasing air temperature trends. These conditions will be an alarm for Iran with arid and semi-arid conditions. Any change in the amount of evapotranspiration causes drought in the environment, followed by water needs and irrigation frequency for the agricultural sector as the most important water consuming sector in Iran. Therefore, it is important to pay serious attention to water resources management programs.

Conclusion

Among the models used, the output of the regional model; NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M has more optimal conditions in simulating the effects of climate change in Iran. The ETo spatial pattern is a function of location components throughout the year. These conditions are well evident in the distribution of potential evapotranspiration. The amount of ETo will increase from west to east and from north to south of the country based on the spatial pattern obtained in the historical (1980-2005) and the future period from 2025 until 2050. The southern and central regions of the Iran are the focus of areas with high ETo. The role of altitude and latitude factor in determining this spatial pattern is obvious. Comparison of ETo historical-observational period with the future decades to 2050, shows a significant increasing in the amount of potential evapotranspiration in Iran. Under RCP8.5 from March - September ETo will reach the highest level. In areas with high ETo in Iran, the average amount of ETo will increase by an average of 11 mm from April to June and in the warm months by an average of 17 mm. Under RCP4.5 scenario, these conditions are also observed to be incremental with a lower value. In the cool and cold months, in the high regions, the amount of minor and small changes and in some areas without change is observed. Significant increasing in reference evapotranspiration in August as one of the hottest months of the year in Iran is significant; because at this time of year, the demand for water consumption in all sectors; in particular, the agricultural sector is reaching its highest level, which necessitates attention to water resources management. In general, reference evapotranspiration as one of the hydro-climatic components, with any change in air temperature, will face increasing conditions that result in this increase, imposing more drought on the environment and thus increasing the water demand. Especially in the agricultural sector. These conditions are important for the geography of Iran with its fragile climate. Therefore, the land of Iran is currently facing tensions and instability in the situation of water resources, these conditions will intensify in the coming decades under the conditions of climate change. The need to pay attention to risk management and increase resilience in the face of climate change due to global warming can be considered a roadmap in this area.

Keywords: Reference Evapotranspiration, Climate change, CORDEX, Penman- Monteith FAO, RCP.

ارزیابی تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در ایران بر اساس برون داد مدل‌های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه CORDEX-MNA

علی صادقی^۱ - استادیار گروه علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
حمزه احمدی - دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

تبخیر - تعرق به عنوان یکی از متغیرهای مهم هواشناسی و ارتباط دهنده بین سطح زمین و هوا کره، در بررسی شاخص‌های خشکی و تخصیص منابع آبی حائز اهمیت است. آشکارسازی رفتار این سنجه اقلیمی در دوره آینده نسبت به دوره (۱۹۸۰-۲۰۰۵) و توزیع فضایی آن بر اساس شبکه داده، هدف تحقیق حاضر می‌باشد. در این پژوهش، از برون داد مستقیم مدل‌های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه کوردکس - منا (CORDEX -MNA) با تفکیک ۲۲ کیلومتری تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCP4.5 و RCP8.5) استفاده شد. از روش پنمن - مونتیت، فائو، به عنوان روش برآورد کننده تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در دوره تاریخی - مشاهده‌ای و دوره پیش‌نگری شده بر اساس مدل‌ها استفاده شد. در بررسی نتایج معیارهای آماری، برون داد مدل NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M عملکرد بهتری را نشان داد. نتایج نشان داد که الگوی فضایی ETo ماهانه در طول سال، تابع مؤلفه‌های مکانی بوده و از غرب به شرق و از شمال به جنوب مقدار آن افزایش می‌یابد. مناطق جنوبی، مرکزی و شرق کشور؛ کانون‌های حد بالای ETo محسوب می‌شوند. بررسی و مقایسه ETo ماهانه پیش‌نگری شده در دوره آینده تا میانه قرن (۲۰۵۰ میلادی) نسبت به دوره گذشته، نشان دهنده افزایش قابل توجه‌ای در مقدار این سنجه هیدرو - اقلیمی مهم در گستره ایران می‌باشد.

واژگان کلیدی: تبخیر - تعرق مرجع، تغییر اقلیم، پنمن - مونتیت فائو، کوردکس. RCP.

مقدمه

بحران آب و برنامه‌ریزی منابع آبی یکی از چالش‌های جهانی عصر حاضر می‌باشد. تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی در بلندمدت، بر روی وضعیت هدر رفت آب تأثیر بالایی خواهد داشت (فروغی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۷). تبخیر - تعرق مرجع یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در چرخه هیدرولوژیکی بوده و به‌عنوان سنجه‌ای از تقاضای تبخیر در جو، در محاسبه بسیاری از شاخص‌های خشکی و خشک‌سالی و مطالعات مربوط به پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم استفاده شده است (حجایی، ۱۳۹۹: ۱۹۲۰). طی سده گذشته، اقلیم به گونه‌های مختلفی تغییر یافته است. این روند تغییرات احتمالاً برای آینده ادامه خواهد داشت (عساکره و همکاران، ۱۴۰۰: ۹۱). تغییر اقلیم به‌عنوان یک پدیده پیچیده اتمسفری - اقیانوسی، به مفهوم تغییر در شرایط میانگین آب‌وهواست که در مقیاس جهانی و در یک دوره طولانی‌مدت اتفاق می‌افتد (میر حسینی و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۰۶). در سال‌های پس از انقلاب صنعتی با توسعه روزافزون صنایع و به سبب آن افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، غلظت گازهای گلخانه‌ای بخصوص میزان دی‌اکسید کربن افزایش یافته است که این امر گرم شدن کره زمین را به همراه داشته است. گرم‌تر شدن زمین بر وضعیت دیگر اجزاء سامانه آب‌وهوا اثر گذاشته و پدیده تغییر اقلیم را موجب شده است. طی ۱۵۰ سال اخیر افزایش کلی دمای هوا به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد مشاهده گردیده است (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۷۵). انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث گرم‌تر شدن و تأثیر بر مؤلفه‌های آب و هوایی می‌شود و در نتیجه، نیاز آبی بخش کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (باب الحکمی، ۱۳۹۹: ۳۸۸). مطابق شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP5 (فاز پنجم مقایسه مدل‌های جفت شده)، تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP8.5، RCP4.5، میانگین دمای هوای کره زمین در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۸۱ نسبت به دوره ۲۰۰۵ - ۱۹۸۶، به میزان ۳/۸ - ۰/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت (حجایی، ۱۳۹۹: ۱۹۲۱).

چالش کاهش منابع آبی و همچنین ظهور پدیده تغییر اقلیم موجب شده که تبخیر - تعرق مرجع به‌عنوان ورودی اولیه و اصلی طراحی سیستم‌های آبیاری، تخصیص منابع آبی و برنامه‌ریزی برای منابع آبی در جهت استفاده کارآمد؛ همواره کانون مطالعات مختلف خارجی و داخلی باشد که در ادامه به این مهم پرداخته شده است.

پورآ و همکاران (۲۰۲۰) در ارزیابی تبخیر - تعرق مرجع در شبه‌جزیره مالزی مشخص نمودند که افزایش دمای هوا بخصوص دمای کمینه موجب افزایش مقدار ET₀ شده است. ماسی^۱ و همکاران (۲۰۲۰) از مدل‌های منطقه‌ای کوردکس - آفریقا برای پیش‌نگری‌های هیدرولوژیکی تحت شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبخیز کشور اتیوپی استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل‌های منطقه‌ای، پتانسیل بالایی برای بررسی مطالعات پیامدهای تغییر اقلیم در مناطق با توپوگرافی مرتفع برخوردار می‌باشند. یانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تغییر زمانی - مکانی تبخیر - تعرق مرجع در شمال غربی چین بر اساس پروژه کوردکس، نشان دادند که تبخیر - تعرق مرجع در آینده خواهد یافت و همچنین داده‌های این پروژه جهانی، امروزه کاربردهای متنوعی از نظر برون‌داد مدل‌های منطقه‌ای پیدا کرده است. رضیئی و پرکار^۷ (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های بازکای شده NCEP/NCAR به برآورد تبخیر - تعرق مرجع در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که روش فائو، پنمن - موتیث از عملکرد بالاتری برخوردار می‌باشد. احمدی و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی مناطق کشت پسته در ایران بر اساس مدل‌های منطقه‌ای کوردکس، مشخص نمودند که افزایش دمای هوا در دوره آینده نسبت به دوره گذشته موجب افزایش تبخیر - تعرق مرجع و کاهش منابع آبی

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

2. Pour

3. Reference Evapotranspiration

4. Musie

5. Yang

6. Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX)

7. Raziie & Parehkar

در مناطق خشک ایران خواهد شد.

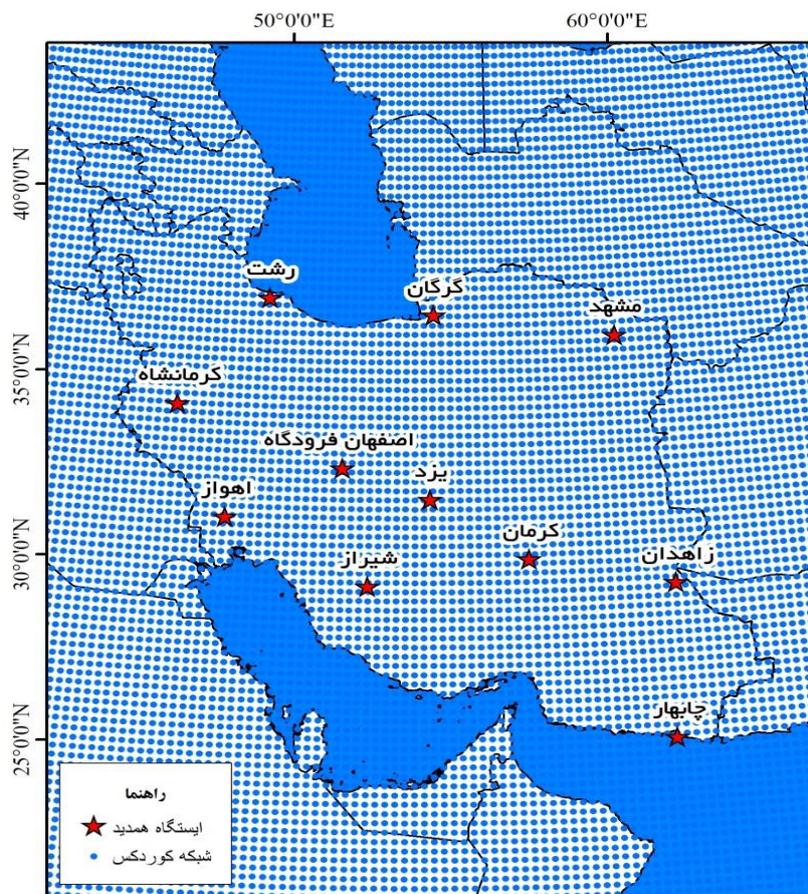
جورابلو و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر - تعرق گیاه مرجع و کمبود بارندگی در منطقه سمنان را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در سایه افزایش دمای هوا برای دوره آینده، مقدار تبخیر - تعرق مرجع بر اساس سناریوی A2، A1B1 و B1 به ترتیب حدود ۹/۲، ۸ و ۵/۸ درصد افزایش می یابد. فروغی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر - تعرق گیاه مرجع در منطقه غرب ایران، نشان دادند که هر چند روند افزایشی و کاهش می معنی دار در تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در ایستگاهها وجود دارد، اما درصد روند افزایشی بیشتر مشاهده می شود. حیدری تاشه کبود و خوشخو (۱۳۹۸) به تصویرسازی تغییرات آبی تبخیر - تعرق مرجع در مقیاس های فصلی و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای RCP پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که میانگین تبخیر - تعرق مرجع سالانه برای فصول پاییز و زمستان در مقایسه با دوره پایه افزایش معنی داری در سطح ۰/۰۱ خواهد داشت. حجابی (۱۳۹۹) با برآورد تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از پیش نگرهای پروژه کوردکس و بررسی سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات آن در دریاچه ارومیه مشخص نمودند که مقدار ETo در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی از روند افزایشی برخوردار خواهد بود. باب الحکمی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر - تعرق مرجع در استان مازندران پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره آینده تبخیر - تعرق مرجع افزایش خواهد یافت؛ به طوری که درصد تغییرات تبخیر - تعرق مرجع در ماه های مختلف بین ۱۶/۱ - تا ۲۵/۷ درصد متغیر می باشد. میرحسینی و همکاران (۱۴۰۰) با پیش بینی میزان تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه تحت سناریوهای RCP مشخص نمودند که در دوره آینده مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه افزایش خواهد یافت.

بررسی تحقیقات مختلف نشان داد که تبخیر - تعرق مرجع در دوره آینده در اثر تغییرات آب و هوایی با روند افزایشی مواجه خواهد شد. کاهش منابع آبی و تهدید جهانی و منطقه ای تغییر آب و هوا، اهمیت این پدیده را در سطح جهانی و منطقه دوچندان می کند. بررسی نتایج تحقیقات داخلی نشان داد که وضعیت ETo ماهانه در گستره ایران بر اساس مدل های دینامیکی پروژه کوردکس و ارائه الگوی فضایی این تغییرات تا میانه قرن تا به حال انجام نشده است. بدون شک رقابت بر سر منابع آبی در بخش های مختلف بخصوص بخش کشاورزی در سایه چالش تغییر اقلیم در آینده ادامه خواهد یافت. با توجه به نتایج مطالعات انجام شده، تغییرات در رفتار تبخیر - تعرق مرجع نمودی از پیامدهای تغییر آب و هوا و گرمایش جهانی محسوب می شود. ارتباط و درهم تنیدگی این متغیر هیدرو - اقلیمی با تغییرات اقلیمی حائز اهمیت است. ایران به عنوان کشوری واقع در جغرافیای خشک کره زمین؛ در حال حاضر درگیر مسئله تنش کم آبی می باشد. این کم آبی در سایه تغییر آب و هوا و افزایش تبخیر - تعرق تشدید خواهد شد. بررسی پیامدهای تغییر آب و هوا در قالب پیش نگرهای، در بازه بلندمدت می تواند نقشه راهی برای مدیریت محیط در این بخش باشد. بنابراین هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در گستره ایران بر اساس برون داد مدل های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه کوردکس - منا می باشد.

روش پژوهش

در این تحقیق از داده های مشاهده ای - تاریخی برای دوره متوالی (۲۰۰۵ - ۱۹۸۰)، برای پارامترهای اقلیمی دمای حداقل، حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس ماهانه و سالانه استفاده گردید. شکل ۱، موقعیت ایستگاه های همدید منتخب و شبکه ۲۲ کیلومتری مدل های کوردکس بر پهنه سرزمینی ایران را نشان می دهد. برای برآورد میزان تبخیر - تعرق مرجع ماهانه از روش پنمن - مونتیث فائو، استفاده شد. مدل هایی که در این تحقیق بکار رفته، جزو مدل های ریزمقیاس شده پروژه هماهنگ منطقه کوردکس برای محدوده شمال آفریقا و خاورمیانه می باشد. داده های این مدل ها برای دوره تاریخی (۱۹۸۰ - ۲۰۰۵) و دوره آینده از دهه ۲۰۲۵ تا میانه قرن یعنی دهه ۲۰۵۰ میلادی تهیه و تنظیم گردید. تفکیک زمانی داده ها روزانه بوده و مقدار تبخیر - تعرق مرجع نیز به صورت میلی متر در ماه

برآورد شده است. تفکیک افقی ۲۲ کیلومتر و مدل اقلیم منطقه RCA4 می‌باشد.



شکل شماره ۱. ایستگاه‌های همدید منتخب و شبکه ۲۲ کیلومتری مدل‌های کوردکس بر پهنه سرزمینی ایران

مدل‌های دینامیکی مبتنی بر ریز گردانی منطقه‌ای (CORDEX-MNA)

در سال‌های اخیر با استفاده از مدل‌های منطقه‌ای مختلف، مجموعه داده‌های ریزمقیاس گردانی شده CMIP5 توسط WCRP^۳ در اقدامی هماهنگ با انجمن بین‌المللی منطقه‌ای که پروژه کوردکس نامیده شد، تهیه و منتشر گردید. این داده‌ها با هدف پیش‌بینی تغییرات و اثرات آب و هوایی ایجاد گردید (Giorgi et al., 2009؛ سالاری فنودی و همکاران، ۱۳۹۹). کوردکس یک چارچوب هماهنگ بین‌المللی برای تولید نسل پیشرفته از پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی در سراسر جهان است (سالاری فنودی و همکاران، ۱۳۹۹). هدف از پروژه کوردکس مدل‌سازی اقلیم آینده کره زمین بر اساس استاندارد بین‌المللی با هماهنگی برنامه WCRP و بررسی پیامدهای تغییر اقلیم و روش‌های سازگاری با آن در مقیاس منطقه‌ای می‌باشد مدل‌های اقلیم منطقه‌ای کوردکس با دقت مکانی ۰/۴۴، ۰/۲۲ و ۰/۱۱ درجه، در ۱۴ محدوده مختلف در سراسر جهان توسعه یافته‌اند که دو محدوده از آن‌ها ایران را پوشش می‌دهند (منطقه ۶: منطقه آسیای جنوبی و منطقه ۱۳: منطقه خاورمیانه - آفریقای شمالی) (حجایی، ۱۳۹۹: ۱۹۲۲).

هدف اصلی این پژوه بین‌المللی، درک بهتر پدیده‌های محلی و منطقه‌ای و بهبود کارایی مدل‌ها و روش‌های ریزمقیاس شده است. همان‌طور که توضیح داده شد، در این پژوهش از RCM^۴ های تولیدشده توسط اقدام هماهنگ ریز گردانی منطقه‌ای (CORDEX)

1. COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX)-Middle- East North Africa (MNA)
2. The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)
3. World Climate Research Programme
4. Regional Climate Models

سلسیوس (Kpa° C-1) و γ ، ضریب سایکرومتر (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس -Kpa°، C- es- ea) کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

صحت سنجی مدل‌ها

از سنج‌های آماری برای صحت سنجی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود تا شباهت بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده در قالب مقادیر آماری نشان داده شود (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰: ۷۹). برای صحت سنجی مدل‌های منتخب از معیارهای آماری، ضریب تعیین، میانگین اریبی خطا و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد.

میانگین انحراف خطا (MBE)

از معیار MBE در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت و منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد کمتر و بیشتر از میانگین داده‌ها می‌باشد. این معیار هرچه قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد (رضیعی و ستوده، ۱۳۹۶: ۱۳۴).

$$MBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))}{n} \quad (2)$$

مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)

ریشه دوم میانگین مربع خطا یکی از آماره‌هایی است که معمولاً از آن برای ارزیابی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهدات یا تاریخی استفاده می‌شود (رضیعی و ستوده، ۱۳۹۶: ۱۳۴). این شاخص طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود و هر چه خروجی آن به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر خطای کمتر در داده‌های شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$RMSE = \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))^2}}{n} \quad (3)$$

در روابط (۱) و (۲) $z^*(X_i)$ مقدار برآورد شده متغیر در X_i ، $Z(X_i)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر در X_i ، n تعداد نقاط با متغیر مشاهده‌ای است (رضیعی و ستوده، ۱۳۹۶: ۱۳۴).

ضریب تبیین (R2)

ضریب تبیین نیز یکی دیگر از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی میان دو متغیر است که به شکل بی‌بعد نمایش داده می‌شود. مقدار R2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هرچه قدر مقدار آماره به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد (رضیعی و ستوده، ۱۳۹۶: ۱۳۴).

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

در رابطه (۳)، P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار اندازه‌گیری \bar{P} و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد (رضیعی و ستوده، ۱۳۹۶: ۱۳۴).

بحث و یافته‌ها

صحت سنجی مدل‌ها برای تبخیر - تعرق مرجع

برای صحت سنجی، مقدار تبخیر - تعرق یازده ایستگاه ۱- کرمانشاه، ۲- ایلام، ۳- اهواز، ۴- گرگان، ۵- رشت، ۶- مشهد، ۷- زاهدان و ۸- چابهار، ۹- کرمان، ۱۰- یزد و ۱۱- اصفهان که هر یک معرف یک پهنه کلان آب‌وهوایی، از پهنه اقلیمی بلندی‌ها تا آب‌وهوای کرانه‌های دریای عمان (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۱۷۹؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹: ۸۰) هستند؛ استفاده شد. نتایج صحت سنجی مدل‌ها بر اساس ایستگاه‌های همدید منتخب به نمایندگی پهنه‌های اقلیمی ایران نشان داد که مدل NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M از عملکرد بهتر و میزان خطای کمتری در برآورد و شبیه‌سازی تبخیر - تعرق مرجع ماهانه برخوردار می‌باشد (جدول ۲). در این راستا داده پیش‌نگری شده تا میانه قرن از ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۰ میلادی با دوره تاریخی - مشاهده‌ای از ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ پردازش شد. در واقع اعمال آماری معیارهای صحت سنجی بر وضعیت تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در پهنه‌های اقلیمی (از آب‌وهوای بلندی‌ها تا آب‌وهوای کرانه‌های

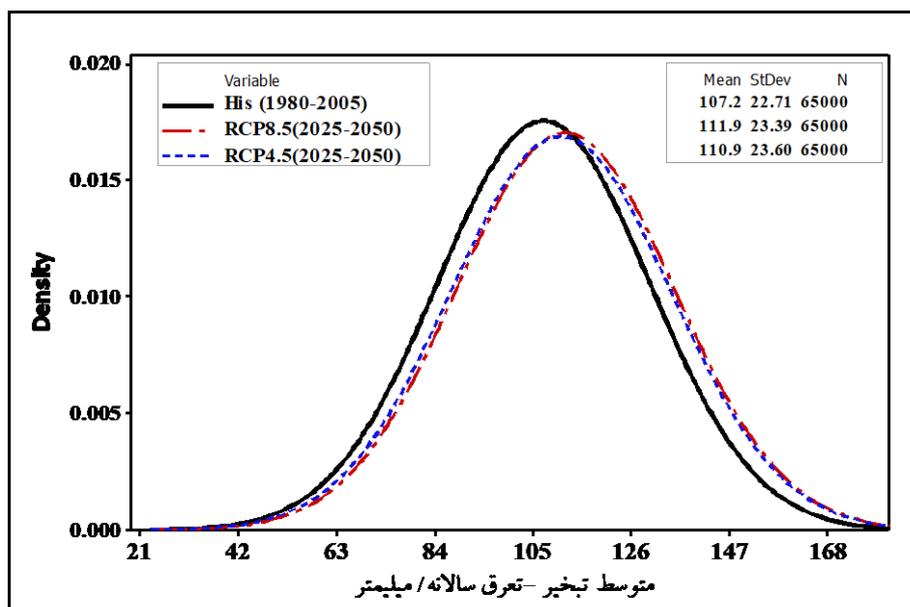
دریای عمان) به نمایندگی ایستگاه‌های همدید منتخب، نشان داد که مدل -GFDL-ESM2M NOAA-GFDL در شبیه‌سازی و برآورد ETo مرجع ماهانه از تطابق بالاتری با دوره تاریخی - مشاهده‌ای برخوردار می‌باشد. به‌طوری نمونه در پهنه اقلیمی بلندی‌ها به نمایندگی ایستگاه همدید کرمانشاه، میزان R2، MBE و RMSE برای مدل -GFDL-ESM2M NOAA-GFDL به ترتیب ۰/۸۱، ۵/۲۵- و ۴/۶۵ در حالی که برای مدل MPI-ESM-LR این ضرایب در شاخص‌های مذکور به ترتیب به ۰/۷۶، ۸/۵۴- و ۷/۷۶ می‌رسد. این شرایط در دیگر پهنه‌های اقلیمی از طریق جدول (۲) در گستره ایران نیز آشکار می‌باشد.

جدول شماره ۲. صحت سنجی نتایج مدل‌های منتخب از تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در پهنه‌های کلان آب و هوایی ایران

R ²	MBE	RMSE	مدل	ایستگاه	پهنه اقلیمی
۰/۸۱	-۵/۲۵	۴/۶۵	-GFDL-ESM2M NOAA-GFDL-	کرمانشاه	آب هوای بلندی‌ها
۰/۷۶	-۸/۵۴	۷/۷۶	MPI-ESM-LR		
۰/۸۷	۴/۴۳	۷/۷۸	GFDL-ESM2M	شیراز	آب‌وهوای کوهپایه غربی
۰/۷۴	۵/۶۵	۹/۵۸	MPI-ESM-LR		
۰/۹۰	۷/۸۷	۱۰/۱۲	GFDL-ESM2M	اهواز	آب‌وهوایی کرانه‌های خلیج فارس
۰/۸۲	۹/۹۸	۱۳/۱۲	MPI-ESM-LR		
۰/۸۶	-۹/۴۵	۱۴/۲۳	GFDL-ESM2M	گرگان	آب‌وهوای دامنه‌های شمالی البرز
۰/۷۵	-۱۲/۴۵	۱۸/۸۷	MPI-ESM-LR		
۰/۷۹	-۷/۴۵	۸/۹۸	GFDL-ESM2M	رشت	آب‌وهوای کرانه‌های خزر
۰/۷۲	-۹/۰۵	۱۱/۴۳	MPI-ESM-LR		
۰/۸۲	۶/۵۶	۸/۳۶	GFDL-ESM2M	مشهد	آب‌وهوای کوهپایه‌های شرقی
۰/۷۳	۷/۸۷	۱۰/۰۶	MPI-ESM-LR		
۰/۸۳	۶/۵۵	۸/۳۵	GFDL-ESM2M	اصفهان	آب‌وهوای فلات شرقی
۰/۷۲	۷/۸۸	۱۰/۰۵	MPI-ESM-LR	فرودگاه	
۰/۸۵	۷/۸۵	۱۱/۵۴	GFDL-ESM2M	زاهدان	آب‌وهوای فلات شرقی
۰/۸۱	۹/۶۵	۱۴/۱۲	MPI-ESM-LR		
۰/۸۳	۶/۵۷	۸/۳۶	GFDL-ESM2M	یزد	آب‌وهوای فلات شرقی
۰/۷۵	۸/۸۷	۱۱/۰۱	MPI-ESM-LR		
۰/۸۶	۷/۸۸	۱۱/۱۰	GFDL-ESM2M	کرمان	آب‌وهوای کرانه‌های عمان
۰/۸۲	۸/۹۸	۱۳/۱۱	MPI-ESM-LR		
۰/۸۸	۱۰/۱۲	۱۵/۵۴	GFDL-ESM2M	چابهار	آب‌وهوای کرانه‌های عمان
۰/۷۸	۱۳/۳۲	۱۸/۲۵	MPI-ESM-LR		

نمودار تغییرات متوسط ETo سالانه در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی - مشاهداتی

تغییرات متوسط ETo سالانه دوره آینده بر اساس پرونداد مدل برای ۶۵۰۰۰ رکورد بافاصله ۲۲ کیلومتری در گستره ایران در شکل (۲) مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط ETo سالانه نسبت به دوره تاریخی از انحراف افزایشی برخوردار می‌باشد. در دوره تاریخی متوسط ETo سالانه با ۱۰۷/۲ میلی‌متر بوده که در دوره آینده بر اساس سناریوی حد بالا (RCP8.5) و حد وسط (RCP4.5) به ترتیب تا ۱۱۱/۹ و ۱۱۰/۹ میلی‌متر تغییر خواهد یافت. به بیانی دیگر، در میانه قرن حاضر تا ۲۰۵۰ میلادی، بر اساس سناریوهای مذکور نسبت به دوره تاریخی به ترتیب ۳/۷ و ۲/۸ درصد متوسط تبخیر - تعرق مرجع سالانه افزایش خواهد یافت.



شکل شماره ۲. نمودار تغییرات متوسط ET0 سالانه در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)

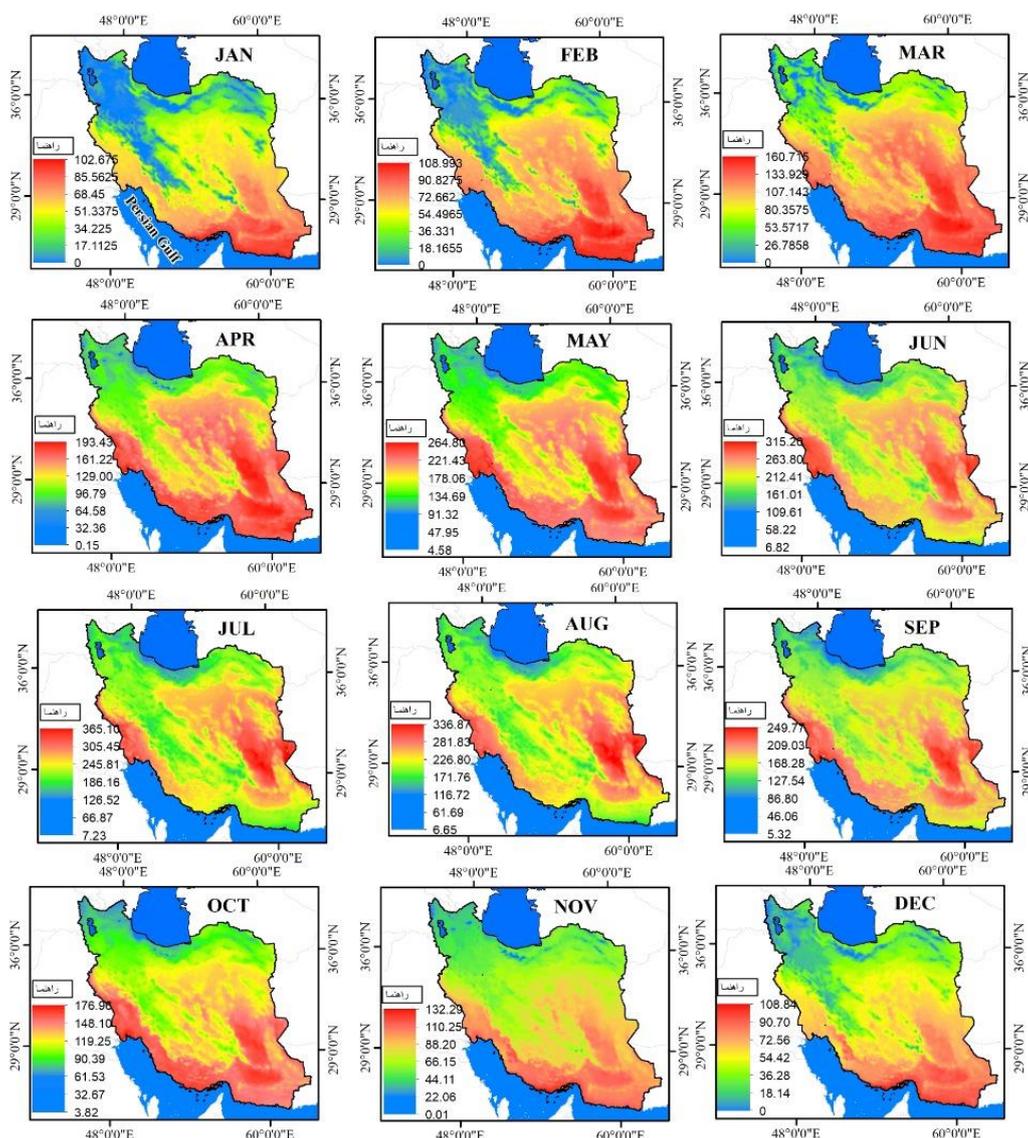
وضعیت و توزیع فضایی ET0 ماهانه در دوره تاریخی - مشاهده‌ای (۱۹۸۰-۲۰۰۵)

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص شده، میزان تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در طول سال تابع الگوی دمای هوای ماهانه می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) بر اساس داده‌های مشاهده‌ای، بیشترین ET0 در ماه‌های خرداد (ژوئن)، تیر (جولای) و مرداد (آگوست) رخ می‌دهد. به طوری که در این ماه‌ها مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل به ترتیب به ۳۱۵/۲، ۳۶۵/۱ و ۳۳۶/۸ میلی‌متر می‌رسد. کمترین مقدار نیز در ماه‌های نیمه سرد سال بخصوص دسامبر (آذرماه) تا فوریه (بهمن) به ترتیب به مقدار ۱۸، ۱۷ و ۱۸ میلی‌متر در ماه رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۳) الگوی تبخیر - تعرق ماه‌های سرد سال با ماه‌های نیمه گرم فرق دارد. در واقع در ماه‌های سرد سال، گستره پهنه با تبخیر - تعرق بالا محدود به مناطق پست عرض‌های مرکزی و جنوبی کشور می‌شود. که این برگرفته از تفاوت‌های دمایی و اقلیمی در گستره ایران زمین می‌باشد. تبخیر تعریق پتانسیل از ماه آوریل به تدریج روند صعودی پیدا می‌کند و اوج این روند افزایشی به ماه آگوست می‌رسد.

از نظر مکانی مقدار تبخیر - تعرق تابع عوامل و مؤلفه‌های مکانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشخص شده، عواملی مانند ارتفاع از سطح دریا، عرض جغرافیایی و موقعیت هر مکان در میزان تبخیر - تعرق مرجع ماهانه موثر می‌باشد. به طوری که از شمال به جنوب و از غرب به شرق کشور، همواره بر میزان ET0 ماهانه افزوده می‌شود. در ماه‌های دسامبر و ژانویه به عنوان سردترین ماه‌های سال، مناطق نیمه جنوبی بخصوص محدوده استان هرمزگان و جنوب سیستان و بلوچستان و مناطق جنوبی دشت لوت؛ کانون بالای تبخیر - تعرق مرجع ماهانه را از ۹۰ تا ۱۰۸ میلی‌متر به خود اختصاص می‌دهند. در ماه‌های فوریه و مارس، این الگوی مکانی با کمی تغییر به نسبت گسترده‌تر می‌شود. به طوری که از ماه فوریه به مارس حدود ۵۲ میلی‌متر بر مقدار تبخیر - تعرق افزوده می‌شود که این نشان از افزایش ناگهانی و صعودی درجه حرارت در این موقع از سال است. همچنین گستره مکانی مناطق با ET0 بالا در این ماه‌ها به عرض‌های شمالی تا حاشیه دشت کویر در نیمه شمالی کشور نیز کشیده می‌شود. مناطق کویری و بیابانی کشور به دلیل ارتفاع کمتر و همچنین قلت پوشش گیاهی و برخورداری از اقلیمی بری، یکی از کانون‌های اصلی تبخیر - تعرق فزاینده در کشور محسوب می‌شوند (شکل ۳).

بررسی‌ها نشان داد که در نیمه گرم سال مقدار ET0 ماهانه با روندی خطی افزایش پیدا نمی‌کند بلکه به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند؛ در واقع با افزایش درجه حرارت در نیمه گرم سال مقدار تبخیر - تعرق نسبت به ماه قبلی از افزایش

قابل توجه‌ای برخوردار می‌باشد. به نحوی که در ماه آوریل بالاترین مقدار از ۱۹۳ میلی‌متر به ۲۶۴ میلی‌متر در ماه می و در ماه ژوئن به ۳۱۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد. در این ماه‌های سال نیز مناطق نیمه جنوبی و نواحی مرکزی کشور در مناطق دشت لوت و دشت کویر و چاله جازموریان و نوار جنوبی کشور، همچنان از بالاترین سطح برخوردار می‌باشند. در تمام پهنه کشور از ژوئن تا آگوست، الگوی پراکنش ETo ماهانه متفاوت‌تر است. در این ماه‌های سال کل کشور از سطح بالایی از تبخیر - تعرق ماهانه برخوردار بوده و فقط نوار خزری در حدود ۶۶ میلی‌متر از مقدار کمتری برخوردار می‌باشد. تفاوت مکانی و عوامل جغرافیایی موجب تفاوت زیادی در مقدار ETo بین مناطق مختلف کشور از نیمه جنوبی به شمالی شده است. با شروع فصل پاییز به تدریج از مقدار ETo کاسته می‌شود (شکل ۳).



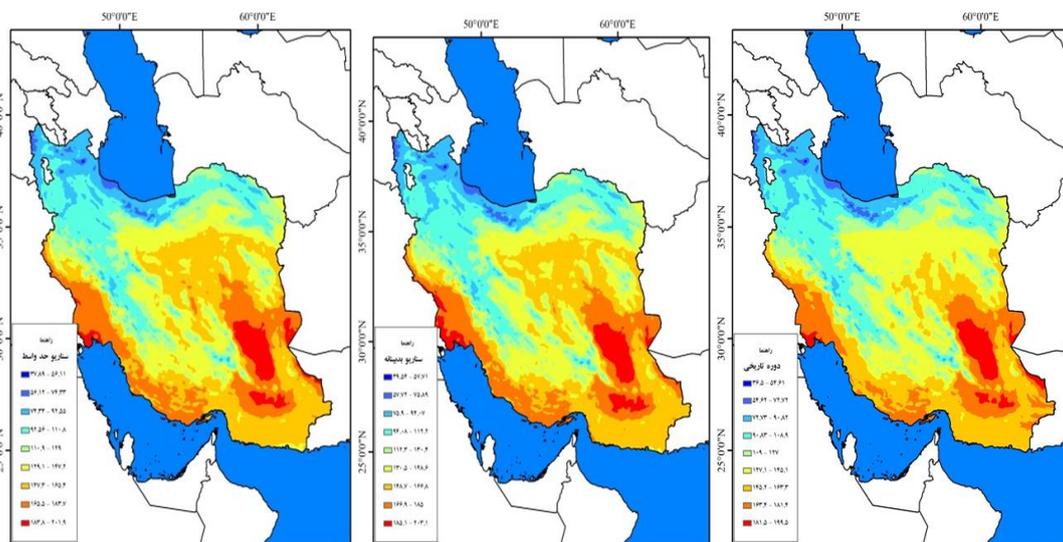
شکل شماره ۳. توزیع مکانی ETo ماهانه برای ماه‌های سال در دوره تاریخی - مشاهده‌ای (۱۹۸۰-۲۰۰۵)

تغییرات متوسط ETo سالانه در دوره تاریخی - مشاهداتی و دوره آینده

دوره تاریخی - مشاهداتی: در شکل (۴) متوسط ETo سالانه برای دوره تاریخی در گستره ایران بر اساس داده شبکه‌ای مشخص شده است. همان‌طور که در شکل (۴) هم قابل مشاهده می‌باشد، متوسط ETo سالانه با تأثیر از عوامل مکانی از شمال به جنوب و از غرب به شرق افزایش می‌یابد. متوسط سالانه از ۳۶/۵ میلی‌متر در مناطق مرتفع و عرض‌های بالا تا ۱۹۹/۵ میلی‌متر در مناطق کم ارتفاع‌های پایین کشور متغیر می‌باشد. تأثیر عامل ارتفاع در الگوی فضایی ETo

سالانه در دوره تاریخی - مشاهداتی بارز است. مناطق واقع در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و مناطق مرتفع شمال شرق، از مقدار ETO کمتری نسبت به مناطق نوار جنوبی و نیمه شرقی و جنوب شرقی کشور برخوردار می‌باشند (شکل ۴). دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) بر اساس سناریوی بدبینانه یا حد بالا؛ متوسط ETO سالانه بر اساس برون‌داد مدل، برای سناریوی بدبینانه در شکل (۴) مشخص شده است. پردازش‌ها و الگوی فضایی مشخص شده دال بر تغییرات متوسط ETO سالانه در ایران نسبت به دوره تاریخی می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که این شرایط از ۳۹/۵ میلی‌متر در مناطق مرتفع و عرض‌های بالا تا ۲۰۳/۱ میلی‌متر در نواحی کم ارتفاع و عرض‌های پایین متغیر می‌باشد. مقایسه الگوی فضایی متوسط سالانه در این دوره با دوره تاریخی نشان داد که بر محدوده مناطق با ETO بالاتری تا حدودی افزوده شده است؛ هر چند این تغییرات وسیع نیست، اما روند افزایشی آن برای ۳ دهه آتی حائز اهمیت می‌باشد (شکل ۴).

دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) بر اساس سناریوی حد وسط؛ متوسط ETO سالانه بر اساس پردازش‌های به‌دست آمده از برون‌داد مستقیم مدل به‌صورت ماهانه بر اساس سناریوی حد وسط در شکل (۴) مشخص شده است. همان‌طور که مشخص شده در دوره آینده تا میانه قرن حاضر، متوسط تبخیر - تعرق سالانه نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. بر اساس الگوی فضایی به‌دست آمده از شبکه داده در گستره ایران، متوسط ETO سالانه از ۳۷/۸ میلی‌متر تا ۲۰۱/۹ میلی‌متر متغیر خواهد بود (شکل ۴).



شکل شماره ۴. تغییرات متوسط ETO سالانه در دوره تاریخی - مشاهده‌ای (۱۹۸۰-۲۰۰۵) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰)

تغییرات ETO ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) بر اساس سناریوی RCP8.5

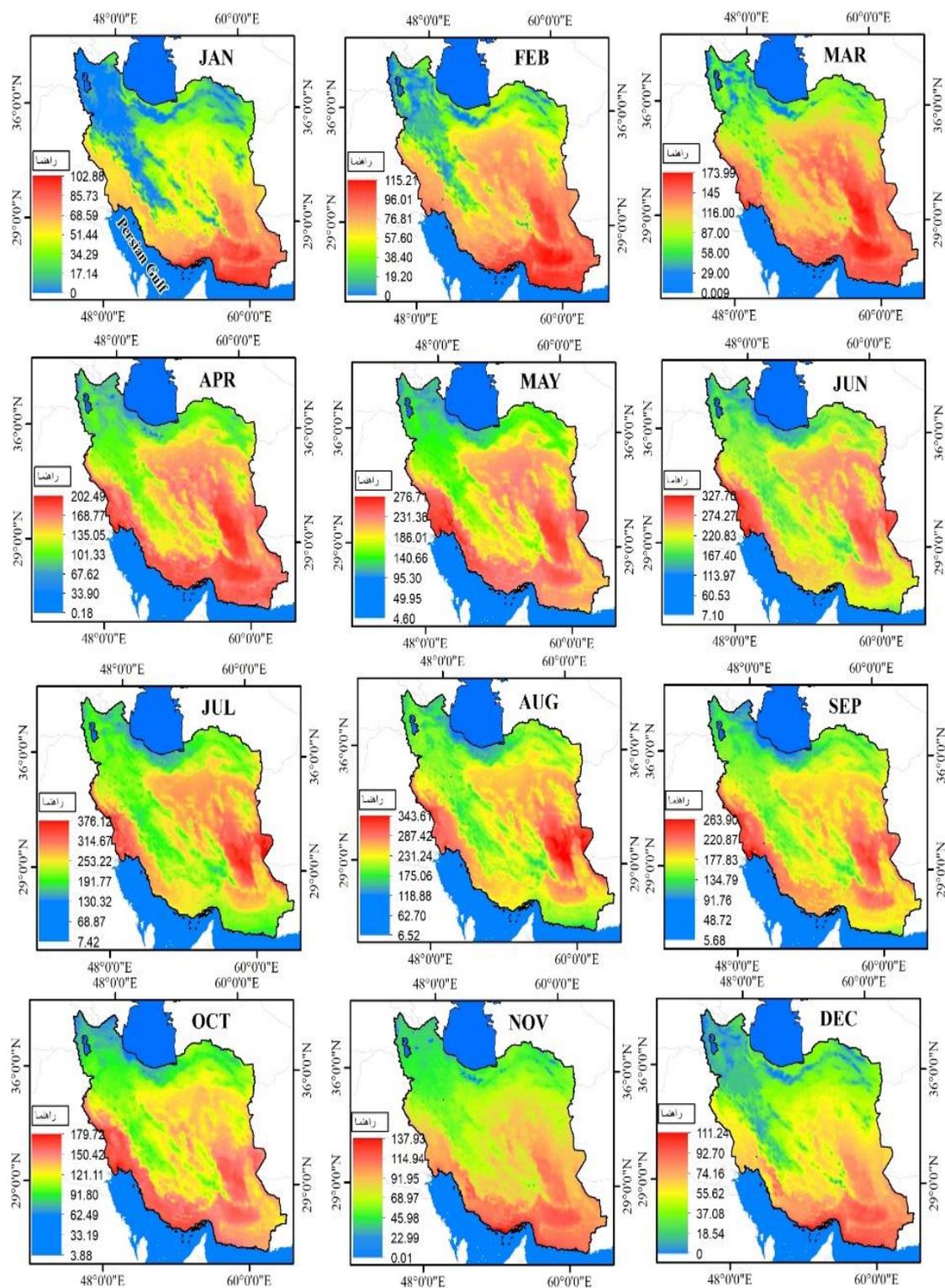
نتایج تغییرات ETO برای هر ماه در طول سال در میانه قرن حاضر برای دهه‌های (۲۰۲۵-۲۰۵۰) در شکل (۵) مشخص شده است. نتایج اولیه نشان داد که توزیع مکانی میزان ETO در دوره آینده نیز تابع عوامل مکانی می‌باشد. از شمال به جنوب و از غرب به شرق مقدار تبخیر - تعرق مرجع ماهانه افزایش خواهد یافت. برون‌داد مدل‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که در هر ماه نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای، بر مقدار ETO ماهانه افزوده خواهد شد. در ادامه تغییرات ماهانه به تفکیک ماه‌های سال بررسی می‌شود.

ماه‌های (ژانویه، فوریه و مارس): همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشخص شده است، در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوی بدبینانه واداشت تابشی RCP8.5، مقدار ETO ماهانه نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای افزایش خواهد یافت. به‌طوری‌که حد بالای ETO در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس به ترتیب به مقدار ۱۰۲/۸، ۱۱۵/۲ و ۱۷۳/۹ میلی‌متر در ماه خواهد رسید که در مقایسه با دوره تاریخی - مشاهده‌ای در ماه‌های فوریه و مارس به ترتیب ۷ و ۱۳ میلی‌متر افزایش

رخ خواهد داد. در این ماه‌ها از سال بر گستره پهنه‌های با میزان ETo بالا افزوده خواهد شد. ماه‌های (آوریل، می و ژوئن): نتایج بررسی تغییرات ETo در این ماه‌ها نیز نشان از افزایش قابل‌ملاحظه در میزان تبخیر - تعرق مرجع ماهانه نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای می‌باشد. در این ماه‌ها از سال، کمترین مقدار در نوار خزری و شمال غرب ایران و در اولویت دوم مناطق و پهنه بلندی‌ها در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و ارتفاعات شمال شرق و مناطق پراکنده مرتفع رخ خواهد داد. بررسی‌ها نشان داد که گستره مناطق با ETo ماهانه بالا در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای بیشتر خواهد شد. به طوری که در ماه‌های آوریل تا ژوئن در مناطق با حد بالا، به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۲ میلی‌متر تا ۲۰۵۰ میلادی تحت سناریوی بدبینانه RCP8.5 بر مقدار ETo افزایش خواهد یافت. در واقع در ماه‌های نیمه گرم سال بر گستره مناطق با ETo ماهانه بالاتر نسبت به دوره تاریخی افزوده خواهد شد.

ماه‌های (جولای، آگوست و سپتامبر): نتایج بررسی تغییرات ماه‌های گرم و بسیار گرم سال (جولای، آگوست و سپتامبر) نشان داد که میزان ETo در دهه ۲۰۵۰ تحت سناریوی بدبینانه نسبت به دوره تاریخی از افزایش قابل توجه‌ای برخوردار می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشخص شده است، تمام گستره ایران به دلیل حاکمیت شرایط اقلیمی گرم در وضعیت تبخیر - تعرق بالایی قرار دارد به استثنای نوار جلگه خزری که تقریباً نسبت به دیگر مناطق، میزان تبخیر - تعرق کمتری در آن به دلیل شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشاهده می‌شود. بررسی و مقایسه داده‌های دوره تاریخی - مشاهده‌ای با دوره آینده تحت سناریو RCP8.5 نشان می‌دهد که در کانون‌های بالای ETo در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر به ترتیب: ۱۱، ۷ و ۳۴ میلی‌متر، بر مقدار ETo ماهانه افزوده خواهد شد. در تمام کانون‌های ETo گستره جغرافیایی ایران، مقدار ETo به دلیل افزایش درجه حرارت و تغییر در الگوهای دمایی، با روند افزایشی نسبت به دهه‌های گذشته همراه خواهد بود. طیف ETo ماهانه در گستره ایران متناسب با تغییرات دمایی متأثر از تفاوت‌های مکانی در هر ماه، تا حدودی تغییر می‌یابد. تغییرات رنگ نقشه‌ها به تفکیک هر ماه دال بر این مدعاست. بنابراین نقش عوامل مکانی از جمله عرض جغرافیایی و دوری و نزدیکی به پهنه‌های آبی در تعیین وضعیت هدر رفت آب از طریق تبخیر - تعرق پتانسیل حائز اهمیت می‌باشد.

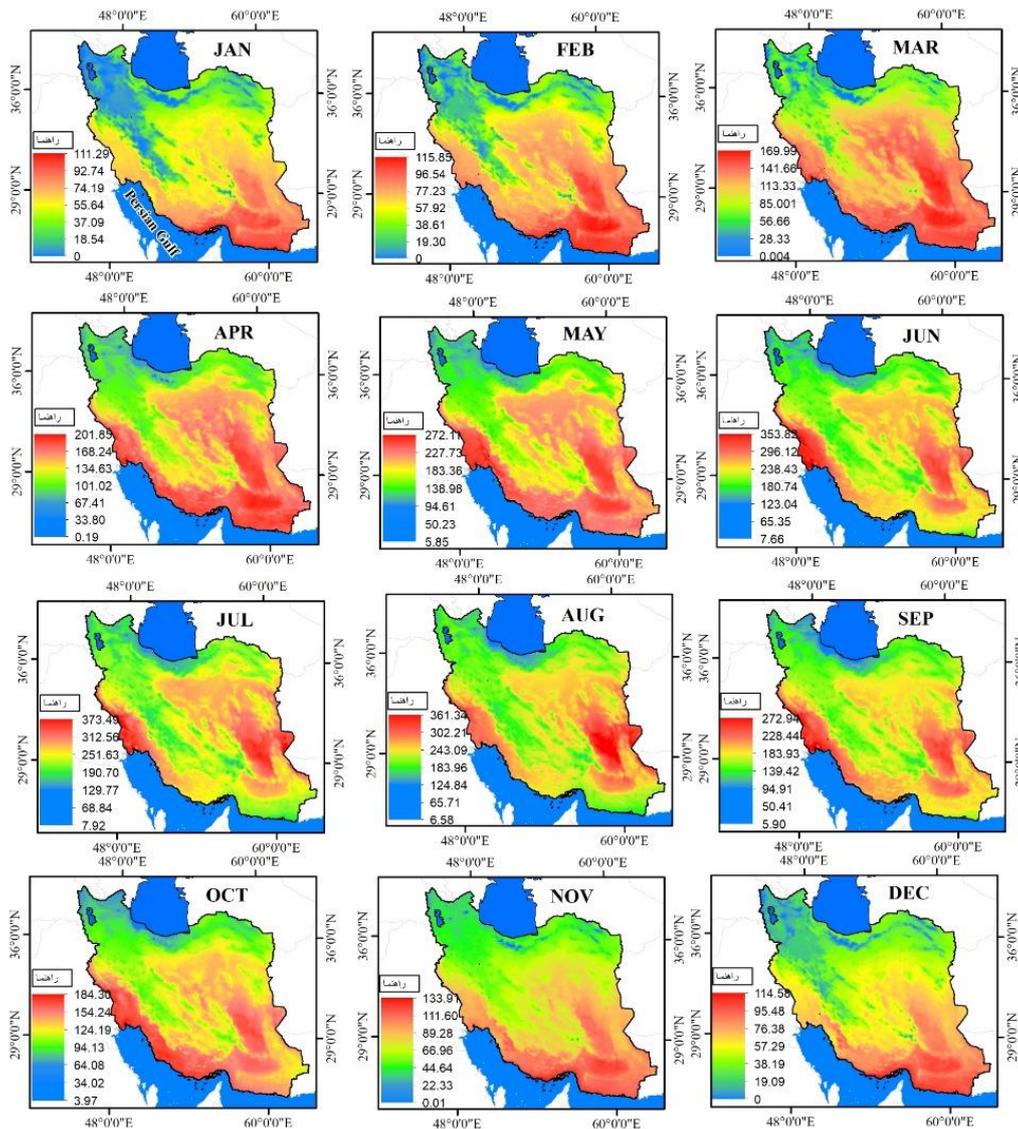
ماه‌های (اکتبر، نوامبر، دسامبر): در ادامه وضعیت مقدار ETo در ماه‌های فصل پاییز به تفکیک هر ماه در شکل (۵) مشخص شده است. همان‌طور که از روی الگوی نقشه‌ها قابل مشاهده می‌باشد، به تدریج با تغییر دمای هوا و جابجایی فصلی، روند کاهش ETo ماهانه در تمام گستره ایران رخ می‌دهد. البته این شرایط در الگوی مکانی اولیه حکم‌فرما می‌باشد. با توجه به توزیع مکانی به دست آمده برای ماه‌های فصل پاییز، بالاترین ETo در مناطق مرکزی، دشت کویر و دشت لوت و چاله جازموریان رخ خواهد داد. در ماه‌های اکتبر تا دسامبر با تغییر دمای هوا، تغییرات تبخیر - تعرق مرجع ماهانه نیز به تدریج تغییر خواهد کرد. بررسی و مقایسه داده‌های برون‌داد مدل‌ها با داده تاریخی - مشاهده‌ای در گستره ایران نشان داد که، در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر تا دهه ۲۰۵۰ میلادی تحت سناریوی مذکور مقدار ETo به ترتیب ۳، ۵ و ۳ میلی‌متر بر مقدار تبخیر - تعرق مرجع ماهانه افزوده خواهد شد. لازم به ذکر است که در مناطق مرتفع و سردسیر و عرض‌های جغرافیایی بالاتر، شرایط نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای با تغییرات جزئی در حد ۱ میلی‌متر و کمتر مشاهده می‌شود. در واقع تغییرات افزایشی ETo در دوره آینده تحت شرایط تغییر اقلیم، از نظر زمانی از اواسط فصل زمستان تا اواسط پاییز حائز اهمیت است. در ماه‌های خنک و سرد سال در مناطق مرتفع و سردسیر، میزان تغییرات اندک بوده و در مناطقی نیز بدون تغییر مشاهده می‌شود.



شکل شماره ۵. پیش‌نگری تغییرات ET₀ در طول سال در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) بر اساس سناریوی RCP8.5

تغییرات ET₀ ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) بر اساس سناریوی RCP4.5

در شکل (۶) الگوی ET₀ ماهانه در گستره ایران و تغییرات آن در دوره آینده تا دهه ۲۰۵۰ بر اساس سناریوی RCP4.5 بررسی شده است. این تغییرات به تفکیک ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل شماره ۶. پیش‌نگری تغییرات ET₀ ماهانه در طول سال در دوره آینده (۲۰۲۵ - ۲۰۵۰) بر اساس سناریو RCP4.5

ماه‌های (ژانویه، فوریه و مارس): در این ماه‌ها، الگوی توزیع مکانی ET₀ به مانند دوره تاریخی مشاهده می‌شود. به طوری که کمترین مقدار ET₀ در مناطق کوهستانی و مرتفع و عرض‌های بالا مشاهده می‌شود و در مقابل در مناطق کم ارتفاع نیمه جنوبی، مرکزی و شرقی کشور، بالاترین مقدار ET₀ را به خود اختصاص داده است. مقایسه حد بالای ET₀ در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس نشان داد که تا دهه ۲۰۵۰ نسبت به دوره تاریخی به ترتیب ۹، ۷ و ۹ میلی‌متر افزایش رخ خواهد داد. این تغییرات نسبت به سناریوی بدبینانه RCP8.5 در سطح پایین‌تری قرار دارد.

ماه‌های (آوریل، می و ژوئن): در این ماه‌ها به ترتیب مقدار ET₀ به ترتیب ۸، ۸ و ۲۸ میلی‌متر در دهه ۲۰۵۰ نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای افزایش خواهد یافت. این تغییرات بر اساس سازوکار سناریوی حد وسط مشاهده می‌شود. در این ماه‌ها نیز گستره کانون‌های بالای ET₀ به سمت مناطق مرتفع کشیده شده است.

ماه‌های (جولای، آگوست و سپتامبر): در ماه‌های گرم و بسیار گرم سال نیز مقدار ET₀ نیز تحت سناریوی حد وسط RCP4.5 نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. نتایج نشان داد که با توجه به الگوی توزیع مکانی تبخیر - تعرق مرجع ماهانه به دست آمده بر اساس پرونداد مدل در قالب این سناریو، بیشترین مقدار در مناطق کم ارتفاع نواحی جنوبی و مرکزی کشور رخ خواهد داد. مقدار تغییرات در این سناریوی حد وسط نسبت به سناریوی حد بالا کمتر خواهد بود. به طوری که در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر به ترتیب ۸، ۲۵ و ۲۳ میلی‌متر مقدار ET₀ نسبت به دوره گذشته

افزایش خواهد یافت. افزایش بالای تبخیر - تعرق در ماه آگوست قابل توجه می‌باشد. ماه‌های (اکتبر، نوامبر، دسامبر): در این ماه‌ها با ورود به فصل پاییز بتدرج با کاهش دمای هوا، از مقدار ETO ماهانه نیز کاسته خواهد شد. تحت سناریوی حد وسط تغییرات ETO به ترتیب، ۸، ۱ و ۶ میلی‌متر نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. در ماه اکتبر بالاترین و در ماه نوامبر کمترین تغییرات مشاهده می‌شود.

نتایج برونداد مستقیم مدل‌های دینامیکی پروژه هماهنگ کوردکس - منا به صورت ریزمقیاس شده و بر اساس سناریوهای واداشت تابشی نشان داد که در دوره آینده در گستره ایران؛ مقدار تبخیر - تعرق مرجع به عنوان یکی از اجزاء بسیار مهم چرخه هیدرولوژیکی، نسبت به دوره تاریخی - مشاهده‌ای افزایش خواهد یافت.

تغییرات متوسط ETO سالانه دوره آینده بر اساس برونداد مدل برای ۶۵۰۰۰ نقطه با فاصله ۲۲ کیلومتری در گستره ایران نشان داد که متوسط ETO سالانه نسبت به دوره تاریخی دارای انحراف افزایشی می‌باشد. به طوری که متوسط ETO سالانه دوره تاریخی با متوسط ۱۰۷/۲ میلی‌متر، در دوره آینده بر اساس سناریوی حد بالا و حد وسط به ترتیب به ۱۱۱/۹ و ۱۱۰/۹ میلی‌متر تغییر خواهد یافت. در واقع متوسط ETO سالانه در دوره آینده تا ۲۰۵۰ (میان‌ه قرن حاضر) بر اساس سناریوی حد بالا و حد وسط به ترتیب ۳/۷ و ۲/۸ درصد نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد داشت.

از نظر ماهانه، درصد تغییرات ETO در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی در ماه‌های فصل سرد سال (ژانویه تا مارس) در مناطقی که از مقدار تبخیر - تعرق مرجع پایین‌تری نسبت به دیگر مناطق برخوردار می‌باشند، بیشتر مشاهده می‌شود (جدول ۲). این مناطق بیشتر عرض‌های بالا و مناطق سردسیر را پوشش می‌دهند. از طرفی دیگر در ماه‌های فصل گرم سال (جولای تا سپتامبر) درصد تغییرات تبخیر - تعرق مرجع ماهانه تحت سناریوهای مورد مطالعه در مناطق با مقدار بالای ETO بیشتر از دیگر مناطق رخ خواهد داد (جدول ۳).

از نظر زمانی بالاترین تغییرات ETO ماهانه از اواسط زمستان تا اوایل پاییز با توجه به حاکمیت دوره گرم‌تر رخ خواهد داد. تحت سناریوی واداشت تابشی حد بالا، مقدار ETO تا ۳۴ میلی‌متر در ماه‌های بسیار گرم مانند آگوست نیز افزایش خواهد یافت. از نظر مکانی، کانون‌های عمده حد بالای تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در نواحی مرکزی اطراف دشت کویر، دشت لوت، چاله جازموریان و نیمه جنوبی کشور قرار دارد. این نواحی با توجه به ناحیه بندی‌های اقلیمی اقلیم شناسان در ایران، کانون گرم‌ترین ناحیه اقلیمی نیز محسوب می‌شوند. الگوی فضایی به دست آمده بر اساس برونداد مستقیم مدل نشان داد که در دوره تاریخی - مشاهده‌ای و دوره آینده، همچنان از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور، بر مقدار ETO ماهانه افزوده خواهد شد. بر گستره پهنه‌های با تبخیر - تعرق مرجع بالا در کشور افزوده خواهد شد. مناطق سردسیر و عرض‌های بالا با توجه به پذیرش اثرات تغییر اقلیم و روند افزایشی دمای هوا برای دهه‌های آتی، مقدار ETO ماهانه بالایی را نیز تجربه خواهند کرد.

جدول شماره ۳. درصد تغییرات ETO ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) تحت

سناریوهای مختلف

ماه‌های فصل سرد	درصد تغییرات دوره آینده بر اساس RCP8.5	درصد تغییرات دوره آینده بر اساس RCP4.5	ماه‌های فصل گرم	درصد تغییرات دوره آینده بر اساس RCP8.5	درصد تغییرات دوره آینده بر اساس RCP4.5
مناطق با مقدار ETO بالایی	ژانویه	۸/۱۷	جولای	۸/۱	۲۲/۳
ماهانه	فوریه	-۰/۵۲۱	آگوست	۰/۴۹۸	۱/۲۷
مناطق با مقدار ETO پایین	مارس	۲/۳۰	سپتامبر	۲/۱۰	۴/۳۹
ماهانه	ژانویه	۹/۱۷	جولای	۸/۱۸	۲/۹
	فوریه	۶/۰۷	آگوست	۶/۶	۱/۱
	مارس	۱۱	سپتامبر	۹	۵/۸

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تغییرات تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در گستره ایران بر اساس استفاده مستقیم مدل های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه کوردکس - منا بررسی شد. در بین مدل های بکار رفته، برون داد مدل منطقه ای NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M بر اساس مقایسه معیارهای آماری، عملکرد بالاتری نشان داد. استفاده مستقیم از برون داد مدل ها می تواند در کاهش عدم قطعیت موثر باشد که در تحقیق حاضر لحاظ شد. بررسی تغییرات ETo سالانه تا ۲۰۵۰ میلادی نشان داد که در دوره آینده تا میانه قرن حاضر بر اساس سناریوی حد بالا و حد وسط به ترتیب ۳/۷ و ۲/۸ درصد، متوسط ETo سالانه نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. الگوی توزیع فضایی ETo ماهانه در طول سال تابع مؤلفه های مکان می باشد. بر اساس الگوی فضایی به دست آمده بر اساس شبکه داده در گستره ایران، در دوره تاریخی - مشاهده ای (۱۹۸۰-۲۰۰۵) و دوره آینده تا دهه ۲۰۵۰ میلادی، از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور، مقدار ETo ماهانه افزایش می یابد و در مناطق نیمه جنوبی و مرکزی، کانون مناطق بالا تشکیل می شود. بررسی ETo ماهانه پیش نگرسی شده در دوره آینده تا ۲۰۵۰ میلادی نسبت به دوره تاریخی - مشاهده ای نشان دهنده افزایش قابل توجه ای در مقدار تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در گستره ایران می باشد. این تغییرات در الگوی خط سیر حد بالای واداشت تابشی (RCP8.5) از ماه مارس تا اواخر تابستان به بالاترین سطح خود می رسد؛ به طوری که در کانون های حد بالا در مناطق مذکور، در ماه های نسبتاً گرم از آوریل تا ژوئن به طور میانگین ۱۱ میلی متر و در ماه های گرم سال از جولای تا اگوست به طور متوسط، تا ۱۷ میلی متر مقدار ETo افزایش خواهد یافت. تحت سناریوی خط سیر حد وسط واداشت تابشی، این شرایط نیز به صورت افزایشی بوده و با مقدار پایین تری رخ خواهد داد. به طور کلی تبخیر - تعرق مرجع ماهانه به عنوان یکی از مؤلفه های هیدرو - اقلیمی بر اساس برون داد مستقیم مدل ها با شرایط افزایشی مواجه خواهد شد که پیامد این افزایش، تحمیل خشکی بیشتر بر محیط و در نتیجه افزایش تقاضای برای مصرف آب بخصوص در بخش کشاورزی خواهد بود. این شرایط برای جغرافیای ایران با آب و هوایی شکننده، حائز اهمیت می باشد. بنابراین سرزمین ایران در حال حاضر با تنش و ناپایداری در وضعیت منابع آبی مواجه می باشد، این شرایط در دهه های آینده تحت شرایط تغییر اقلیم نیز تشدید خواهد شد. لزوم توجه به مدیریت ریسک و افزایش تاب آوری در شرایط تغییر آب و هوایی ناشی از گرمایش جهانی می تواند نقشه راهی در این زمینه محسوب شود. به طور کلی دورنمایی دوره آینده لزوم توجه جدی به مدیریت منابع آبی و ملاحظات اقلیمی را ضروری می سازد.

نتایج تحقیق حاضر در تائید مطالعات قهرمان و همکاران (۱۳۹۵) و جورابلو و همکاران (۱۳۹۷) مشخص می دارد که مدل های دینامیکی کوردکس در برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل ماه های گرم سال از توانایی بالاتری نسبت به ایام سرد سال برخوردار می باشند. همچنین در راستای این مطالعه می توان تائید نمود که تبخیر - تعرق در دوره آینده در بیشتر ماه های سال نسبت دوره گذشته افزایش خواهد یافت. نتایج تحقیق حاضر در تائید مطالعات میرحسینی و همکاران (۱۴۰۰) و حیدری تاشه کبود و خوشخو (۱۳۹۸) مشخص می دارد که تحت کلیه سناریوهای RCP یا سناریوهای واداشت تابشی، مقدار ETo در طول سال در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج تحقیق حاضر در تائید مطالعات حاجبی (۱۳۹۹) می باشد. وی در مطالعه خود بر اساس دو مدل اقلیمی پروژه CORDEX و روش پنمن - مونتیت، فائو و سناریوهای RCP مشخص نمودند که تغییرات ETo در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱) و آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهد یافت. در تائید مطالعات یانگ و همکاران (۲۰۲۰) اهمیت مدل های منطقه ای پروژه کوردکس برای ارزیابی تبخیر - تعرق حائز اهمیت می باشد. همچنین تغییرات افزایش ETo در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی حائز اهمیت می باشد.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) احمدی، م.؛ داداشی رودباری، ع.؛ اکبری ازیرانی، ط. و کرمی، ج. (۱۳۹۸). کارایی مدل HadGEM2-ES در ارزیابی ناپهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی. فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۳)، ۶۲۵-۶۴۴.
- ۲) باب الحکمی، ع.؛ غلامی سفیدکوهی، م.ع. و عمادی، ع. (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران. تحقیقات آب‌و‌خاک ایران، ۵۱(۲)، ۴۰۱-۳۸۷.
- ۳) بهمنش، ج.؛ آزاد طلاتپه، ن.؛ منتظری، م.؛ رضایی، ح. و خلیلی، ک. (۱۳۹۴). اثر تغییر اقلیم بر تبخیر - تعرق مرجع، کمبود بارندگی و کمبود فشار بخار هوا در ارومیه. نشریه دانش آب‌و‌خاک، ۲۵(۲)، ۹۱-۷۹.
- ۴) جورابلو، س.؛ اژدری، خ.؛ گنجی نوروزی، ز. و دلغندی، م. (۱۳۹۷). تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر - تعرق گیاه مرجع و کمبود بارندگی در منطقه سمنان. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۱(۴)، ۷۵-۶۱.
- ۵) حجابی، س. (۱۳۹۹). برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از پیش‌نگری‌های پروژه CORDEX و بررسی سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات آن. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱۴)، ۱۹۳۸-۱۹۲۰.
- ۶) حیدری تاشه کبود، ش. و خوشخو، ی. (۱۳۹۸). تصویرسازی و پیش‌بینی تغییرات آبی تبخیر - تعرق مرجع در مقیاس‌های فصلی و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای انتشار RCP. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۳)، ۱۷۶-۱۵۷.
- ۷) رضیعی، ط.؛ ستوده، ف. (۱۳۹۶). بررسی دقت مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF) در پیش‌بینی بارش مناطق گوناگون اقلیمی ایران. فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۱)، ۱۴۷-۱۳۳.
- ۸) زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۶۰۲-۵۸۳.
- ۹) زارع ایبانه، ح.؛ قبائی سوق، م. و مساعدی، ا. (۱۳۹۴). پایش خشک‌سالی بر مبنای شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم. نشریه آب‌و‌خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۹(۲)، ۳۹۲-۳۷۴.
- ۱۰) سالاری فنودی، م.؛ خسروی، م.؛ طاوسی، ت. و حمیدیان پور، م. (۱۳۹۹). مقایسه و ارزیابی دقت داده‌های بارش پایگاه کوردکس با داده‌های ایستگاهی (مورد کاوی: بارش تابستانه جنوب شرق ایران). پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۱(۴۳)، ۱۵-۳۲.
- ۱۱) عساکره، ح.؛ مسعودیان، س.ا. و ترک‌ارانی، ف. (۱۴۰۰). تفکیک نقش عوامل درونی و بیرونی در وردایی دهه‌ای بارش سالانه ایران زمین طی چهار دهه اخیر (۱۳۹۴ - ۱۳۵۵). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۱۰۷-۹۱.
- ۱۲) فروغی، م.؛ دین پژوه. و جهانبخش اصل، س. (۱۳۹۸). اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر - تعرق گیاه مرجع در منطقه غرب ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۰(۳۷)، ۳۷-۲۱.
- ۱۳) قهرمان، ن.؛ بابائیان، ا.؛ طباطبایی، س. م. (۱۳۹۵). ارزیابی پس پردازش برون داده‌های دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر - تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد). فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۹۶-۶۸۷.
- ۱۴) قهرمان، ن.؛ بابائیان، ا. و طباطبایی، س. م. (۱۳۹۵). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و طول دوره رشد گیاه نیشکر تحت سناریوهای واداشت تابشی. نشریه حفاظت منابع آب‌و‌خاک، ۶(۱)، ۷۴-۶۳.
- ۱۵) میر حسینی، س.م.؛ قاسمیه، ه. و عبداللهی، خ. (۱۴۰۰). پیش‌بینی میزان تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه تحت سناریوهای RCP در دوره‌های آبی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلیاگان). اکوهیدرولوژی، ۸(۱)، ۲۲۰-۲۰۵.
- ۱۶) مسعودیان، ا. (۱۳۹۰). آب‌وهوای ایران، چاپ اول. مشهد: انتشارات شریعه توس مشهد.

References

- 1) Ahmadi, H., Baaghdeh, M., Dadashi-Roudbari, A. (2021). Climate change impacts on pistachio cultivation areas in Iran: a simulation analysis based on CORDEX-MENA multi-model ensembles. *Theor Appl Climatol*, 145, 109-120.
- 2) Asakareh H., Masoudian S.A., & Turkarani F., (2021). A Discrimination of Roles of Internal and External Factors on the Decadal Variation of Annual Precipitation in Iran over

- Recent Four Decades (1975-2016). *Natural Geography Research*, 53 (1): 107-91.
- 3) Babhekmi A., Gholamisefidkoochi M.A., & Emadi A., (2020). The effect of climate change on reference evapotranspiration in Mazandaran province. *Iranian Soil and Water Research*, 51 (2), 401 - 387. [In Persian].
 - 4) Behmanesh J., Azad Talatappah N., Montaseri M., Rezayi H., & Khalili K. 2015. Climate Change Impact on Reference Evapotranspiration, Precipitation Deficit and Vapor Pressure Deficit in Urmia. *Water and Soil Science*, 25(2), 79-91. [In Persian].
 - 5) Foroghi, M., Dinpajuh, Y., & Jahanbakhshasl, S., (2019) Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west rejoin of Iran. *Journal of Climate Research*. 10 (37), 37-21. [In Persian].
 - 6) Ghahraman, N., Babaeian, A., Tabatabai, S.M., (2015). Evaluation the post processed outputs of dynamic models in estimation potential evapotranspiration changes under RCP scenarios (Case Study: Mashhad plain). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42 (3), 696- 687. [In Persian].
 - 7) Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175-183. [In Persian].
 - 8) Hejabi S., (2020). Estimation of the Reference Evapotranspiration Using the Projections of CORDEX Project and Investigation of the Meteorological Variables Contribution in its Changes (Case Study: Lake Urmia Basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6 (14), 1938-1920. [In Persian].
 - 9) Heydari Tashah Kaboud S., & Khoshkhouy, Y., (2019). Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the West of Iran under RCP emission scenarios. *researches in Geographical Sciences*, 19 (53), 157-176. [In Persian].
 - 10) Joorabloo S., Azhdary K., Ganji Z., & Delghandi M. (2018). Climate Change Impact on Reference Evapotranspiration and Precipitation Deficit in Semnan Region. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), 61-75. [In Persian].
 - 11) Mirhosseini, S.M., Qasemieh, H., Abdullahi, Kh., (2021). Prediction of Monthly Potential Evapotranspiration under RCP Scenarios in Future Periods (Case Study: Golpayegan Basin). *Eco Hydrology*, 8 (1), 220 - 205. [In Persian].
 - 12) Musie, M., Sen, S., & Srivastava, P. (2020). Application of CORDEX-AFRICA and NEX-GDDP datasets for hydrologic projections under climate change in Lake Ziway subbasin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100-721.
 - 13) Masoudian, A., (2011). *Climatology of Iran*, first edition. Mashhad: Sharia Toos Publications. [In Persian].
 - 14) Pour, S. H., Abd Wahab, A. K., Shahid, S., Ismail, Z. B. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 246: 105-096.
 - 15) Raziiei, T., Porehkar, A. (2021). Performance evaluation of NCEP/NCAR reanalysis blended with observation-based datasets for estimating reference evapotranspiration across Iran. *Theor Appl Climatol*, 144, 885-903. [In Persian].
 - 16) Raziiei, T., & Stoudeh, F. (2017). Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different climates of Iran. *Journal of the Earth AND SPACE PHYSICS*. 43 (1), 133-147. [In Persian].
 - 17) Salarifenudi M., Khosravi M., Tausi T., & Hamidianpour M., (2020). Evaluation and comparison of the accuracy of the CORDEX database's summer precipitation network data with station data (Case study: summer precipitation of South East of Iran). *Journal of Climate Research*, 11 (43), 32-15. [In Persian].
 - 18) Yang, L., Feng, Q., Adamowaski, J.F., Yin, Z., Wen, X., Wu, M., Jia, B., & Hao, Q. (2020). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research*, 238, 104-868.
 - 19) Zareabyaneh H., Ghobaeisugh M., & Masaedi A., (2014). Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 29 (2), 392 - 374. [In Persian].

- 20) Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research Quarterly*, 53 (1), 75-9. [In Persian].
- 21) Yang, L., Feng, Q. Adamowaski, J.F., Yin, Z. Wen., X. Wu, M. Jia., B. & Hao, Q. (2020). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research*, 238, 10-48.