



Spatiotemporal Trend Analysis of Reference Evapotranspiration in the Western Half of Iran during 1996–2023

Atefe Khoshbayan¹ | Mehraneh Khodamorad Pour² | Vahid Varshavian³

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

E-mail: atefekhoshbayan@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: mkhodamorad@basu.ac.ir

3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: v.varshavian@basu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 19, 2025

Revised: Oct. 31, 2025

Accepted: Nov. 16, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

*Climate change,
Penman-Monteith FAO 56,
Man-Kendall test,
Sen's slope estimator,
West and central Iran.*

ABSTRACT

Surface energy balance and water balance are determined by evapotranspiration, a crucial part of the hydrological cycle. Using the FAO56 Penman–Monteith method, this study examines the spatiotemporal patterns of reference evapotranspiration (ET₀) in Iran's semi-western region (including the western half and parts of the center) over a long period (1996–2023) and a recent decade. Trends were evaluated using Sen's slope estimator and Mann–Kendall nonparametric test. It is found that hot, arid regions in the south and southwest have the highest ET₀, while humid northern and western regions have the lowest. There has been a significant increase in ET₀ trends at over 70% of stations, with Kashan in the center having the largest slope at 0.20mm per year, while Ardabil and Rasht had the smallest slopes at 0.02–0.03mm per year. In all seasons, the majority of stations exhibit growing ET₀ trends, with summer (78% of stations) and winter (64% of stations), and summer slopes of 0.49 mm (Kashan) being the highest. There was, however, a negative seasonal trend in ET₀ in autumn only in Shiraz (–0.04 mm). Compared with a baseline period, the annual mean ET₀ has increased in recent decades, with the largest increases occurring in central Iran (78%), the Zagros Mountains (48%), and the Lake Urmia basin. In light of the fact that ET₀ is expected to increase in response to climate change, it is important for water resources management and agricultural planning to understand how these changes may affect the hydrological cycle.

Cite this article: Khoshbayan, A., Khodamorad Pour, M., & Varshavian, V.(2025) Spatiotemporal Trend Analysis of Reference Evapotranspiration in the Western Half of Iran during 1996–2023, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11), 2969-2987. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398578.669979>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398578.669979>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

As the link between the water and surface energy cycles, evapotranspiration is a crucial component of the hydrological cycle. As a result of global warming, evapotranspiration has been affected significantly, accelerating the hydrological cycle, particularly in semiarid and arid areas. Consequently, understanding the changes in evapotranspiration is essential and plays a critical role in studies related to climate change impacts, hydrology, and agriculture. Therefore, this study examines spatiotemporal changes in reference evapotranspiration (ET₀) across semi-western Iran (covering the western half and parts of the center) over long periods of time (1996-2023), comparing its changes with the recent period (2011-2023).

Methodology

The aim of this research was to examine spatiotemporal changes in reference evapotranspiration (ET₀) in the semi-western region of Iran. Using FAO-56's Penman-Monteith method, ET₀ was calculated. Daily meteorological data were gathered from 25 weather stations in semi-western and central parts of the region for the calculation of monthly and annual ET₀ values, including temperature, relative humidity, wind speed, and sunshine hour. The non-parametric Mann-Kendall test was used to determine significance (at two confidence levels: 99% and 95%), and Sen's slope estimator was used to measure slope of the trend. As part of the assessment of the effects of climate change on evapotranspiration dynamics, spatial analyses were conducted at different time scales—seasonal (spring, summer, autumn, and winter) and annual—to compare spatial heterogeneity and temporal changes between long-term means and those of recent decades.

Results and Discussion

A long-term annual and seasonal mean of ET₀ (1996-2023) indicates an increase in evapotranspiration from north to south of the study area. The southern regions exhibit the highest ET₀, with a peak of 2419 mm in summer, whereas the humid coastal areas along the Caspian Sea and the northern highlands show the lowest levels, with less than 150 mm in winter. The varying topography of the Zagros Mountains, the Central Iranian Desert (Kavir), and the Khuzestan Plain likely contribute to these differences. Moreover, the high humidity and lower radiation levels in the northern coastal regions significantly contribute to the reduction of ET₀. Also, the monthly ET₀ trend for most stations (72% of stations) shows a positive trend in most months. On an annual basis, 70% of the stations studied experienced a significant upward trend, achieving a high confidence level of 99%. The greatest proportion of stations showing a significant increase occurred in summer (71%), followed by winter (64%), and then spring (60%). There was a significant increasing trend in Kashan (central Iran) of 0.49 mm during summer. In contrast, the Shiraz station exhibited a significant negative trend in ET₀, with a decrease of 0.04 mm in autumn. This decline may be attributed to increased cloud cover and reduced energy available for evapotranspiration during that season. Overall, the temporal analysis of the trend lines indicates that the increasing trends demonstrate a steeper slope compared to the decreasing trends.

There has been a significant increase in the annual average ET₀ in recent years, specifically from 2011 to 2023, compared to the baseline period of 1996 to 2010. The most notable increases have occurred in central regions, which saw an increase of 78%, and in northwest regions, which experienced a rise of 48%. In contrast, the southwestern coast registered the smallest increase at just 10%. The effects of climate change may lead to greater temperature rises in higher latitudes, potentially explaining the increase in ET₀ observed in the highlands. On the southwestern coast, however, the high humidity has moderated the impact of rising temperatures, resulting in only a slight change in ET₀.

Conclusion

The research confirms a marked and widespread acceleration in reference evapotranspiration across semi-western Iran during the period 1996–2023. This trend is most pronounced in the central and higher elevation northwestern regions, particularly in the most recent decade. The observed increase in atmospheric water demand poses a substantial threat to regional water resources, underscoring the imperative for prompt management strategies and the implementation of advanced irrigation practices.

Author Contributions

A. Kh: Data preparation, Software, Formal Analysis, Validation, and writing-original draft preparation. **M. Kh:** Methodology, Conceptualization, Results Interpretation, Writing-review and editing, Final report review. Supervision. **V. V:** Writing-review and editing.

Data Availability Statements

Data available on request from the authors.

Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for providing the meteorological data used in this study.

Ethical Consideration

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

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

تحلیل روند زمانی و مکانی تبخیر-تعرق مرجع در نیمه غربی ایران طی دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۳

عاطفه خوش بیان^۱ | مهرانه خدامرادپور^۲ | وحید ورشایان^۳^۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: atefekhoshbayan@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: mkhodamorad@basu.ac.ir^۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: v.varshavian@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۵	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، پنمن-ماتیت فائو ۵۶، آزمون من-کندال، تخمین گرشیب سن، غرب و مرکز ایران.	تبخیر-تعرق از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می‌باشد. هدف این پژوهش، بررسی الگوی روندهای زمانی-مکانی تعرق مرجع پنمن-ماتیت فائو ۵۶ (ET0) با آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گرشیب سن در نیمه غربی ایران (شامل نیمه غربی و بخش‌هایی در مرکز) در بلند مدت (۲۰۲۳-۱۹۹۶) و دهه اخیر است. نتایج این پژوهش نشان از بیشترین ET0 در مناطق گرم و خشک جنوب و جنوب غرب کشور و کمترین مقدار آن در مناطق مرطوب شمالی و غرب کشور دارد. روندهای ET0 سالانه در بیش از ۷۰٪ ایستگاه‌ها افزایشی معنادار بود، که بیشترین آن با ۰/۲ میلی‌متر در سال (در کاشان در مرکز) و کمترین آن در اردبیل و رشت به ترتیب با ۰/۰۲ و ۰/۰۳ میلی‌متر در سال مشاهده شد. در تمام فصل‌های سال، اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی ET0 را تجربه کردند، به طوری که بیشترین درصد ایستگاه‌ها در فصل‌های تابستان (۷۸٪ ایستگاه-ها) و زمستان (۶۴٪ ایستگاه-ها)، با بیشینه روند ۰/۴۹ میلی‌متر در تابستان (کاشان) بودند. روند منفی معنادار فقط در ایستگاه شیراز (۰/۰۴- میلی‌متر بر فصل) در فصل پاییز رخ داد. مقایسه میانگین سالانه ET0 در دوره اخیر نشان از افزایش محدوده تغییرات آن دارد، به طوری که بیشترین افزایش در نواحی مرکزی ایران (حداکثر ۷۸٪)، در ارتفاعات زاگرس (حداکثر ۴۸٪) و حوضه دریاچه ارومیه رخ می‌دهد. روند افزایشی ET0 تحت تاثیر گرمایش جهانی منجر به تغییراتی در چرخه هیدرولوژی می‌شود، که شناخت آن در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد.
استناد: خوش بیان، عاطفه؛ خدامرادپور، مهرانه؛ و ورشایان، وحید (۱۴۰۴). تحلیل روند زمانی و مکانی تبخیر-تعرق مرجع در نیمه غربی ایران طی دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۳. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۱)، ۲۹۶۹-۲۹۸۷. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398578.669979	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.398578.669979	



مقدمه

در سال‌های اخیر، تحقیقات در مورد تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه افزایش پیدا کرده است، و گرمایش جهانی به عنوان یکی از مسائل مهم زیست محیطی مطرح شده است، به طوری که دمای سطح جهانی در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۱ نسبت به سال‌های ۱۸۵۰-۱۹۰۰ به میزان ۱/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (IPCC, 2023). در پنجمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) برآورد شده است که پیامدهای تغییر اقلیم مانند خشک‌سالی، سیل، طوفان و امواج شدید گرمایی به شکل شدیدتری ادامه خواهند یافت (IPCC, 2014). تبخیر-تعرق از مؤلفه‌های کلیدی مؤثر بر فرآیندهای اقلیمی می‌باشد. به عبارت دیگر، تغییرات زمانی در تبخیر-تعرق می‌تواند از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر اقلیم یک منطقه باشد (Zhang et al., 2016). در اغلب مناطق جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، افزایش دما باعث افزایش تبخیر-تعرق گیاه مرجع و کاهش رطوبت خاک شده است، که بر بارندگی، رطوبت هوا، تشعشع خورشیدی، رواناب و آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار است (Goyal, 2004؛ اسمعیل پور و دین پژوه، ۱۳۹۱؛ Farooq et al., 2021). هر یک از این عوامل به‌طور مستقیم از طریق متغیرهای هواشناختی (مانند افزایش تبخیر-تعرق با افزایش دما از طریق افزایش کمبود فشار بخار اشباع جو) یا غیرمستقیم از طریق پاسخ‌های محیطی و گیاهی (مانند تغییرات تبخیر-تعرق از طریق تغییر تشعشع خورشیدی و تأثیر آن بر باز و بسته شدن روزنه‌های گیاهان) در تغییرات تبخیر-تعرق و نیاز آبی گیاه نقش دارند که منجر به افزایش نیاز آبی گیاهان و مصرف آب در بخش کشاورزی می‌شود (Mai et al., 2023; Liu et al., 2019). با این حال، برخی از مطالعات نشان می‌دهد که علیرغم افزایش دمای هوا، تبخیر-تعرق در برخی مناطق کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر دمای هوا، پارامترهای آب و هوایی دیگری مانند سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش خورشید و غیره وجود دارد که بر تغییرات تبخیر-تعرق تأثیر دارند (Ndiaye et al., 2024؛ Donohue et al., 2010).

برآورد دقیق تبخیر-تعرق به عنوان یکی از عناصر اصلی در چرخه هیدرولوژیکی برای برنامه ریزی سیستم‌های آبیاری، مدیریت منابع آب، محاسبه مدل‌های تعادل آب و تصمیم‌گیری‌های کشاورزی ضروری است (Khou et al., 2006؛ Wang et al., 2012). تبخیر-تعرق پتانسیل، حداکثر توان تبخیری جو از سطح بدون محدودیت آبی است. این فرآیند باعث تلفات آب و رطوبت از سطوح آبی می‌شود و با توجه به نوع خاک و پوشش گیاهی، بر دسترسی آب به‌ویژه برای کشاورزی تأثیر می‌گذارد (Burn and Hesch, 2007). با توجه به عدم در نظر گرفتن نوع پوشش گیاهی در تبخیر-تعرق پتانسیل و وابسته بودن آن به متغیرهای هواشناختی (تابش خورشیدی، باد و دمای هوا)، تبخیر-تعرق مرجع (ET₀) در شرایط استاندارد برای گیاه چمن با ارتفاع یکنواخت ۱۲ سانتی‌متر ارائه شد (Allen et al., 1998). تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET₀) به دو صورت مستقیم (لایسیمتر وزنی) و غیرمستقیم شامل: تست تبخیر و مدل‌های تجربی برآورد می‌گردد. محدودیت دسترسی به اندازه‌گیری‌های مستقیم تبخیر-تعرق مرجع (استفاده از لایسیمتر وزنی)، به دلیل مشکلاتی در نصب و اندازه‌گیری لایسیمترها و ایراداتی در برآوردهای مربوط به تست تبخیر و ضریب آن، منجر به استفاده از روش‌های تجربی براساس دما، تابش و ترکیبی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع شد (خدامرادپور و قوی، ۱۴۰۰). روش ترکیبی پنمن-مانیتث فائو ۵۶ توسط سازمان جهانی فائو به عنوان مدل استاندارد در برآورد تبخیر-تعرق مرجع، به دلیل عدم نیاز به واسنجی محلی در اقلیم‌ها و زمان‌های متفاوت با توجه به فیزیکی بودن مدل (برهم‌کنش انرژی بین گیاه و جو) پیشنهاد شد (Allen et al., 1998; Allen et al., 2006; Yoder et al., 2005; Parmar and Tiwari., 2020). مطالعات متعددی روندهای مختلف تبخیر-تعرق مرجع و میزان تأثیرگذاری هریک از متغیرهای هواشناسی را در تغییرات ET₀ در سطح جهان مانند شمال شرقی هندوستان (Jhajharia et al., 2012)، هندوستان (Singh et al., 2025)، ارمنستان (Aschale et al., 2023)، الجزایر (Bouregaa, 2024)، بنگلادش (Rahman et al., 2023)، چین (Liu et al., 2025) و ایران (Dinpashoh et al., 2011; Valipour et al., 2020)، شمال غربی ایران (Kousari et al., 2013) و دشت مغان در ایران (Dinpashoh and Allahverdipour, 2025) را بررسی کرده‌اند.

بررسی توزیع مکانی و روندهای سالانه، فصلی و ماهانه ET₀ به روش پنمن-مونیتث فائو ۵۶ برای ۲۱ ایستگاه سینوپتیک در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران برای دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۰۵ بررسی شد (Tabari et al., 2012). همچنین برای تحلیل روندها از آزمون‌های آماری من-کندال، شیب سن و رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که مقادیر ET₀ ماهانه از ژانویه تا جولای افزایش و تا دسامبر کاهش می‌یابد، و بیشترین مقادیر سالانه ET₀ در جنوب شرقی و کمترین آن‌ها در شمال غرب منطقه مشاهده شد.

همچنین به طور کلی روند افزایشی در طول دوره آماری غالب بود، به طوری که در حدود ۳۰٪ ایستگاه‌ها این افزایش معنادار بود. بررسی ET0 ماهانه و فصلی بیانگر روند افزایشی در اکثر ایستگاه‌ها بود، به طوری که بیشترین روندهای معنادار در فصل زمستان و ماه سپتامبر مشاهده شد. توانمندی پنج مدل برآورد تبخیر-تعرق مرجع شامل: پنمن - مانیتث فائو، ترنت وایت، بلانی کریدل اصلاح شده، هارگریوز و پنمن اصلاح شده بر اساس داده‌های ماهانه و سالانه در محاسبه‌ی نیاز آبی گیاه زیتون در پنج ایستگاه سینوپتیک استان کرمانشاه در دوره‌ی ۲۰۰۵-۱۹۵۱ توسط میرموسوی و همکاران (۱۳۹۱) مطالعه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش پنمن - مانیتث فائو، برآورد دقیق‌تری برای ET0 ارائه می‌کند. حداکثر میزان ET0 ماهانه و سالانه، به ترتیب ۸/۵ و ۴۸/۹ میلی‌متر در ایستگاه روانسر و حداقل آن به ترتیب ۵/۸ و ۳۸/۴ میلی‌متر در ایستگاه کنگاور بود. بر این اساس، بیشترین نیاز آبی سالانه در ایستگاه روانسر با مقدار ۹۲۳/۳ میلی‌متر به‌دست آمد. (Nafarzadegan et al. (2013) به بررسی روندهای سالانه و فصلی ET0 در ۱۰ ایستگاه در جنوب ایران (با مرکزیت استان فارس) طی دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۴۵ پرداختند. رگرسیون خطی چند متغیره نشان داد که متغیرهای کلیدی در تغییرات زمانی ET0 در منطقه مورد مطالعه به ترتیب سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بودند. همچنین نتایج مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه نشان داد که سرعت باد و رطوبت نسبی بیشترین تأثیر را بر روند ET0 داشتند و اکثر روندهای فصلی و سالانه ET0 غیرمعنادار بوده و پس از آن به ترتیب روند کاهشی و افزایشی بیشترین فراوانی را داشت. حساسیت روند تبخیر-تعرق گیاه مرجع ماهانه (ET0) به متغیرهای اقلیمی (حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و سرعت باد) در پنج ایستگاه سینوپتیک مشهد، تبریز، تهران، انزلی و شیراز طی دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۳۴۲ بررسی شد (Mosaedi et al., 2017). نتایج این پژوهش نشان داد که ET0 دارای روند افزایشی معنادار ماهانه در مشهد و تبریز روند کاهشی معنادار در تهران، انزلی و شیراز بود. متغیرهای هواشناسی شامل: رطوبت نسبی و سرعت باد بیشترین تأثیر را در روند کاهشی ET0 در ایستگاه‌های تهران و انزلی داشتند، در حالی که سرعت باد و دمای هوا بیشترین تأثیر را بر روند کاهشی ET0 در شیراز داشتند. از سوی دیگر، متغیرهای اصلی مؤثر بر روند مثبت معنادار ET0، رطوبت نسبی و ساعت آفتابی در تبریز و حداقل دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد در مشهد بودند. (Liu et al. (2020) با بررسی اثرات تابش خالص، دما، سرعت باد و رطوبت بر تبخیر و تعرق مرجع (ET0) با استفاده از روش پنمن - مانیتث در پکن طی ۶۰ سال گذشته (۲۰۱۷-۱۹۵۸) دریافتند که ضریب حساسیت رطوبت نسبی در مقیاس‌های زمانی مختلف همواره منفی و ضرایب حساسیت تابش خالص، دما و سرعت باد مثبت بودند. چترنور و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه سینوپتیک تبریز در دوره زمانی پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۱) پرداختند. همچنین تبخیر-تعرق مرجع را در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۵ با استفاده از سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 خروجی مدل‌های CMIP5 و ریزمقیاس شده با مدل LARS-WG برآورد کردند. نتایج نشان داد که عملکرد هر دو مدل در ماه‌های گرم سال قابلیت بهتری را در برآورد ET0 دارد. همچنین در تمامی دوره‌های آبی و تحت تمامی سناریوها، میانگین تبخیر-تعرق در مقیاس‌های سالانه در مقایسه با دوره پایه افزایش معناداری در سطح ۰/۰۱ خواهد داشت و در هر سه سناریو بیشترین میزان تبخیر-تعرق در ماه جولای و کمترین میزان آن در ماه دسامبر برآورد شد. یحیوی‌دیزج و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی روند ET0 پنمن-مانیتث فائو ۵۶ با آزمون من-کندال و روند نوآورانه (ITA) و حساسیت ET0 به پارامترهای اقلیمی با روش سبل (Sobol) در ۴۰ ایستگاه همدیدی در بازه زمانی (۱۹۷۶-۲۰۲۰) در ایران پرداختند. نتایج نشان از روند افزایشی میانگین فصلی ET0 در ایران داشت و توزیع الگوی مکانی آن بیانگر افزایش از شمال به جنوب و از غرب به شرق ایران داشت. در فصل بهار بیشترین میزان ET0 در بخش‌های جنوب و جنوب شرقی ایران مشاهده شد، که با حرکت به سمت نواحی شمالی کشور مقدار آن کاهش می‌یابد. در فصل تابستان ET0 در بیشتر بخش‌های کشور افزایش داشت، به طوری که در عرض‌های جنوبی به بالاترین حد خود (بیش از ۱۰۵۰ میلی‌متر در سال) رسیده است. در فصل‌های پاییز و زمستان نیز، کاهش محسوس ET0 در نواحی شمال غربی، غرب و شمال شرقی مشاهده شد که با کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی در این فصل‌ها، کاهش تبخیر-تعرق در مناطق شمالی نسبت به جنوبی محسوس‌تر بود. نتایج تحلیل حساسیت نیز بیانگر تأثیر منفی رطوبت نسبی و تأثیر مثبت کمینه و بیشینه دما و سرعت باد بر میانگین فصلی تبخیر-تعرق بود.

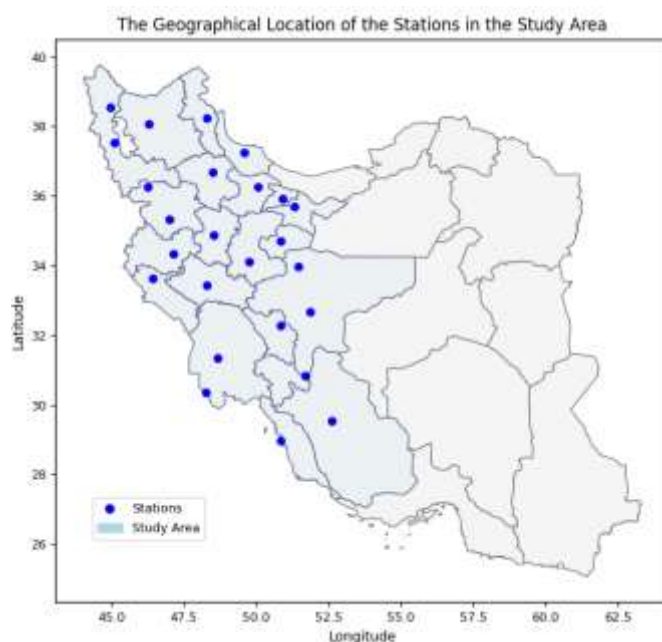
مرور منابع نشان می‌دهد که تعداد قابل توجهی از مطالعات در داخل و خارج کشور به بررسی عملکرد روش‌های برآورد تبخیر-تعرق و متغیرهای هواشناسی مؤثر بر آن پرداخته‌اند و بسیاری از پژوهشگران معادلات مشابهی را برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده کرده‌اند. بنابراین در این پژوهش از روش پرکاربرد پنمن-مانیتث فائو ۵۶ در محاسبه تبخیر-تعرق مرجع استفاده شد. وجه تمایز این مطالعه را می‌توان در سه محور اصلی بیان کرد: ابتدا، استفاده از داده‌های بلندمدت و به‌روز تا سال ۲۰۲۳ که نسبت به بسیاری از مطالعات پیشین جامعیت بیشتری دارد. سپس، تمرکز ویژه بر نیمه غربی کشور با اطلاعات ۲۵ ایستگاه همدیدی، که امکان تحلیل دقیق‌تر و جزئی‌تری از

روندهای مکانی را فراهم می‌کند، و در نهایت، بررسی هم‌زمان تغییرات در مقیاس‌های زمانی مختلف شامل: سالانه، فصلی و دهه‌ای که می‌تواند به درک بهتر تغییرات تبخیر-تعرق نسبت به عوامل اقلیمی کمک کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز بازنگری در الگوهای مصرف آب، اصلاح سیاست‌های مدیریت منابع آب و افزایش تاب‌آوری بخش کشاورزی در برابر ناپایداری‌های اقلیمی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، ۲۵ ایستگاه در نیمه غربی ایران، بخش غربی‌تر کشور نسبت به نصف‌النهار مرکزی آن است، که استان‌های نیمه غربی شامل: اردبیل، آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، زنجان، همدان، کردستان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، چهارمحال بختیاری، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، بوشهر، گیلان، فارس و برخی نواحی مرکزی شامل: اصفهان، مرکزی، البرز، تهران، قزوین و قم می‌باشند. داده‌های مورد نیاز تحقیق شامل دمای حداکثر، دمای حداقل و میانگین دمای هوا، سرعت باد ۱۰ متری، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و فشار بخار آب در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۲۳ است که از سازمان هواشناسی کشور به صورت روزانه دریافت شد. پراکنش مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است. در این پژوهش با توجه به عملکرد مناسب روش عکس معکوس فاصله (IDW) در پهنه‌بندی ET₀ (نادریانفر و همکاران، ۱۳۹۹)، از روش یادشده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و محیط توسعه یکپارچه PyCharm نسخه [۲۰۲۴، ۱، ۳] استفاده شد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع

سازمان بین‌المللی غذا و کشاورزی (FAO)، در سال ۱۹۹۸ در نشریه شماره ۵۶ فائو، روش پنمن-مانتیت فائو را به عنوان روش استاندارد برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع پیشنهاد نمود. این روش بیشترین استفاده را در جهان دارد و ثابت شده است که می‌تواند ET₀ را در اقلیم‌های مختلف تخمین بزند (Zotarelli et al., 2009; Pour et al., 2020). برآورد تبخیر-تعرق در این روش به متغیرهای هواشناسی شامل: دماهای بیشینه و کمینه، میانگین دمای هوا، میانگین رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی نیاز دارد، که براساس رابطه (۱) برآورد می‌شود (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

رابطه (۱)

که در این رابطه، ET₀: تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n: تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G:

شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T : میانگین روزانه دما در ارتفاع دومتری (درجه سانتی گراد)، u_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s : فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a : فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ : شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و γ : ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر سلسیوس) می باشد.

شاخص های آماری

در این پژوهش بررسی وجود روند در سری های تبخیر- تعرق مرجع و شیب به ترتیب از آزمون های من- کندال و تخمین گر شیب سن با استفاده از کدنویسی در نرم افزار اکسل انجام شد. آزمون ناپارامتریک من-کندال که توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO) در ارزیابی روند سری های زمانی داده های محیطی توصیه شده است این مزیت را دارد که کمترین حساسیت را به داده های پرت دارد (Liang et al., 2010; Khodamorad Pour et al., 2025). به طور کلی نتایج به دست آمده از این آزمون مشخص کننده وجود یا عدم وجود روند در یک سری زمانی، معناداری یا غیر معنادار بودن آن و در نهایت مثبت و یا منفی بودن روند در صورت وجود است (ابلاغیان و همکاران، ۲۰۱۹). آزمون روند من-کندال ابتدا با محاسبه آماره S انجام می شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1, j = i+1, \dots, n) \quad \text{رابطه ۲}$$

که n تعداد مشاهدات سری و x_i, x_j به ترتیب داده های i و j ام سری می باشند.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

اگر آماره $|Z| \leq \frac{\alpha}{2}$ باشد، آنگاه فرض صفر یا همان عدم وجود روند را می توان در سطح معناداری α پذیرفت. در غیر این صورت، فرضیه صفر را می توان رد کرد و فرضیه جایگزین را در سطح معناداری α پذیرفت.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

اگر روند خطی در سری زمانی وجود داشته باشد، شیب واقعی (تغییر در واحد زمان) را می توان با استفاده از روش ناپارامتری ساده تخمین گر شیب سن (Sen, 1968) برآورد کرد. مزایای ذکر شده برای آزمون من-کندال بر این آزمون نیز صادق می باشد. به علاوه در صورتی که در سری داده ها، داده های گمشده وجود داشته باشد، نیز می توان از این روش استفاده کرد (Tabari et al., 2011).

$$Q = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \text{For } 1, \dots, N' \quad \text{رابطه ۵}$$

Q شیب بین هر جفت داده می باشد.

که N' برابر با تعداد جفت داده ها می باشد که برابر است با :

$$N' = \frac{n(n-1)}{2} \quad \text{رابطه ۶}$$

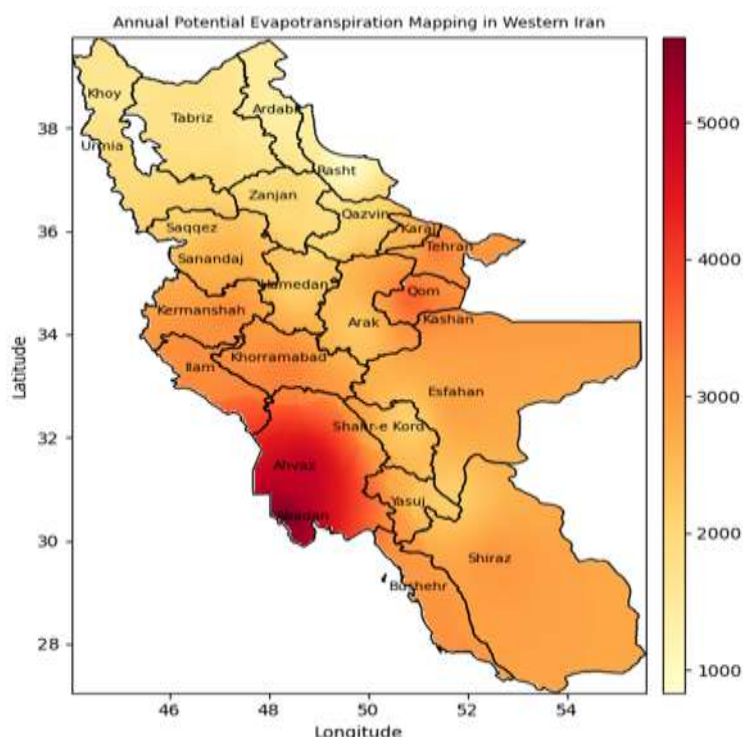
این آزمون از نوع دو طرفه بوده و با توجه به سطوح مختلف اطمینان، نتایج متفاوتی دارد (ابلاغیان و همکاران، ۲۰۱۹).

نتایج و بحث

توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع سالانه

میانگین سالانه تبخیر-تعرق مرجع بر اساس روش پنمن-ماتنیث فائو ۵۶ برای ۲۵ ایستگاه نیمه غربی کشور در دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۲۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی شکل ۲ نشان از افزایش تبخیر-تعرق از بخش های شمالی به سمت بخش های جنوبی کشور دارد، به طوری که بیشترین تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه های آبادان و اهواز به ترتیب با ۵۶۲۵ و ۴۹۶۳ میلی متر در سال و کمترین تبخیر-تعرق در سواحل جنوب غربی دریای خزر در ایستگاه رشت با ۸۳۴ میلی متر در سال و بخش سردسیر شمال غرب در ایستگاه اردبیل ۱۳۷۷

میلی‌متر در سال رخ می‌دهند. به عبارت دیگر تبخیر-تعرق مرجع در مناطق گرمسیر تقریباً ۴ تا ۵ برابر نواحی مرطوب و سردسیر است. همچنین بررسی شکل ۲ بیانگر دو هسته بیشینه تبخیر-تعرق مرجع است. شدیدترین هسته بیشینه تبخیر-تعرق مرجع، در جنوب غربی کشور (استان خوزستان) با مرکزیت ایستگاه آبادان (با بیش از ۵۶۰۰ میلی‌متر در سال) و به دنبال آن هسته ضعیف‌تری در نواحی مرکزی ایران با مرکزیت ایستگاه قم (با تبخیر-تعرق مرجع بیش از ۳۶۰۰ میلی‌متر در سال) مشاهده شد. با این حال، هسته اصلی کمینه ET_0 بر روی سواحل شمالی با مرکزیت ایستگاه رشت (با حدود ۸۰۰ میلی‌متر بر سال) قرار دارد. به طور کلی، میانگین سالانه تبخیر-تعرق مرجع از جنوب به شمال منطقه مورد مطالعه کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از وجود ناهمواری‌های زاگرس، جلگه خوزستان و کویر مرکزی ایران باشد. با این حال، در راستای غربی-شرقی الگوی غالب مشخصی وجود ندارد. همچنین، میانگین سالانه تبخیر-تعرق مرجع در مناطق پست و کم ارتفاع، به جز سواحل جنوب غربی دریای خزر در شمال کشور، بیش از مناطق مرتفع است. میانگین سالانه کم تبخیر-تعرق در سواحل شمالی می‌تواند به دلیل وجود رطوبت زیاد و تابش کمتر خورشید در این نواحی باشد.



شکل ۲. میانگین تغییرات سالانه تبخیر-تعرق مرجع در نیمه غربی ایران طی دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۲۳

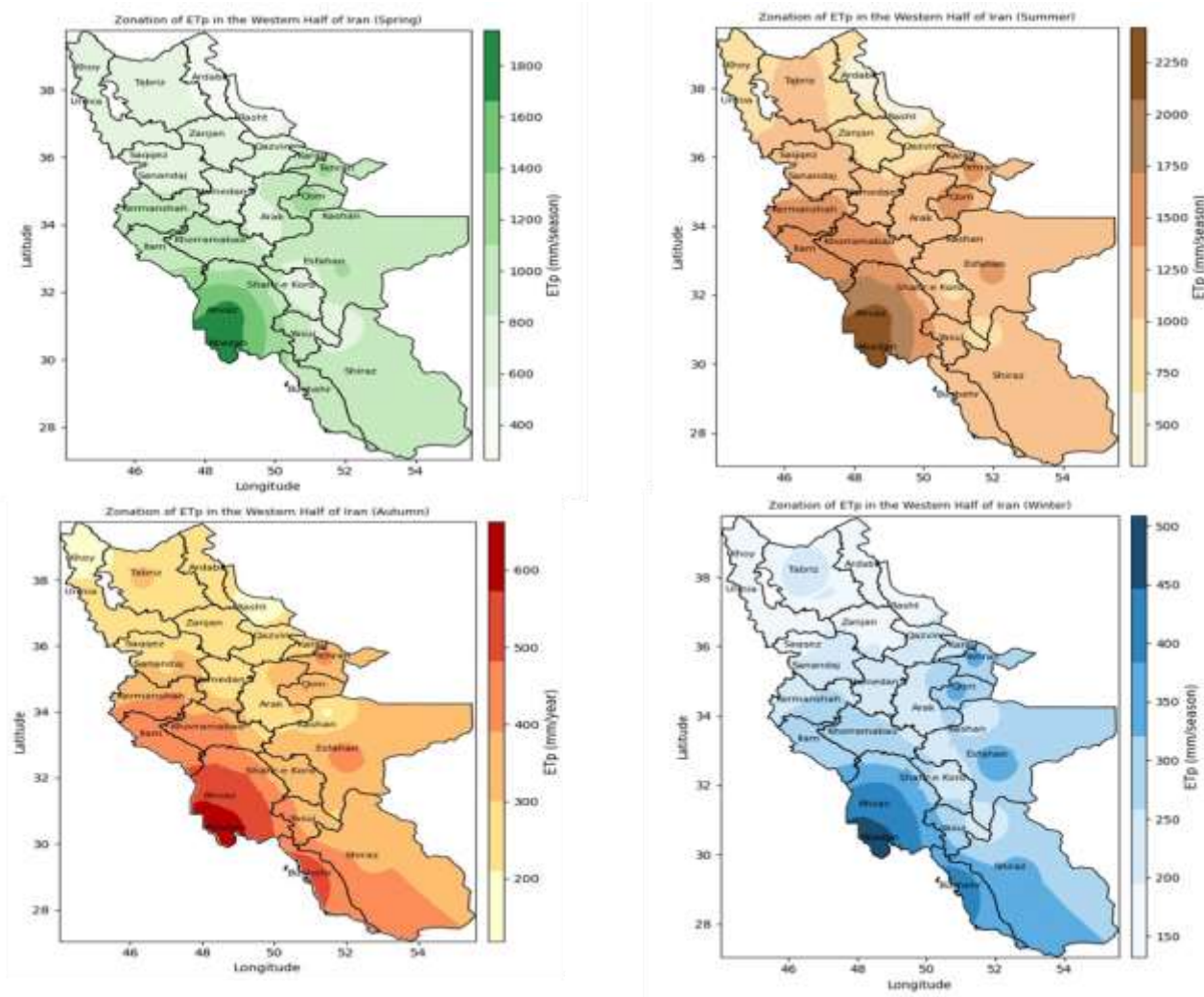
توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع فصلی

میانگین فصلی تغییرات تبخیر-تعرق مرجع در فصل‌های مختلف در شکل ۳ آورده شده است. الگوی مکانی میانگین فصلی تبخیر-تعرق در تمام فصل‌ها مشابه هستند، به طوری که بیشینه میانگین فصلی تبخیر-تعرق در نواحی گرم جنوب غربی کشور و کمینه آن در سواحل شمالی در جنوب غربی دریای خزر (ایستگاه رشت) و ارتفاعات شمال غربی کشور در تمام فصل‌ها رخ می‌دهند. بیشترین مقدار هسته بیشینه میانگین فصلی تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه آبادان با ۲۴۱۹ میلی‌متر در فصل تابستان مشاهده شد، در حالی که کمترین هسته کمینه میانگین تبخیر-تعرق فصلی در ایستگاه‌های رشت و اردبیل (کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر) در فصل زمستان رخ می‌دهند. نکته جالب توجه این است که بیشترین (کمترین) میانگین تبخیر-تعرق فصلی در تمام فصل‌ها به ترتیب در ایستگاه‌های آبادان و اهواز (رشت، اردبیل و خوی) بود. تابش خورشید و گرمایش بیشتر سطح زمین در عرض‌های جنوبی کشور می‌تواند دلیلی بر بیشینه تبخیر-تعرق در نواحی جنوب غربی کشور باشد. همچنین کمترین میزان تبخیر-تعرق در فصل بهار در نیمه شمالی و شمال غربی کشور در ایستگاه‌های رشت (۲۶۶ میلی‌متر) و اردبیل (۴۳۴ میلی‌متر) مشاهده می‌شود، که می‌تواند ناشی از بارندگی‌های همرفتی بهاره باشد. در فصل پاییز نیز، با توجه به شروع فصل سرد که با کاهش دمای هوا و کاهش طول روز در نواحی شمال غربی و غرب کشور همراه است، کمترین ET_0 در این نواحی با تبخیر-تعرق کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر (ایستگاه خوی) رخ می‌دهد. همچنین بارندگی و کاهش دمای هوا در سواحل جنوبی خزر در فصل پاییز نیز می‌تواند دلیلی بر کمینه تبخیر-تعرق در ایستگاه رشت باشد. کاهش قابل توجه ET_0 در فصل زمستان در نواحی شمال غربی و غربی کشور رخ می‌دهد، ممکن است به دلیل کاهش شدیدتر دما در نواحی مرتفع، واقع شدن در امتداد رشته کوه زاگرس و در نتیجه افزایش رطوبت

نسبی و بارندگی در این نواحی باشد.

روندهای مقیاس‌های مختلف زمان تبخیر- تعرق مرجع

روند تبخیر- تعرق ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه توسط آزمون ناپارامتریک من-کندال در دو سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ در مقیاس-های سالانه و ماهانه بررسی شد. در این آزمون چنانچه مقدار آماره Z بین دو عدد $\pm 1/96$ قرار گیرد، نشان دهنده عدم وجود روند می‌باشد. همچنین مقادیر آماره Z، بیش از $1/96+$ و کمتر از $1/96-$ بیانگر وجود روند در سطح اطمینان ۹۵٪ و مقادیر بیش از $2/58+$ و کمتر از $2/58-$ نشان‌دهنده وجود روند معناداری در سطح اطمینان ۹۹٪ است. مقادیر مثبت آماره بیانگر روند افزایشی و مقادیر منفی روند کاهشی می‌باشند.



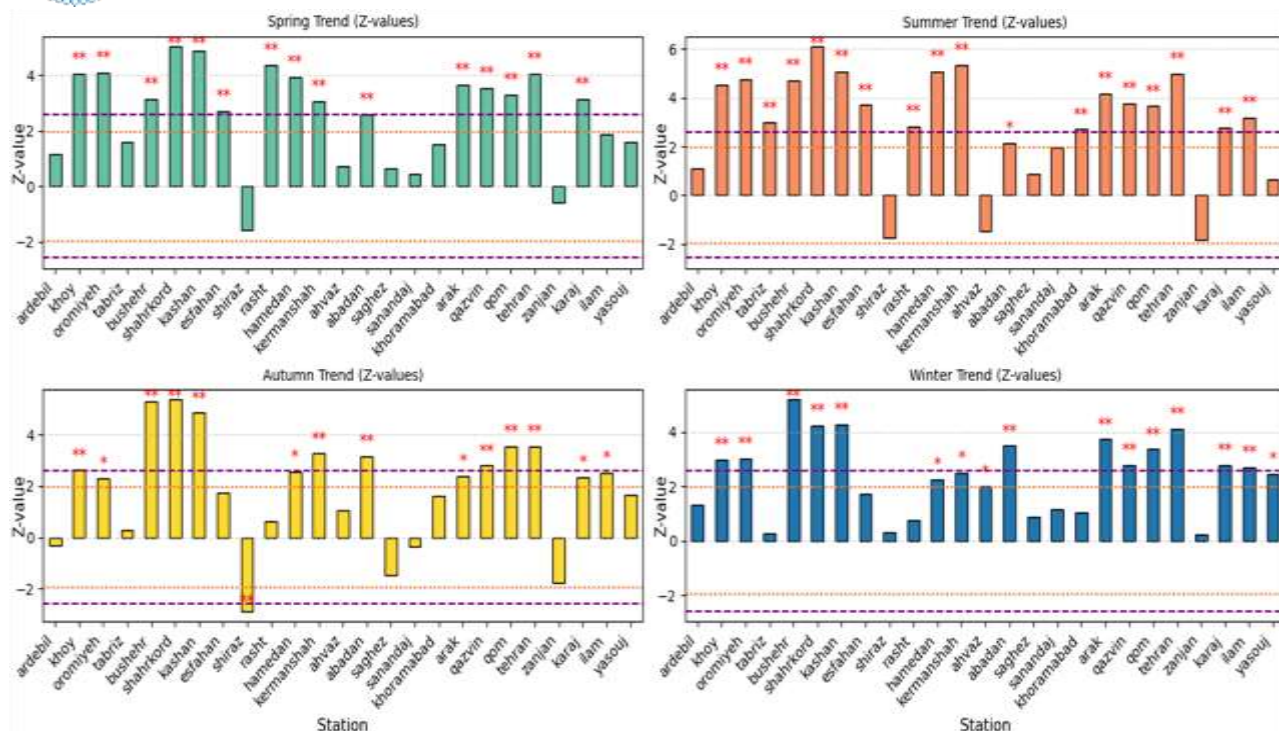
شکل ۳. پهنه‌بندی میانگین فصلی تبخیر- تعرق گیاه مرجع در فصول مختلف طی دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۲۳

روندهای ماهانه به تفکیک تعداد ماه‌های بدون روند و دارای روند معنادار در هر دو سطح اطمینان ۹۵٪ (با علامت *) و ۹۹٪ (با علامت **) و مقادیر آماره سالانه Z در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. بررسی روندها در مقیاس ماهانه بیانگر روند افزایشی معنادار در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه (۷۲٪ کل ایستگاه‌ها) در اکثر ماه‌ها بود، به‌طوری که در ایستگاه‌های شهرکرد و کاشان در تمام ماه‌ها روند معنادار در بالاترین سطح اطمینان (۹۹٪) مشاهده شد. با این حال در ایستگاه‌های سردسیر و مرتفع اردبیل و سقز در هیچکدام از ماه‌ها، روندهای تبخیر- تعرق مرجع معنادار نبود. همچنین آماره Z در مقیاس سالانه در جدول ۱ نشان از روند سالانه مثبت معنادار با سطح اطمینان ۹۹٪ در بیش از ۷۰٪ ایستگاه‌های مورد مطالعه بود، به‌طوری که آماره Z در محدوده $2/3$ (در ایستگاه خرم‌آباد) با سطح اطمینان ۹۵٪ تا $5/8$ (در ایستگاه شهرکرد) با سطح اطمینان ۹۹٪ تغییر می‌کند. همچنین ایستگاه‌های شیراز و زنجان دارای روند منفی سالانه تبخیر- تعرق مرجع، با توجه به مقادیر منفی آماره Z بودند، هر چند که در هیچکدام از این ایستگاه‌ها معنادار نبود.

جدول ۱. تعداد ماه‌های دارای روند تبخیر-تعرق مرجع در سطوح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ و آماره Z سالانه و در ایستگاههای مورد مطالعه (** و *)
سطح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪

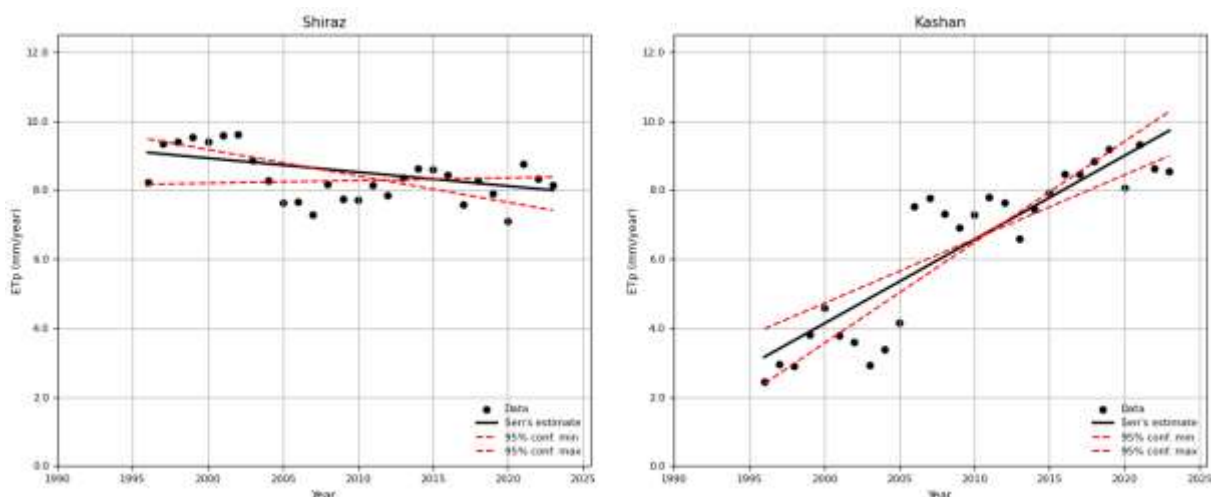
ایستگاه	تعداد ماه‌های معنادار در سطح اطمینان ۹۹٪	تعداد ماه‌های معنادار در سطح اطمینان ۹۵٪	تعداد ماه‌های بدون روند	آماره Z سالانه	جهت روند غالب براساس تعداد ماه‌ها
اردبیل	۰	۰	۱۲	۱/۴۴	بدون روند
خوی	۶	۳	۳	۴/۲**	افزایشی ↑
ارومیه	۷	۲	۳	۵/۱۱**	افزایشی ↑
تبریز	۱	۲	۹	۳/۰۲**	افزایشی ↑
بوشهر	۱۰	۲	۰	۵/۴۳**	افزایشی ↑
شهرکرد	۱۲	۰	۰	۵/۸۲**	افزایشی ↑
کاشان	۱۲	۰	۰	۵/۵۱**	افزایشی ↑
اصفهان	۴	۱	۷	۳/۸۵**	افزایشی ↑
شیراز	۰	۵	۷	-۱/۷۱	بدون روند
رشت	۵	۱	۶	۳/۶۹**	افزایشی ↑
همدان	۶	۲	۴	۴/۸۷**	افزایشی ↑
کرمانشاه	۵	۳	۴	۵/۱۵**	افزایشی ↑
اهواز	۰	۲	۱۰	۰/۳۷	بدون روند
آبادان	۴	۴	۴	۳/۸۵**	افزایشی ↑
سقز	۰	۰	۱۲	۰/۱۳	بدون روند
سنندج	۱	۰	۱۱	۰/۲	بدون روند
خرم آباد	۳	۱	۸	۲/۳۵*	افزایشی ↑
اراک	۷	۴	۱	۴/۶۸**	افزایشی ↑
قزوین	۶	۱	۵	۴/۱۲**	افزایشی ↑
قم	۹	۳	۰	۳/۸۵**	افزایشی ↑
تهران	۹	۳	۰	۵/۰۳**	افزایشی ↑
زنجان	۰	۱	۱۱	-۱/۶۷	بدون روند
کرج	۴	۳	۵	۳/۸۹**	افزایشی ↑
ایلام	۵	۳	۴	۳/۶۹**	افزایشی ↑
یاسوج	۱	۲	۹	۰/۹۶	بدون روند

نتایج آماره Z آزمون من-کندال در دو سطح معناداری ۹۵٪ (خط چین بنفش) و ۹۹٪ (خط چین نارنجی) در روندهای فصلی تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاههای مورد مطالعه در فصل‌های مختلف سال در شکل ۴ نشان داده شده است. تمام ایستگاههای مورد مطالعه دارای آماره مثبت معنادار (۷۶٪ کل ایستگاهها) همه در سطح معناداری ۹۹٪، به جز ایستگاه آبادان در سطح معناداری ۹۵٪ در فصل تابستان بودند، و به دنبال فصل تابستان، به ترتیب فصل زمستان دارای بیشترین ایستگاه دارای آماره مثبت Z (۶۴٪ کل ایستگاهها) با سطح اطمینان ۹۹٪ در اکثر ایستگاهها و سپس در فصل بهار در بیش از نیمی از ایستگاهها (۶۰٪ کل ایستگاهها) دارای آماره مثبت Z در سطح معناداری ۹۹٪ بودند. با این حال، روندهای منفی در تعداد کمی از ایستگاهها (حداکثر چهار ایستگاه شامل: شیراز و زنجان در فصل بهار، شیراز، اهواز و زنجان در فصل تابستان و سقز، سنندج، زنجان و شیراز در فصل پاییز) رخ می‌دهند، در حالی که تنها روند کاهشی معنادار (در سطح اطمینان ۹۹٪) در ایستگاه شیراز، با توجه به مقادیر منفی آماره Z، در فصل پاییز رخ می‌دهد (شکل ۴). این روند کاهشی معنادار در ایستگاه شیراز در فصل پاییز می‌تواند ناشی از افزایش پوشش ابر و کاهش انرژی در دسترس برای تبخیر باشد. هم چنین در فصل زمستان تمام ایستگاهها دارای روند مثبت بر اساس مقادیر مثبت آماره Z بودند و روند منفی در هیچکدام از ایستگاهها مشاهده نشد. در این فصل ایستگاههایی که عمدتاً در نواحی مرکزی، جنوبی و غربی کشور قرار دارند دارای آماره Z در سطح معناداری بالا (در سطح ۹۹٪) بودند، که این افزایش تبخیر-تعرق در این مناطق می‌تواند منجر به تغییر الگوی زمستانی در این نواحی گردد.



شکل ۴. روند فصلی تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های منتخب بر اساس آزمون من-کندال (* و ** سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪)

روندهای سالانه و فصلی تبخیر-تعرق مرجع براساس تخمین گر شیب سن در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. دامنه تغییرات شیب سن در مقیاس سالانه بین $-۰/۰۴۰$ تا $+۰/۲۴$ میلی‌متر در سال متغیر می‌باشد. مقدار شیب سن مثبت نشان‌دهنده روند صعودی و شیب منفی نشان‌دهنده روند نزولی تبخیر-تعرق است. بیشترین مقدار شیب مثبت سالانه معنادار مربوط به ایستگاه کاشان ($۰/۲$ میلی‌متر در سال) و کمترین مقدار شیب معنادار مربوط به ایستگاه‌های اردبیل ($۰/۰۲$ میلی‌متر در سال) و رشت ($۰/۰۳$ میلی‌متر در سال) می‌باشد (جدول‌های ۱ و ۲). روندهای منفی سالانه در ایستگاه‌های رشت و زنجان هیچکدام معنادار نشدند. بررسی‌های فصلی نیز نشان دادند، که در فصل‌های بهار و تابستان بیشترین شیب روند مربوط به ایستگاه کاشان به ترتیب $۰/۳۲$ و $۰/۴۹$ میلی‌متر بر فصل (هر دو معنادار در سطح اطمینان ۹۹٪) و کمترین شیب‌های معنادار مربوط به ایستگاه اهواز ($۰/۰۲$ میلی‌متر بر فصل) در فصل بهار و در ایستگاه رشت ($۰/۰۶$ میلی‌متر در فصل) در فصل تابستان بودند (جدول ۲ و شکل ۵). شیب منفی معناداری در دو فصل بهار و تابستان در هیچ ایستگاهی مشاهده نشد.



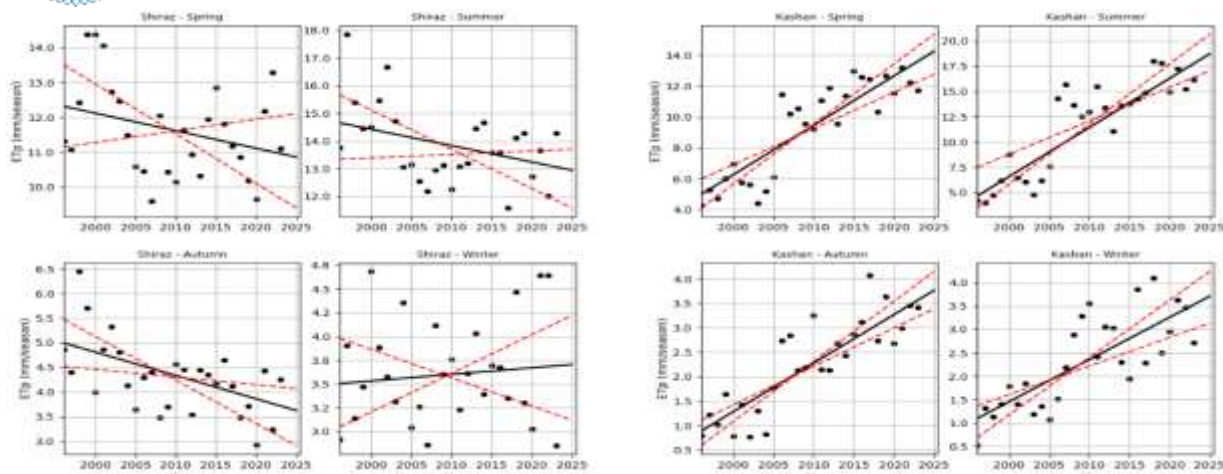
شکل ۵. روند سالانه تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه‌های شیراز و کاشان. خط قرمز شیب سن و خطوط قرمز حد پایین و بالای تغییرات شیب را نشان می‌دهند.

در فصل‌های پاییز و زمستان نیز، بیشترین مقدار شیب خط روند در ایستگاه بوشهر به ترتیب $0/13$ و $0/1$ میلیمتر بر فصل (هر دو معنادر در سطح اطمینان 99%) بود، در حالی که کمترین شیب خط روند در فصل پاییز در ایستگاه شیراز با روند کاهشی معنادر $0/04$ - میلیمتر بر فصل (معنادر در سطح 99%) و در فصل زمستان در ایستگاه رشت با روند معنادر افزایشی بسیار کوچک ($0/004$ میلیمتر بر فصل) می‌باشند. این نتایج چه از نظر وجود روند معنادر در داده‌ها و چه از نظر شدت آن، با یافته‌های (Mosaedi et al. (2017) و Nafarzadegan et al. (2013) توافق دارد. در این مطالعات نیز مشابه این پژوهش، در برخی ایستگاه‌ها مانند کاشان روندهای افزایشی قابل توجه و در ایستگاه‌هایی مانند شیراز روندهای کاهشی معنادر مشاهده شده است. این شباهت‌ها بیانگر الگوی نسبتاً ثابت تغییرات تبخیر-تعرق در نواحی مختلف کشور هستند.

جدول ۲. مقادیر شیب سن سالانه و فصلی تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	شیب سالانه mm/year)	شیب فصل بهار mm/season)	شیب فصل تابستان mm/season)	شیب فصل پاییز mm/season)	شیب فصل زمستان mm/season)
اردبیل	$-0/18$	$0/33$	$0/25$	$-0/11$	$0/15$
خوی	$-0/92$	$0/136$	$0/182$	$-0/29$	$0/31$
ارومیه	$-0/72$	$0/88$	$0/138$	$-0/25$	$0/30$
تبریز	$-0/32$	$0/35$	$0/77$	$0/03$	$0/02$
بوشهر	$-0/123$	$0/107$	$0/165$	$0/132$	$0/105$
شهرکرد	$-0/174$	$0/195$	$0/301$	$-0/117$	$0/94$
کاشان	$-0/242$	$0/322$	$0/482$	$-0/99$	$0/91$
اصفهان	$-0/56$	$0/73$	$0/92$	$-0/25$	$0/34$
شیراز	$-0/40$	$-0/51$	$-0/58$	$-0/46$	$0/07$
رشت	$-0/32$	$0/55$	$0/57$	$0/06$	$0/04$
همدان	$-0/118$	$0/127$	$0/250$	$0/41$	$0/38$
کرمانشاه	$-0/92$	$0/98$	$0/199$	$-0/43$	$0/31$
اهواز	$-0/04$	$0/25$	$-0/67$	$-0/21$	$0/40$
آبادان	$-0/113$	$0/163$	$0/131$	$-0/114$	$0/99$
سقز	$-0/01$	$0/08$	$0/20$	$-0/15$	$0/10$
سنندج	$-0/15$	$0/15$	$0/43$	$-0/07$	$0/13$
خرم آباد	$-0/44$	$0/49$	$0/103$	$0/41$	$0/17$
اراک	$-0/92$	$0/108$	$0/159$	$-0/44$	$0/56$
قزوین	$-0/69$	$0/86$	$0/111$	$-0/36$	$0/31$
قم	$-0/128$	$0/158$	$0/216$	$-0/89$	$0/73$
تهران	$-0/126$	$0/168$	$0/189$	$0/58$	$0/72$
زنجان	$-0/25$	$-0/19$	$-0/45$	$-0/23$	$0/02$
کرج	$-0/67$	$0/59$	$0/105$	$-0/27$	$0/41$
ایلام	$-0/63$	$0/49$	$0/108$	$-0/57$	$0/40$
یاسوج	$-0/45$	$0/51$	$0/33$	$-0/42$	$0/49$

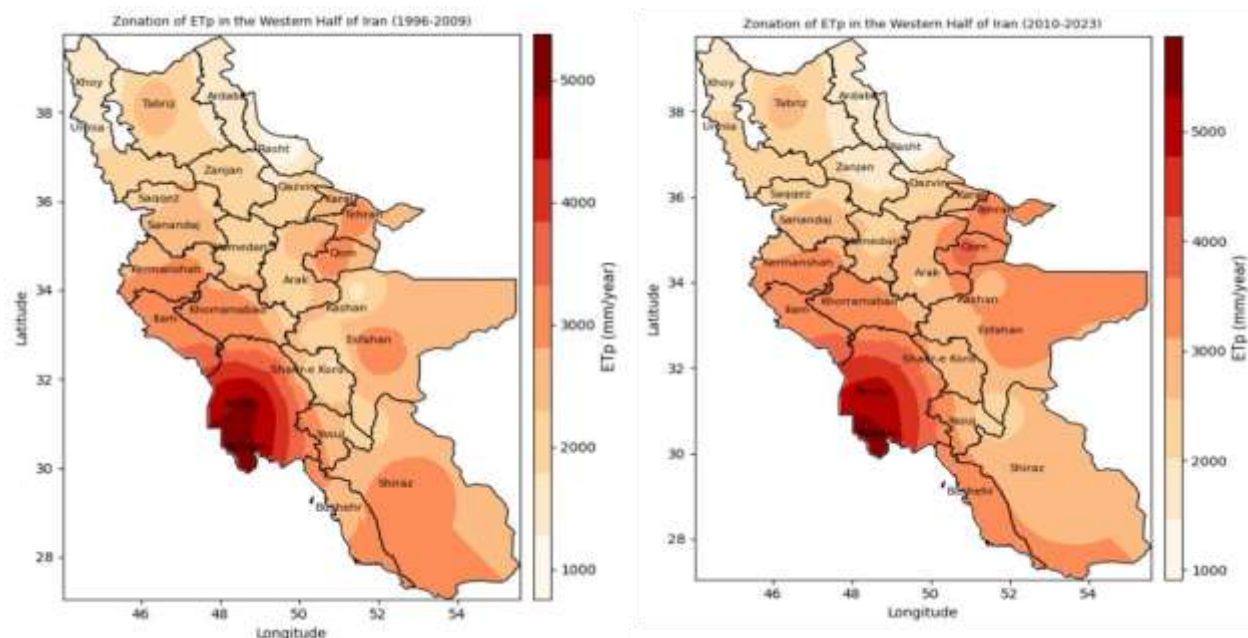
همچنین، ایستگاه‌های کاشان و شیراز به‌عنوان ایستگاه‌های شاخص با بیشترین و کمترین مقادیر شیب سن در مقیاس سالانه و در اغلب فصل‌ها انتخاب شدند. به منظور تحلیل روندهای تبخیر-تعرق مرجع، شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب روندهای سالانه و فصلی دو ایستگاه نمونه شیراز و کاشان را نشان می‌دهند، که در آنها خط توپر بیانگر مقدار شیب سن و خط‌چین‌های قرمز حد بالا و پایین شیب سن در سطح اطمینان $95/0$ است. مقایسه شیب سن در مقیاس سالانه در شکل ۵، نشان از شیب شدید خط روند افزایشی تبخیر-تعرق سالانه در ایستگاه کاشان در کل دوره مورد مطالعه است، در حالی که روند کاهشی با شیب بسیار کمتری، به‌ویژه در سال‌های اخیر در ایستگاه شیراز مشاهده می‌شود. همچنین روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع فصلی در ایستگاه شیراز در سه فصل بهار، تابستان و پاییز کاهشی بوده و تنها در فصل زمستان روند نسبتاً افزایشی می‌باشد (شکل ۶). با این حال، ایستگاه کاشان، در تمام فصول سال، به ویژه بهار و تابستان، شیب خط روند افزایشی قابل توجهی در تبخیر-تعرق مرجع داشت.



شکل ۶. روند فصلی تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه‌های شیراز و کاشان (خط مشکی شیب سن و خطوط قرمز حد پایین و بالای تغییرات شیب را نشان می‌دهند)

تغییرات دهه ای تبخیر-تعرق مرجع

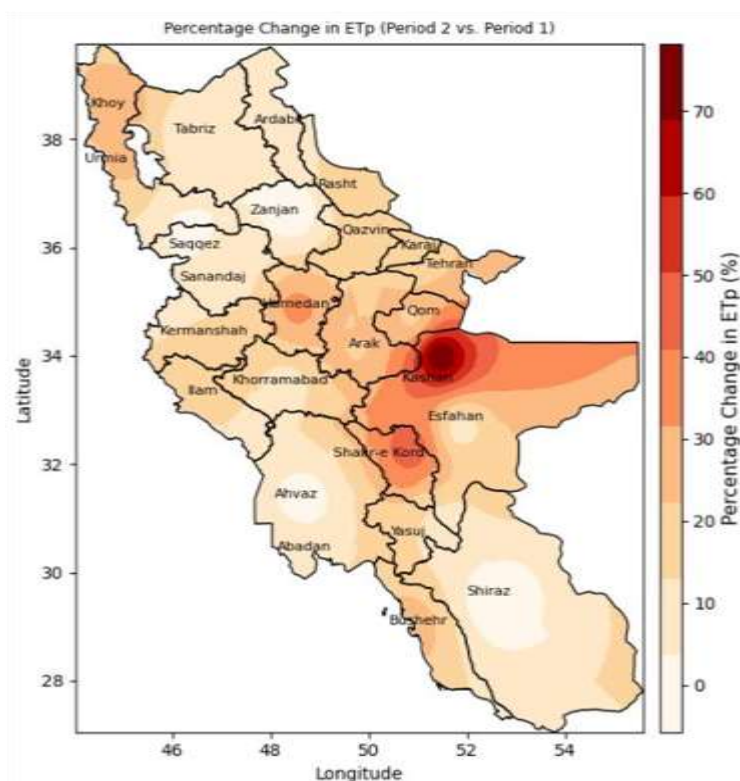
میانگین مکانی تبخیر-تعرق مرجع در مقیاس سالانه به تفکیک در دو بازه زمانی مساوی شامل، دوره پایه (۱۹۹۶ تا ۲۰۰۹) و دوره اخیر (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳) در شکل ۷ و تغییرات مکانی نسبی دوره دوم نسبت به دوره اول نیز بر حسب درصد در شکل ۸ ارائه شده است. بیشترین تبخیر-تعرق مرجع در دوره پایه در ایستگاه‌های آبادان، اهواز و اصفهان به ترتیب با ۵۳۷۸، ۴۹۸۰ و ۳۳۱۵ میلی‌متر بر سال و کمترین آن در ایستگاه‌های رشت، اردبیل و خوی به ترتیب با ۷۵۵، ۱۲۹۹ و ۱۳۸۳ میلی‌متر بر سال مشاهده شد. در دوره اخیر، بیش‌ترین تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های آبادان، اهواز به ترتیب با ۵۸۷۲، ۴۹۴۶ میلی‌متر بر سال و کمترین آن در ایستگاه‌های رشت و اردبیل با ۹۱۳ و ۱۴۵۶ میلی‌متر بر سال و در نهایت خوی با ۱۷۶۴ میلی‌متر بر سال بود (شکل ۷). این نتایج نشان از افزایش محدوده تغییرات تبخیر-تعرق مرجع در دوره اخیر (۴۹۵۹ میلی‌متر بر سال)، با توجه به افزایش در بیشینه و کمینه تبخیر تعرق، نسبت به دوره گذشته (۴۶۲۳ میلی‌متر بر سال) دارد.



شکل ۷. پهنه‌بندی تبخیر-تعرق مرجع سالانه در دو دوره آماری پایه در ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۹ (سمت چپ) و اخیر در ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ (سمت راست)

مقایسه تغییرات مکانی تبخیر-تعرق در شکل ۷ نشان می‌دهد که روند تغییرات تبخیر-تعرق دوره اخیر نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های مرکزی، شمالی، حوضه دریاچه ارومیه و برخی مناطق کوهستانی زاگرس در غرب چندین برابر ایستگاه‌های جنوبی و جلگه خوزستان است. به‌عنوان نمونه باتوجه به اینکه تبخیر-تعرق دوره اخیر در ایستگاه اهواز تنها ۱٪ نسبت به دوره پایه افزایش یافته است، اما

این افزایش در ایستگاه شهرکرد ۴۶٪ است. دلیل این تغییرات می‌تواند به دلیل افزایش قابل ملاحظه دمای هوا در نواحی مرتفع در اثر گرمایش جهانی و بدون تغییر در مناطق پست و کم‌ارتفاع جنوب غربی کشور به دلیل تأثیر رطوبت در این نواحی باشد (Pour et al., 2025). همچنین برخی مطالعات (رسولی و همکاران، ۱۳۹۱) نشان می‌دهند که هسته مرکزی پرفشار مهاجر که نقش عمده‌ای در بارش‌های فصل پاییز و تابستان خزر دارد، در اثر گرمایش جهانی تضعیف شده است که می‌تواند موجب کاهش بارش‌های مناطق مرطوب شمالی گردد. این کاهش بارندگی همراه با افزایش گرمایش جهانی می‌تواند از عوامل تشدیدکننده افزایش روند تبخیر-تعرق مرجع در این ناحیه است. ادامه چنین روندی ممکن است طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های ساحلی و سردسیر شمالی و شمال غربی را به طبقه اقلیمی به نسبت خشک تر با پوشش جنگلی ضعیف شده تغییر دهد. علاوه بر این، بیشترین افزایش نسبی تبخیر-تعرق در ایستگاه کاشان در نواحی مرکزی کشور (حدود ۷۸٪) رخ می‌دهد و در مناطق کوهستانی زاگرس و مناطقی از حوضه دریاچه ارومیه نیز تبخیر-تعرق مرجع در دوره اخیر نسبت به دوره پایه بیش از ۴۰٪ افزایش یافته است. مطابق شکل ۸، بیشترین درصد افزایش تبخیر-تعرق در ایستگاه‌های کاشان، شهرکرد و همدان، و کمترین درصد تغییرات در ایستگاه‌های شیراز، زنجان و اهواز مشاهده شد. روش تقسیم‌بندی بازه زمانی به دو دوره مساوی برای بررسی تغییرات دهه‌ای تبخیر-تعرق مرجع در این مطالعه مشابه رویکرد چترنور و همکاران (۱۴۰۲) است؛ با این تفاوت که در پژوهش حاضر هر دو دوره مربوط به داده‌های گذشته است و تحلیل تغییرات واقعی انجام شده، در حالی که چترنور و همکاران (۱۴۰۲) علاوه بر دوره پایه، سناریوهای آینده را نیز مورد ارزیابی قرار داده‌اند.



شکل ۸. تغییرات نسبی تبخیر-تعرق گیاه مرجع (%) در دوره اخیر (۲۰۲۳-۲۰۱۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۰۹)

جمع‌بندی

در این پژوهش، الگوی مکانی روندهای سالانه، فصلی و تغییرات دهه‌ای تبخیر-تعرق مرجع با روش پنمن-مانیتث فائو ۵۶، و آزمون‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب سن در نیمه غربی و بخش‌هایی از مرکز ایران دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق مرجع از الگوی مکانی و زمانی مشخصی تبعیت می‌کند که تحت تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی و توپوگرافی منطقه قرار دارد. بیشترین تبخیر-تعرق مرجع سالانه و فصلی در نواحی گرم و خشک جنوب و جنوب غربی کشور (آبادان، اهواز و بوشهر) و کمترین تبخیر-تعرق در نواحی مرطوب شمالی و غربی کشور (رشت، اردبیل و خوی) مشاهده شد. این یافته‌ها در خصوص تمرکز بر توزیع مکانی تبخیر-تعرق مرجع در مناطق گرم و خشک جنوب و کاهش آن در مناطق شمالی مرطوب، با نتایج یحیوی‌دیزج و همکاران



(۱۴۰۲) هم‌راستا می‌باشد. نتایج تحلیل‌های فصلی نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق مرجع در فصل تابستان به دلیل افزایش دما به طور قابل توجهی نسبت به سایر فصول افزایش داشته است. به عبارت دیگر این تفاوت‌ها به دلیل نقش پارامترهایی مانند دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و ارتفاع است که نقش مهمی در توزیع مکانی تبخیر-تعرق دارند. این الگوی فصلی با یافته‌های (Tabari et al. (2012) مطابقت دارد که بیشترین میزان تبخیر-تعرق را در فصول گرم سال، به‌ویژه بهار و تابستان در نواحی جنوبی کشور گزارش کردند. یحیوی-دیزج و همکاران (۱۴۰۲) نیز افزایش تبخیر-تعرق در فصل تابستان در مناطق گرم و کاهش آن در نواحی شمالی مرطوب را تأیید کردند. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که روند افزایشی معنادار در تبخیر-تعرق مرجع سالانه در بیش از ۷۰٪ ایستگاه‌ها رخ می‌دهند و در روند ماهانه، بیشترین افزایش معنادار در ماه‌های گرم سال (ژوئن، جولای و آگوست) و کمترین آن در ماه‌های سرد سال (اکتبر، نوامبر و دسامبر) مشاهده شد. هم‌چنین در مقیاس فصلی، بیشتر مناطق نیمه غربی کشور و مرکزی، به‌ویژه در فصل‌های بهار و تابستان روند افزایشی قابل توجهی داشتند. در پاییز، اگرچه بیشتر مناطق روند افزایشی داشتند، برخی مناطق خاص روند کاهشی معناداری را تجربه کردند که احتمالاً ناشی از تغییرات اقلیمی محلی است. در زمستان نیز، مناطق مرکزی، جنوبی و غربی کشور افزایش چشمگیری در تبخیر-تعرق مرجع داشتند که بیانگر تغییر الگوی اقلیمی به سمت گرم‌تر و خشک‌تر شدن این فصل است. مقادیر شیب سن تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های منتخب نیز تحلیل شد و دامنه تغییرات سالانه آن بین مقادیر منفی و مثبت متغیر بود که نشان‌دهنده وجود هر دو روند کاهشی و افزایشی در مناطق مختلف بود. بیشترین شیب معنادار سالانه مربوط به ایستگاه کاشان در نواحی مرکزی (افزایشی) و کمترین آن به ایستگاه‌های اردبیل و رشت (روند افزایشی) اختصاص داشت. تحلیل‌های فصلی نیز نشان داد که در فصول بهار و تابستان، شیب سن در ایستگاه کاشان بیشترین روند افزایشی معنادار و در ایستگاه‌های اهواز و رشت کمترین روند افزایشی معنادار را داشتند. بیشترین شیب مثبت معنادار در پاییز و زمستان نیز در ایستگاه بوشهر و شیب منفی معنادار در ایستگاه شیراز تنها در پاییز مشاهده شد. تحلیل تغییرات دهه‌ای نیز نشان داد که تبخیر-تعرق مرجع دوره اخیر (۲۰۲۳-۲۰۱۰) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۹-۱۹۹۶)، روند افزایشی معناداری در اکثر ایستگاه‌ها، به‌ویژه در مناطق مرکزی، کوهستانی زاگرس و حوضه دریاچه ارومیه دارد، در حالی که این تغییرات در مناطق شمالی و جنوبی کشور کمتر بود. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که روند افزایشی تبخیر-تعرق مرجع در مناطق مختلف کشور، می‌تواند ناشی از اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی باشد، که تأثیر قابل توجهی بر منابع آب کشور دارد. از آنجا که تبخیر-تعرق مرجع معرف نیاز آبی بالقوه یک منطقه به‌شمار می‌رود، لذا شناخت روند تغییرات آن برای برنامه‌ریزی‌های کلان در حوضه آب و کشاورزی ضروری است. این نتایج تأکید می‌کند که روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع تحت تأثیر شرایط اقلیمی محلی و جغرافیایی متفاوت بوده و نیازمند بررسی‌های منطقه‌ای دقیق‌تر است.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- ابلاغیان، آناهیتا؛ آخوندعلی، علی محمد؛ رادمنش، فریدون؛ و زارعی، حیدر (۱۳۹۸). بررسی روند تغییرات دما، بارندگی و رطوبت نسبی در ایران. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۲(۳)، ۱۹۷-۲۱۲.
- اسمعیل پور، مرضیه و دین‌پژوه، یعقوب (۱۳۹۱). تحلیل روند بلندمدت تبخیر تعرق پتانسیل در حوضه جنوبی رود ارس. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۳(۳)، ۲۱۰-۱۹۳.
- چترنور، منصور؛ نویدی، میر ناصر؛ دواتگر، نسرین؛ مرادی مجد؛ نسرین و دلسوز خاکی، جواد (۱۴۰۲). پیشنگری تبخیر-تعرق پتانسیل بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (مطالعه موردی: تبریز)، *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴(۵۴)، ۲۱۳-۲۲۶.
- خدامرادپور، مهرانه و قوی، لیلا (۱۴۰۰). ارزیابی تبخیر-تعرق سنجنده مودیس با تبخیر-تعرق پنمن-مانتیت فائو ۵۶ و پرستلی-تیلور در اقلیم‌های متفاوت ایران، *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۸(۱)، ۲۰۱-۲۱۸.
- رسولی، علی اکبر؛ بابائیان، ایمان؛ قائمی، هوشنگ و زواررضا، پیمان (۱۳۹۱). تحلیل سری‌های زمانی فشار مراکز الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر بارشهای فصلی ایران، *مجله جغرافیا و توسعه*، ۲۷(۱۰)، ۸۸-۷۷.
- میرموسوی، سید حسین؛ پناهی، حمید؛ اکبری، حمید و اکبرزاده، یونس (۱۳۹۱). واسنجی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع و محاسبه‌ی نیازآبی گیاه (ETc) زیتون در استان کرمانشاه، *نشریه جغرافیا و پایدار محیطی*، ۳(۳)، ۴۵-۶۴.
- نادریانفر، الهام؛ دلبری، معصومه؛ افراسیاب، پیمان و کهخامقدم، پریسا (۱۳۹۹). مقایسه فرآیندهای مختلف پهنه‌بندی تبخیر-تعرق در ایران، *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۳(۳)، ۱۷-۳۱.

یحيوی‌دیزج، آمنه؛ اکبری‌ازیرانی، طیبه؛ خالدی، شهریار و جوان، خدیجه (۱۴۰۲). بررسی فصلی تبخیر تفرق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران، آب و خاک، ۳۷(۴)، ۶۴۳-۶۵۷.

REFERENCES

- Aschale, T. M., Peres, D. J., Gullotta, A., Sciuto, G., & Cancelliere, A. (2023). Trend Analysis and Identification of the Meteorological Factors Influencing Reference Evapotranspiration. *Water*, 15(3), 470. <https://doi.org/10.3390/w15030470>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, NO. 56, Rome, Italy.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., et al. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manag.* 81(2), 1-22.
- Bouregaa, T. (2024). Spatiotemporal trends of reference evapotranspiration in Algeria. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(1), 581-598.
- Burn DH, Hesch NM (2007) Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *J Hydrol.*, 336(1), 61-73.
- Chatrenour, M., Mirnaser, N., Davatgar, N., Moradimajd, N., Asadi Oskouei, E., Delsooz Khaki, B. (2023). Prediction of Potential Evaporation and Transpiration under Radiative Forcing Scenarios (Case Study: Tabriz). *Journal of Climate Research*, 54 (14), 2013-226. (In Persian).
- Donohue RJ, McVicar TR, Roderick ML. 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology*, 386, 186-197.
- Dinpashoh Y, Jhajharia D, Fakheri-Fard A, Singh VP, Kahya E (2011) Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *J Hydrol.*, 399(3), 422-433.
- Dinpashoh, Y., & Allahverdi-pour, P. (2025). Monitoring and predicting changes in reference evapotranspiration in the Moghan Plain according to CMIP6 of IPCC. *Environment and Water Engineering*, 11(1), 47-56.
- Eblaghian, A. , Akhondali, A. M. , Radmanesh, F. and Zarei, H. (2019). Trend Analysis of Temperature, Precipitation, and Relative Humidity Changes in Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 197-212. (In Persian).
- Esmailpour, M. and Dinpazhooh, Y. (2012). Analyzing long term trend of potential evapotranspiration in the Southern parts of the Aras river basin. *Geography and Environmental Planning*, 23(3), 193-210. (In Persian).
- Farooq, I., Shah, A. R., Salik, K. M., et al. (2021). Annual, seasonal and monthly trend analysis of temperature in Kazakhstan during 1970-2017 using non-parametric statistical methods and GIS technologies. *Earth System Environment*, 5(5), 575-595. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00244-3>
- Goyal, R.K. (2004). Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69, 1-11.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jhajharia, D., Dinpashoh, Y., Kahya, E., Singh, V. P., & Fakheri-Fard, A. (2012). Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes*, 26(3), 421-435. <https://doi.org/10.1002/hyp.8140>
- Khodamorad Pour, M., Hessami, N., & Varshavian, V. (2025). From Dry to Temperate: How Climate Change Alters Growing Seasons?. *International Journal of Climatology*, 45(5), e8752. <https://doi.org/10.1002/joc.8752>
- Khodamorad Pour, M. and Ghavi, L. (2021). The Evaluation of Evapotranspiration Product of MODIS with Penman-Montieth FAO 56 and Priestley-Taylor Evapotranspiration at the Different Climate Types of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(1), 201-218. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18734.3425>



- Kousari MR, Zarch MAA, Ahani H, Hakimelahi H (2013) A survey of temporal and spatial reference crop evapotranspiration trends in Iran from 1960 to 2005. *Climatic Change*, 120(1-2), 277-298.
- Khou, L., Ouassar, M., & Nakagawa, K. (2006). Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods for semiarid regions. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 227-247.
- Liang L, Li L, Liu Q (2010) Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer River basin of Northeast China. *Agric Forest Meteorol* 150(2), 298-306.
- Liu, Y. J., Chen, J., & Pan, T. (2019). Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998-2005. *Earth and Space Science*, 6(8), 1366-1377.
- Liu, Y., Guo, M., Li, J., Lyu, N., Zhang, J., & Zhang, B. (2025). Attribution analysis of trends in reference crop evapotranspiration in China. *Journal of Geographical Sciences*, 35(1), 3-16.
- Liu, W., Zhang, B., & Han, S. (2020). Quantitative analysis of the impact of meteorological factors on reference evapotranspiration changes in Beijing, 1958-2017. *Water (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082263>
- Mai, M., Wang, T., Han, Q., Jing, W., & Bai, Q. (2023). Comparison of environmental controls on daily actual evapotranspiration dynamics among different terrestrial ecosystems in China. *Science of The Total Environment*, 871, 162124.
- Mirmousavi, H., Panahi, H., Akbari, H., & Akbarzadeh, Y. (2012). Calibration Methods to Estimate Reference Crop Evapotranspiration and Calculated Potential Water Requirements of Olive Plant in Kermanshah Province. *Geography and Environmental Sustainability*, 2(2), 45-64. (In Persian).
- Mosaedi, A., Ghabaei Sough, M., Sadeghi, S. H., Mooshakhian, Y., & Bannayan, M. (2017). Sensitivity analysis of monthly reference crop evapotranspiration trends in Iran: a qualitative approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(3-4), 857-873. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1740-y>
- Naderianfar, E. Delbari, M. Afrasiab, P., & Kahrkhamoghaddam, P. (2020). Comparing Different Processes for Mapping Reference Evapotranspiration in Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(3), 17-31. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307>
- Nafarzadegan, A.R., Ahani, H., Singh, V.P., and Kherad, M. (2013). Parametric and non-parametric trend of evapotranspiration and its key influencing climatic variables (Case study: southern Iran). *Ecopersia*, 1(2), 123-144.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, S. B., Diop, L., Dezetter, A., Ogilvie, A., & Djaman, K. (2024). Trend analysis of reference evapotranspiration and climate variables in the main hydrosystems of Senegal: Senegal, Gambia and Casamance River Basins. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 385, 305-314. <https://doi.org/10.5194/piahs-385-305-2024>
- Parmar, S. H., & Tiwari, M. K. (2020). Determination of reference evapotranspiration (ET₀) using FAO-56 Penman-Monteith and comparison with Hargreaves and remote-sensing-based MOD16 data in middle Gujarat region, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(8), 3025-3034.
- Pour, S. H., Wahab, A. K. A., Shahid, S., & Ismail, Z. Bin. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
- Rahman, M. N., Azim, S. A., Jannat, F. A., Rony, M. R. H., Ahmad, B., & Sarkar, M. A. R. (2023). Quantification of rainfall, temperature, and reference evapotranspiration trend and their interrelationship in sub-climatic zones of Bangladesh. *Heliyon*, 9(9).
- Rasouli, A. A., Babaeian, I., Ghaemi, H., & Zavvarreza, P. (2012). Time series analysis of pressure centers of synoptic patterns affecting seasonal precipitation in Iran, *Journal of Geography and Development*, 10(27), 77-88. (In Persian).
- Singh, A., Dhaliya, A., Majumder, A., Duhan, D., Wratch, M. K., Malik, A., & Singh, S. (2025). Temporal trend analysis of average annual reference evapotranspiration using non-parametric methods in different agro-climatic zones of Indian Punjab. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(6), 387.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of regression coefficients based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc*, 63, 1379-1389.
- Tabari, H., Aeini, A., Talaee, P. H., & Some'e, B. S. (2012). Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran. *Hydrological Processes*, 26(4), 500-512.

- Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaei, P. H., & Mohammadi, K. (2011). Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and forest meteorology*, 151(2), 128-136.
- Valipour, M., Bateni, S. M., Gholami Sefidkouhi, M. A., Raeini Sarjaz, M., & Singh, V. P. (2020). Complexity of forces driving trend of reference evapotranspiration and signals of climate change. *Atmosphere*, 11(10), 1081.
- Wang, P.; Yamanaka, T.; Qiu, G. (2012). Causes of decreased reference evapotranspiration and pan evaporation in the Jinghe River catchment, northern China. *Environmentalist*, 32(1), 1–10.
- Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, Sh., & Javan, Kh. (2023). Seasonal analysis of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological elements in IRAN. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 643-657. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307>
- Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., & Wright, W. C. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 197–202.
- Zhang, Y., Chiew, F. H. S., & Peña-Arancibia, J. L. (2016). Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6), 2122–2137.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, 8.