



Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN

A. Yahyavi Dizaj¹, T. Akbari Azirani^{2*}, Sh. Khaledi³, Kh. Javan⁴

Received: 09-07-2023

Revised: 03-08-2023

Accepted: 08-08-2023

Available Online: 09-08-2023

How to cite this article:

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 with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307>

Introduction

Evapotranspiration is the combination of two separate processes, soil moisture evaporation, and plant transpiration, which amount depends on various meteorological elements. Therefore, identifying the effective factors and the amount of their impact on reference evapotranspiration (ET_0) is important. This component plays an important role in various agricultural studies, including the design of irrigation and drainage systems, reservoir design, and irrigation planning (Ahmadyan *et al.*, 2023). Accurate estimates of evaporation and transpiration play an important role in studies such as global climate change, and environmental evolution, and in various scientific fields such as hydrology, agriculture, forest and pasture management, and water resources management (Kazemi, 2020).

Materials and Methods

The research was conducted in Iran, and the data analyzed encompass various meteorological parameters, including maximum, average, and minimum temperatures, average relative humidity, wind speed, and sunshine hours. These data were collected on a daily basis from 40 synoptic stations across the country. The dataset spans from 1976 to 2020 and was sourced from the Meteorological Organization of the country (IMO, 2022). The research employed the FAO Penman-Monteith method, specifically the 56th version, to estimate seasonal ET_0 (evapotranspiration) values. In this research, for statistical evaluations of ET_0 and revealing the trend of time series on a seasonal scale, the non-parametric Mann-Kendall (M-K) test; (Kendall, 1948; Mann, 1945) was used. To identify the changing trend of the ET_0 time series, the ITA method was used on a seasonal scale. Four meteorological stations and the 45-year time scale (1976-2020) used in the current research, it had a better performance than other interpolation methods, which was used as the superior method. To understand the possible changes of one or more meteorological variables in ET_0 , the sensitivity of Reference Evapotranspiration to six meteorological variables (relative humidity, hours of sunshine, average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and wind speed) was estimated. For this purpose, Sobol's method (Sobol, 1993). Sensitivity analysis was used.

Results and Discussion

According to the ET_0 survey results, the highest amount of ET_0 was observed in the spring season in the south and south-eastern parts, and the highest average value was 1050 mm/year in Zabul station. The increase of ET_0 in these areas can be due to the sun's radiation and more warming of the earth's surface in the southern latitudes of the country. In summer due to the length of the day and higher temperature, we saw an increase in ET_0 , especially

1, 2 and 3- Ph.D Student, Assistant Professor and Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: t_akbari@sbu.ac.ir)

4- Associate Professor in Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.83328.1307](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307)

in the southern and southeastern regions of the country. In autumn, due to the decrease in the length of the day and the decrease in temperature, the amount of ET_0 has also decreased significantly in the northern parts of the country. In winter, with a decrease in temperature and an increase in relative humidity, which is more noticeable in northern than southern regions.

In the summer season, all stations generally showed an increasing trend in ET_0 . In most of the stations, the significance level was 5% and it did not follow a specific pattern. In the autumn season, an increasing trend of ET_0 was observed at a significant level of 5% in Khoy and Saqez stations, and a significant decreasing trend was observed in Qazvin and Shiraz stations. In the winter season, in the western and northwestern regions, all study stations showed an increasing trend of ET_0 . Finally, the overall results indicate that there is a significant increasing trend of ET_0 during the summer in Iran. The graphical results of the ET_0 trend by the four seasons on a scale of 44 showed that, in general, there was an increasing trend in ET_0 in both high and low areas in all seasons. The values of meteorological variables have been changed by the Sobol method in the range of 40% to investigate the effect of meteorological elements on ET_0 in different seasons of the year. The ranking of the sensitivity coefficient of the most effective meteorological parameter on the increase of the seasonal ET_0 using Sobol's method showed that, in general, in the spring season, the minimum temperature had the greatest effect on the reference evaporation and transpiration rate. Also, the ratings obtained in the summer season indicate that wind speed has the greatest effect on the ET_0 amount. In the autumn season, wind speed is still the first rank in affecting the rate of evaporation and transpiration. Finally, in the winter, the maximum temperature is the most important influencing factor among the other meteorological parameters.

Conclusion

According to the results, the amount of ET_0 was increasing and it has been noteworthy in the eastern half of Iran in recent years. The trend of changes in ET_0 showed that most stations had a positive value. The ET_0 seasonal time series analysis with the ITA method indicated that in Kerman station; ET_0 increased in all seasons and these results were at Bandar Anzali station. It was also observed that the seasonal trend of ET_0 was increasing. The results of the sensitivity analysis graphs showed that relative humidity generally had a negative effect, and the other parameters indicates a positive effect in increasing the ET_0 . Also, the results explained that in spring, summer, autumn, and winter, meteorological variables of minimum temperature, wind speed, and maximum temperature played a greater role in increasing ET_0 . The findings of the present research and the results of the ranking of the sensitivity of factors affecting the ET_0 rate showed that in each period, different conditions prevail in terms of the influence of meteorological elements on the ET_0 rate.

Keywords: ET_0 , FAO Penman-Monteith 56, ITA, Sobol's sensitivity analysis method

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۶۴۳-۶۵۷

بررسی فصلی تبخیر تعرق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران

آمنه یحوی دیزج^۱ - طیبه اکبری اذیرانی^{۲*} - شهریار خالدی^۳ - خدیجه جوان^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

چکیده

تبخیر تعرق ترکیب دو فرایند مجزا، تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است که میزان آن بستگی به عناصر مختلف هواشناسی دارد. از این رو شناخت عوامل مؤثر و میزان تأثیر هر عنصر بر تبخیر تعرق مرجع (ET_0) حائز اهمیت فراوان است. در پژوهش حاضر، برآورد ET_0 فصلی بر اساس آمار ۴۵ ساله ۱۹۷۶-۲۰۲۰ سازمان هواشناسی ۴۰ ایستگاه همدید به روش فائوپنمن مانیت ۵۶ محاسبه و بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد. روند تغییرات ET_0 با آزمون‌های من-کندال و روند نوآورانه (ITA) بررسی شد. به منظور بررسی میزان تأثیر هر عنصر بر ET_0 ، ضریب حساسیت فصلی با استفاده از روش Sobol محاسبه شد. بدین صورت که توزیع آماری عناصر هواشناسی شامل رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط، بیشینه و کمینه دما و سرعت باد؛ با محاسبه میانگین و واریانس هر پارامتر در دامنه $\pm 40\%$ برآورد شد و سپس با ثابت نگه داشتن هر متغیر، تغییر تمامی متغیرها ضریب حساسیت در مقیاس فصلی ارائه شد. براساس نتایج، میزان تأثیرگذاری عناصر هواشناسی در ET_0 در فصول مختلف سال متفاوت است. ضریب حساسیت برای میزان تأثیرگذاری هر عنصر شامل کمینه دما با $1/18\%$ ، سرعت باد $22/5\%$ ، سرعت باد $31/9\%$ و بیشینه دما $20/4\%$ به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان رتبه نخست را در میزان تأثیرگذاری به خود اختصاص دادند. براساس یافته‌های پژوهش حاضر میزان تأثیرگذاری عناصر مختلف هواشناسی بر ET_0 در فصول مختلف تفاوت داشت که این مهم باید در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب کشور مورد توجه قرار بگیرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق مرجع، تحلیل حساسیت سبل، روند نوآورانه، فائوپنمن مانیت ۵۶

مقدمه

مختلف کشاورزی از جمله طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، طراحی مخازن و برنامه‌ریزی آبیاری نقش مهمی ایفا می‌کند (Ahmadyan et al., 2023). تعیین مقدار تبخیر تعرق (نیاز آبی گیاه) یک مؤلفه مهم در تعیین بیلان آب و بودجه‌بندی آبیاری می‌باشد. برآوردهای دقیق تبخیر تعرق در مطالعاتی از قبیل تغییر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و در زمینه‌های مختلف علمی همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب نقش مهمی ایفا

تبخیر تعرق^۵ متغیری پیوسته و وابسته به موقعیت جغرافیایی است و در عین حال متأثر از فرایندهای مختلفی است که این فرایندها در زمان و مکان متغیر هستند (Yahyavi Dizaj et al., 2023). نوسانات تبخیر تعرق تابعی از نوسانات عناصر مختلف هواشناسی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی است. این مؤلفه در مطالعات

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(Email: t_akbari@sbu.ac.ir) * نویسنده مسئول:

۴- دانشیار جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

و تحلیل حساسیت معادله پنمن مانیتیت نسبت به عناصر مختلف هواشناسی درگستره ایران صورت پذیرفته است. بنابراین از آنجایی که هر یک از اجزاء سازنده دستگاه اقلیم بُرد (دامنه مکانی) و بازه (دامنه زمانی) معینی دارند یعنی اندازه و عمر مشخصی دارند اقلیم اساساً دستگاهی مقیاس‌مند است. بر همین اساس هدف اصلی پژوهش حاضر؛ ارزیابی تبخیر تعرق مرجع فصلی (دامنه زمانی) درگستره ایران (دامنه مکانی) در طول دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۷۶)، با بهره‌گیری از روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ و بررسی روند و تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع با بهره‌گیری از روش سبیل، به هر یک از عناصر هواشناسی از جمله دمای بیشینه، دمای متوسط، دمای کمینه، متوسط رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است (شکل ۱)؛ ایران کشوری وسیع با تنوع جغرافیایی بالاست. حداقل ارتفاع کشور ایران از ۲۷- در سواحل دریای خزر تا بیش از ۵۶۰۰ m در رشته کوه البرز متغیر است. بخش‌های بزرگی از آن در مناطق داخلی، شرقی و جنوب شرقی کشور پوشیده از بیابان‌های بزرگی است؛ به طوری که دشت لوت ۱۰٪ کل مساحت کشور را در بر گرفته است (Ahmadi et al., 2021). متوسط 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 (Babaei, 2021).

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر داده‌های دمای بیشینه (Tmax)، دمای متوسط (Tm)، دمای کمینه (Tmin)، متوسط رطوبت نسبی (RHmean)، سرعت باد (Wind) و ساعت آفتابی (Sun) در مقیاس زمانی روزانه برای ۴۰ ایستگاه همدید کشور که دارای آمار بلند مدت ۴۵ ساله و دوره آماری مشترک بودند از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰، از سازمان هواشناسی کشور (IMO, 2022) دریافت شدند (جدول ۱). سپس داده‌های مذکور به ترتیب مرتب‌سازی، بازسازی به فرمت مورد نظر برای محاسبه ET₀ در مقیاس فصلی به روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ آماده‌سازی شدند.

می‌کنند (Kazemi, 2020). امروزه با توجه به مسئله بحران آب و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق، آگاهی از وضعیت تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET₀) می‌تواند به تصمیم‌گیری‌ها برای برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب و روش‌های مدیریتی مناسب کمک کند (Zeraati Neyshabouri et al., 2022). این امر نشان دهنده اهمیت و ضرورت توجه بیشتر به مسئله ET₀ و شناسایی عوامل مهم تأثیرگذار بر آن در فصول مختلف سال در کشور است.

تحلیل حساسیت^۲ تبخیر تعرق مرجع، نقش مؤثری در شناخت عوامل تأثیرگذار در نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری خواهد داشت (Mubialiwo et al., 2020). تبخیر تعرق یک پارامتر اقلیمی است و با انجام تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع می‌توان با تغییر یک یا چند عنصر اقلیمی تأثیر سایر عناصر هواشناسی را محاسبه نمود (Allen et al., 1998). براساس مطالعات متفاوت انجام شده حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به عناصر هواشناسی بسته به مکان و زمان متغیر است (Fang, Hu et al., 2021; Kang et al., 2021; 2021). در نتیجه، ET₀ یک پدیده چند متغیره و پیچیده است که در هر منطقه، بازتاب شرایط اقلیمی آن منطقه بوده و تحت تأثیر برخی از عوامل اقلیمی است (Dinpashoh and Foroghi, 2020). ET₀ تابع عوامل محلی و بیرونی مانند ویژگی‌های اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است و برخی از این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند (Babaei, 2021). براساس مجموعه‌ای از مطالعات افزایش قابل توجه روند ET₀ (Pour et al., 2020; Ahmad et al., 2019; D'Andrea et al., 2019; Ghafouri-Azar Pravalie et al., 2019; Hwang et al., 2020; et al., 2018). برخلاف مجموعه قبلی، کاهش میزان ET₀ را پژوهشگرانی نظیر (Wang et al., 2020; Rahman et al., 2019; Cabral Junior et al., 2019 Nouri and Bannayan, 2019; Li et al.) در پژوهش خود گزارش کرده‌اند. تعدادی دیگر از محققان مانند (Li et al., 2019; Zhang et al., 2017 et al., 2022). نوسان ET₀ را در مطالعات خود بیان کرده‌اند. در نهایت برخی دیگر از جمله (Lin et al., 2018; Blyth et al., 2019). در مطالعات خود عدم تغییر در میزان ET₀ را اظهار داشته‌اند. بنابراین، برای برآورد ET₀، یکی از موارد پراهمیت بررسی روند تغییرات و همچنین حساسیت ET₀ به تمامی پارامترهای تأثیرگذار برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و غیره ضروری است.

از آنچه گذشت چنین برمی‌آید که با توجه به اهمیت موضوع و با وجود مطالعاتی که در زمینه ET₀ در ایران انجام شده (Ebrahimi, 2019; Dinpashoh and Foroghi, 2020; Haftcheshmeh, 2019; Zeraati Neyshabouri, 2022; Ahmadyan et al., 2023)، هنوز مطالعه بنیادی و جامعی در خصوص ارزیابی فصلی تبخیر تعرق مرجع



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش به همراه ایستگاه‌های همید منتخب
Figure 1- Geographical location of the research area along with the selected synoptic stations

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده پژوهش حاضر

Table 1- Data used in the current research

پارامترهای هواشناسی Meteorology Parameter	واحد Unit	دوره زمانی Time	لینک داده‌ها Data Link
RH رطوبت نسبی	%	1976-2020	
SUN ساعت آفتابی	h	1976-2020	
Tmax بیشینه دما	°C	1976-2020	https://data.irimo.ir/
Tm متوسط دما	°C	1976-2020	
Tmin کمینه دما	°C	1976-2020	
Wind سرعت باد	m/s	1976-2020	

روش‌های مورد استفاده

برآورد تبخیر تعرق مرجع (ET₀)

روش‌های مختلفی برای محاسبه ET₀ وجود دارد؛ اما عملکرد این روش‌ها در شرایط اقلیمی مختلف، متفاوت می‌باشد. در مطالعاتی که توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان انجام شده، روش فائو پنمن مانیت ۵۶ به عنوان یک روش استاندارد جهانی برای تخمین ET₀ پیشنهاد شده است و به عنوان دقیق‌ترین روش تحت شرایط آب و هوایی مختلف ارائه و معرفی شده است (Allen et al., 1998 Piri). از این رو در پژوهش حاضر نیز جهت برآورد ET₀ فصلی، از روش (FAO-56 PM)، استفاده شد.

این مدل برای استفاده در بازه زمانی روزانه، ماهانه و فصلی برای گیاه چمن با ارتفاع ۰/۱۲m، مقاومت سطحی ثابت ۰/۷ ثانیه بر متر m/s و ضریب آلبیدو ۰/۳۲ به صورت رابطه ۱ است (Allen et al., 1998).

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

که در آن ET₀: تبخیر تعرق مرجع (mm)، R_n: تابش خالص، G_s: چگالی شارگرمایی خاک، T: متوسط دمای هوا (°C)، U₂: سرعت باد (m/s) در ۲ m، e_s و e_a: به ترتیب فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع، Δ: شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما و γ: ثابت سایکرومتری است (Allen et al., 1998).

آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K)

آزمون ناپارامتریک من-کندال یکی از پرکاربردترین روش‌های آشکارسازی روند سری‌های زمانی است. از مزایای روش‌های ناپارامتریک این است که وجود داده‌های پرت، نتیجه روند را کمتر از روش‌های پارامتریک تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش به منظور ارزیابی‌های آماری ET₀ و آشکارسازی روند سری‌های زمانی در مقیاس فصلی از آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K)؛ (Kendall, 1948)

(Mann, 1945) استفاده شد.

متغیر در دامنه واریانس $\pm 40\%$ محاسبه و توزیع هر متغیر تخمین زده شد. سپس واریانس جزئی هر متغیر با ثابت نگه داشتن متغیر مورد نظر و تغییر تمام متغیرهای باقی مانده تخمین زده شد. به عنوان مثال، حساسیت ET_0 نسبت به بیشینه دما با ثابت نگه داشتن آن در حالی که تمام پنج عنصر دیگر تغییر داده می‌شد، بدست آمد. علاوه بر این از واریانس جزئی برای تخمین حساسیت کل، نسبت به همه عناصر استفاده شد. در نهایت عناصر با توجه به حساسیت آنها رتبه‌بندی شدند. بنابراین در پژوهش حاضر ضریب حساسیت هر یک از عناصر هواشناسی بر ET_0 با استفاده از روش تحلیل حساسیت سبُل و با استفاده از برنامه نویسی در نرم‌افزار R ارزیابی شد و در نهایت ضریب حساسیت فصلی هر یک از عناصر تأثیرگذار بر میزان تغییرات ET_0 محاسبه و رتبه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که جزئیات مربوط به روش سبُل را می‌توان در پژوهش سبُل (Sobol, 2001) یافت.

نتایج و بحث

برآورد (ET_0) در مقیاس فصلی به روش پنمن-مانتیت فائو

۵۶

باتوجه به اینکه ET_0 متغیری پیوسته بوده و از عوامل و عناصر اقلیمی تأثیر می‌پذیرد، می‌توان استنباط کرد که ET_0 به تغییرات زمانی از قبیل: تغییر در متغیرهای مختلف اقلیمی در فصول مختلف سال و مکانی مانند: موقعیت جغرافیایی نقاط ایستگاهی وابسته می‌باشد. این مطلب اهمیت مدیریت مکانی و زمانی ET_0 را تأیید می‌نماید. از این رو محاسبه ET_0 و تهیه نقشه‌های آن با دقت بیشتر و به تفکیک فصول چهارگانه در گستره ایران انجام شد. براساس (شکل ۳) در فصل بهار در بخش‌های جنوب و جنوب‌شرقی بیشترین میزان ET_0 مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار میانگین آن در ایستگاه زابل ۱۰۵۰ mm در سال است. افزایش ET_0 در این نواحی می‌تواند، در اثر تابش خورشید و گرمایش بیشتر سطح زمین در عرض‌های جنوبی کشور باشد. با توجه به شکل ۳. میزان ET_0 در عرض‌های شمالی تر کاهش به کمتر از ۳۰۰ mm در سال رسیده است که از جمله دلایل آن را می‌توان کاهش زاویه تابش و آغاز بارش‌های همرفتی بهاره در عرض‌های شمالی کشور دانست که همزمان با فعالیت بارش‌های همرفتی بهاره در این نواحی ET_0 کمتری مشاهده می‌شود. نتایج این بخش از پژوهش با مطالعه طاووسی و همکاران (Tavoosi et al., 2012) که پهنه‌بندی شدت خشکی را در ایران انجام دادند همسو است. در فصل تابستان؛ به دلیل طول روز و دمای بیشتر شاهد افزایش ET_0 بویژه در نواحی جنوب و جنوب‌شرقی کشور هستیم.

آزمون گرافیکی روند نوآورانه (ITA')

به منظور شناسایی روند تغییرات سری زمانی ET_0 آزمون ITA در مقیاس فصلی مورد استفاده قرار گرفت. که بی نیاز بودن از هرگونه پیش‌فرضی مانند: غیرنرمال بودن توزیع، تعداد داده‌ها، همبستگی سریالی و غیره از جمله مزایای روند ITA است. ITA با ایجاد فواصل اطمینان و با در نظر گرفتن تفاوت بین دو میانگین سری داده‌ها قابل انجام است (Javan, 2021).

پهنه‌بندی ET_0 در گستره ایران

پهنه‌بندی ET_0 روشی مناسب جهت محاسبه منطقه‌ای ET_0 می‌باشد که برای منطقه‌ای نمودن ET_0 می‌توان از روش‌های درونیایی استفاده کرد. انتخاب روش درونیایی به نوع متغیر و تغییرات آن بستگی دارد و باید به این نکته توجه شود که برای حالات مختلف، هیچگاه استفاده از یک مدل بهینه پیشنهاد نمی‌شود، زیرا که یک مدل خاص در شرایط مختلف دقت‌های متفاوتی دارد (Ebrahimi, Haftcheshmeh, 2019). برای پهنه‌بندی ET_0 محاسبه شده در پژوهش حاضر با مقایسه جذر میانگین مربعات خطا^۲ در بین روش‌های مختلف درونیایی زمین آمار، روش معمولی^۳ که جزو خانواده روش کریجینگ^۴ می‌باشد. برای ایستگاه‌های هواشناسی و مقیاس زمانی ۴۵ ساله (۲۰۲۰-۱۹۷۶) مورد استفاده پژوهش حاضر؛ عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌های درونیایی داشت که به عنوان روش برتر پهنه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل حساسیت (Sobol's Method)

با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت می‌توان پارامترهای ورودی مدل را بر اساس تأثیر آنها بر خروجی رتبه‌بندی کرد تا درک بهتری از تأثیر تغییرپذیری ورودی بر خروجی مدل ارائه شود (Zhou et al., 2020). در این پژوهش، برای درک تغییرات احتمالی یک یا چند متغیر هواشناسی در ET_0 ، حساسیت تبخیر ترقع مرجع نسبت به شش متغیر هواشناسی (رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط دما، بیشینه دما، کمینه دما و سرعت باد) برآورد شد. برای این منظور از روش سبُل (Sobol, 1993). تحلیل حساسیت استفاده شد (شکل ۲). روش سبُل از یک رویکرد تجزیه واریانس برای محاسبه تأثیرگذاری حساسیت متغیرهای مختلف استفاده می‌کند (Wang et al., Yamamoto et al., 2020). (2020).

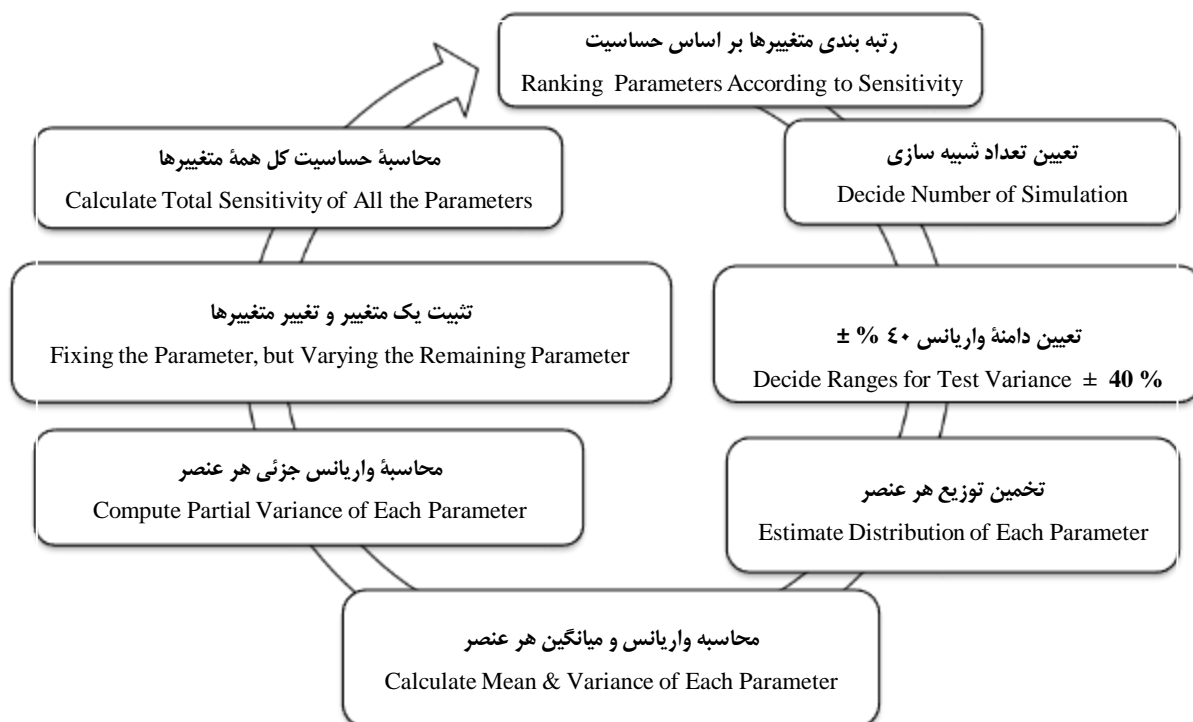
در پژوهش حاضر با استفاده از روش سبُل میانگین و واریانس هر

3- Ordinary

4- Kriging

1- Innovative Trend Analysis

2- Root-Mean-Square

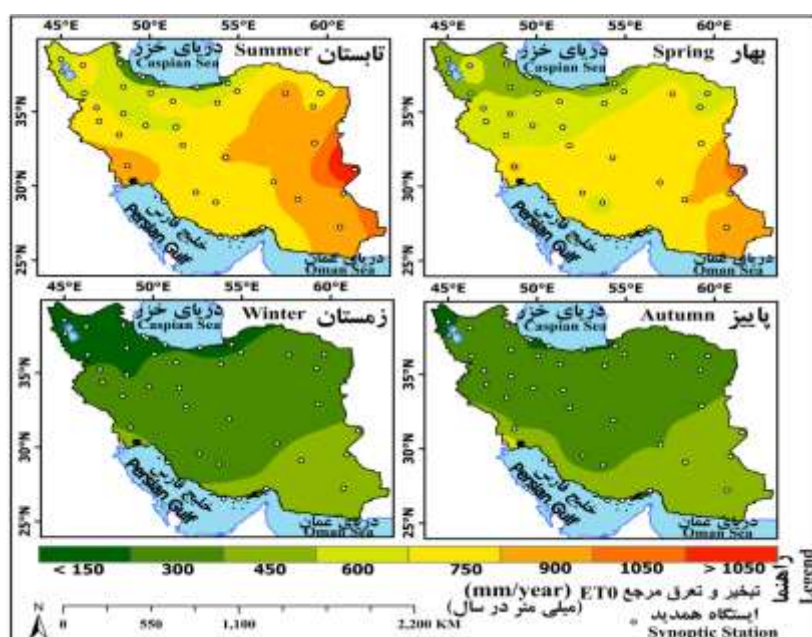


شکل ۲- فلوجارت تحلیل حساسیت عناصر هواشناسی نسبت به ET_0 با استفاده از روش تحلیل حساسیت Sobol

Figure 2- Flowchart of the sensitivity analysis of meteorological elements to ET_0 using the Sobol sensitivity analysis method

کاهش قابل توجهی دارد. کاهش ET_0 در این نواحی را می توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع دانست، که افزایش ارتفاع سبب کاهش دما و کاهش ET_0 می شود. در عین حال، وجود دو رشته کوه البرز در امتداد شمال و رشته کوه زاگرس در امتداد شمال غرب و غرب کشور، در کاهش دما، افزایش رطوبت و کاهش ET_0 مؤثر هستند. در نتیجه در فصل زمستان ET_0 به کمترین میزان خود یعنی به کمتر از 150 mm در سال رسیده است. این بخش از نتایج با نتایج پژوهش نیازی (Niazi, 2016) که به محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش های انتقال جرم پرداخت هم خوانی دارد. نتایج کلی نشان می دهد که آرایش جغرافیایی الگوی ET_0 تابع عوامل محلی (عرض جغرافیایی و ارتفاع) و بیرونی (عناصر گردش عمومی جو) بوده و پراکنش مکانی فصلی آن حاکی از افزایش میزان ET_0 از شمال به جنوب و از غرب به شرق می باشد. در نتیجه بیشترین میزان آن در نواحی جنوب شرقی مشاهده می شود. در این پژوهش آرایش جغرافیایی الگوی ET_0 با نتایج پژوهش صادقی و احمدی (Sadeghi and Ahmadi, 2021) محاسبه تبخیر تعرق ایران با استفاده از روش برون داد مدل های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه CORDEX - MNA مطابقت دارد و صحت نتایج پژوهش حاضر را تأیید می نماید.

در این فصل؛ مقدار ET_0 در بخش های وسیعی از کشور ایران افزایش یافته است. به طوری که میزان ET_0 در عرض های جنوبی به بالاترین حد خود یعنی بیشتر از 1050 mm در سال رسیده است. در این دوره، نواحی واقع در عرض های بالاتر به دلیل اینکه دمای کمتری نسبت به عرض های جنوبی دارند در نتیجه میزان ET_0 کمتری یعنی کمتر از 150 mm در سال را نشان می دهند. این قسمت از نتایج پژوهش حاضر، با نتایج لرستانی (Lorestani, 2016) که با استفاده از روش های برآورد تبخیر تعرق مرجع بر پایه درجه حرارت در ایران پرداخت هم خوانی دارد. در فصل پاییز؛ که برابر با شروع دوره سرد سال است به دلیل کاهش طول روز و پایین آمدن دما، میزان ET_0 نیز در بخش های شمالی کشور کاهش قابل توجهی یافته است که نتایج این بخش از پژوهش با نتایج نیازی (Niazi, 2016) مطابقت دارد. در این فصل؛ میزان ET_0 در عرض های شمالی به کمتر از 150 mm در سال رسیده در حالی که در عرض های جنوبی بیشینه تبخیر تعرق مرجع بین 300 تا 450 mm در سال است. این بخش از نتایج نیز با نتایج طاووسی و همکاران (Tavoosi et al., 2012) مطابقت دارد. در فصل زمستان؛ با کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی که در مناطق شمالی نسبت به مناطق جنوبی محسوس تر است. به تبع آن ET_0 نیز کاهش یافته است. در این فصل؛ در نواحی شمال غربی، غرب و شمال شرقی؛ میزان ET_0



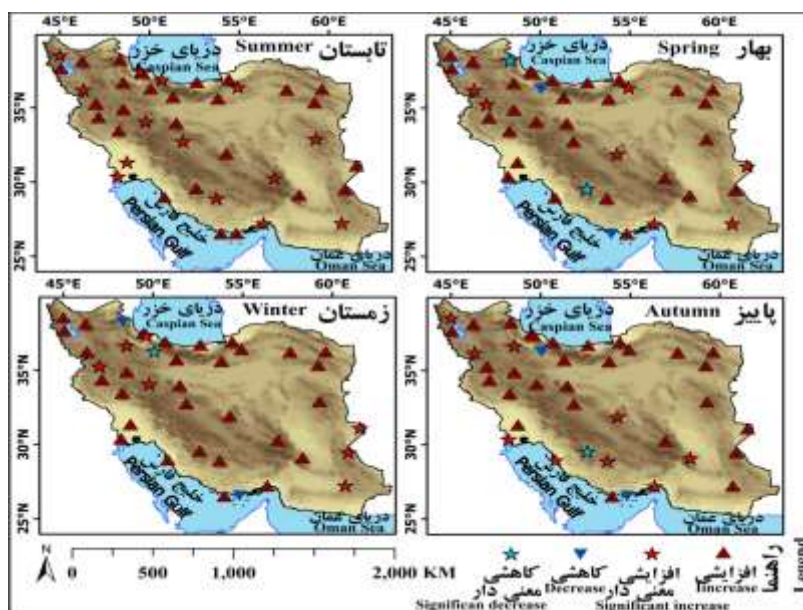
شکل ۳- توزیع فصلی ET_0 ایران با استفاده از روش فائو پنمن ماتیتث ۵۶ (۱۹۷۶-۲۰۲۰)

Figure 3- Distribution of Iran's seasonal ET_0 using the FAO Penman Monteith 56 method 1976-2020

۵٪ است. در نواحی جنوب شرقی همه ایستگاه‌ها روند افزایشی ET_0 را نشان می‌دهند. در فصل زمستان در نواحی غرب و شمال غربی تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی روند افزایشی میزان ET_0 را نشان می‌دهد. این در حالی است که این افزایش در ایستگاه سنندج در سطح ۵٪ معنی‌دار است و ایستگاه‌های اردبیل و قزوین روند کاهشی تبخیر تعرق را نشان می‌دهند و در ایستگاه‌های رشت و زنجان معنی‌داری روند کاهشی در سطح ۵٪ مشاهده می‌شود. میزان تبخیر تعرق در بقیه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی است. ایستگاه بندر لنگه تنها ایستگاهی که روند کاهشی در میزان تبخیر تعرق مرجع را نشان داده و بقیه ایستگاه‌ها روند افزایشی در تبخیر تعرق را تجربه نموده‌اند. همچنین میزان تبخیر تعرق در ایستگاه‌های زابل، زاهدان و ایرانشهر دارای روند افزایشی است. در نهایت نتایج کلی حاکی از آن است که در گستره ایران، گرچه ET_0 ، دارای روند افزایشی و کاهشی معنی‌دار ET_0 فصلی در ایران است. اما روند افزایشی بویژه در تابستان؛ بیشترین میزان را دارد. به بیانی دیگر میزان آب مورد نیاز گیاهان در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف کشور ایران افزایشی بوده است که نتایج این بخش از پژوهش با نتایج فروغی و همکاران (Foroghi et al., 2020) که اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات ET_0 در منطقه غرب ایران را با روش فائو پنمن ماتیتث ۵۶ (۲۰۱۵-۱۹۸۰) بررسی کردند مطابقت دارد.

توزیع مکانی روند و شیب روند ET_0 در مقیاس فصلی

شکل ۴ توزیع مکانی روند ET_0 فصلی را با استفاده از آزمون آماری ناپارامتریک من-کندال بصورت سری‌های زمانی فصلی (۲۰۲۰-۱۹۷۶) ۴۰ ایستگاه همدید واقع در گستره ایران، نشان می‌دهد. در فصل بهار و در نواحی شمال غربی تمامی ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی هستند و این افزایش در ایستگاه‌های سقز و سنندج در سطح خطای ۵٪ معنی‌دار است. در ایستگاه‌های اردبیل، قزوین، شیراز و جزیره کیش روند معنی‌دار کاهشی ET_0 و ایستگاه‌های اردبیل، شیراز و بوشهر روند معنی‌دار افزایشی را در سطح ۵٪ نشان می‌دهند. تبخیر تعرق مرجع در نواحی مرکزی در تمامی ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی بوده و در ایستگاه‌های واقع در جنوب شرقی دارای روند افزایشی هستند و این افزایش در ایستگاه‌های زابل و ایرانشهر افزایشی معنی‌دار است. در فصل تابستان تمامی ایستگاه‌ها بطور کلی روند افزایشی در ET_0 را نشان می‌دهند. در بیشتر ایستگاه‌ها سطح معنی‌داری ۵٪ است و از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند بطور نایک‌نواخت در گستره ایران مشاهده می‌شوند. در فصل پاییز در ایستگاه‌های خوی و سقز روند افزایشی ET_0 در سطح ۵٪ معنی‌دار است و ایستگاه‌های قزوین و شیراز دارای روند معنی‌دار کاهشی و بقیه ایستگاه‌ها روند معنی‌دار افزایشی و شیب مثبت دارند. در ایستگاه‌های زنجان، شیراز، بوشهر و یزد معنی‌داری در سطح ۵٪ است. همچنین ایستگاه بندر لنگه روند معنی‌دار کاهشی را در میزان تبخیر تعرق مرجع نشان می‌دهد و بقیه ایستگاه‌ها روند افزایشی معنی‌دار دارند و در ایستگاه‌های یزد، بم و بندرعباس روند افزایشی در سطح معنی‌داری



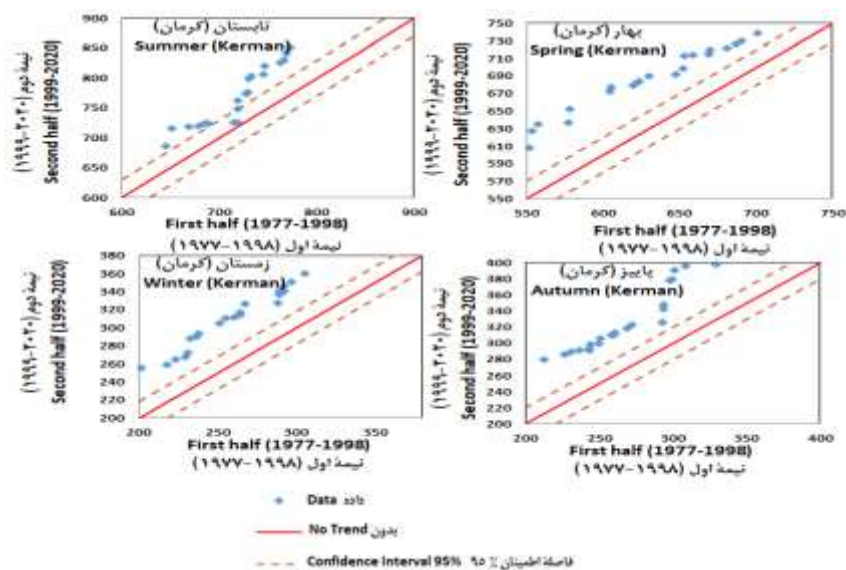
شکل ۴- توزیع مکانی روند ET_0 فصلی (۱۹۷۶-۲۰۲۰)
Figure 4- Spatial distribution of seasonal ET_0 trend 1976-2020

روند ET_0 در بازه زمانی بلند مدت و حاکی از افزایش نیاز آبی گیاهان در کشور ایران است.

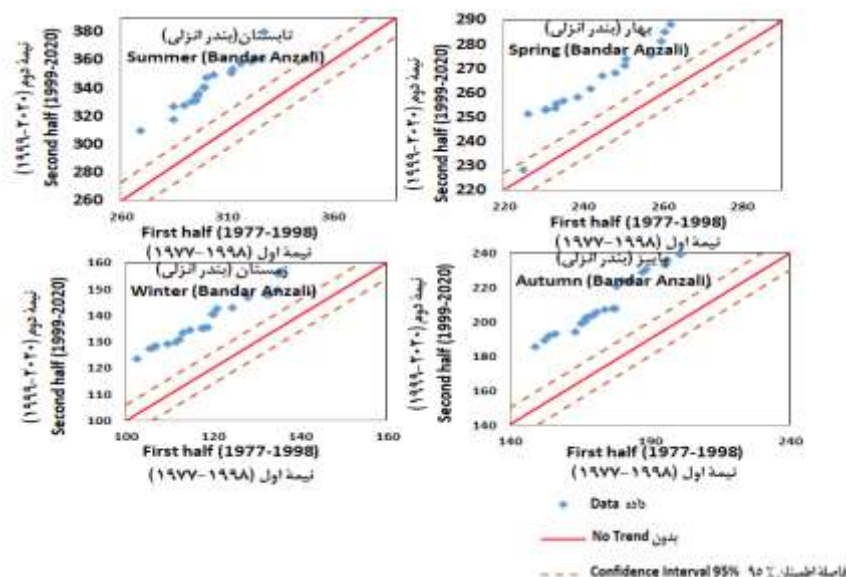
تأثیر متغیرهای هواشناسی بر تغییر میزان ET_0 فصلی

تأثیر عناصر هواشناسی بر روی ET_0 در فصول مختلف سال در شکل ۷ قابل مشاهده است. در اینجا برای درک تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی در فصول چهارگانه بر ET_0 ، مقادیر متغیرهای هواشناسی به روش سبیل در محدوده ۴۰٪ تغییر داده شده‌اند. در شکل مذکور شیب بیشتر یک خط نشان دهنده تأثیر بیشتر در ET_0 به دلیل تغییر در یک متغیر هواشناسی و در نتیجه تأثیر بیشتر متغیر بر ET_0 است. همچنین در نمودارهای ارائه شده در این شکل، مقادیر منفی رطوبت نسبی بیانگر کاهش رطوبت و مقادیر مثبت سایر متغیرها بیانگر افزایش آنها و اثر بر ET_0 می‌باشد. بدین معنا که منفی بودن رطوبت نسبی حاکی از کاهش مقادیر آن است که چنین شرایطی سبب تأثیرگذاری بیشتر و به بیانی دیگر سبب افزایش میزان ET_0 شده و بالعکس. از طرفی مثبت بودن سایر پارامترها به معنی افزایش میزان آنها و به تبع آن تأثیرگذاری بیشتر آنها بر ET_0 است. در نتیجه با توجه به شکل ۷ در فصول بهار و تابستان تأثیر گذارترین پارامترها بر مقدار ET_0 به ترتیب ابتدا متوسط دما و سپس بیشینه دما هستند که نشان دهنده تأثیر بیشتر این دو پارامتر در مقایسه با سایر پارامترهای مؤثر بر میزان ET_0 می‌باشد.

روند ET_0 فصلی با استفاده از تحلیل روند نوآورانه (ITA) برای شناسایی روند سری زمانی ET_0 فصلی حاصل از روش فائو پنمن مانیتث ۵۶ در کشور ایران از روند نوآورانه (ITA) استفاده شد. بدین صورت که سری زمانی به دو زیر سری؛ نیمه اول (۱۹۷۷-۱۹۹۸) و نیمه دوم (۱۹۹۹-۲۰۲۰) تقسیم شد. در پژوهش حاضر؛ از بین ۴۰ ایستگاه منتخب، دو ایستگاه (کرمان) و (بندر انزلی) به ترتیب با ارتفاع ۱۷۵۴ و ۲۳۶- به عنوان نماینده مناطق مرتفع و پست انتخاب شده‌اند. که شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تحلیل کیفی روند ET_0 ، حاصل از روش ITA را بر حسب mm/year در مناطق مرتفع و پست نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ نتایج گرافیکی روند ET_0 به تفکیک فصول چهارگانه در مقیاس ۴۴ ساله ایستگاه کرمان نشان می‌دهد. تمامی نقاط داده‌ها در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که نشان دهنده روند افزایشی میزان ET_0 در مقیاس زمانی فصلی در ایستگاه منتخب کرمان در گستره ایران است. به همین ترتیب در شکل ۶ ایستگاه بندرانزلی نیز حاکی از افزایش روند در میزان ET_0 در بازه زمانی ۴۴ ساله است. ایستگاه بندرانزلی نماینده مناطق پست، در مقایسه با ایستگاه کرمان نماینده مناطق مرتفع، نشان می‌دهد که در این ایستگاه نیز روند افزایشی در میزان ET_0 در تمامی فصول مشاهده می‌شود. بنابراین بطور کلی هم در مناطق مرتفع و هم در مناطق پست در تمامی فصول روند افزایشی در میزان ET_0 مشاهده می‌شود. این امر نشان دهنده افزایش



شکل ۵- روند ITA برای فصلی ایستگاه کرمان (نماینده مناطق مرتفع)
Figure 5- ITA trend for seasonal ET_0 of Kerman station representative of high areas



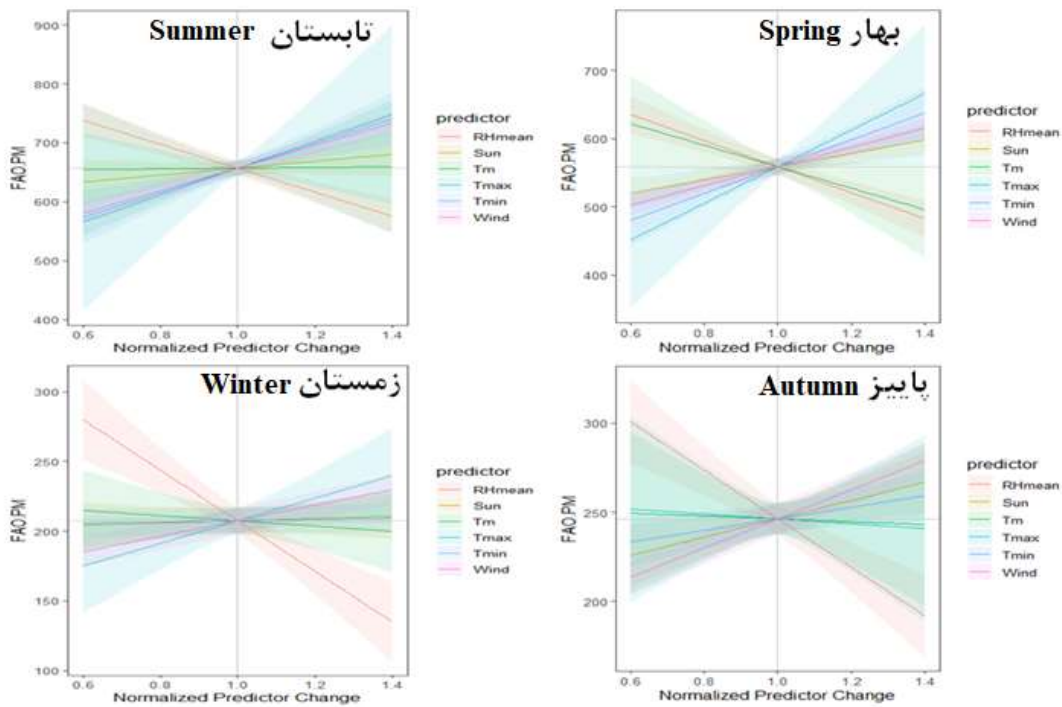
شکل ۶- روند ITA برای فصلی ایستگاه بندرانزلی (نماینده مناطق پست)
Figure 6- ITA trend for seasonal ET_0 of Bandar Anzali station representative of lowland areas

این جدول در فصل بهار تأثیر کمیته دما در افزایش میزان ET_0 در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی بیشتر مشاهده می‌شود. تأثیر کمیته دما بر ET_0 (ستون ششم جدول ۲) ۱۸/۱٪ است و باعث افزایش ۲۱/۵٪ در ET_0 در این فصل شده است. براساس جدول ۲، پارامتر رطوبت نسبی با وجود اینکه از نظر عددی بالاترین عدد را با ضریب ۲۱/۵٪ در مقایسه با بقیه پارامترها نشان می‌دهد اما نکته حائز اهمیت در مورد رطوبت نسبی این است که به میزانی که ضریب رطوبت نسبی افزایش می‌یابد و عدد آن رو به سمت مثبت می‌رود سبب کاهش میزان ET_0 می‌شود در نتیجه در اینجا بالاترین نقش را در کاهش میزان ET_0 در فصل بهار

همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که در فصل پاییز سرعت باد بالاترین تأثیر را در میزان ET_0 داشته و بعد از آن رطوبت نسبی در رتبه بعدی قرار گرفته است. در نهایت در فصل زمستان به ترتیب متغیرهای هواشناسی متوسط دما و سپس سرعت باد رتبه‌های اول و دوم را به خود اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است که منفی یا مثبت بودن ضریب حساسیت (s) نشان‌دهنده کاهش یا افزایش پتانسیل تبخیر تعرق است (Gong et al., 2006). ضریب حساسیت فصلی متغیرهای هواشناسی بر مقادیر ET_0 بر حسب درصد و با استفاده از روش سبُل در جدول ۲ ارائه شده است. در

۶/۲٪ رسیده است که حاکی از افزایش تأثیر آن برافزایش ET_0 می‌باشد. در نهایت در فصل زمستان بیشینه دما با ضریب ۲۰/۴٪ به عنوان مهم-ترین و مؤثرترین عامل بر افزایش میزان ET_0 است. رتبه‌بندی ضریب حساسیت مؤثرترین پارامتر هواشناسی بر افزایش میزان ET_0 فصلی با بهره‌گیری از روش سُبُل نشان می‌دهد که بطور کلی در فصل بهار کمینه دما بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر تعرق مرجع دارد. همچنین رتبه‌های بدست آمده در جدول ۳ در فصل تابستان حاکی از آن است که سرعت باد بیشترین تأثیر را بر میزان ET_0 داراست.

دارد. در فصل تابستان سرعت باد با ضریب تأثیرگذاری ۲۲/۵٪ بر ET_0 بیشترین میزان تأثیرگذاری را به خود اختصاص داده است بعد از آن کمینه دما با میزان ۱۹/۸٪ دومین نقش را از نظر تأثیرگذاری بر میزان ET_0 در فصل تابستان دارد. در فصل پاییز با اینکه سرعت باد همچنان عامل مهم تأثیرگذار در افزایش میزان ET_0 است و در عین حال در این فصل ضریب آن نسبت به فصل تابستان افزایش یافته و ضریب تأثیرگذاری آن بر ET_0 به میزان ۳۷/۹٪ رسیده است از طرفی مشاهده می‌شود که ضریب رطوبت نسبی کاهش چشمگیری یافته و به میزان



شکل ۷- حساسیت تبخیر تعرق مرجع به متغیرهای مختلف هواشناسی در فصول مختلف

Figure 7- Sensitivity of Reference Evapotranspiration to different meteorological variables in different seasons

جدول ۲- ضریب حساسیت متغیرهای هواشناسی (%) بر ET_0 فصلی در ایران ($\pm 40\%$) از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰

Table 2- Sensitivity coefficient of meteorological variables (%) on seasonal ET_0 in Iran ($\pm 40\%$) from 1976 to 2020

مقیاس زمانی Time	RH (%) رطوبت نسبی	Sun (h) ساعت آفتابی	Tmax (°C) بیشینه دما	Tm (°C) متوسط دما	Tmin (°C) کمینه دما	Wind (m/s) سرعت باد
بهار Spring	21.5	12.4	17.5	13.6	18.1	16.9
تابستان Summer	13.8	13.4	17.3	13.3	19.8	22.5
پاییز Autumn	6.2	23.2	11.5	10.3	16.9	31.9
زمستان Winter	23.1	16.8	20.4	11.1	10.8	17.9

S = Sensitivity Analysis

جدول ۳- رتبه‌بندی ضریب حساسیت مؤثرترین پارامتر هواشناسی بر افزایش میزان ET_0 فصلیTable 3- Ranking of the sensitivity coefficient of the most effective meteorological parameter on the increase of seasonal ET_0

مقیاس زمانی Time	رتبه اول Rank 1	رتبه دوم Rank 2	رتبه سوم Rank 3	رتبه چهارم Rank 4	رتبه پنجم Rank 5	رتبه ششم Rank 6
بهار Spring	کمینه دما T_{min}	بیشینه دما T_{max}	سرعت باد SUN	متوسط دما T_{avg}	ساعت آفتابی SUN	رطوبت نسبی RH
تابستان Summer	سرعت باد $Wind$	کمینه دما T_{min}	بیشینه دما T_{max}	ساعت آفتابی SUN	متوسط دما T_{avg}	رطوبت نسبی RH
پاییز Autumn	سرعت باد $Wind$	رطوبت نسبی RH	ساعت آفتابی SUN	کمینه دما T_{min}	بیشینه دما T_{max}	متوسط دما T_{avg}
زمستان Winter	بیشینه دما T_{max}	سرعت باد $Wind$	ساعت آفتابی SUN	متوسط دما T_{avg}	کمینه دما T_{min}	رطوبت نسبی RH

ایستگاه‌ها دارای مقدار مثبت روند هستند. نتایج بررسی سری زمانی فصلی ET_0 با استفاده از روش ITA نشان داد که در ایستگاه نماینده مناطق مرتفع (ایستگاه کرمان)؛ ET_0 در تمامی فصول افزایش یافته و این نتایج در ایستگاه واقع در مناطق پست (ایستگاه بندرانزلی)؛ نیز مشاهده شد که روند فصلی ET_0 افزایشی می‌باشد. نتایج حاصل از نمودارهای تحلیل حساسیت نشان داد که بطور کلی رطوبت نسبی تأثیر منفی داشته که بیانگر کاهش آن و به تبع آن افزایش میزان ET_0 در منطقه است و نیز تأثیر مثبت سایر پارامترها حاکی از نقش هر یک از آنها در افزایش میزان ET_0 است. همچنین نتایج ضرایب تحلیل حساسیت متغیرهای هواشناسی و رتبه‌بندی آنها نشان داد که به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان متغیرهای هواشناسی دمای کمینه، سرعت باد، سرعت باد و دمای بیشینه نقش بیشتری در افزایش ET_0 داشتند. یافته‌های پژوهش حاضر و نتایج رتبه‌بندی حساسیت عوامل مؤثر بر میزان ET_0 نشان داد که در هر دوره زمانی شرایط متفاوتی به لحاظ تأثیرگذار بودن عناصر هواشناسی بر میزان ET_0 حاکم است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر و با توجه به اینکه در حال حاضر بحران کمبود آب یکی از چالش‌های مهم جمعیت رو به رشد جهان بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند کشور ایران بوده و هست، از این رو شناخت هر یک از عناصر مؤثر بر میزان تغییرات ET_0 ، آگاهی از نیاز آبی گیاهان در زمان‌های مختلف و استفاده مناسب و بهینه از منابع آب برای مقابله با بروز تنش آبی و بحران کم‌آبی راهکار مناسبی خواهد بود. همچنین شناسایی میزان تأثیر هر یک از عناصر هواشناسی نسبت به تغییرات تبخیر تعرق مرجع حائز اهمیت فراوان بوده و می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب کشور نقش بسزایی داشته باشد. با نظر گرفتن این مهم برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که تأثیر هر یک از عناصر هواشناسی را بر تبخیر تعرق مرجع در مناطق مختلف جغرافیایی و در زمان‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دهند.

در فصل پاییز نیز همچنان سرعت باد رتبه اول را در تأثیرگذاری میزان تبخیر تعرق به خود اختصاص داده است. در نهایت در فصل زمستان بیشینه دما در بین بقیه پارامترهای هواشناسی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار می‌باشد. بطور کلی بجز فصل پاییز در بقیه فصول رطوبت نسبی بالاترین نقش را در کاهش میزان ET_0 دارد و سایر عناصر در فصول مختلف سال با ضرایب مختلف بر افزایش میزان ET_0 نقش مؤثری ایفا می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، میزان تغییرات تبخیر تعرق مرجع بر اساس آمار بلند مدت هواشناسی از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰ برای ۴۰ ایستگاه همدید شامل رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط، بیشینه و کمینه دما و سرعت باد با استفاده از روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ برآورد شد و نتایج حاصل بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی‌های آماری از آزمون‌های (من-کندال و روند نوآورانه) به منظور بررسی روند تغییرات ET_0 بررسی شد. سپس با استفاده از روش تحلیل حساسیت سبُل و با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R تحلیل حساسیت ET_0 نسبت به عناصر مختلف هواشناسی ارزیابی شد و در نهایت ضریب حساسیت هر یک از متغیرهای تأثیرگذار بر میزان تغییرات ET_0 محاسبه و رتبه‌بندی شدند.

با توجه به نتایج حاصل از برآورد ET_0 فصلی می‌توان دریافت که در کشور ایران میزان ET_0 گرچه دارای افت و خیز بوده ولی بطور کلی در حال افزایش بوده است. بر اساس نتایج، برآورد ET_0 فصلی در گستره ایران افزایشی بوده و آرایش الگوی توزیع مکانی فصلی ET_0 حاکی از افزایش میزان آن از شمال به جنوب و از غرب به شرق می‌باشد. افزایش میزان ET_0 در نیمه شرقی ایران در سال‌های اخیر قابل توجه است. با استفاده از نتایج ارزیابی‌های آماری، روند تغییرات ET_0 نشان داد که طی دوره آماری مورد نظر؛ آزمون من-کندال داده‌های ET_0 بیشتر

1. 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. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1575110>
2. Ahmad, N.F.A., Askari, M., Harun, S., Fadhil, A.B., & Demun, A. S. (2017). Sensitivity analysis of a FAO Penman Monteith for potential evapotranspiration to climate change. *Jurnal Teknologi*, 79(7), 21-30. <http://dx.doi.org/10.11113/jt.v79.8377>
3. Ahmadi, M., Mirzaei, Z.S., & Dadashroudbari, A. (2021). Investigation of seasonal distribution and abnormal trend of day and night surface temperature in Iran using MODIS sensor data. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(3), 351-364. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.323144.1007615>.
4. Ahmadyan, M., Sobhani., B., & Jahanbakhsh Asl, S. (2023). Evapotranspiration changes of reference Crop during the growth stages of apple tree in Urmia and Semirrom cities.. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 23(70), 21-36. (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1300.0.0.24.7>
5. 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*.
6. 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. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22516174.1398.10.19.12.5>
7. Babaei, M. (2021). *Temporal and Spatial Assessment of Actual Evapotranspiration by Semi- Distributed Model and a Remote Sensing Method*. Ph.D. Dissertation in Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran. (In Persian with English abstract)
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. *Physical Geography: Earth and Environment*, 43(5), 666-693. <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. <https://link.springer.com/article/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. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
11. Dinpashoh, Y., & Foroghi, M. (2020). Application of Path Analysis in identification of dominant effective meteorological parameters on ET0 in West Azarbaijan. *Journal of Geographical Sciences*, 20(58), 163-180. (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5>
12. Ebrahimi Haftcheshmeh, M. (2019). Zoning of potential reference crop evapotranspiration (ET₀) in Kermanshah province. Master Thesis in Faculty of Science and Agricultural Engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
13. Fang, M. (2021). Variations and Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration During 2010-2019 in the Zhangye Farmland Oasis, Northwest China. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-831426/v1>
14. Foroghi, M., Dinpashoh, Y., & Jahanbakhsh Asl, S. (2020). Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west rejoin of Iran. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 21-37. (In Persian with English abstract)
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.006>
16. 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. <https://doi.org/10.3390/w10101373>
17. Gong, L., Xu, C.Y., Chen, D., Halldin, S., Chen, Y.D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of hydrology*, 329(3-4), 620-629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
18. Hu, S., Gao, R., Zhang, T., Bai, P., & Zhang, R. (2021). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and its climatic drivers over the Tibetan Plateau during 1970–2018. *Applied Sciences*, 11(17), 8013. <https://doi.org/10.3390/app11178013>
19. 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. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00777-4>
20. Iran Meteorological Organization (2022). Product & Services Database.
21. Javan, K. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 138-119. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22034/hyd.2021.43326.1562>.

22. Kang, T., Li, Z., & Gao, Y. (2021). Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its determining climatic factors in the Taihang mountains, China. *Water*, 13(21), 3145. <https://doi.org/10.3390/w13213145>
23. Kazemi, M.H. (2020). Evaluation of different data driven methods in estimating reference evapotranspiration. Master Thesis in Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz. (In Persian with English abstract)
24. Kendall, M.G. (1948). Rank Correlation Methods. *New York*: Griffin.
25. 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>
26. 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. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>
27. Lorestani, M. (2016). Evaluation and comparison of different (temperature based methods) for estimating reference evapotranspiration in different climates and that's Iran zoning with GIS. Master Thesis in Faculty of Agricultural sciences and engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
28. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
29. Mubialiwo, A., Onyutha, C., & Abebe, A. (2020). Historical rainfall and evapotranspiration changes over Mpologoma catchment in Uganda. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2020/8870935>
30. Niazi, Z. (2016). Evaluation and generalization of Mass transfer-based methods for calculating Reference Evapotranspiration across of Iran by GIS. Master Thesis in Faculty of Agricultural sciences and engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
31. 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. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2543-0>
32. Piri, H., & Poozan, M. (2019). Evaluation of 24 models of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Iranian journal of Ecohedrily*, 6(3), 611-622. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2019.277302.1065>
33. 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
34. Pravalie, R., Piticar, A., Roşca, B., Sfica, 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. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>
35. Rahman, M. A., Yunsheng, L., Sultana, N., & Ongoma, V. (2019). Analysis of reference evapotranspiration (ET₀) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(3), 639-655. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0596-3>
36. Sadeghi, A., & Ahmadi, H. (2021). Evaluation of monthly reference evapotranspiration in Iran based on the output of CORDEX-MNA project downscaled dynamic models. *Physical Geography Research Quarterly*, 54(2), 185-202. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.332856.1007652>
37. Sobol, I.M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55 (1-3), 271-280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)
38. Sobol, I.M. (1993) Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 4, 407-414.
39. Tavooosi, T., Mansouri Daneshvar, M., & Movaqqari, A. (2012). The zonation of aridity intensity in Iran using Hargreaves- Samani evapotranspiration model based on digital elevation model (DEM). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(3), 95-110. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/221119/en>
40. Wang, Q., Xu, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Xiang, J., Xu, Y., & Wang, J. (2020). Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 236, 104805. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104805>
41. Yahyavi Dizaj, A., Javan, K., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. (2023). Evaluation of changes in reference evapotranspiration in Iran over the last decades. *Desert Management*, 11(1), 39-58. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2023.2000984.1413>
42. Yamamoto, M. (2020). Ensemble simulations of the influence of regionally warm sea surface on moisture and rainfall in Tsushima Strait during August 2013. *Atmospheric Research*, 238, 104876. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104876>
43. Yang, L., Feng, Q., Adamowski, J. F., Yin, Z., Wen, X., Wu, M., & Hao, Q. (2020). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research*, 238, 104868. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104868>
44. Yang, Y., Chen, R., Song, Y., Han, C., Liu, J., & Liu, Z. (2019). Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China. *Journal of*

- Hydrology*, 568, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.069>
45. Zeraati Neyshabouri, S., Pourreza Bilondi, M., Khashei-Siuki, A., & Shahidi, A. (2022). Efficiency comparison of fuzzy regression models with the penman-monteith method in estimating of monthly reference evapotranspiration of Neyshabour plain. *Environment and Water Engineering*, 8(1), 205-217. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.283243.1555>.
46. Zhang, X., Wang, L., & Chen, D. (2019). How does temporal trend of reference evapotranspiration over the Tibetan Plateau change with elevation?. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2295-2305. <https://doi.org/10.1002/joc.5951>
47. Zhou, P., Liu, Z., & Cheng, L. (2020). An alternative approach for quantitatively estimating climate variability over China under the effects of ENSO events. *Atmospheric Research*, 238, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104897>