

## Evaluation of Changes in Reference Evapotranspiration in Iran Over the Last Decades

A. Yahyavi Dizaj<sup>1</sup>, K. Javan<sup>2</sup>, S. Khaledi<sup>3</sup>, T. Akbari Azirani<sup>4\*</sup>

1. Ph. D Student in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor of Geography, Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Urmia, Iran.
3. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
4. Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\* Corresponding Author: t\_akbari@sbu.ac.ir

Received date: 26/04/2023

Accepted date: 30/05/2023

 [10.22034/JDMAL.2023.2000984.1413](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2000984.1413)

### Extended Abstract

#### Introduction

Today, one of the biggest challenges for mankind is the lack of water resources in the world. This is one of the limiting factors for agricultural development in Iran in recent years. Identifying and estimating reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) can help make decisions to plan and mitigate the use of water resources and appropriate management methods in the country. Thus, one of the ways to reduce water losses in the fields is good irrigation planning, which is based on accurate estimation of the water requirements of plants and  $ET_0$ . The aim of this research is to evaluate the  $ET_0$  changes using temperature and radiation methods, statistical tests such as Man-Kendall, Sen's slope analysis in Iran over the last decades.

#### Material and Methods

In the current research, primary evaluation of data, such as sorting, etc., was conducted in the desired  $ET_0$  calculation format. For the classification of weather station climate, annual precipitation and temperature data from 1976 to 2020 were used. To estimate  $ET_0$ , maximum temperature ( $^{\circ}C$ ), minimum temperature ( $^{\circ}C$ ), average relative humidity (%), wind speed (m/s), and sunshine hour (h) were used on a monthly time scale. The Koppen-Geiger climate classification method was used to classify the meteorological stations studied. For estimating monthly and annual  $ET_0$ , the methods such as FAO Penman-Monteith (FAO PM), Hargreaves-Samani (H-S), and Priestley Taylor (PT) were used. Then, an attempt was made to introduce the appropriate model for each climate by using the results of  $ET_0$  estimation using RMSE and MAE.  $ET_0$  maps were produced with more accuracy based on the results of the RMSE. Among different geostatistical interpolation methods, the Kriging method worked better than the other methods, which was used as the superior interpolation method. The Mann-Kendall non-parametric test was used to detect the trend of time series. To examine the trend slope in the  $ET_0$  time series, the



non-parametric Sen's slope method was used. For qualitative analysis of the  $ET_0$  trend, the innovative ITA trend was used for all three methods on a yearly basis

### Results and Discussion

In this research, the station climate classification results show that climate varieties in Iran are high and can be divided into seven different climates. According to the RMSE and MAE statistical evaluations, the H-S method in semi-desert climates, dry and cold steppe, dry desert, temperate with dry summers, very hot semi-desert and snowy climates; and PT method in dry desert climates, moderate with dry summers, semi-desert, and very hot semi-desert were recognized as superior methods. In the temperate and rainy climate zone of Bandar Anzali, the H-S, and in Rasht, the PT methods were evaluated as suitable methods. Based on the monthly  $ET_0$  estimation, the amount of  $ET_0$  is significantly reduced in the northwestern, western and northeastern regions during the winter season. In winter,  $ET_0$  decreases as a result of increased air moisture. In the spring season, the amount of  $ET_0$  declined in the northern latitudes. The onset of convective spring rains in the northern latitudes of the country is one of the reasons behind this reduction in  $ET_0$  in these areas. During the summer season, regions in the upper latitudes have a lower  $ET_0$  because of their lower temperature than southern latitudes. In the autumn, there is a lower  $ET_0$  in the northern latitudes than in the southern regions of the country. Trend analysis shows that with the exception of the Arak station with an  $ET_0$  downward trend in April, most  $ET_0$  time series have a positive trend in the rest of the stations. Sanandaj is the only station that has a downward trend in  $ET_0$  in November. An increasing trend is observed in most of the studied stations, but in some other stations such as Arak and Sanandaj, a downward trend in the Reference Evapotranspiration may be observed. Finally, the results of the Innovative Trend Analysis (ITA) showed an upward trend in the amount of  $ET_0$  in both high and low areas in all seasons. This shows the increase of the long-term  $ET_0$  trend, indicating the increase in water requirements for plants in Iran. In the present study, climatic data from 40 stations from 1976 to 2020 were used to estimate  $ET_0$  in Iran. The Koppen- Geiger method was also used to classify the weather stations into the seven climates classes. The FAO PM, H-S, and PT models were used to estimate monthly and annually  $ET_0$ . To choose the appropriate method of estimating  $ET_0$  in each climate zones; the H-S and PT methods were compared with the FAO PM method, and validated using RMSE and MAE statistics. Due to the involvement of various processes in  $ET_0$  changes, the best estimation method differs between stations. In this research, the H-S method was more compatible than the PT method at most of the stations. Results have been presented as monthly and annual zoning maps. The zoning results of the three  $ET_0$  calculation methods mentioned showed that changes in climatic elements in different regions and periods have different effects on the  $ET_0$  value. The trend in  $ET_0$  changes using the Mann-Kendall test showed that the  $ET_0$  data at most stations have an increasing slope. Only two stations (Arak representing the top stations and Sanandaj representing the bottom station) have a decreasing slope. Based on the results of the  $ET_0$  time series analysis using ITA, the  $ET_0$  trend increased at all stations representative of the high and low elevation zones. Overall results show that  $TE_0$  has increased in most parts of the country, resulting in increased water requirements for plants. In the absence of effective management, Iran will face a serious water crisis in the future.

**Keywords:** FAO Penman-Monteith56; Hargreaves Samani; Priestley Taylor; Innovative Trend Analysis





## ارزیابی تغییر مقدار تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دهه‌های اخیر

آمنه یحیوی دیزج<sup>۱</sup>، خدیجه جوان<sup>۲</sup>، شهریار خالدی<sup>۳</sup>، طیبه اکبری ازیرانی<sup>۴\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
  ۲. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
  ۳. استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
  ۴. استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- \* نویسنده مسئول: [t\\_akbari@sbu.ac.ir](mailto:t_akbari@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹

doi [10.22034/JDMAL.2023.2000984.1413](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2000984.1413)

### چکیده

بررسی تبخیر و تعرق مرجع در مناطق خشک و نیمه خشکی مانند کشور ایران برای مدیریت علمی منابع آب ضروری است. در پژوهش حاضر تبخیر و تعرق مرجع طی دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های ۴۰ ایستگاه همدیدی (۱۳۵۶ تا ۱۴۰۰) بهره‌گیری شد. برپایه طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها به روش کوپن-گایگر، ۷ طبقه اقلیمی حاصل شد. برای برآورد تبخیر و تعرق، روش‌های فائو پنمن مانیتیت، هارگریوز سامانی و پریستلی تیلور استفاده شد. اعتبارسنجی نتایج حاصل از برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از آماره‌های RMSE و MAE نشان داد که روش‌های هارگریوز سامانی و پریستلی تیلور در مقایسه با روش استاندارد فائو پنمن مانیتیت؛ روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق برای هر اقلیم است. مطابق ارزیابی، روش هارگریوز سامانی در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی، استپ خشک و سرد، بیابان خشک، معتدل با تابستان‌های خشک، نیمه‌بیابانی بسیار گرم و اقلیم برفی به ترتیب با تعداد ۹، ۶، ۵، ۵، ۲ و ۲ ایستگاه و پریستلی تیلور در اقلیم‌های بیابانی خشک، معتدل با تابستان‌های خشک، نیمه‌بیابانی و نیمه‌بیابانی بسیار گرم با تعداد ایستگاه‌های ۳، ۳، ۲ و ۱ روش برتر شناخته شدند. در اقلیم معتدل پرباران بندر انزلی، روش هارگریوز سامانی و در رشت پریستلی تیلور، مناسب ارزیابی شد. نتایج در مقیاس ماهانه و سالانه پهنه‌بندی و تحلیل شد. آزمون‌های من کندال، شیب سن و روند نوآورانه ITA برای ارزیابی تغییرات روند تبخیر و تعرق استفاده شدند. براساس نتایج ترکیب عناصر اقلیمی، عوامل محلی نظیر ارتفاعات و عرض جغرافیایی و فرامحلی مانند عناصر گردش عمومی جو بر تغییر روند تبخیر و تعرق نقش زیادی دارند. بطوری که در عرض‌های جنوبی که از گرمایش بیشتر سطح زمین برخوردارند، مقدار تبخیر و تعرق بیشتر و در عرض‌های شمالی به دلیل دمای پایین‌تر، کمتر است. نتایج حاکی از آن است که روند سالانه تبخیر و تعرق افزایشی و نیاز آبی گیاهان افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: فائو پنمن مانیتیت؛ ۵۶؛ هارگریوز سامانی؛ پریستلی تیلور؛ روند نوآورانه



## ■ مقدمه

کمیاب منابع آب در جهان یکی از مهم‌ترین چالش‌های بشر و عامل محدود کننده توسعه کشاورزی در سال‌های اخیر بوده است. از آنجایی که بیشتر گستره ایران نیز در مناطق خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است از این چالش به دور نبوده و تنش‌های وارده را احساس می‌نماید. امروزه با توجه به مسئله بحران آب و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق، آگاهی از تغییر مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع<sup>۱</sup> ( $ET_0$ ) ضروری است و به دلیل بررسی تغییر متغیرهای اقلیمی بصورت ترکیبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲). با توجه به اینکه  $ET_0$  تابعی از ویژگی‌های اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است و برخی از آنها در زمان و مکان متغیر هستند (۷)؛ روند  $ET_0$  نیز در مناطق مختلف کره زمین بسیار متنوع است (۲۶). در واقع چون تغییرات در متغیرهای هواشناسی به طور یکنواخت بر روی کره زمین رخ نمی‌دهد. در نتیجه تغییرات مختلف در ویژگی‌های بیان شده باعث شده که افزایش قابل توجه روند  $ET_0$  در مناطق استپی سرد و خشک شمال شرقی آسیا (۴۱). آرژانتین (۱۰). بخش شرقی پاکستان (۱). کره جنوبی (۱۳، ۱۵). رومانی (۲۷). و شبه جزیره مالزی (۲۶). مشاهده شود. در حالی که کاهش روند  $ET_0$  در منطقه نیمه خشک برزیل (۹). بنگلادش (۳۰). مناطق مرطوب ایران (۲۴) و چین (۴۰). گزارش شده است و هیچ تغییری در روند  $ET_0$  نیز در برخی مناطق از جمله بریتانیای کبیر (۸) و کوه‌های Qilian چین (۲۱) گزارش نشده است. نوسان روند  $ET_0$  نیز در برخی مناطق مانند ارتفاعات تبت (۴۲)، مناطق حساس زیست محیطی چین (۲۰) و حوضه رودخانه لیائو غربی چین (۱۲). مشاهده شده است. لازم به ذکر است که در موارد (۱۰، ۱۳، ۱۵، ۲۷، ۲۶، ۳۰، ۳۱، ۴۲، ۲۰ و ۱۲) برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو پنمن مانیتیت استفاده شده و موارد (۴۱، ۱، ۲۴، ۴۰ و ۸) به ترتیب با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل همبستگی و تحلیل رگرسیون، سنجش از دور، شاخص خشکی، الگوریتم یادگیری ماشین، و مدل فیزیکی JULES انجام شده است.

با توجه به اینکه برای برآورد  $ET_0$ ، بررسی روند تغییرات آن نیز برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و غیره ضروری است. بر این اساس روابط متعددی برای محاسبه  $ET_0$  با استفاده از روش‌های تجربی ارائه شده‌اند که در چهار گروه روش‌های مبتنی بر تابش، دما، ترکیبی و رطوبتی طبقه‌بندی می‌شوند (۲۲، ۲۵). پژوهشگران روش ترکیبی، روش فائو پنمن مانیتیت را به عنوان روشی معتبر برای تخمین  $ET_0$  توصیه کرده‌اند (۳). با وجود دقت زیاد این روش، وابستگی به متغیرهای متعدد هواشناسی ضعف این روش محسوب می‌شود. در روابط گروه دمایی، دما متغیر اصلی است و معمولاً برای ایستگاه‌هایی که فاقد آمار کامل هواشناسی هستند به کار می‌رود. در روابط گروه تابشی، از انرژی خورشید به عنوان عامل اصلی  $ET_0$  استفاده می‌شود و در روابط گروه رطوبتی نیز عواملی نظیر رطوبت نسبی و دما مؤثرند (۳۳). در این میان در بررسی‌های مختلفی که به وسیله پژوهشگران در جهان صورت گرفته، روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ به عنوان دقیق‌ترین روش تحت شرایط آب و هوای مختلف ارائه و معرفی شده است (۳، ۵). مرور پیشینه مطالعات بیانگر آن است که روش‌هایی مانند فائو پنمن مانیتیت، پریستلی تیلور، هارگریوز، ماکینک، بلانی کریدل، و هارگریوز سامانی، از جمله روش‌های قابل قبول برای محاسبه  $ET_0$  هستند (۳، ۵، ۳۶). در این باره تعیین  $ET_0$  بصورت نقطه‌ای اندازه‌گیری یا برآورد می‌شود. از آنجا که بیشتر بررسی‌ها در مقیاس منطقه‌ای انجام می‌شود، نیاز به تعمیم این اطلاعات از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای می‌باشد. اما به علت توزیع و تراکم نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی امکان بررسی دقیق تغییرات منطقه‌ای آن نیست. بنابراین، ضرورت دارد تا مقادیر  $ET_0$  را در نقاط فاقد آمار برآورد و آن را از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای تعمیم داد (۱۸). جمع بندی پژوهش‌های مختلف در اقصی نقاط جهان نشان می‌دهد که برآورد  $ET_0$  برای مدیریت بحران آب و غیره در تمامی اقلیم‌ها حائز اهمیت فراوان بوده و هست. بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشکی مانند ایران که دارای پراکنش نامنظم بارش بوده و در عین حال دچار تنش کم آبی است ضرورت تغییرات روند  $ET_0$  اهمیت

<sup>1</sup>Reference Evapotranspiration

همدید (۱۶). طی دوره آماری ۴۵ ساله ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۰ (جدول ۱). ضمن ارزیابی‌های اولیه داده‌ها مانند: مرتب‌سازی و بازسازی داده‌های مفقوده و در پایان آماده‌سازی داده‌ها به فرمت مورد نظر محاسبه  $ET_0$  (۴). بهره گرفته شد. به منظور طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه (گستره ایران)؛ از داده‌های بارش mm و دمای  $^{\circ}C$  سالانه ایستگاه‌های هواشناسی منتخب، در طول دوره آماری مورد نظر استفاده شد؛ برای برآورد  $ET_0$  دوره آماری مورد نظر از داده‌های همدید (۱۶). از جمله دمای بیشینه  $^{\circ}C$  دمای کمینه  $^{\circ}C$ ، میانگین رطوبت نسبی %، سرعت باد m/s و ساعت آفتابی h در مقیاس زمانی ماهانه استفاده شد.

### روش‌های مورد استفاده

در این پژوهش برای اقلیم‌بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه از روش طبقه‌بندی اقلیمی Koppen-Geiger (۳۱). استفاده شد. (شکل ۲، جدول ۱). به منظور برآورد  $ET_0$  ماهانه و سالانه، از روش‌های محاسبه  $ET_0$  در گروه‌های ترکیبی FAO-56 PM (۴)، دمایی H-S (۱۴) و تابشی PT (۲۸) بهره‌گیری شد. جزئیات مربوط به این روش‌ها به شرح ذیل است:

ویژه‌های می‌یابد. بر همین اساس هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی تغییرات مقدار  $ET_0$  در ایران طی دهه‌های اخیر، در طول دوره آماری ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۰ با استفاده از روش‌های ترکیبی، دمایی و تابشی محاسبه  $ET_0$ ، ارزیابی‌های آماری مانند من-کندال، شیب سن، تحلیل روند نوآورانه می‌باشد.

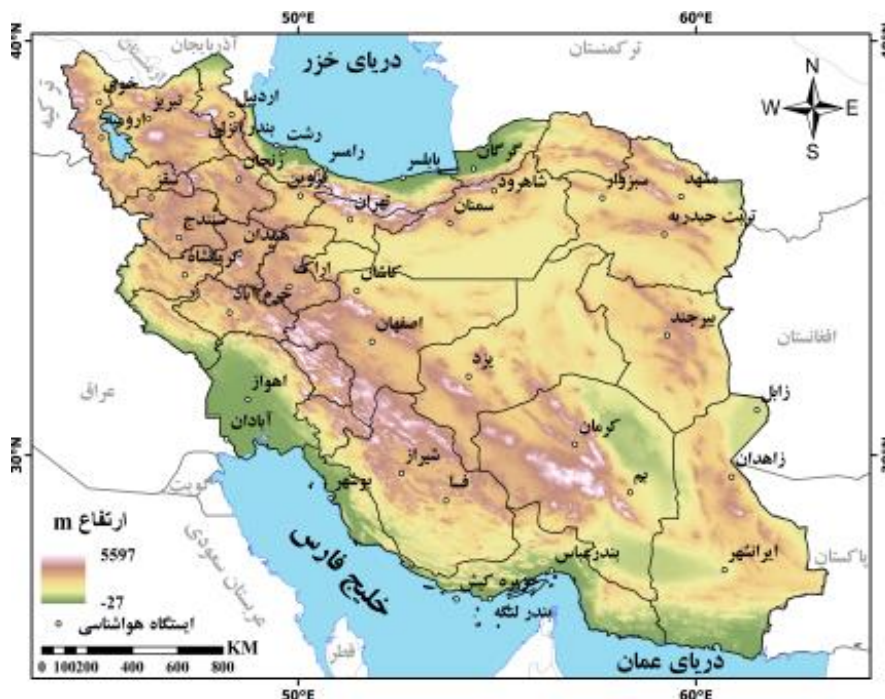
### ■ مواد و روش

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر کشور ایران است (شکل ۱). کشور ایران بین  $44^{\circ} 5'$  تا  $63^{\circ} 18'$  طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ  $30' 25^{\circ}$  تا  $47' 39^{\circ}$  عرض شمالی از خط استوا واقع شده است. بخش بزرگی از ایران در مناطق داخلی، شرقی و جنوب‌شرقی کشور پوشیده از بیابان‌های بزرگی است؛ به طوری که بیابان دشت لوت ۱۰٪ از کل مساحت کشور را در بر گرفته است. میانگین سالانه بارندگی کشور ایران کمتر از یک سوم سالانه بارش خشکی‌های کره زمین و متوسط سالانه تبخیر آن، سه برابر تبخیر سالانه کره زمین است (۷).

#### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از داده‌های ۴۰ ایستگاه هواشناسی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدید مطالعاتی

خورشیدی<sup>۲</sup> (برحسب mm/day) و G: انرژی گرمایی هدایت شده به داخل خاک<sup>۳</sup> (برحسب mm/day) است. در پژوهش حاضر برای ارزیابی و مقایسه دقت مدل‌های هارگریوز سامانی و پرستلی تیلور؛ معادله فائو پنمن مانتیت ۵۶ به‌عنوان روش مبنا قرار گرفت از جمله دلایلی که موجب انتخاب فائو پنمن مانتیت ۵۶ به‌عنوان روش مبنا شد در بخش پیشینه پژوهش اشاره شده است.

#### ارزیابی‌های آماری دقت مدل‌ها

نتایج حاصل از برآورد ET<sub>0</sub> با استفاده از روابط ۴ و ۵ مورد بررسی قرار گرفت تا به ترتیب ضمن ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> RMSE و میانگین خطای مطلق<sup>۵</sup> MAE، مدل مناسب هر اقلیم را نیز معرفی نماید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (5)$$

در روابط فوق x<sub>i</sub> و y<sub>i</sub> به ترتیب i امین داده اندازه‌گیری شده و داده برآورد شده و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشد.

#### پهنه‌بندی ET<sub>0</sub> برآورده شده از روش‌های FAO-56 PM

##### PT و H-S

چون ET<sub>0</sub> متغیری پیوسته و متأثر از عوامل و عناصر اقلیمی است، وابسته به موقعیت جغرافیایی محل مورد نظر است و علاوه بر پراکنش مکانی از تغییرات زمانی نیز تأثیرپذیر است. این موضوع ضرورت مدیریت مکانی و زمانی ET<sub>0</sub> را تأیید می‌نماید. لذا تغییر در متغیرهای اقلیمی در نواحی و زمان‌های مختلف دارای تأثیر مختلفی بر ET<sub>0</sub> است. با توجه به وابستگی زیاد ET<sub>0</sub> نسبت به مکان، به دلیل متفاوت بودن عوامل و عناصر اقلیمی هر ناحیه با ناحیه دیگر، تهیه نقشه‌های ET<sub>0</sub> با دقت بیشتر براساس نتایج حاصل از مقایسه جذر میانگین مربعات خطا در بین

#### برآورد تبخیر و تعرق مرجع ET<sub>0</sub>

##### تخمین ET<sub>0</sub> مبتنی بر روش ترکیبی FAO-56 PM (۴)

این مدل برای استفاده در بازه زمانی روزانه و ماهانه برای گیاه چمن با ارتفاع ۰/۱۲m، مقاومت سطحی ثابت ۰/۷m/s و ضریب آلبیدو ۰/۳۲ مانند رابطه (۱) است (۳).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن: ET<sub>0</sub>: تبخیر و تعرق مرجع، R<sub>n</sub>: تابش خالص، G<sub>s</sub>: چگالی شار گرمایی خاک، T: میانگین دمای هوا، U<sub>2</sub>: سرعت باد در ارتفاع ۲ m، e<sub>s</sub> و e<sub>a</sub>: به ترتیب فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع، Δ: اختلاط منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما و γ: ثابت سایکرومتری است (۳).

##### تخمین ET<sub>0</sub> مبتنی بر دما H-S

برای برآورد ET<sub>0</sub> از رابطه هارگریوز سامانی (۱۴)، استفاده شد؛ این رابطه با داشتن دماهای بیشینه و کمینه قادر است ET<sub>0</sub> را در دوره ۲۴ ساعته، هفتگی، ۱۰ روزه و ماهانه با استفاده از رابطه (۲) حساب کند (۱۴).

$$ET_0 = (H - S) = 0.408 \times 0.0023 (T_{\text{mean}} - 17.8) [(T)_{\text{max}} - T_{\text{min}}]^{0.5} R_a \quad (2)$$

که در آن:

ET<sub>0</sub>: تبخیر و تعرق مرجع، T<sub>max</sub>: حداکثر دمای روزانه، T<sub>min</sub>: حداقل دمای روزانه، T<sub>mean</sub>: متوسط دما و R<sub>a</sub>: تابش متوسط روزانه دریافتی از خورشید بر سطح افقی در بالای جو و تابعی از روز سال، عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی است.

##### تخمین ET<sub>0</sub> مبتنی بر تابش PT (۲۸)

روش نامبرده مبتنی بر روابط فیزیکی و تابش خورشیدی است و رابطه اصلی PT مطابق رابطه (۳) است (۲۸).

$$ET_0 = \alpha_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (3)$$

که در آن: α<sub>e</sub>: ضریب پرستلی-تیلور، Δ: گرادیان شیب فشار بخار اشباع<sup>۱</sup>، γ: ثابت سایکرومتریک، R<sub>n</sub>: تابش خالص

<sup>4</sup> MSE: Root Mean Square Error

<sup>5</sup> MAE: Mean Absolute Error

<sup>1</sup> Gradient of saturated vapor pressure

<sup>2</sup> Net solar radiation

<sup>3</sup> Outgoing heat conduction into the soil

روش‌های مختلف درونیابی زمین آمار مانند کریجینگ<sup>۱</sup> و تمامی زیرمجموعه‌های آن و همچنین روش وزن دهی عکس فاصله<sup>۲</sup> همراه همه زیر مجموعه‌های آن با توجه به طبیعت متغیر اقلیمی، نحوه پراکنش مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و مقیاس زمانی ۴۵ ساله روش کریجینگ عملکرد بهتری نسبت به بقیه روش‌ها داشت که به عنوان روش برتر درونیابی مورد استفاده قرار گرفت.

**تحلیل روند**

**آزمون‌های ناپارامتریک من کندال M-K و شیب سن Sen's Slope**

برای تحلیل روند  $ET_0$  محاسبه شده با سه روش مذکور، برای آشکارسازی روند سری‌های زمانی از آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K) (۱۹، ۲۳) استفاده شد. به منظور بررسی شیب روند در سری‌های زمانی  $ET_0$  به دست آمده با استفاده از سه روش نام برده، روش ناپارامتریک Sen's Slope (۳۴، ۳۹) بهره‌گیری شد.

#### نتایج برآورد ماهانه $ET_0$

##### نتایج برآورد ماهانه $ET_0$ با روش FAO-56 PM

با توجه به اینکه تغییرات زمانی در متغیرهای اقلیمی موجب اختلاف در مقدار  $ET_0$  در نواحی مختلف می‌شود با در نظر گرفتن این موضوع در این پژوهش محاسبه  $ET_0$  به تفکیک ماهانه و سالانه با سه روش برآورد  $ET_0$  انجام شد. در زمستان به علت کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی  $ET_0$  حاصل، مقدار کمتری را نشان می‌دهد (شکل ۳). بطوریکه در ماه ژانویه این مقدار در مناطق شمالی و غربی به کمترین مقدار خود یعنی کمتر از ۵۰ mm رسیده است. در ماه فوریه همچنان کمترین مقدار  $ET_0$  در مناطق شمالی و غربی مشاهده می‌شود اما نسبت به ماه قبلی پهنه کمتری را به خود اختصاص داده است. در پایان در ماه مارس که دما افزایش می‌یابد به تبع آن مقدار  $ET_0$  نیز افزایش یافته بویژه در مناطق واقع در جنوب شرقی این مقدار بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ متغیر است. در سه ماه بهار؛ بطور کلی در بخش‌های جنوب و جنوب‌شرقی مقدار  $ET_0$  افزایش یافته بطوریکه مقدار آن در حدود ۳۵۰-۲۵۰ و ۴۵۰-۳۵۰ متغیر است.

برای تحلیل روند  $ET_0$  محاسبه شده با سه روش مذکور، برای آشکارسازی روند سری‌های زمانی از آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K) (۱۹، ۲۳) استفاده شد. به منظور بررسی شیب روند در سری‌های زمانی  $ET_0$  به دست آمده با استفاده از سه روش نام برده، روش ناپارامتریک Sen's Slope (۳۴، ۳۹) بهره‌گیری شد.

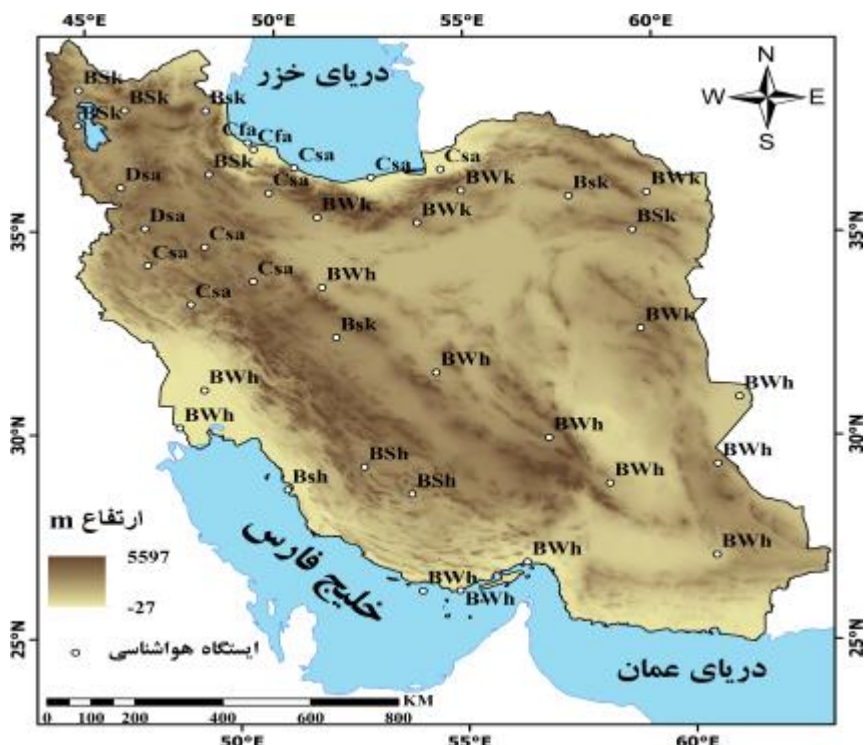
##### آزمون گرافیکی روند نوآورانه $ITA^3$

برای تحلیل کیفی روند  $ET_0$  در ایران، از روند نوآورانه ITA برای هر سه روش بصورت سالانه استفاده شد. شین در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار این روش را ارائه داد (۳۵). بی‌نیاز بودن از هرگونه پیش‌فرضی مانند: غیر نرمال بودن توزیع، تعداد داده‌ها، همبستگی سریالی و غیره از جمله مزایای روش نام برده است. ITA با ایجاد فواصل اطمینان و با در نظر گرفتن تفاوت بین دو میانگین سری داده‌ها قابل انجام است (۱۷). بطور کلی نتایج به دست آمده از روش‌های فوق به منظور بررسی تغییرات مقدار  $ET_0$  در ایران طی دهه‌های اخیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

#### ■ نتایج و بحث

##### نتایج بررسی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتایج طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش حاضر با داده‌های ۴۰ ایستگاه منتخب که با علائم

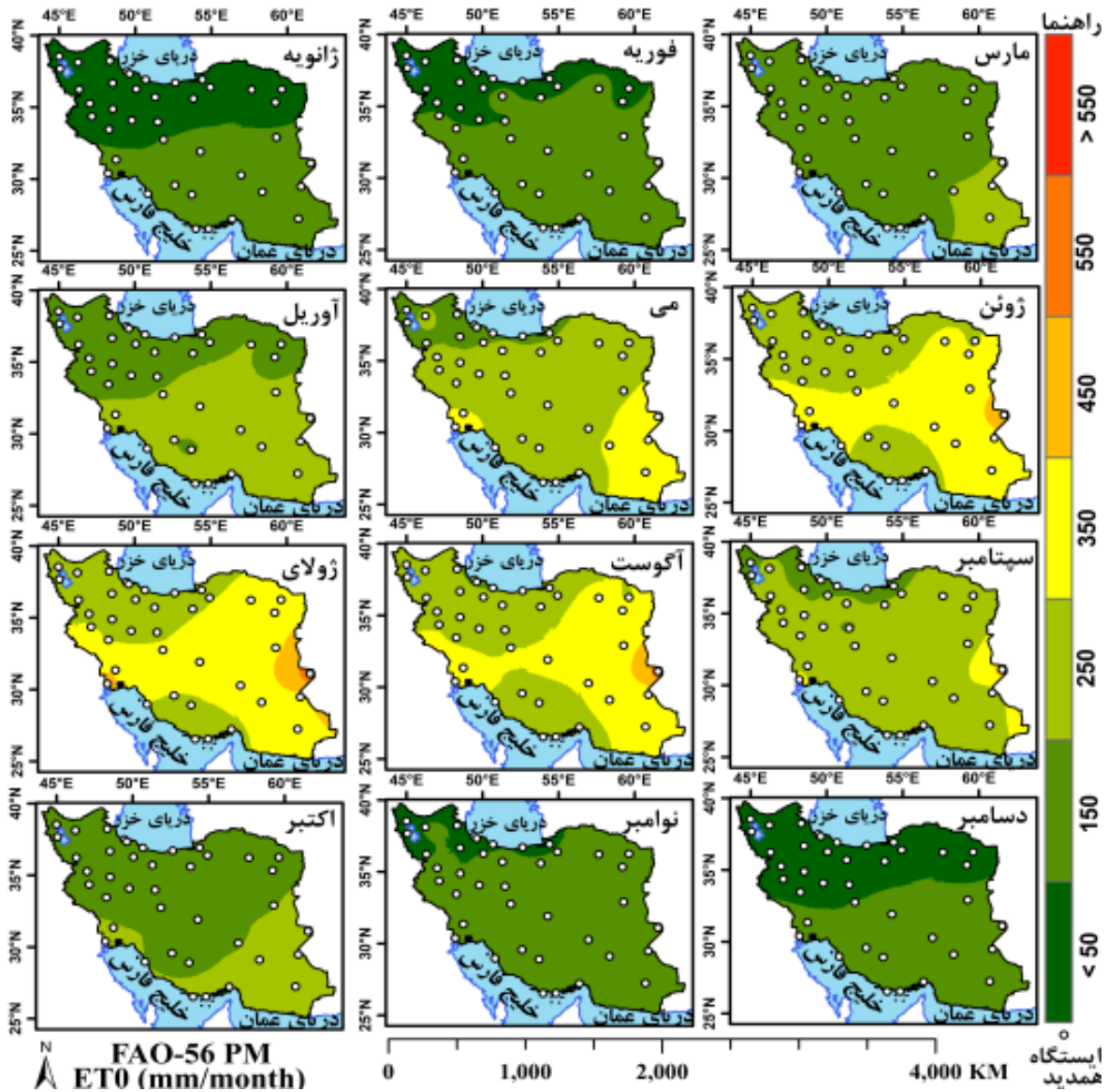


شکل ۲. نوع اقلیم ایستگاه‌های مطالعاتی به روش Koppen-Geiger (۱۹۷۶-۲۰۲۰)

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی منطقه مورد مطالعه و گروه‌های اقلیمی کوبین-گایگر

نام ایستگاه	طول λ	عرض φ	ارتفاع m	گروه اقلیم	نام ایستگاه	طول λ	عرض φ	ارتفاع m	گروه اقلیم
جزیره کیش	۵۳/۹۸	۲۶/۵۲	۳۰	BWh	همدان	۴۸/۵۳	۳۴/۸۷	۱۷۴۰/۸	Csa
بندرلنگه	۵۴/۸۳	۲۶/۵۳	۲۲/۷	BWh	سنندج	۴۷/۱۰	۳۵/۲۵	۱۳۷۳/۴	Dsa
بندرعباس	۵۶/۳۷	۲۷/۲۱	۹/۸	BWh	ترت حیدریه	۵۹/۲۱	۳۵/۳۳	۱۴۵۱	BSk
ایران‌شهر	۶۰/۷۲	۲۷/۲۳	۵۹۱/۱	BWh	سمنان	۵۳/۸۲	۳۵/۵۹	۱۱۲۷	BWk
فسا	۵۳/۷۲	۲۸/۹	۱۲۶۸	BSh	تهران	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱	BWk
بوشهر	۵۰/۸۲	۲۸/۹۶	۹	BSh	سبزوار	۵۷/۶۵	۳۶/۲۱	۹۶۲	BSk
بم	۵۸/۳۵	۲۹/۱	۱۰۶۶/۹	BWh	سقز	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲	۱۵۲۲/۸	Dsa
زاهدان	۶۰/۹	۲۹/۴۷	۱۳۷۰	BWh	مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲	BWk
شیراز	۵۲/۶	۲۹/۵۶	۱۴۸۸	BSh	قزوین	۵۰/۱۰۶	۳۶/۲۶	۱۲۷۹/۱	Csa
کرمان	۵۶/۹۶	۳۰/۲۶	۱۷۵۴	BWh	شاهرود	۵۴/۹۳	۳۶/۳۸	۱۳۲۵/۲	BWk
آبادان	۴۸/۲۱	۳۰/۳۸	۶/۶	BWh	زنجان	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴	BSk
زابل	۶۱/۵۴	۳۱/۰۹	۴۸۹/۲	BWh	بابلسر	۵۲/۶۴	۳۶/۷	-۲۱	Csa
اهواز	۴۸/۷۴	۳۱/۳۴	۲۲/۵	BWh	رامسر	۵۰/۶۸	۳۶/۹	-۲۰	Csa
یزد	۵۴/۲۹	۳۱/۹	۱۲۳۰/۲	BWh	گرگان	۵۴/۴۱	۳۶/۹۱	۰	Csa
اصفهان	۵۱/۸۶	۳۲/۷۴	۱۵۵۱/۹	BSk	رشت	۴۹/۶۲	۳۷/۳۲	۸/۶	Cfa
بیرجند	۵۹/۲۸	۳۲/۸۹	۱۴۹۱	BWk	بندر انزلی	۴۹/۴۶	۳۷/۴۸	۲۳/۶	Cfa
خرم آباد	۴۸/۲۸	۳۳/۴۴	۱۱۴۷/۸	Csa	ارومیه	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	۱۳۲۸	BSk
کاشان	۵۱/۴۸	۳۳/۹۷	۹۵۵	BWh	تبریز	۴۶/۲۴	۳۸/۱۲	۱۳۶۱	BSk
اراک	۴۹/۷۸	۳۴/۰۷	۱۷۰۲/۸	Csa	اردبیل	۴۸/۳۳	۳۸/۲۲	۱۳۳۵/۲	BSk
کرمانشاه	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵	۱۳۱۸/۵	Csa	خوی	۴۵	۳۸/۵۳	۱۱۰۳/۴	BSk





شکل ۳. ET<sub>0</sub> ماهانه ۱۴۰۰-۱۳۵۶ با استفاده از مدل FAO-56 PM

که در تمامی ماه‌های این فصل ET<sub>0</sub> بطور قابل توجهی افزایش یافته و در جنوب و جنوب‌شرقی به بالاترین مقدار نسبت به بقیه فصول رسیده طوری که مقدار آن بین ۴۵۰ تا ۵۵۰ است که از جمله دلایل آن می‌تواند طول روز بیشتر، دمای بالاتر و رطوبت نسبی پایین‌تر باشد. در این فصل نیز به ترتیب در ماه جولای بیشترین مقدار بعد از آن در ماه آگوست پهنه آن تا حدودی کاهش یافته تا اینکه در نهایت در ماه سپتامبر کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در ماه‌های پاییز در ماه اکتبر ET<sub>0</sub> کاهش یافته و در مناطق شمالی و غربی مقدار آن بین ۵۰ تا ۱۵۰ mm است در حالی که در مناطق جنوبی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ است. در ماه نوامبر و در نواحی شمالی مقدار ET<sub>0</sub> نسبت به ماه

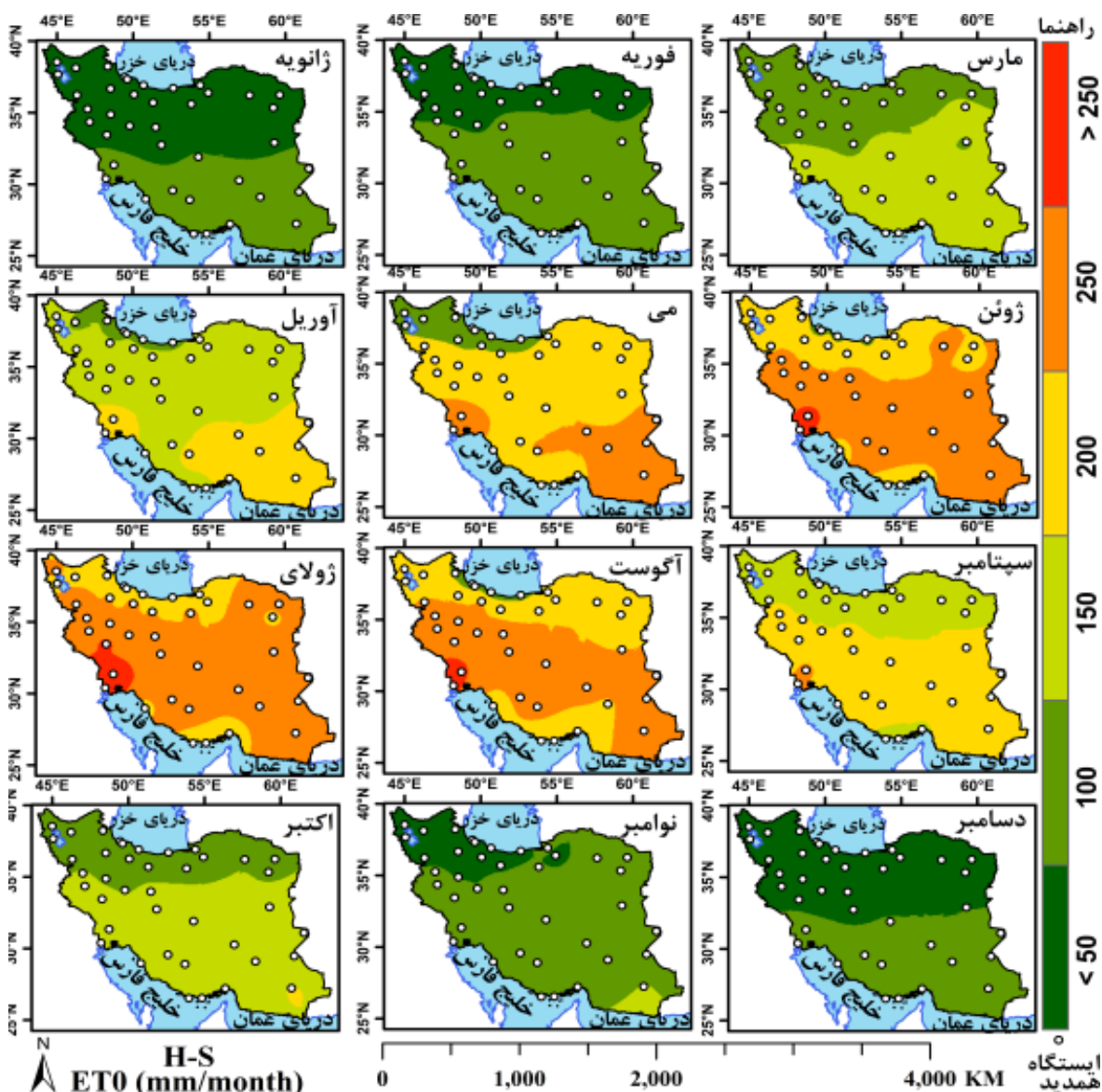
افزایش مقدار ET<sub>0</sub> در مناطق واقع در جنوب و جنوب‌شرقی می‌تواند، در اثر تابش خورشید، گرمایش بیشتر سطح زمین در عرض‌های جنوبی کشور باشد. این در حالی است که این مقدار در عرض‌های شمالی‌تر کمتر می‌شود و بین ۵۰ تا ۱۵۰ می‌رسد. از سویی دیگر مشاهده می‌شود که در ماه آوریل مقدار ET<sub>0</sub> تا حدودی کمتر از ماه می است و همچنین در ماه می نیز این مقدار نسبت به ماه ژوئن مقدار کمتری را دارد این امر نشان می‌دهد که ET<sub>0</sub> با دما همبستگی معکوس دارد که با نتایج (۶). که برآورد مقدار تبخیر و تعرق در استان فارس با استفاده از شاخص‌های تجربی را انجام دادند مطابقت دارد. براساس نتایج حاصل از محاسبه ET<sub>0</sub> مربوط به ماه‌های تابستان؛ مشاهده می‌شود

مشاهده می‌شود در صورتی که در نواحی جنوبی تا حدودی مقدار بیشتری دارد. در ماه مارس نسبت به دو ماه قبلی این فصل  $ET_0$  افزایش یافته و این افزایش در مناطق جنوبی قابل توجه است. بطور کلی در مناطق مرتفع نسبت به مناطق پست  $ET_0$  کاهش می‌یابد. همچنین از جمله دلایل کاهش  $ET_0$  در این فصل را می‌توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع دانست، که ارتفاع بیشتر موجب کاهش دما و کاهش  $ET_0$  می‌شود. در ضمن، وجود دو رشته کوه البرز در امتداد شمال و رشته کوه زاگرس در امتداد شمال غرب و غرب کشور، مطابق نتایج به دست آمده از (شکل ۴) در کاهش دما، افزایش رطوبت و کاهش  $ET_0$  مؤثر هستند.

قبلی کاهش یافته ۱۵۰-۵۰ را نشان می‌دهند. در نهایت در ماه دسامبر مقدار  $ET_0$  کاهش چشمگیری دارد و تمامی پهنه شمالی را در بر گرفته است. مطابق نتایج به دست آمده از ماه‌های فصل پاییز می‌توان دریافت که به دلیل کاهش طول روز و دما،  $ET_0$  مقدار کمتری دارد.

#### نتایج برآورد ماهانه $ET_0$ با مدل H-S

با توجه به نتایج حاصل از محاسبه  $ET_0$  در ماه‌های زمستان روش H-S می‌توان دریافت؛ که در این ماه‌ها  $ET_0$  در نواحی شمالی کاهش قابل توجهی دارد (شکل ۴). به طوریکه در ماه ژانویه مقدار کمتر از ۵۰ mm با پهنه بیشتری از نواحی شمالی را دارد. در ماه فوریه کاهش  $ET_0$  در مناطق شمالی



شکل ۴.  $ET_0$  ماهانه ۱۴۰۰-۱۳۵۶ با استفاده از مدل H-S

همزمان با فعالیت بارش‌های همرفتی بهاره در این نواحی  $ET_0$  کمتری مشاهده می‌شود. در ماه‌های تابستان؛ مقدار  $ET_0$  در بخش‌های وسیعی از کشور ایران افزایش قابل توجهی می‌یابد. به طوری که مقدار  $ET_0$  در عرض‌های جنوبی به بیشتری حد خود یعنی بیشتر از ۲۰۰ رسیده است. در این دوره، نواحی واقع در عرض‌های بالاتر به علت اینکه دمای کمتری نسبت به عرض‌های جنوبی دارند در نتیجه مقدار  $ET_0$  کمتری یعنی مقدار عددی ۱۰۰-۵۰ را نشان می‌دهند. ماه‌های پاییز؛ که برابر با شروع دوره سرد سال است. در عرض‌های شمالی‌تر  $ET_0$  کمتری را در مقایسه با نواحی جنوبی کشور نشان می‌دهند. بطوری که این مقدار در عرض‌های شمالی به کمتر از ۵۰ می‌رسد در حالی که عرض‌های جنوبی در بیشترین حالت خود  $ET_0$ ، ۱۰۰-۱۵۰ را نشان می‌دهند با نتایج پژوهش (۳۸). مطابقت دارد.

**برآورد سالانه  $ET_0$  با روش‌های FAO-56 PM، H-S و PT**  
در مقیاس سالانه روش FAO-56PM به ترتیب کمترین مقدار  $ET_0$  با کمتر از ۶۰۰mm در سال متعلق به مناطق شمالی و شمال‌غربی و بیشترین مقدار مربوط به مناطق جنوب‌شرقی و جنوبی است که براساس (شکل ۶). مشاهده می‌شود که مناطق جنوب‌شرقی  $ET_0$  ۳۲۵۰mm را دارند. در روش H-S مقدار ۸۵۰ تا ۱۲۵۰ را مناطق شمالی نشان می‌دهند که نسبت به دیگر مناطق تا حدودی مقدار کمتری می‌باشد. در این روش نیز همچنان مناطق جنوب شرقی مقدار بیشتری از  $ET_0$  را نشان می‌دهد ولی در مقایسه با روش FAO-56 PM مقدار کمتری را برآورد کرده است. در روش PT در مقایسه با دو روش قبلی؛ مقدار  $ET_0$  کمتری دارد چنانچه (شکل ۶). نشان می‌دهد مقدار ۸۵۰ تا ۱۲۵۰mm گستره وسیعی از کشور بویژه نیمه شمالی آن را در بر گرفته است. کمترین مقدار آن با مقدار عددی بین ۱۶۵۰ تا ۲۰۵۰ متعلق به مناطق جنوبی است. گرچه در مقیاس ماهانه پیش‌تر ارائه شده به تفکیک ماه به ماه مشاهده شد که عوامل محلی و فرامحلی در دوره‌های مختلف تأثیرات متفاوتی بر مقدار  $ET_0$  دارند. اما بطور کلی در مقیاس سالانه نیز نتایج بیانگر همان روند ماهانه است. بدین صورت که تأثیر ارتفاع، عرض جغرافیایی، عوامل محلی و غیره؛ در هر سه روش در

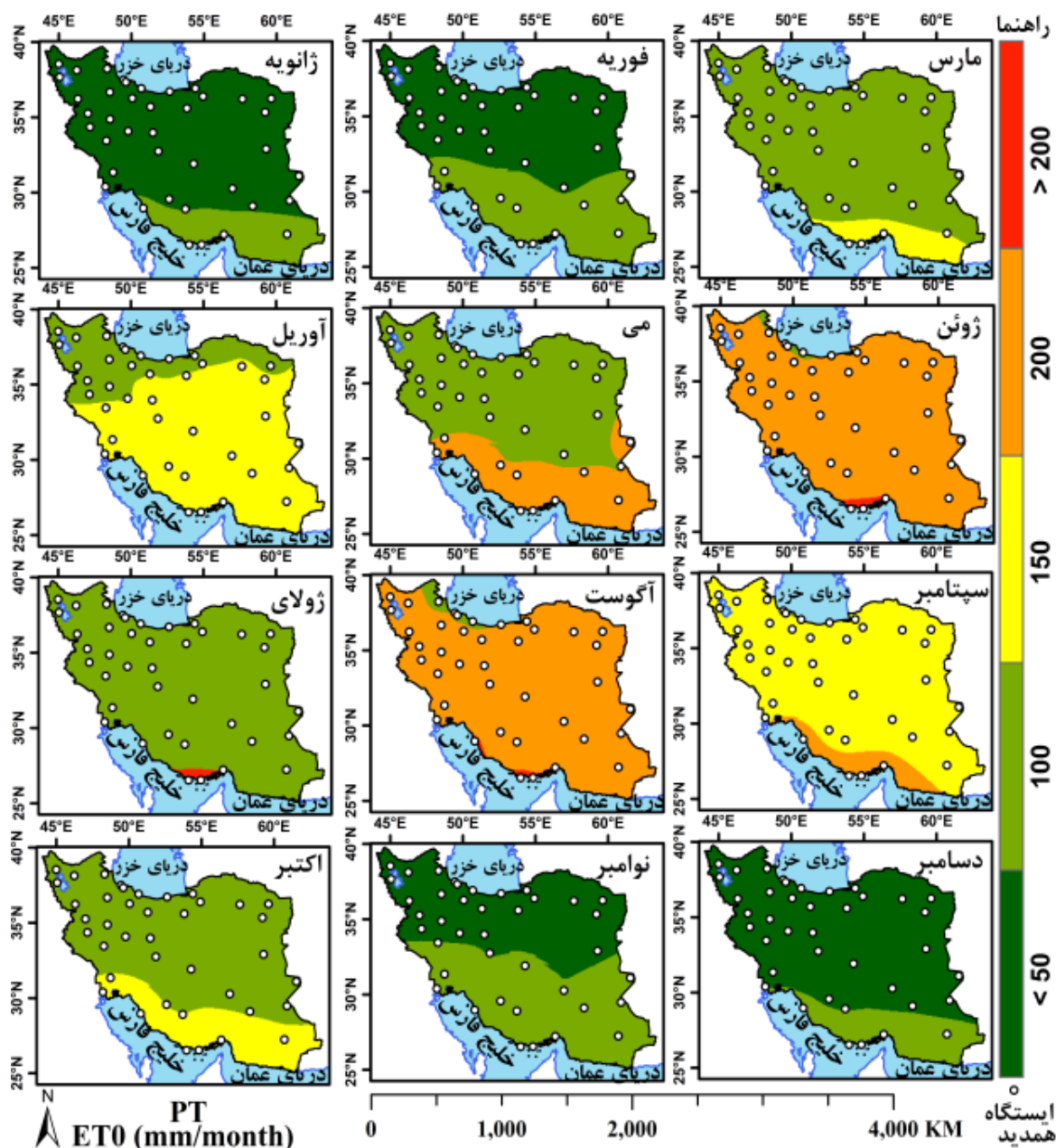
در سه ماه بهار؛ نواحی جنوب، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی کشور؛ بیشترین مقدار  $ET_0$  به ترتیب در ماه‌های آوریل، می و ژوئن با مقدار عددی ۲۰۰-۱۵۰، ۲۵۰-۲۰۰ و بیشتر از ۲۵۰mm در جنوب‌غربی مشاهده می‌شود که این نتایج با پژوهش (۳۸) که پهنه بندی شدت خشکی را با استفاده از روش هارگریوز سامانی  $ET_0$  بر مبنای مدل رقومی ارتفاع در ایران انجام دادند و نتایج آنها نشان داد که طی فصول مختلف و با توجه به عرض جغرافیایی، ارتفاع و عوامل محلی دیگر مقدار تبخیر و تعرق افزایش یا کاهش می‌یابد با نتایج پژوهش حاضر همسو است. در ماه‌های ژوئن، آگوست و سپتامبر؛ همانطور که پیش‌تر نیز بیان شد مقدار  $ET_0$  به دلیل طول روز و دمای بیشتر و رطوبت نسبی کمتر افزایش چشمگیری بویژه در نواحی جنوب‌غربی و جنوبی را به خود اختصاص داده است. اما بطور کلی در این روش نیز همچنان  $ET_0$  در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی مقدار کمتری دارد. در ماه‌های پاییز اکتبر، نوامبر و دسامبر؛ به دلیل کاهش طول روز و پایین آمدن دما، به تبع آن مقدار  $ET_0$  نیز کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که گرچه مقدار  $ET_0$  در دوره‌های مختلف از سال و در نواحی مختلف نتایج یکسانی ارائه نمی‌دهد. ولی در یک نگاه کلی می‌توان دریافت که در تمامی دوره‌ها تأثیرات مختلف عوامل محلی مانند عرض جغرافیایی، ارتفاع، دوری و نزدیکی به دریا، پوشش گیاهی و غیره و بیرونی مانند سامانه‌های مختلفی که در دوره‌های مختلف وارد کشور ایران می‌شوند و تأثیرات متفاوتی بر مقدار  $ET_0$  دارند در تمامی دوره‌ها به تفکیک ماهانه مشاهده می‌شود.

#### نتایج برآورد ماهانه $ET_0$ با مدل PT

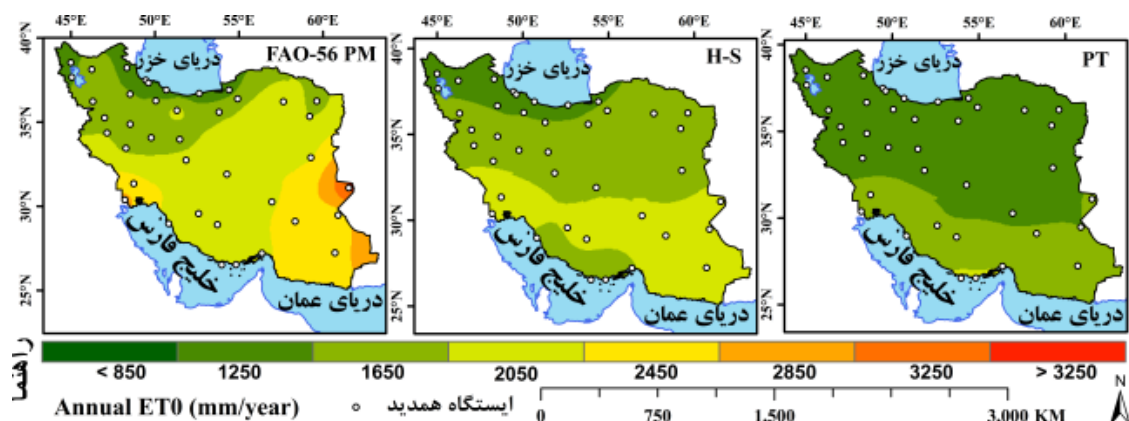
در ماه‌های زمستان مقدار  $ET_0$  در نواحی شمال‌غربی، غرب و شمال‌شرقی؛ کاهش قابل توجهی دارد و مقدار آن به کمتر از ۵۰ رسیده است (شکل ۵). زیرا مرطوب بودن هوا در این دوره از سال در این نواحی؛ موجب افزایش رطوبت هوا و در نتیجه آن کاهش  $ET_0$  می‌شود. در ماه‌های بهار و در عرض‌های شمالی کشور؛ کاهش  $ET_0$  به مقدار ۱۰۰-۵۰ می‌رسد که از جمله دلایل آن را می‌توان آغاز بارش‌های همرفتی بهاره در عرض‌های شمالی کشور دانست. که

عرض‌های شمالی و بیشترین آن در عرض‌های جنوب‌شرقی و جنوبی است.

اینجا نیز صادق هستند. همانطور که مشاهده می‌شود کمترین مقدار  $ET_0$  در هر سه روش محاسبه  $ET_0$ ، در



شکل ۵.  $ET_0$  ماهانه ۱۴۰۰-۱۳۵۶ با استفاده از مدل PT



شکل ۶.  $ET_0$  سالانه ۱۴۰۰-۱۳۵۶ با استفاده از مدل‌های FAO-56 PM، H-S، و PT

با تابستان‌های خشک و بسیار گرم، ایستگاه‌های اراک، کرمانشاه، همدان، قزوین و بابلسر روش هارگریوز سامانی دقت بالاتری را نشان داده است در صورتی که در همین اقلیم روش پریستلی تیلور در ایستگاه‌های خرم آباد، رامسر و گرگان به عنوان روش برتر می‌باشد. در اقلیم نیمه بیابانی استپ خشک و بسیار گرم ایستگاه‌های فسا و شیراز با روش هارگریوز سامانی و بوشهر با روش پریستلی تیلور سازگار است. روش هارگریوز سامانی که شامل ایستگاه‌های سنندج و سقز است مناسب اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم می‌باشد. در اقلیم معتدل پرباران بدون فصل خشک با تابستان‌های گرم، روش هارگریوز سامانی در ایستگاه بندرانزلی و روش پریستلی تیلور در ایستگاه رشت به‌عنوان روش برتر برآورد تبخیر و تعرق معرفی شدند.

انتخاب روش مناسب برآورد  $ET_0$  در اقلیم‌های مختلف باتوجه به (جدول ۲). مطابق ارزیابی‌های آماری  $RMSE$  و  $MAE$  در اقلیم بیابانی خشک و بسیار گرم ایستگاه‌های بندرعباس، ایرانشهر، بم، زاهدان، کرمان، آبادان، زابل، اهواز و یزد روش هارگریوز سامانی به‌عنوان روش مناسب شناخته شد. از طرفی در ایستگاه‌های جزیره کیش، بندرلنگه و کاشان روش پریستلی تیلور به‌عنوان روش برتر انتخاب شد. در ایستگاه‌های اصفهان، سبزوار، ارومیه، تبریز، اردبیل و خوی روش هارگریوز سامانی و در ایستگاه‌های تربت حیدریه و زنجان روش پریستلی تیلور در اقلیم نیمه بیابانی استپ خشک و سرد روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق بدست آمده‌اند. روش هارگریوز سامانی متناسب با اقلیم بیابان خشک و سرد است که شامل ایستگاه‌های بیرجند، سمنان، تهران، مشهد و شاهرود می‌باشد. در اقلیم معتدل

جدول ۲. نتایج آماره‌های ارزیابی دقت مدل ایستگاه‌های منتخب

روش‌های برآورد $ET_0$ و ارزیابی خطا				نام ایستگاه	روش‌های برآورد $ET_0$ و ارزیابی خطا				نام ایستگاه
PT		H-S			PT		H-S		
MAE	RMSE	MAE	RMSE		MAE	RMSE	MAE	RMSE	
۰/۶	۰/۷	۰/۳	۰/۴	همدان	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۷	جزیره کیش
۱/۵	۱/۸	۰/۴	۰/۶	سنندج	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۱/۴	بندرلنگه
۰/۱	۰/۲	۰/۶	۰/۹	تربت حیدریه	۱/۳	۱/۵	۱/۳	۱/۵	بندرعباس
۰/۵	۰/۸	۰/۵	۰/۷	سمنان	۱/۵	۱/۷	۰/۴	۰/۵	ایرانشهر
۱/۹	۲/۲	۱/۴	۱/۶	تهران	۱/۴	۱/۸	۰/۹	۱/۱	فسا
۱/۸	۲/۳	۱/۰	۱/۴	سبزوار	۰/۸	۰/۹	۱/۰	۱/۳	بوشهر
۰/۵	۰/۶	۰/۴	۰/۵	سقز	۱/۹	۲/۲	۱/۰	۱/۳	بم
۰/۵	۰/۸	۰/۴	۰/۵	مشهد	۲/۶	۲/۹	۱/۴	۱/۵	زاهدان
۱/۳	۱/۶	۰/۶	۰/۸	قزوین	۱/۲	۱/۶	۰/۴	۰/۵	شیراز
۱/۴	۱/۷	۰/۹	۱/۱	شاهرود	۲/۲	۲/۵	۰/۷	۰/۹	کرمان
۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۷	زنجان	۳/۱	۴/۰	۱/۷	۲/۵	آبادان
۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۴	بابلسر	۵/۰	۶/۵	۳/۷	۵/۲	زابل
۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۶	رامسر	۲/۴	۳/۰	۰/۷	۱/۰	اهواز
۰/۴	۰/۳	۰/۹	۱/۰	گرگان	۲/۱	۲/۴	۰/۹	۱/۱	یزد
۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۸	رشت	۲/۲	۲/۷	۱/۱	۱/۴	اصفهان
۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۲	بندر انزلی	۲/۴	۳/۰	۱/۳	۲/۰	بیرجند
۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	ارومیه	۰/۶	۰/۸	۰/۸	۱/۰	خرم آباد
۱/۳	۱/۸	۱/۰	۱/۴	تبریز	۰/۴	۰/۶	۱/۱	۱/۴	کاشان
۰/۶	۰/۷	۰/۳	۰/۴	اردبیل	۰/۵	۰/۷	۰/۵	۰/۶	اراک
۰/۴	۰/۵	۰/۳	۰/۴	خوی	۱/۳	۱/۷	۰/۴	۰/۷	کرمانشاه

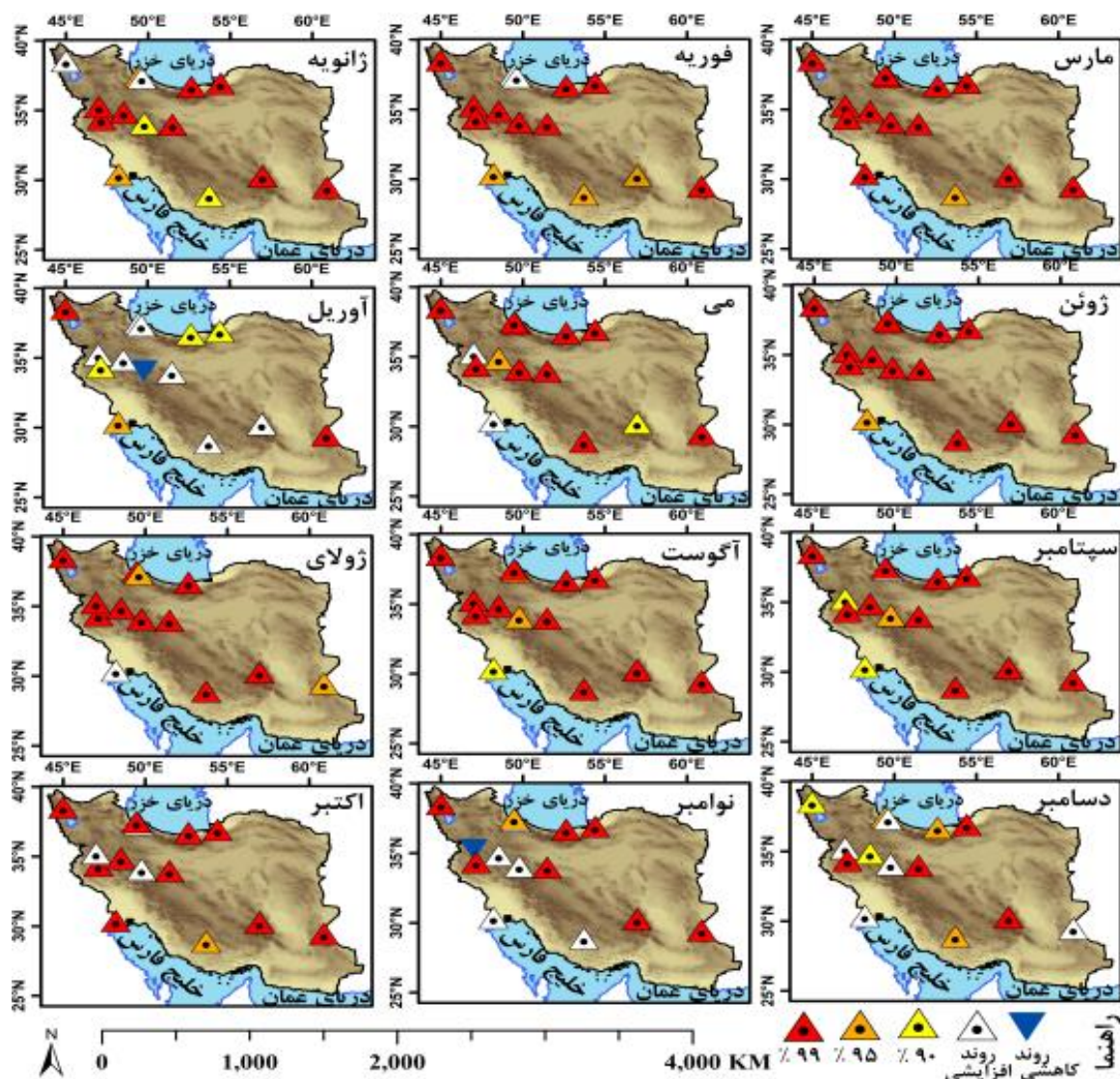
## نتایج تحلیل روند

## تحلیل روند من کندال M-K و شیب روند Sen

در این بخش از بین ۴۰ ایستگاه مطالعاتی واقع در گستره ایران، ۷ ایستگاه هواشناسی به‌عنوان نماینده مرتفع‌ترین و ۷ ایستگاه به‌عنوان کم‌ارتفاع‌ترین ایستگاه‌های مناطق اقلیمی حاصل از روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۰ انتخاب شده‌اند. سپس با استفاده از روش‌های تحلیل روند من-کندال و شیب سن (۱۷)، روند سری‌های زمانی  $ET_0$  ماهانه ایستگاه‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۷).

با توجه به نتایج حاصل بر روی داده‌های  $ET_0$  ماهانه بدست آمده از روش FAO-56 PM، نشان می‌دهد که بجز ایستگاه اراک که در ماه آوریل روند کاهشی  $ET_0$  را دارد در بقیه ایستگاه‌ها بیشترین سری‌های زمانی  $ET_0$  دارای

روند مثبت می‌باشند. به عنوان مثال در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی با حدود اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰٪ و روند افزایشی قابل مشاهده است. در ماه‌های آوریل، می و ژوئن مشاهده می‌شود که ایستگاه اراک در ماه آوریل با روند منفی، شیب کاهشی سن را در روند  $ET_0$  نشان می‌دهد. در مقابل در ماه ژوئن بجز ایستگاه آبادان که دارای حدود اطمینان ۹۵٪ است بقیه ایستگاه‌های مطالعاتی روند تبخیر و تعرق را با حدود اطمینان ۹۹٪ نشان می‌دهند. در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر مقدار روند  $ET_0$  بصورت افزایشی و بیشتر آنها در حدود ۹۹٪ می‌باشند. در انتها، ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر تنها ایستگاهی که روند کاهشی  $ET_0$  را در ماه نوامبر نشان می‌دهد ایستگاه سنندج است.



شکل ۷. پراکنش مکانی روند ماهانه  $ET_0$  فائو پنمن مانیت ۵۶ در ایستگاه‌های مرتفع و پست

ITA استفاده شد. نتایج حاصل از تغییرات  $ET_0$  در مقیاس سالانه (اشکال ۸، ۹). به شرح زیر است:

در این راستا سری زمانی به دو زیر سری نیمه اول ۱۹۷۷-۱۹۹۸ و نیمه دوم ۲۰۲۰-۱۹۹۹ تقسیم شد. برای تحلیل کیفی روند  $ET_0$  از روش نوآورانه ITA برای ۷ اقلیم مختلف حاصل از روش طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر ترسیم شد. با توجه به زیاد بودن تعداد ایستگاه‌ها، برای هر اقلیم دو ایستگاه دارای بیشترین و کمترین ارتفاع نسبت به سطح دریا، به عنوان نماینده برگزیده شده‌اند. در ایستگاه‌های مرتفع مناطق اقلیمی منطقه مورد بررسی، تمامی نقاط داده‌ها در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده روند افزایشی مقدار  $ET_0$  در مقیاس زمانی سالانه در همه ایستگاه‌های مرتفع مناطق اقلیمی ایران است (شکل ۸). به‌همین ترتیب (شکل ۹). نیز که نتایج حاصل از تغییرات  $ET_0$  سالانه در مناطق اقلیمی مورد نظر برای ایستگاه‌های پست می‌باشند. حاکی از افزایش روند در مقدار  $ET_0$  در بازه زمانی ۴۴ ساله است و بطور کلی هم در مناطق مرتفع و هم در مناطق کم ارتفاع، روند افزایشی در مقدار  $ET_0$  سالانه مشاهده می‌شود.

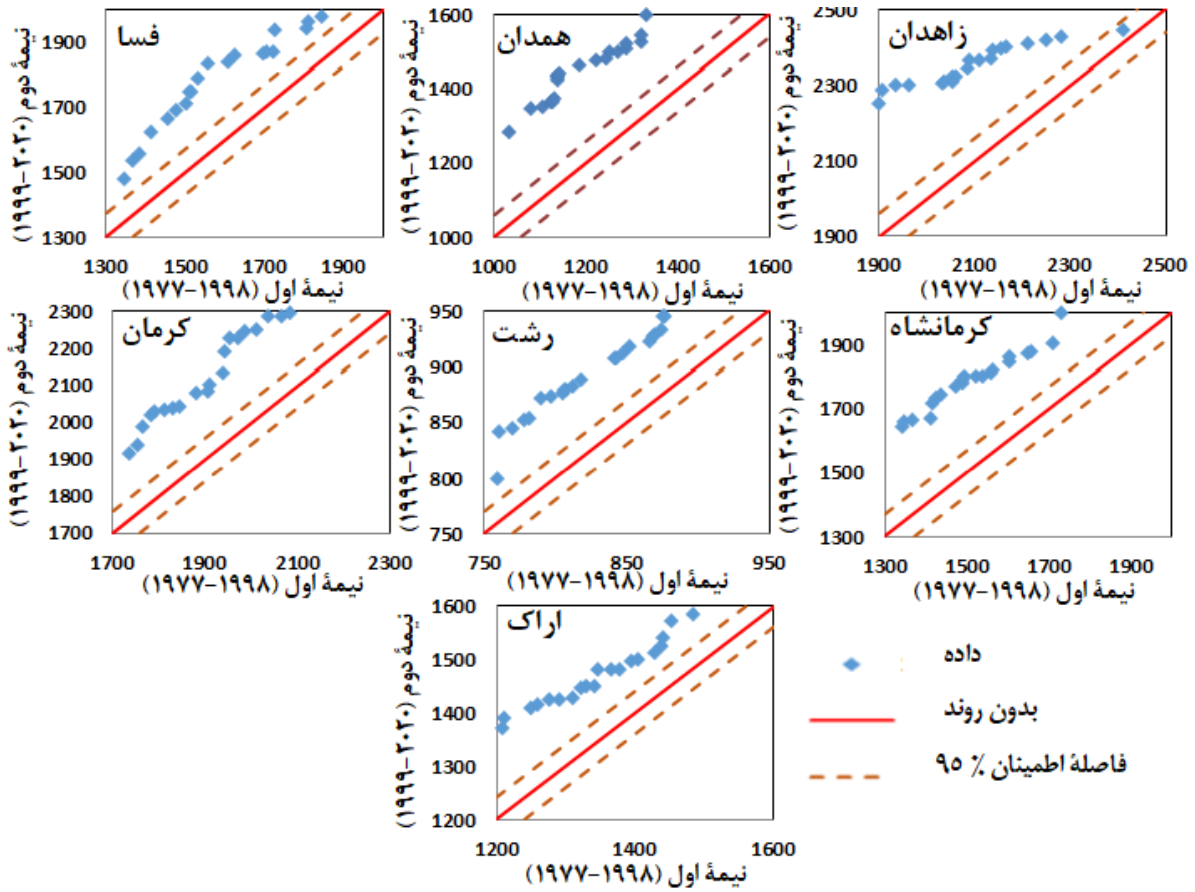
### ■ نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای بررسی تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دهه‌های اخیر؛ سعی بر آن شد که براساس داده‌های ۴۰ ایستگاه همدید در کل کشور در دوره ۴۵ ساله از سال ۱۳۵۶ تا ۱۴۰۰ ایستگاه‌های مورد بررسی با استفاده از روش کوپن-گایگر، طبقه‌بندی اقلیمی شوند که بر اساس آن ۷ اقلیم متفاوت برای ایستگاه‌های مطالعاتی به‌دست آمد. سپس بمنظور برآورد  $ET_0$  در ایران به تفکیک ماهانه و سالانه از مدل‌های پنمن مانیتث، هارگریوز سامانی و پریستلی تیلور استفاده شد. برای انتخاب روش مناسب برآورد  $ET_0$  در هر اقلیمی؛ روش‌های هارگریوز سامانی و پریستلی تیلور در مقایسه با روش فائو پنمن مانیتث ۵۶ و با استفاده از آماره‌های ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق اعتبارسنجی شد. مطابق نتایج به دست آمده روش هارگریوز سامانی در شرایط کمبود داده در اقلیم‌های بیابانی خشک و بسیار گرم، نیمه بیابانی استپ

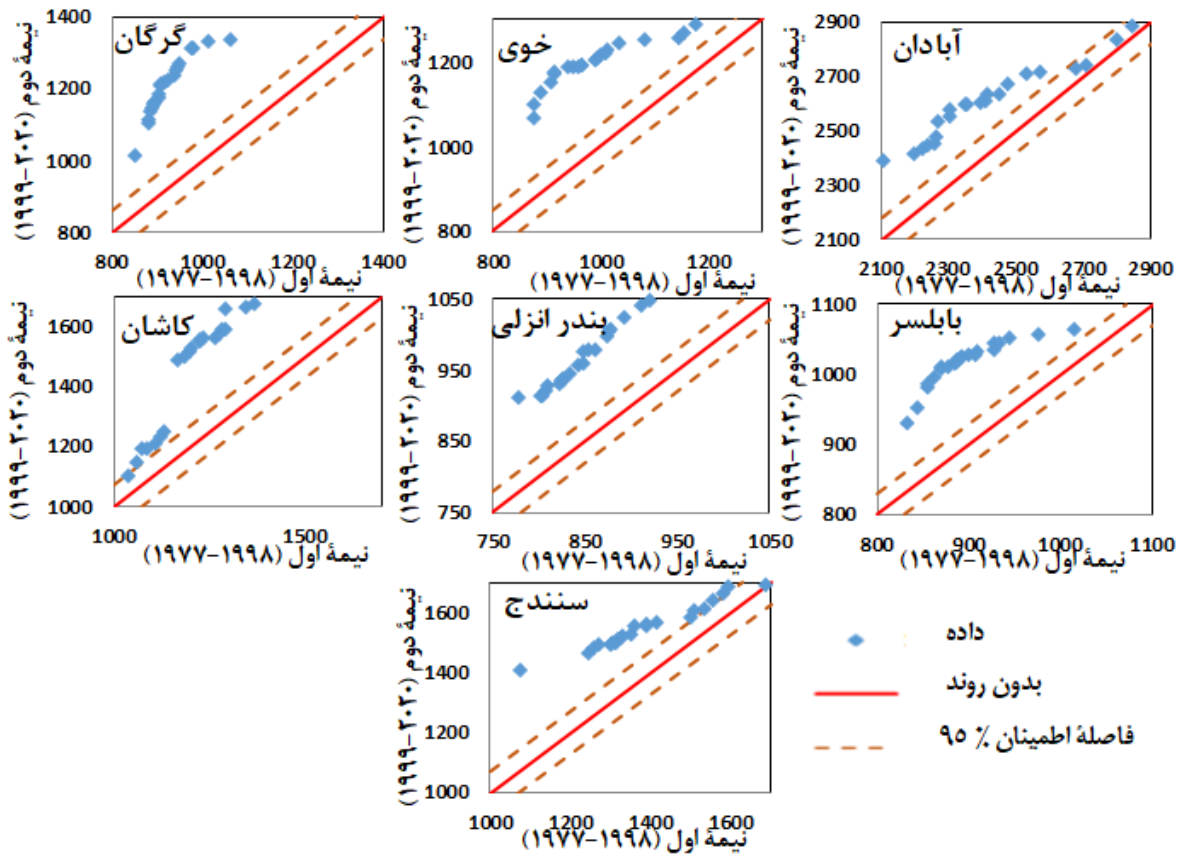
بیشتر مابقی ایستگاه‌ها بویژه در ماه‌های اکتبر و نوامبر همچنان دارای روند افزایشی در حدود اطمینان ۹۹٪ می‌باشند در صورتی‌که در ماه دسامبر از تعداد ایستگاه‌های دارای بالاترین حدود اطمینان کاسته شده است ولی در عین حال در این ماه نیز تمامی ایستگاه‌ها روند افزایشی را همچنان دارند. ایستگاه گرگان بیشترین مقدار روند را در بین ایستگاه‌های کم ارتفاع به خود اختصاص داده است. با وجود اینکه در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه روند افزایشی مشاهده می‌شود ولی در عین حال در برخی دیگر مانند ایستگاه‌های اراک و سنندج روند کاهشی تبخیر و تعرق نیز دیده شده است (شکل ۸). چنانچه در پژوهش سان و همکاران (۳۷). نیز مشاهده شد در برخی از ایستگاه‌های جنوب غرب چین مقدار تبخیر و تعرق مرجع ماهانه و سالانه با روند کاهشی مواجه بوده است. علاوه بر آن پژوهش فروغی و همکاران (۱۱). نشان داد که اگر چه در بازه زمانی ماهانه و سالانه ۱۸ ایستگاه غرب ایران، هر دو روند افزایشی و کاهشی دیده شده است در حالت کلی بیشتر ایستگاه‌ها روند افزایشی داشته‌اند که حاکی از افزایش مقدار تبخیر و تعرق در منطقه می‌باشد. همچنین سبزی‌پرور و شادمانی (۳۲). روند تغییرات تبخیر و تعرق مرجع را در ۱۱ ایستگاه دارای اقلیم خشک بررسی کردند نتایج نشان داد با وجود یکسان بودن اقلیم ایستگاه‌ها رفتار روند تبخیر و تعرق در هر شهری متفاوت به دست آمده است. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که روند تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس ماهانه، در ۴۰ ایستگاه واقع در گستره ایران، ترکیبی از روندهای افزایشی و کاهشی است که با توجه به نتایج متفاوت نقطه‌ای در شهرهای مختلف می‌توان دریافت که در مقدار تغییر روند تبخیر و تعرق؛ چنانچه پیش‌تر در بخش پیشینه پژوهش نیز بیان شد فرایندهای مختلفی از جمله: عوامل و عناصر اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی هر منطقه نقش بسزایی دارند.

### نتایج گرافیکی روند $ET_0$ سالانه با استفاده از تحلیل روند نوآورانه ITA

به‌منظور شناسایی روند تغییر سری زمانی  $ET_0$  حاصل از روش پنمن مانیتث ۵۶ در گستره ایران از روند نوآورانه



شکل ۸. نتایج روش ITA برای ET<sub>0</sub> سالانه اقلیم‌های مختلف ایستگاه‌های مرتفع ایران



شکل ۹. نتایج روش ITA برای ET<sub>0</sub> سالانه اقلیم‌های مختلف ایستگاه‌های پست ایران



روند افزایشی برخوردار هستند. تنها دو ایستگاه اراک نماینده ایستگاه‌های مرتفع با ارتفاع ۱۷۰۲ و ایستگاه سنندج با ارتفاع کمتر ۱۳۷۴/۴ متر از سطح دریا دارای شیب روند کاهشی هستند. نتایج بررسی سری زمانی  $ET_0$  با استفاده از ITA نشان داد که در تمامی ایستگاه‌های نماینده مناطق مرتفع و کم ارتفاع روند  $ET_0$  افزایشی بوده است. در نتیجه‌گیری کلی می‌توان دریافت که گرچه مقدار  $ET_0$  در بیشتر مناطق کشور ایران دارای شدت و ضعف بوده است، ولی بطور کلی در حال افزایش و به تبع آن نیاز آبی گیاهان نیز افزایش یافته است و در صورت عدم مدیریت کارآمد آب؛ کشور ایران در آینده با بحران جدی آب مواجه خواهد شد. همچنین در دستیابی به روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق، با توجه به محدودیت‌های موجود در ثبت داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و نیاز به داده‌های زیاد در روش فائو پنمن مانیتیت به عنوان روش سازگار با تمامی اقلیم‌ها، بنظر می‌رسد بررسی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از ارزیابی‌های آماری و مقایسه با روش فائو پنمن مانیتیت در اولویت باشد تا ضمن دستیابی به روش مناسب برآورد تبخیر و تعرق در هر اقلیمی، بتوان اقدام مناسبی در شرایط کمبود داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک برای مقابله با چالش بحران آب و مدیریت منابع آب کشور اتخاذ کرد.

#### ■ سپاسگزاری

نویسندگان پژوهش حاضر بر خود لازم می‌دانند که از سازمان هواشناسی ایران برای در اختیار قرار دادن آمار ایستگاه‌های هواشناسی کشور، مراتب تشکر صمیمانه خود را اعلام دارند.

#### ■ References

- Ahmad, M. U. D., Kirby, J. M., & Cheema, M. J. M. (2019). Impact of agricultural development on evapotranspiration trends in the irrigated districts of Pakistan: evidence from 1981 to 2012. *Water International*, 44(1), 51-73. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1575110>
- Ahmadyan, M., Sobhani, B., Jahanbakhsh Asl, S. (2023). Evapotranspiration changes of reference Crop during the growth stages of apple tree in Urmia and Semrom cities, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 23(70), 21-36. [In Persian]

خشک و سرد، بیابان خشک و سرد، معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم، نیمه بیابانی استپ‌خشک و بسیار گرم، اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم و معتدل پرباران بدون فصل خشک با تابستان‌های گرم به‌عنوان روش برتر برآورد تبخیر و تعرق معرفی شد و پس از آن روش پرستلی تیلور در برخی از شهرها دقت بیشتری را نشان داد. چون تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان متغیری پیوسته و وابسته به موقعیت جغرافیایی و در عین حال متأثر از متغیرهای هواشناسی مختلف است؛ نمی‌توان بطور قطع روش خاصی را برای محاسبه  $ET_0$  به‌عنوان روش برتر در تمامی زمان‌ها و مکان‌ها پیشنهاد نمود. چنانچه براساس نتایج نیز روش برتر برآورد تبخیر و تعرق مرجع از شهری به شهر دیگر تفاوت داشت که نشان می‌دهد فرایندهای مختلفی بر آن تأثیرگذار است. در آخر نتایج حاصل بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی ماهانه و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت. با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری من‌کندال، شیب سن و تحلیل روند نوآورانه روند تغییرات  $ET_0$  نیز بررسی شد. بنابراین  $ET_0$  بصورت ماهانه و سالانه در کل ایران با استفاده از سه روش؛ بصورت ترکیبی متأثر از عناصر و عوامل اقلیمی است. بدین صورت که نواحی دارای ارتفاع کم از سطح دریا که رطوبت‌پذیری بیشتری دارند نسبت به نواحی مرتفع که دمای کمتری دارند؛ مقادیر بالای  $ET_0$  را دارند. همچنین تأثیرهای مختلف عوامل محلی و فرامحلی در تمامی دوره‌ها مشاهده شد. نتایج نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از سه روش مذکور محاسبه  $ET_0$  نشان داد که تغییرات عناصر اقلیمی در مناطق و دوره‌های مختلف تأثیرات متفاوتی بر مقدار  $ET_0$  دارد. نتایج ارزیابی‌های آماری روند تغییرات  $ET_0$  نشان داد که طی دوره آماری مورد نظر؛ آزمون من‌کندال داده‌های  $ET_0$  بیشتر ایستگاه‌ها از شیب

3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: Fao.
4. Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R., Howell, R., Itenfisu, D., & Jensen, M. (2005). RL Snyder, the ASCE standardized reference evapotranspiration equation. *Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers*, 57. DOI: [https://doi.org/10.1061/40499\(2000\)126](https://doi.org/10.1061/40499(2000)126)
5. Amiri, M., & Pourghasemi, H. R. (2019). Comparing different methods of potential evapotranspiration and studying temporal and spatial changes in the Mahalou Watershed using GIS. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 22-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.10.19.22>
6. Asadi, M., Karami, M. (2020). Estimation of evapotranspiration in Fars province using experimental indicators, *Geographical Sciences*, 20 (56), 159-175. DOI: <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.20.56.159> [In Persian]
7. Babaei, N. (2021) *Temporal and spatial assessment of actual evapotranspiration by semi-distributed model and a remote sensing method*. PhD thesis, University of Shahid Beheshti. [In Persian]
8. Blyth, E. M., Martinez-de la Torre, A., & Robinson, E. L. (2019). Trends in evapotranspiration and its drivers in Great Britain: 1961 to 2015. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(5), 666-693. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133319841891>
9. Cabral Junior, J. B., de Almeida, H. A., Bezerra, B. G., & Spyrides, M. H. C. (2019). Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), 215-225. DOI: <https://DOI:10.1007/s00704-019-02816-w>
10. D'Andrea, M. F., Rousseau, A. N., Bigah, Y., Gattinoni, N. N., & Brodeur, J. C. (2019). Trends in reference evapotranspiration and associated climate variables over the last 30 years (1984–2014) in the Pampa region of Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3), 1371-1386. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
11. Foroghi, M., Dinpashoh, Y., & Jahanbakhsh Asl, S. (2020). Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west region of Iran. *Climate Research*, 10(37), 21-37. [In Persian]
12. Gao, Z., He, J., Dong, K., & Li, X. (2017). Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 106-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.006>
13. Ghafouri-Azar, M., Bae, D. H., & Kang, S. U. (2018). Trend analysis of long-term reference evapotranspiration and its components over the Korean Peninsula. *Water*, 10(10), 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101373>
14. Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99. DOI: <https://DOI:10.13031/2013.26773>
15. Hwang, J. H., Azam, M., Jin, M. S., Kang, Y. H., Lee, J. E., Latif, M., & Hashmi, M. Z. (2020). Spatiotemporal trends in reference evapotranspiration over South Korea. *Paddy and Water Environment*, 18(1), 235-259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00777-4>
16. Iran Meteorological Organization (2022). *product & services database*, from <https://irimo.ir/eng/wd/720-Products-Services.html>

17. Javan, Kh. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. *Hydrogeomorphology*, 7 (25), 119-138. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/hyd.2021.43326.1562> [In Persian]
18. Kaveh, H., Nazarifar, H., & Salari, A. (2020). Spatial estimation and zoning of reference evapotranspiration using the geostatistics and Thiessen method (case study: Hamadan), *Irrigation & Water Engineering*, 10(39), 98-112. DOI: <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.107095> [In Persian]
19. Kendall, M.G. (1948). *Rank correlation methods*, New York: Griffin.
20. Li, Y., Qin, Y., & Rong, P. (2022). Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmospheric Research*, 273, 106178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>
21. Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2018). Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: historical trends and projected changes. *International Journal of Climatology*, 38(7), 2980-2993. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5477>
22. Liu, R., Wen, J., Wang, X., & Wang, Z. (2017). Validation of evapotranspiration and its long-term trends in the Yellow River source region. *Water and Climate Change*, 8(3), 495-509. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.134>
23. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13(3), 245-259. DOI: <https://doi.org/10.2307/1907187>
24. Nouri, M., & Bannayan, M. (2019). Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses. *Theoretical and applied climatology*, 136(3), 1073-1084. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2543-0>
25. Peng, L., Li, Y., & Feng, H. (2017). The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China. *Scientific reports*, 7(1), 1-19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-05660-y>
26. 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, 105096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
27. Pravalie, R., Piticar, A., Roşca, B., Sfca, L., Bandoc, G., Tiscovschi, A., & Patriche, C. (2019). Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013. *Catena*, 172, 295-312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>
28. Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
29. Rahimi, J., Laux, P., & Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Koppen–Geiger climate zones. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 183-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03190-8>

30. Rahman, M. A., Yunsheng, L., Sultana, N., & Ongoma, V. (2019). Analysis of reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 30(3), 1-117. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0596-3>
31. Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., & Saghafian, B. (2005). Annual rainfall trend analysis in arid and semi-arid regions of central and eastern Iran. *Water and Wastewater*, 54, 73-81. [In Persian]
32. Sabziparvar, A.A., Shadmani, M. (2011). Trends analysis of reference evapotranspiration rates by using the Mann-Kendall and Spearman tests in arid regions of Iran. *Water and Soil*, 25(4), 823-834. DOI: <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.10242> [In Persian]
33. Safari, F., Kaviani, A., Azizian, A., & Etedali, H. R. (2022). Modification of the coefficients of some equations for estimation of evapotranspiration of the reference plant. *Environment and Water Engineering*, 8(2), 411-426. DOI: <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.293310.1593>
34. Sen, P.K (1968). Asymptotically efficient tests by the method of n rankings. *Journal of the Royal Statistical Society* 3(2), 312-317. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1968.tb00730.x>
35. Sen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042-1046.
36. Shiri, N., & Kazemi, M. H. (2022). Calibration and evaluation of five radiation-based reference evapotranspiration estimation methods in Yazd province, *Water and Soil Science*, 32(2), 129-141. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/ws.2021.40889.2364> [In Persian]
37. Sun, S., Chen, H., Sun, G., Ju, W., Wang, G., Li, X., & Hua, W. (2017). Attributing the changes in reference evapotranspiration in Southwestern China using a new separation method. *Hydrometeorology*, 18(3), 777-798. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0118.1>
38. Tavoosi, T., Mansouri Daneshvar, M.R., & Movaqqare, A.R. (2012). The zonation of aridity intensity in Iran using Hargreaves- Samani evapotranspiration model based on digital elevation model (DEM), *Geography and Environmental Sustainability*, 2 (4), 95-110. [In Persian]
39. Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. *Proc Koninklijke Nederlandse Akad Wetenschappen A*, 53, 1397-1412.
40. Yang, L., Feng, Q., Adamowski, 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, 104868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104868>
41. You, G., Arain, M. A., Wang, S., Lin, N., Wu, D., McKenzie, S., ... & Gao, J. (2019). Trends of actual and potential evapotranspiration based on Bouchet's complementary concept in a cold and arid steppe site of Northeastern Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107-684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107684>
42. Zhang, X., Wang, L., & Chen, D. (2019). How does the temporal trend of reference evapotranspiration over the Tibetan Plateau change with elevation? *Climatology*, 39(4), 2295-2305. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5951>