Physical Geography Research Quarterly

Journal Homepage: www.jphgr.ut.ac.ir

Research Paper

Evaluation and Calibration of Thornthwaite equation for Estimating Reference Evapotranspiration in windy areas case study of Sistan region

Homa Darabi [a], Mohammad Mehdi Chari [a*], Peyman Afrasiab [a], Halima Piri [a]

[a]. *Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, Zabol University, Zabol, Iran*

ARTICLEINFO

Keywords:
Evapotranspiration,
Sistan,
Air temperature,
Windy region

ABSTRACT

There are many methods for calculating evapotranspiration that require a lot of data, but a few require only air temperature. One of these methods is Trontwait. The Sistan region in the southeast of Iran is one of the regions that is unique in Iran due to the 120 days of winds. The purpose of this research is: 1) to evaluate 6 different Trontwait methods available in the sources compared to the Fau-Penman-Monteith method and 2) to modify the equation for the windy region of Sistan. The results showed that the original Trontwhite equation underestimates the amount of evaporation-transpiration. Among the existing methods, the use of coefficient k=0.72 had the best results. In order to recalibrate the Trunthwaite equation, the effective temperature coefficient of the equation (k) must be modified. The results showed that the optimal value of k varies between 0.755 and 1.04. The annual average value of the root mean square error (RMSE), according to the variable k values, was equal to 0.14 mm per day. Also, by minimizing the square of the error, we considered the k value to be 0.802 as a constant, and the RMSE value was equal to 1.19 mm per day. It can be concluded that after correcting the Trontwhite equation, it can be used in the Sistan region.

Received:
3 September 2022
Received in revised form:
2 December 2022
Accepted:
2 February 2023
pp.533-548

Citation: Darabi, H., Chari, M. M., Afrasiab, P., & Piri, H. (2022). Evaluation and Calibration of Thornthwaite equation for Estimating Reference Evapotranspiration in windy areas case study of Sistan region. *Physical Geography Research Quarterly*, *54* (4), 549-564.

http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.350271.1007728

∗ . Corresponding author (Email: mmahdichari@uoz.ac.ir)

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

Extended Abstract

Introduction

Evapotranspiration is one of the most important components of the hydrologic cycle in the nature and its exact determination is essential for water balance studies, irrigation and water resources management. One of the most accurate methods of estimating ETo is in different climates of FAO Penman-Monteith equation (PMF-56) the accuracy of this method for calculating evapotranspiration in all over the world has been proven successfully. PMF-56 method as a standard method requires a large meteorological data such as air temperature, relative humidity, wind speed at a height of 2 meters and solar radiation. Provide exact data on all areas is not and also if it is possible it is not very reliable. Some of the evapotranspiration methods require only air temperature for ETo estimation. One of these methods is Thornthwaite. The Sistan region in the southeast of Iran is one of the regions that is unique in Iran due to the 120-day winds and high day-night temperature changes. The purpose of this research is to evaluate the different existing methods of the Thornthwaite equation (6 methods) and adjustment the Thornthwaite equation for the Sistan region.

Methodology

Six Thornthwaite approaches were used in this study are described below:

1) The Thornthwaite method (Thornthwaite 1948) is a temperature-based method for the estimation of ET0 as a function of the average monthly temperature.

2) Camargo et al. (1999) improved the performance of the Thornthwaite method using an effective temperature (T_{eff}) instead of the mean temperature (T_{ave}) and of the daily temperature amplitude:

$$T_{eff} = k(T_{ave} + A) = \frac{1}{2}k(3T_{max} - T_{min}) \quad (1)$$

where k = calibration coefficient. Camargo et al. (1999) found that k = 0.72 is the best value for estimating monthly ET_0.

3) Pereira and Pruitt (2004) recommended k = 0.69 for estimating daily ET_0.

4) Trajkovic (2005a) expressed the equation reference evapotranspiration where Thornthwaite equation depend on maximum possible duration of sunshine and mean air temperature in the i-th month.

5) The data from Serbian stations Palic, Belgrade, and Nis were used to calibrate the Thornthwaite equation (Trajkovic 2005b):

$$ET_{C-TW} = 0.88ET_{TW} + 0.565 \quad (2)$$

6) Bautista et al. (2009) calibrated the Thornthwaite equation by changing the value of the corresponding constant p = 16.

In this research, in addition to evaluating different methods and determining the best method, the value of coefficient k for Sistan region is recalibrated and its best value is stated.

Results and Discussion

The results based on FAO-56 PM equation show that amount of daily evapotranspiration varied from about 21 mm per day in July to 0.7 mm day^{-1} in the beginning of December.The annual average value of evapotranspiration according to the FAO-56 PM equation is 8.21 mm day^{-1}.

Six Thornthwaite approaches were used in this study were compared to full FAO-56 PM equation. The statistical summary including RMSE (mm day^{-1}), MBE (mm day^{-1}) and r ($\frac{ET_{eq}}{ET_{PM}}$) for Sistan location is presented in Table 1. The value of RMSE in original Thornthwaite equation was equal to 4.15 mm day^{-1}, the value of MBE was equal to -3.92 mm day^{-1}, and the value of r was equal to 0.52, which indicates Thornthwaite equation was very poor in estimating ET0 and greatly underestimated PM values. The method of Camargo et al. (1999) with RMSE value of 3.14 mm day^{-1} and MBE value of -2.49 mm day^{-1} and r value of 0.7 had the best results among all methods. Generally, the accuracy of this method is low compared to the PMF-56 method. Among the studied approaches, only the method of Bautista et al (2009) overestimates the amount of evapotranspiration. The average amount of annual evaporation in this approache is equal to 11.84, which has been overestimated by about 44%.

The best monthly values of k (optimal value) was obtained using the trial and error method and minimizing the value. The

results show that the value of coefficient k varies from 0.755 in March to 1.04 in October and its average value is 0.825. By using the solver option and based on the lowest value of the root mean square error between Thornthwaite evapotranspiration and the FAO-56 PM method, the value of k coefficient was also obtained, which was equal to 0.802. In the following, by using three k coefficient values, including optimal variable coefficient (k_{opt}), average variable coefficient ($k_{0.825}$) and obtained from the solver option ($k_{0.802}$), the evapotranspiration value were calculated and evaluated. Table (2) shows the statistical indices of the evapotranspiration value calculated with the adjustment Thornthwaite equation based on the coefficient k.

The results showed that the use of variablek_{opt} coefficient with RMSE equal to 0.14 mm day^{-1}, MBE -0.04 mm day^{-1} and r equal to 0.99 had the best results. It can be concluded that usingof k_{opt} and $k_{0.802}$ we will reach satisfactory results in calculating evapotranspiration in Sistan region.

Conclusion

The results of this study showed that the 60% of the amount of evapotranspiration in the Sistan region occurs in the four months of June to September when the winds blow for 120 days. The total evapotranspiration in the three months of December, January and February is equal to 8% of the annual evapotranspiration value. The results showed that the six existing methods of estimating evapotranspiration with Thornthwaite method have low accuracy, so its value should be recalibrated. Hence, based on this study, reference evapotranspiration can be easily calculated for the windy region of Sistan with the available metorological data and the calibrated Thornthwaite equation. In developing countries where good quality data are relatively scarce, using such simple methods may be beneficial for the farmers and local water organizations.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی
Journal Homepage: www.jphgr.ut.ac.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی و واسنجی معادله ترونت‌وایت برای تخمین تبخیر تعرق در اقلیم بادخیز مطالعه موردی: منطقه سیستان

هما دارابی – گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
محمدمهدی چاری[1] – گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
پیمان افراسیاب – گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
حلیمه پیری – گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:
تبخیر–تعرق، سیستان، دمای هوا، مناطق بادخیز.

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۶/۱۲
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۱/۰۹/۱۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۱۱/۱۳
صص. ۵۶۴-۵۴۹

چکیده

روش‌های زیادی برای محاسبه تبخیر–تعرق وجود دارد که به داده‌های زیادی نیاز دارد، اما تعدادی از روش‌های فقط به دمای هوا نیاز دارند. یکی ازاین‌روش‌ها ترونت‌ویت است. منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز در ایران منحصربه‌فرد است. هدف از این تحقیق: ۱) ارزیابی ۶ روش مختلف ترونت‌ویت موجود در منابع در مقایسه با روش فائو پن‌من مانتیث و ۲) اصلاح معادله برای منطقه بادخیز سیستان است. نتایج نشان داد معادله اصلی ترونت‌وایت مقدار تبخیر–تعرق را کم برآورد محاسبه می‌کند. در بین روش‌های موجود استفاده از ضریب $k = 0.72$ دارای بهترین نتایج بود. برای واسنجی معادله ترونت‌وایت ضریب دمای موثر معادله (k) باید اصلاح گردد. نتایج نشان داد مقدار بهینه k بین ۰/۷۵۵ تا ۱/۰۴ متغیر هست. میانگین سالانه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، با توجه به مقادیر k متغیر برابر با ۰/۱۴ میلی‌متر در روز به دست آمد. همچنین با استفاده از حداقل کردن مربعات خطا مقدار k را به‌طور ثابت ۰/۸۰۲ در نظر گرفتیم که مقدار RMSE برابر با ۱/۱۹ میلی‌متر در روز به دست آمد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پس از اصلاح معادله ترونت‌وایت می‌توان آن را در منطقه سیستان استفاده کرد.

استناد: دارابی، هما؛ چاری، محمدمهدی؛ افراسیاب، پیمان و پیری، حلیمه. (۱۴۰۱). ارزیابی و واسنجی معادله ترونت‌وایت برای تخمین تبخیر تعرق در اقلیم بادخیز مطالعه موردی: منطقه سیستان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴ (۴)، ۵۶۴-۵۴۹.

http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.350271.1007728

۱. نویسنده مسئول
Email: mmahdichari@uoz.ac.ir

مقدمه

ارزیابی و تعیین تبخیر- تعرق پتانسیل یا مرجع یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها برای بسیاری از کاربردهای آب-اقلیمی مانند طراحی و مدیریت آبیاری، مطالعات بیلان آب و ارزیابی طبقه‌بندی خشکی و شاخص‌های خشک‌سالی است (Aschonitis et al., 2017:615; Aschonitis et al., 2022:160). تبخیر- تعرق یکی از اجزای مهم چرخه آب محسوب می‌شود و محاسبه اصولی و صحیح آن در بسیاری از مطالعات ازجمله شبیه‌سازی عملکرد محصولات، توازن هیدرولوژیکی آب، مدیریت سامانه‌های آبیاری و منابع آب دارای اهمیت بسیاری می‌باشد (روشن و همکاران، ۱۳۹۰). عوامل اقلیمی مانند سرعت باد از عوامل تأثیرگذار بر میزان تبخیر- تعرق می‌باشند و با توجه به فصل سال و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه، نقش آن بر تبخیر- تعرق بیشتر یا کمتر می‌شود (طالبی و همکاران، ۱۳۸۹).

یکی از دقیق‌ترین روش‌های تخمین ET_o، در اقلیم‌های مختلف معادله پنمن- مونتیث فائو (PMF-56) در مقیاس روزانه و ماهانه می‌باشد و دقت این روش در محاسبه تبخیر-تعرق در سرتاسر دنیا با موفقیت به اثبات رسیده است (Allen et al., 1998). ازاین‌رو سازمان فائو (FAO) روش فوق را به‌عنوان روش استاندارد معرفی نمود. روش PMF-56 به‌عنوان روش استاندارد، به داده‌های هواشناسی زیادی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و تابش خورشیدی نیاز دارد. تهیه دقیق این داده‌ها در تمامی مناطق امکان‌پذیر نیست و همچنین در صورت وجود خیلی قابل‌اعتماد نمی‌باشند (Droogers & Allen, 2002:37). پس منطقی به نظر می‌رسد که جایگزینی مناسب برای آن تعیین شود که به داده‌های زیادی نیاز نداشته باشد. روش تجربی تعیین تبخیر-تعرق روش‌های ساده هستند که به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز ندارند. همچنین یکی دیگر مشکلات، محاسبه تبخیر-تعرق در مقیاس بزرگ است که مناسب‌ترین راه استفاده از معادلاتی بر اساس دما می‌باشد (Aschonitis et al., 2022:163).

روش ترونت‌وایت (۱۹۴۸) روش تجربی ساده‌ایی هست که در مناطق مرطوب که دمای هوا تنها داده ورودی است استفاده می‌شود. این معادله به‌طور گسترده برای محاسبه تبخیر-تعرق در مناطق مختلف جهان مورداستفاده قرارگرفته است (Almorox et al., 2015:514; Amatya & Harrison, 2016:1; Wang et al., 2018:2954). بسیاری از شاخص‌های خشک‌سالی معروف (مانند PDSI، RDI، SPEI) از معادله تورنت‌ویت برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند (Palmer 1965; Tsakiris & Vangelis, 2005:3; Vicente-Serrano et al., 2010: 1969). همچنین برای محاسبه تبخیر-تعرق در مقیاس بزرگ و ماهانه بسیار مناسب است (Aschonitis et al., 2022:164).

معادله ترونت‌وایت در ابتدا به‌عنوان یک شاخص خشکی-رطوبت معرفی و بر اساس تبخیر-تعرق محاسبه‌شده از چندین لایسیمتر در مرکز و شرق آمریکا توسعه داده‌شده است برای استفاده در سایر مکان‌ها باید مورد واسنجی قرار گیرد (Trajkovic et al., 2019:2). نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از معادله اصلی ترونت‌وایت بدون واسنجی سبب ایجاد خطا می‌گردد (Garcia et al., 2004: 67; Trajkovic & Kolakovic, 2009: 3057; Sepaskhah & Razzaghi, 2009:59; Trajkovic, 2019:1).

کامارگو[1] و همکاران (۱۹۹۹) روش ارائه‌شده توسط ترونت وایت را با به کار بردن دمای موثر (T_{eff}) به‌جای دمای میانگین (T_{ave}) بهبود بخشید. دقت این روش در مقایسه با روش فائو پن‌من مانتیث برای ۸۶ ایستگاه در سراسر جهان مورد ارزیابی قرار گرفت. نیز از دمای موثر (T_{eff}) در معادله ترونت-وایت استفاده کردند نشان دادند که این روش در مقایسه با داده‌های لایسیمتری کالیفورنیا آمریکا و سائوپالو برزیل دارای نتایج قابل‌قبول دارد. جین و سینای[2] (۱۹۸۵)

1 . Camargo
2 . Jain & Sinai

مقدار ثابت را در فرمول اصلی را بر اساس محدوده حداقل تا حداکثر دمای میانگین سالانه هوا برای محاسبه تبخیر و تعرق برای شرایط نیمه‌خشک اصلاح کرد.

دین پاشوه[1] (۲۰۰۶) از روش ترونت–وایت اصلاح‌شده توسط پریرا و پرویت[2] (۲۰۰۴) برای برآورد تبخیر–تعرق ناحیه مرطوب شمال ایران استفاده کرد. نتیجه گرفت که برای ناحیه مرطوب شمال ایران مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با روش ترونت–وایت اصلاح‌شده در ماه‌های گرم سال بیشتر از روش فائو پن‌من مانتیث و در ماه‌های سرد سال برعکس هست. ژانگ[3] و همکاران (۲۰۰۸) معادله اصلاح‌شده ترونت‌ویت را برای تخمین تبخیر–تعرق در زمین زراعی، بوته‌زارها و جنگل‌های واقع در جنوب غربی چین استفاده کرد. باکوندوکیز[4] و همکاران (۲۰۱۱) از دو روش اصلاح‌شده معادله ترونت‌ویت برای تخمین‌های تغذیه آب زیرزمینی برای منطقه در شرق آفریقا استفاده کرد.

احمدب و فولادمند[5] (۲۰۰۸) معادله ترونت–وایت را برای تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی واقع در استان فارس در ایران با استفاده از معادله فائو پن‌من مانتیث مورد واسنجی قرار دادند. در این تحقیق به‌جای استفاده از ضریب ۰/۷۲ در معادله اصلی ترونت–وایت از یک ضریب واسنجی استفاده کردند. نتایج نشان داد که این ضریب بین ۰/۵۵ تا ۱/۱۲ متغیر بوده و چنانچه از ضریب واسنجی استفاده گردد دقت روش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. سپاسخواه و رزاقی[6] (۲۰۰۹) (از دو فاکتور تصحیح ۰/۶۴ و ۰/۶۹ به‌جای ۰/۷۲ استفاده کرده و به‌جای مقدار دمای میانگین (T_{ave}) از دمای موثر و دمای موثر اصلاح‌شده استفاده کرد. و نشان داد که دقت نتایج افزایش‌یافته است. در تحقیق برای منطقه‌ای در شما صربستان و آب‌وهوای گرم و مرطوب در تابستان و زمستان‌های سرد روش‌های مختلف معادله ترونت–وایت را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد معادله اصلی ترونت–وایت مقدار تبخیر–تعرق را کم برآورد پیش‌بینی می‌کند و دقت آن پایین است. نتایج نشان داد که روش پریرا و پروت (۲۰۰۴) و استفاده از ضریب واسنجی ۰/۶۹ ($k = 0.69$) دارای بهترین نتایج است (Trajkovic et al., 2019:1).

منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز و تغییرات دمایی بالای شبانه‌روز در ایران منحصربه‌فرد است. در این منطقه در بسیاری از ایام سال باد می‌وزد. از طرفی بخش بسیار زیادی از اشتغال (حدود ۳۸٪) در این منطقه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد (Chari et al., 2020:58). در سال‌های اخیر دولت اقداماتی را برای توسعه کشاورزی در این بخش انجام داده است. لذا مطالعه و بررسی تبخیر تعرق در مقیاس بزرگ و ماهانه به‌منظور برآورد نیاز واقعی و توسعه اقتصادی منطقه ضرورت دارد. هدف از این تحقیق ارزیابی روش‌های مختلف موجود معادله ترونت‌وایت (۶ روش) و اصلاح معادله ترونت‌وایت برای منطقه سیستان می‌باشد.

روش پژوهش

روش محاسبه تبخیر- تعرق با روش فائو پن‌من مانتیث

در این پژوهش به علت عدم وجود داده‌های دقیق لایسیمتری در دوره دراز مدت، از روش پنمن- مونتیث فائو به‌عنوان روش استاندارد جهت ارزیابی سایر روش‌ها استفاده شد. با استفاده از این معادله که یکی از مهم‌ترین و عمومی‌ترین معادلات ترکیبی است، مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) به‌صورت زیر برآورد می‌گردد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

1 . Dinpashoh
2 . Pereira & Pruitt
3 . Zhang
4 . Bakundukize
5 . Ahmadi & Fooladmand
6 . Sepaskhah and Razzaghi

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/(T+273)]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$ رابطه۱)

که در آن: ETo تبخیر–تعرق گیاه مرجع (mm/day)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ/m2d)، G شار گرمای خاک (MJ/m2d)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (C°)، U2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، es-ea کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (KPa/°C) و γ ضریب ثابت سایکرومتری (KPa/°C) می‌باشد. برای به دست آوردن اجزای معادله پنمن– مونتیث فائو از دستورالعمل ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردید.

روش ترونت وایت

ترونت‌وایت (۱۹۴۸) یک روش بر اساس دما ارائه کرد که با استفاده از آن مقدار میانگین تبخیر–تعرق ماهانه را به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$ET_{otr} = \begin{cases} 0 & T_{ave} < 0^0c \\ 16\left(10\frac{T_{ave}}{I}\right)^a & 0^0c \le T_{ave} \le 0^0c \\ -0.43\,T_{ave} + 32.24T_{ave} - 415.85 & T_{ave} > 26.5^0c \end{cases}$$ رابطه۲)

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0.2T_{ave})^{1.514}$$ رابطه۳)

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.7912 \times 10^{-2} I + 0.49239$$ رابطه۴)

که ET_{otr} تبخیر تعرق تخمین زده شده با روش ترونت وایت (میلی‌متر بر ماه)، T_{ave} میانگین ماهانه دمای هوا (0_C)، I شاخص حرارتی، a توان معادله که تابعی از I است.

کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) روش ارائه‌شده توسط ترونت وایت را با به کار بردن دمای موثر (T_{eff}) به‌جای دمای میانگین (T_{ave}) بهبود بخشید. T_{eff}به‌صورت تابعی از T_{ave} و دامنه دمای روزانه به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$T_{eff} = k(T_{ave} + A) = \frac{1}{2}k(3T_{max} - T_{min})$$ رابطه۵)

که T_{min}و T_{max} و T_{ave}به ترتیب دمای حداقل، حداکثر و موثر ماهانه است، $A = T_{max} - T_{min}$ و k ضریب کالیره می‌باشد. Camargo et al., (1999) مقدار ضریب کالیبره را برابر با ۰/۷۲ برای تخمین‌های ماهانه بیان کرد.

پریرا و پروت (۲۰۰۴) نیز از روش Camargo et al., (1999) برای محاسبه تبخیر–تعرق ترونت‌وایت استفاده کرد و نشان داد که چنانچه از مقدار $k = 0.69$ استفاده گردد، نتایج بهبود می‌یابد.

تراجکویچ (۲۰۰۵) معادله ترونت وایت را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$ET_{otr,i} = \frac{16N_i}{360}\left(\frac{10T_i}{\sum_{n=1}^{12}(0.2T_i)^{1.514}}\right)^{0.016\sum_{n=1}^{12}(0.2T_i)^{1.514}}$$ رابطه۶)

$ET_{otr,i}$ تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با استفاده از روش ترونت وایت بر حسب میلی‌متر بر روز، N_iحداکثر ممکن ساعات آفتابی$(h\ day^{-1})$، T_i میانگین دمای هوا در ماه iام (درجه سانتی‌گراد) و $i = 1,2, \dots 12$.

همچنین تراجکویچ (۲۰۰۵) برای مناطق جنوب شرقی اروپا نشان داد که رابطه بین پن‌من مانتیث و ترونت‌وایت به‌صورت زیر می‌باشد:

$$ET_{C-TW} = 0.88ET_{TW} + 0.565$$ رابطه۷)

که ET_{TW} تبخیر–تعرق تخمین‌زده شده با روش ترونت‌وایت$(mm\ day^{-1})$، ET_{C-TW} مقدار تبخیر–تعرق اصلاح‌شده روش ترونت‌وایت $(mm\ day^{-1})$ است.

باتیستا و همکاران (۲۰۰۹) با تغییر مقدار ثابت معادله ترونت‌وایت ($p = 16$) این معادله را اصلاح کردند. آن‌ها رابطه زیر را برای کالیبر کردن معادله ترونت‌وایت بیان کردند:

رابطه ۸)
$$p_{adj} = \frac{16ET_{PM}}{ET_{TW}}$$

که ET_{PM} مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با روش فائو پن‌من مانتیث($mm\ day^{-1}$)، ET_{TW} تبخیر–تعرق تخمین‌زده شده با روش ترونت‌وایت ($mm\ day^{-1}$)، p_{adj} مقدار جدید ثابت معادله ترونت‌وایت است.

در این تحقیق علاوه به ارزیابی روش‌های مختلف و تعیین بهترین روش مقدار ضریب k برای منطقه سیستان واسنجی شده و بهترین مقدار آن بیان می‌گردد.

ارزیابی روش‌های مختلف

درنهایت بر ارزیابی از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و نسبت بین مجموع تبخیر TW به PM (r) استفاده می‌شود:

رابطه ۹)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (ET_{p,i} - ET_{PM,i})}{n}}$$

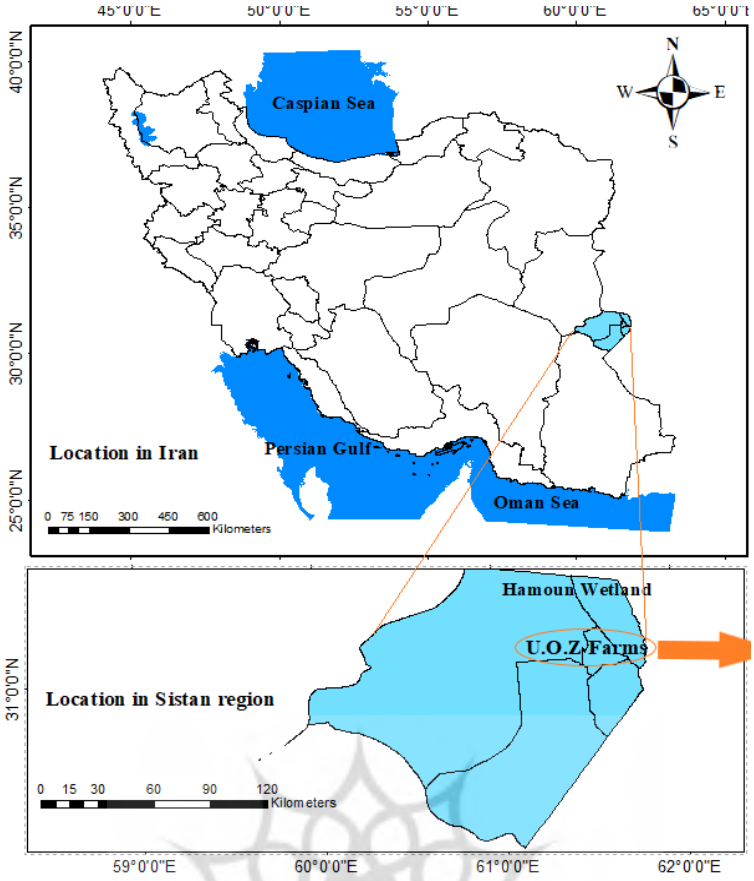
رابطه ۱۰)
$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(ET_{p,i} - ET_{PM,i})$$

رابطه ۱۱)
$$r = \frac{\sum_i^n ET_{p,i}}{\sum_i^n ET_{PM,i}}$$

که i شاخص ماه، n تعداد کل مشاهدات، $ET_{p,i}$ مقدار تبخیر–تعرق روزانه که با استفاده از روش پریستلی–تیلور یا ترونت–وایت به دست می‌آید. $ET_{PM,i}$ مقدار تبخیر–تعرق به‌دست‌آمده با استفاده از روش فائو پن‌من مانتیث است. هرچه مقدار $RMSE$ و MBE کوچک‌تر و مقدار r نزدیک به یک باشد نتایج بهتری را شاهد هستیم.

محدوده موردمطالعه

سیستان در جنوب شرقی ایران در موقعیت جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۲ دقیقه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۴۸۱ متر می‌باشد (شکل ۱). آب‌وهوای شهرستان زابل بر اساس طبقه‌بندی کوپن، جزء اقلیم‌های خشک و بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. بر اساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی زابل، میانگین بارش سالانه این شهرستان ۵۹/۶ میلی‌متر و دمای آن در سال بین ۹/۵– تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. همچنین میانگین حرارت سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. یکی از شاخصه‌های اصلی این منطقه وجود بادها در طول سال است. بادهای ۱۲۰ روز از اواسط اردیبهشت تا اواسط شهریور می‌وزد. در این تحقیق از داده‌های ۳۰ ساله (۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹) اندازه‌گیری شده ایستگاه هواشناسی زابل استفاده‌شده است.

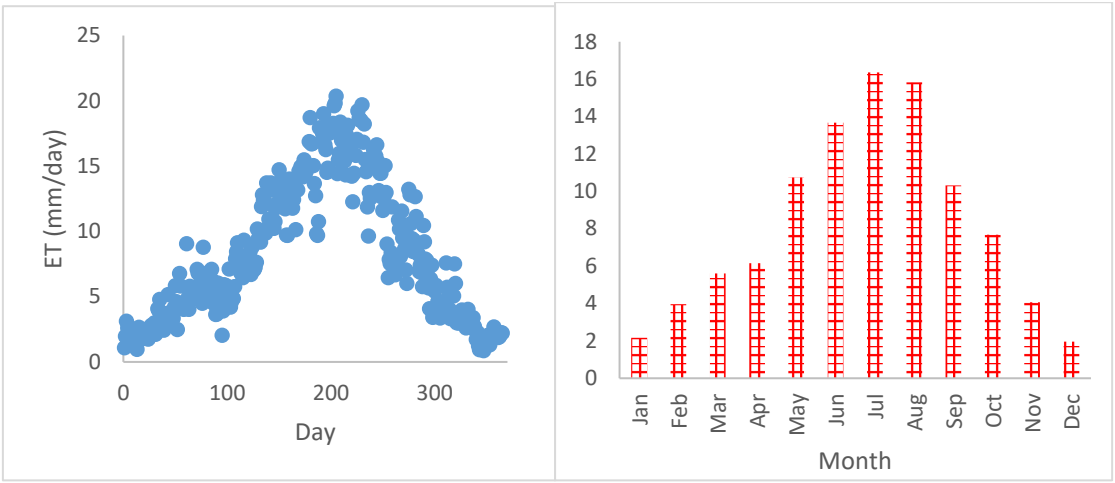


شکل ۱. منطقه موردمطالعه در این تحقیق

یافته‌ها و بحث

معادله پن‌من‌مانتیث فائو (ET_{PM})

شکل (۲) مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با استفاده از روش پن‌من‌مانتیث–فائو برای روزهای مختلف سال در منطقه سیستان را نشان می‌دهد. مقدار تبخیر–تعرق روزانه از حدود ۲۱ میلی‌متر در روز در مردادماه (July) تا ۰/۷ میلی‌متر در روز در ابتدای دی‌ماه (December) متغیر بود. حدود ۶۰ درصد مقدار تبخیر–تعرق در چهار ماه June تا September اتفاق می‌افتد. در این چهار ماه بادهای ۱۲۰ روز در منطقه سیستان جریان دارد و عامل اصلی تبخیر–تعرق می‌باشد. مجموع تبخیر در سه ماه December، January و February برابر با ۸ درصد مقدار تبخیر–تعرق سالانه می‌باشد.

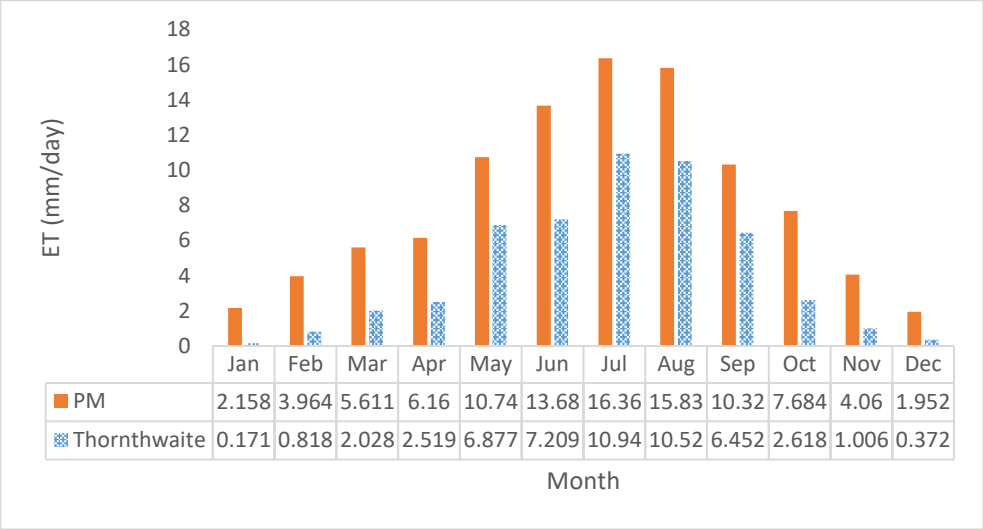


شکل ۲. مقدار تبخیر–تعرق روزانه و میانگین ماهانه بر اساس روش فائو پن‌من–مانتیث

ارزیابی روش ترونت‌وایت (۱۹۴۸)

شکل (۳) میانگین تبخیر–تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و ترونت وایت را برای منطقه سیستان در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. در تمامی ماه‌های سال مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با روش فائو پن‌من–مانتیث بیشتر از مقدار تبخیر تعرق به‌دست‌آمده از روش ترونت‌وایت است. تراژکوویچ و کولاکوویچ[1] (۲۰۰۹) نشان دادند که روش ترونت‌وایت مقدار تبخیر–تعرق را کم برآورد می‌کند. ترایکوویچ[2] و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که مقدار تبخیر–تعرق به‌دست‌آمده با استفاده از روش ترونت‌وایت برای مناطقی در صربستان کمتر از مقدار تبخیر–تعرق فائو پن‌من–مانتیث است. سپاهخواه و رزاقی (۲۰۰۹) برای ناحیه گرم خشک شیراز در جنوب غربی ایران نشان دادند که مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با روش ترونت‌وایت کمتر از مقدار تبخیر–تعرق به‌دست‌آمده با روش لایسیمتر است. گارسیا[3] و همکاران (۲۰۰۴) برای مناطق مرتفع بلوی نشان داد که روش ترونت‌وایت مقدار تبخیر–تعرق ماهانه را ۵۰٪ نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتری کمتر برآورد می‌کند. گارسیا و همکاران (۲۰۰۴) دلیل تفاوت به‌دست‌آمده را ارتفاع زیاد و در نتیجه تأثیر بر روی تابش بیان کردند. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد که روش ترونت‌وایت (۱۹۴۸) روش مناسبی برای برآورد تبخیر–تعرق در منطقه سیستان نمی‌باشد. به‌عنوان‌مثال در ماه july مقدار ۵/۴۲ میلی‌متر در روز (حدود ۵۰ درصد) مقدار میانگین تبخیر تعرق ماهانه را کمتر برآورد کرده است. جدول (۱) مقدار شاخص‌های آمار برای روش‌های مختلف برآورد تبخیر–تعرق روش ترونت‌وایت را نشان می‌دهد. مقدار RMSE در روش ترونت‌وایت برابر ۴/۱۵ میلی‌متر بر روز و مقدار MBE برابر ۳/۹۲– میلی‌متر بر روز و مقدار r برابر با ۰/۵۲ بود که نشان‌دهنده دقت پایین روش مذکور است. در تحقیق ترایکوویچ و همکاران (۲۰۱۹) برای منطقه‌ای در صربستان مقدار RMSE بین ۰/۵۷ تا ۰/۶۶ میلی‌متر بر روز متغیر بود. مقدار میانگین سالانه تبخیر–تعرق روش فائو پن‌من–مانتیث ۸/۲۱ میلی‌متر در روز است، این مقدار در روش ترونت‌وایت (۱۹۴۸) برابر با ۴/۳۱ میلی‌متر در روز است که ۴۸ درصد متفاوت از مقدار واقعی می‌باشد.

1 . Trajkovic & Kolakovic
2 . Trajkovic
3 . Garcia



شکل ۳. میانگین تبخیر-تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و ترونت وایت

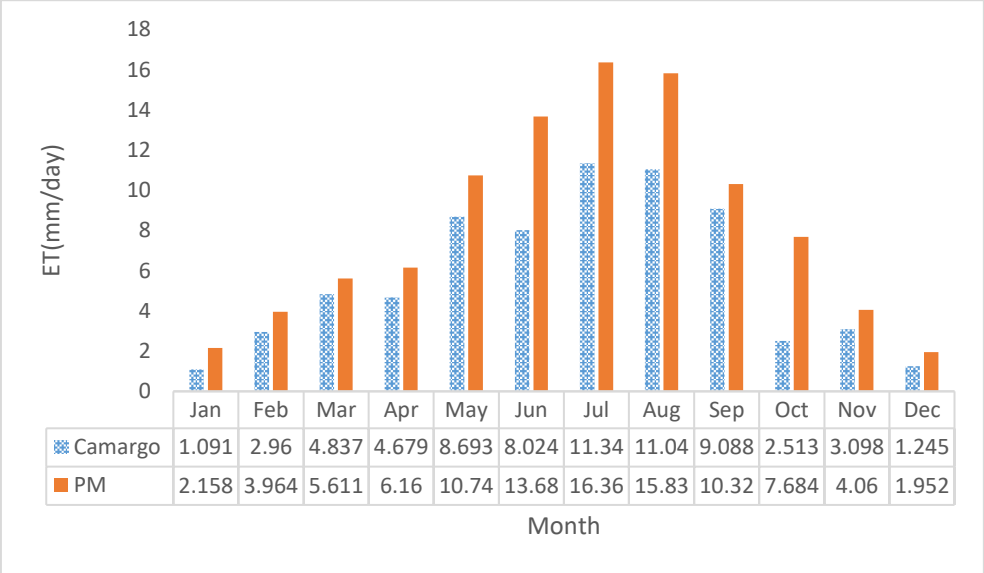
جدول ۱. مقدار شاخص‌های آماری با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه تبخیر-تعرق ترونت‌وایت

Method	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	r	میانگین سالانه
تورنثویت[1] (۱۹۸۴)	۴/۱۵	-۳/۹۲	۰/۵۲	۴/۳۱
کامارگوئت[2] و همکاران (۱۹۹۹)	۳/۱۴	-۲/۴۹	۰/۷۰	۵/۷۵
پریرا و پرویت (۲۰۰۴)	۳/۸۵	-۳/۱۷	۰/۶۱	۵/۰۶
ترایکوویچ و همکاران (۲۰۰۵)	۵/۲۵	-۴/۸۰	۰/۴۱	۳/۴۱
رابطه ۸	۴/۲۴	-۳/۸۴	۰/۵۳	۴/۳۴
باتیستا و همکاران (۲۰۰۹)	۶/۶۸	۳/۶۳	۱/۴۴	۱۱/۸۴

ارزیابی روش کامارگو و همکاران (۱۹۹۹)

شکل (۴) مقایسه روش فائو پن‌من-مانتیث و کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) را نشان می‌دهد. شکل (۴-۷) نشان می‌دهد که روش کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) و استفاده از دمای موثر (T_{eff}) به‌جای دمای میانگین (T_{ave}) دقت روش ترونت‌وایت را افزایش داده است. مقدار k در این روش برابر با ۰/۷۲ است. در این روش نیز مقدار تبخیر-تعرق در تمامی ماه‌ها کمتر از روش فائو پن‌من-مانتیث است. بر اساس جدول (۱) در روش کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) مقدار RMSE در روش ترونت‌وایت برابر ۳/۱۴ میلی‌متر در روز و مقدار MBE برابر ۲/۴۹- میلی‌متر بر روز و مقدار r برابر با ۰/۷ بود که نشان می‌دهد دقت این روش در مقایسه با روش‌های دیگر بیشتر است اما به‌طورکلی دقت این روش نیز نسبت به روش PMF-56 کم است. سپاسخواه و رزاقی (۲۰۰۹) نشان داد که استفاده از T_{eff} باعث افزایش دقت روش ترونت‌وایت می‌گردد.

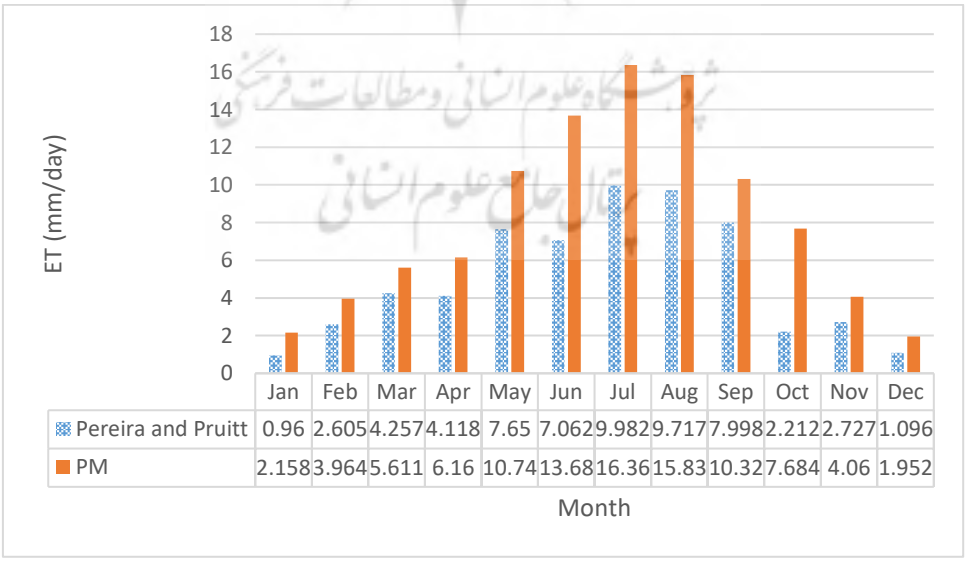
1 . Thornthwaite
2 . Camargoet



شکل ٤. میانگین تبخیر-تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و کامارگو و همکاران (۱۹۹۹)

ارزیابی روش پریرا و پروت (۲۰۰٤)

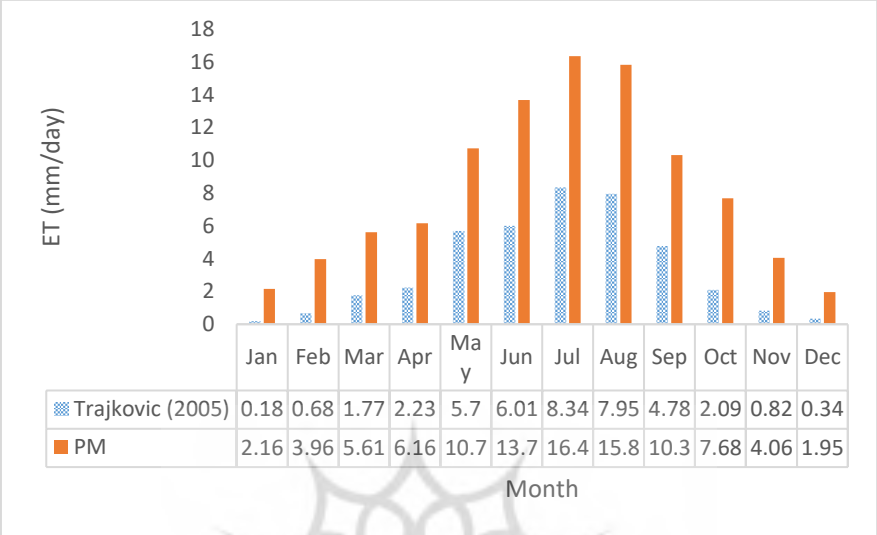
پریرا و پروت (۲۰۰۴) از روش کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) استفاده کرده و مقدار k را برابر با ۰/۶۹ قرار داد. مانند دو روش قبلی مقدار تبخیر-تعرق محاسبه‌شده کمتر از روش فائو پن‌من-مانتیث است (شکل ۵). مقدار RMSE در روش ترونت‌وایت برابر ۳/۸۵ میلی‌متر در روز است که از مقدار روش ترونت‌وایت (۱۹۴۸) بهتر است، اما نتایج کامارگو و همکاران (۱۹۹۹) نتایج بهتری نسبت به این روش دارد. مقدار r برابر ۰/۶۱ می‌باشد. مقدار MBE برابر ۳/۱۷- میلی‌متر بر روز است که نشان‌دهنده کم برآورد نسبت به فائو پن‌من-مانتیث است. در تحقیق تراجکویچ و همکاران (۲۰۱۹) روش پریرا و پروت (۲۰۰۴) مقادیر تبخیر-تعرق را بیش برآورد انجام داده بود و در مناطق نسبتاً مرطوب (sub-humid) نسبت به روش‌های دیگر دارای بهترین نتایج بود.



شکل ۵. میانگین تبخیر-تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و پریرا و پروت (۲۰۰٤)

ارزیابی روش تراجکویچ (۲۰۰۵)

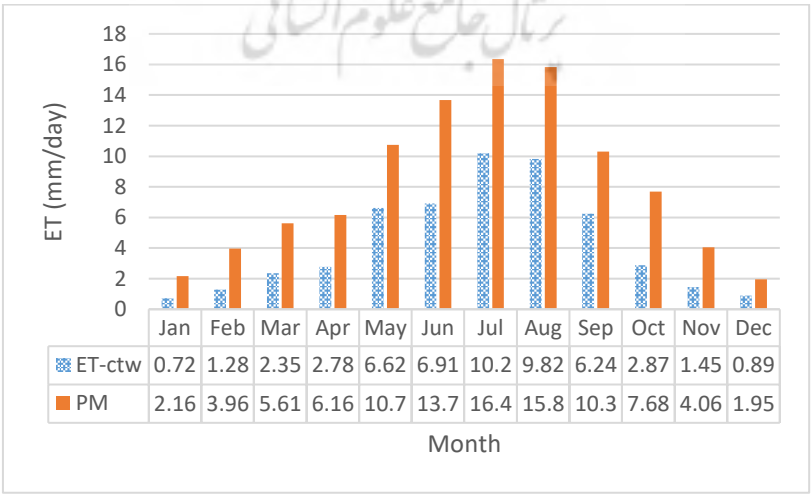
جدول (۱) و شکل (۶) نتایج مربوط به روش تراجکویچ (۲۰۰۵) را نشان می‌دهد. مقدار RMSE در روش ترونت‌وایت برابر ۵/۲۵ میلی‌متر در روز و مقدار MBE برابر ۴/۸۰- میلی‌متر بر روز و مقدار r برابر با ۰/۴۱ بود. میانگین مقدار تبخیر-تعرق سالانه این روش ۳/۴۱ میلی‌متر در روز است که ۵۸٪ با میانگین تبخیر-تعرق سالانه روش فائو پن‌من-مانتیث متفاوت است. این روش در مقایسه با سایر روش‌های موردمطالعه دارای نتایج ضعیف‌تر هست.



شکل ٦. میانگین تبخیر-تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و تراجکویچ (۲۰۰۵)

ارزیابی روش معادله (۸)

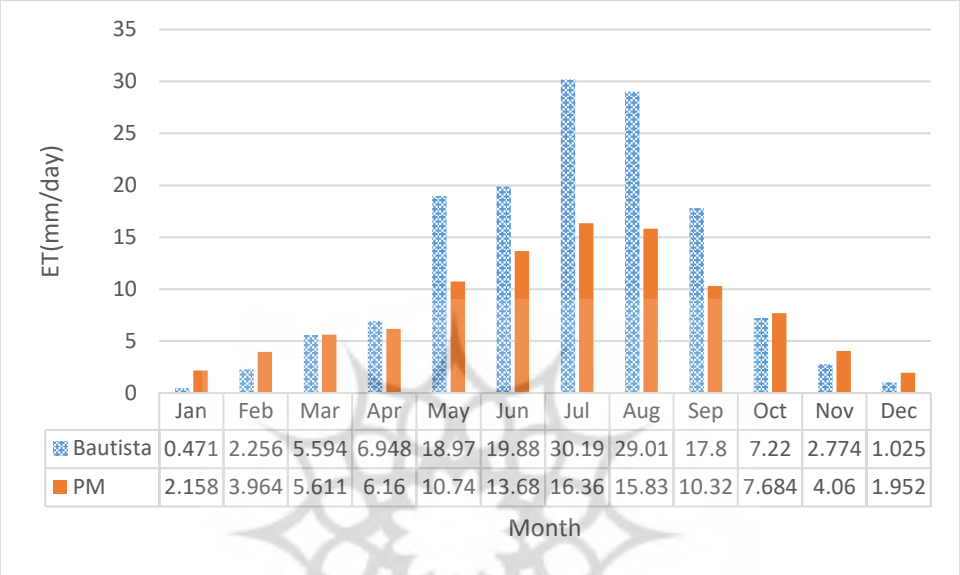
شکل (۷) نشان می‌دهد که استفاده از معادله (۸) دقت روش تراجکویچ (۲۰۰۵) را افزایش داده است. مقدار RMSE در این روش برابر ۴/۲۴ میلی‌متر در روز و مقدار MBE برابر ۳/۸۴- میلی‌متر بر روز و مقدار r برابر با ۰/۵۳ به دست آمد که دقت آن نسبت به روش تراجکویچ (۲۰۰۵) بهتر است. میانگین تبخیر-تعرق سالانه این روش ۴/۳۴ بوده و ۴۷٪ با میانگین سالانه متفاوت هست درصورتی‌که میانگین سالانه روش تراجکویچ (۲۰۰۵) ۵۸٪ تفاوت دارد. تراجکویچ (۲۰۰۵) نشان داد که استفاده از معادله (۳-۸) دقت را افزایش داده است.



شکل ۷. میانگین تبخیر-تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و معادله (۸)

ارزیابی روش باتیستا و همکاران (۲۰۰۹)

شکل (۸) نتایج مربوط روش باتیستا و همکاران (۲۰۰۹) را نشان می‌دهد. در بین روش‌های موردمطالعه فقط روش باتیستا و همکاران (۲۰۰۹) مقدار تبخیر–تعرق را بش برآورد انجام می‌دهد. میانگین مقدار تبخیر سالانه در این روش برابر با ۱۱/۸۴ می‌باشد که حدود ۴۴٪ بیش برآورد انجام داده است. مقدار MBE برابر با ۳/۶۳ میلی‌متر در روز هست. تراجکویچ و همکاران (۲۰۱۹) برای مناطقی در اروپا نشان داد که روش باتیستا و همکاران (۲۰۰۹) مقدار تبخیر–تعرق را بیش برآورد انجام می‌دهد همچنین مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده در این روش در تحقیق تراجکویچ و همکاران (۲۰۱۹) دارای دقت پایینی بود.



	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Bautista	0.471	2.256	5.594	6.948	18.97	19.88	30.19	29.01	17.8	7.22	2.774	1.025
PM	2.158	3.964	5.611	6.16	10.74	13.68	16.36	15.83	10.32	7.684	4.06	1.952

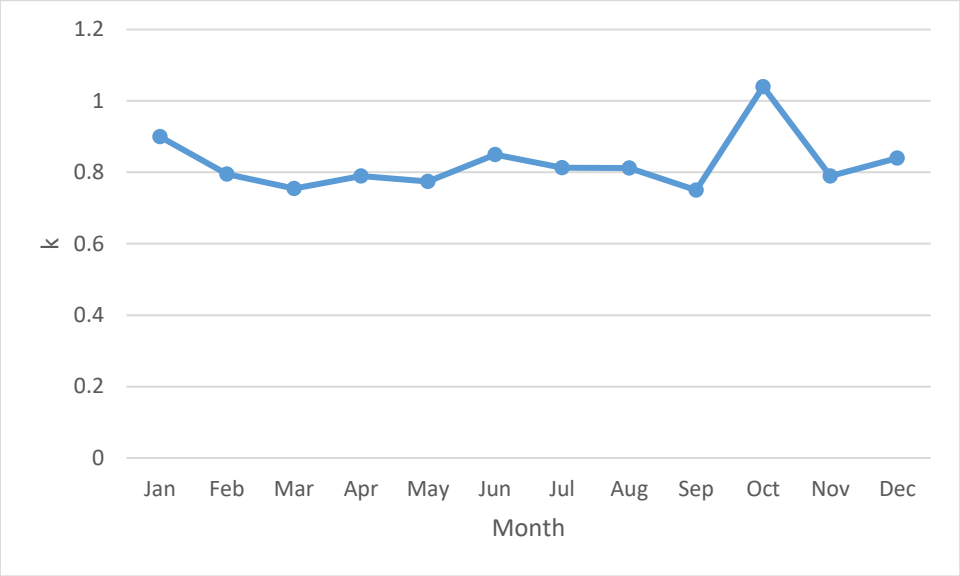
شکل ۸. میانگین تبخیر–تعرق ماهانه فائو پن‌من مانتث و باتیستا و همکاران (۲۰۰۹)

بهینه کردن مقدار k در معادله ترونت‌وایت

بهترین مقدار ماهیانه k (مقدار بهینه) در رابطه (۵) با استفاده از روش سعی و خطا و حداقل کردن مقدار به دست آمد. که مقدار آن برای ماه‌های مختلف در جدول (۲) و شکل (۹) نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب k از ۰/۷۵۵ در ماه March تا مقدار ۱/۰۴ در October متغیر بوده و مقدار میانگین آن برابر با ۰/۸۲۵ است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقدار k دامنه دما $(A = T_{max} - T_{min})$ می‌باشد. هرچه مقدار A کمتر باشد مقدار k افزایش می‌یابد. در این تحقیق ماه اکتبر با مقدار A برابر با ۸/۲۶ درجه سانتی‌گراد دارای کمترین مقدار است در نتیجه مقدار k در این ماه دارای بیشترین مقدار می‌باشد. احمدی و فولادمند (۲۰۰۸) برای تعدادی از شهرهای استان فارس و اطراف استان فارس مقدار ضریب k بین ۰/۵۵ تا ۱/۱۲ متغیر بود. متغیر بودن مقدار ضریب k در این تحقیق نسبت به احمدی و فولادمند (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی و مکانی تأثیر زیادی در مقدار این ضریب دارد.

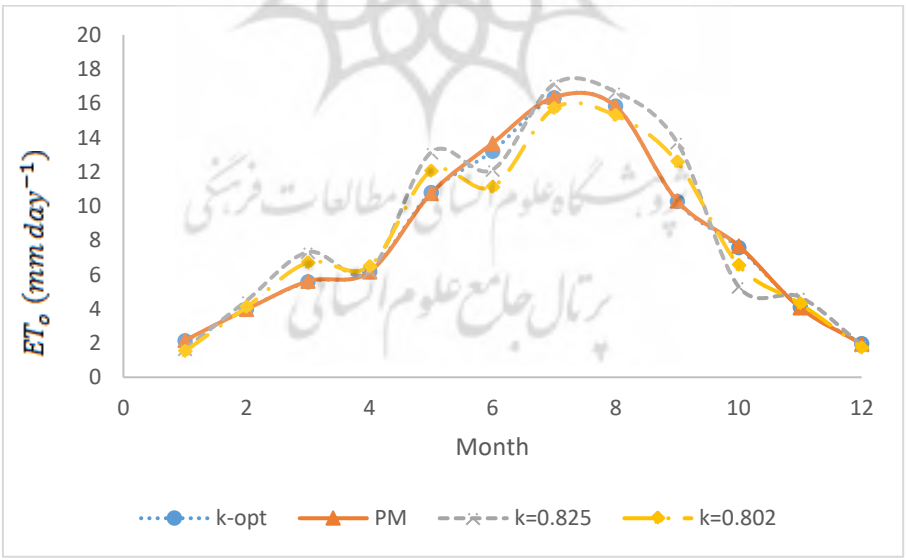
جدول ۲. بهترین مقدار ضریب k برای ماه‌های مختلف در منطقه سیستان

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین
ضریب k	۰/۹۰	۰/۷۹۵	۰/۷۵۵	۰/۷۹	۰/۷۷۴	۰/۸۵	۰/۸۱۳	۰/۸۱۲	۰/۷۵	۱/۰۴	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۸۲۵



شکل ۹. مقدار ضریب k در ماه‌های مختلف سال

با استفاده از گزینه solver و حداقل کردن مربعات خطا بین تبخیر–تعرق ترونت‌وایت و روش فائو پن‌من–مانتیث نیز مقدار ضریب k به دست آمد که برابر با ۰/۸۰۲ بود. در ادامه با استفاده از سه مقدار ضریب k شامل، ضریب بهینه متغیر (k_{opt})، میانگین ضریب متغیر ($k_{0.825}$) و به‌دست‌آمده از گزینه solver و حداقل کردن مربعات خطا ($k_{0.802}$) مقدار تبخیر–تعرق محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول (۳) شاخص‌های آماری مقدار تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با ترونت‌وایت اصلاح‌شده بر اساس ضریب k مشخص‌شده است. همچنین برای درک بهتر در شکل (۱۰) موارد گفته‌شده رسم گردیده هست.



شکل ۱۰. مقدار تبخیر–تعرق به‌دست‌آمده با روش ترونت‌وایت بر اساس مقادیر مختلف ضریب k در ماه‌های مختلف سال در مقایسه با روش فائو پن‌من–مانتث

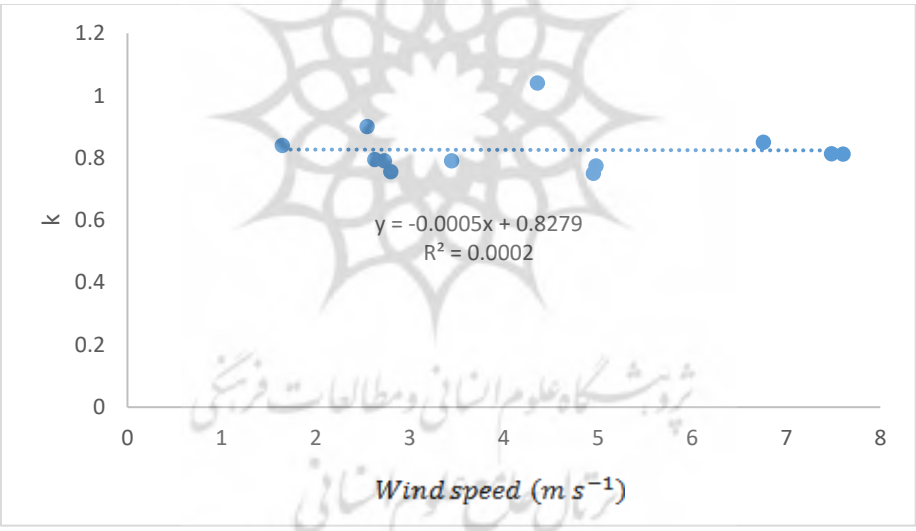
در روش استفاده از ضریب k بهینه متغیر مقدار RMSE برابر ۰/۱۴ میلی‌متر در روز بوده است. در تحقیق احمدی و فولادمند (۲۰۰۸) مقدار RMSE برای مقدار ضریب k بهینه متغیر بین ۰/۱۳ تا ۲/۰۹ میلی‌متر در روز متغیر بود. مقدار

RMSE بر اساس $k_{0.825}$ و $k_{0.802}$ به ترتیب برابر با ۱/۵۹ و ۱/۱۹ است. مقدار شاخص r در روش k_{opt} و $k_{0.802}$ برابر با ۰/۹۹ و کمتر از یک هست. مقدار MBE برای روش $k_{0.825}$ برابر با ۰/۴۸ میلی‌متر در روز و نشان‌دهنده بیش برآورد این روش هست. میانگین سالانه تبخیر–تعرق روش فائو پن‌من–مانتث برابر با ۸/۲۱ میلی‌متر در روز هست که مقادیر بیان‌شده در جدول (۳) نزدیک به آن است. به‌طورکلی استفاده از k_{opt} دارای بهترین نتایج و پس‌ازآن $k_{0.802}$ قرار دارد.

جدول ۳. مقدار شاخص‌های آماری تبخیر–تعرق محاسبه‌شده با ترونت‌وایت اصلاح‌شده بر اساس ضریب k

ضریب k	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	r	میانگین سالانه
k_{opt}	۰/۱۴	−۰/۰۴	۰/۹۹	۸/۲۳
۰/۸۲۵	۱/۵۹	۰/۴۸	۱/۰۶	۸/۶۹
۰/۸۰۲	۱/۱۹	−۰/۰۳	۰/۹۹	۸/۱۷

شکل (۱۱) رابطه بین مقدار k بهینه و سرعت باد را نشان می‌دهد. نتایج شکل (۱۱) نشان می‌دهد که رابطه مناسبی بین سرعت باد و مقدار ضریب k وجود ندارد درنتیجه نمی‌توان از آن برای به دست آوردن ضریب استفاده کرد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که چنانچه ازk_{opt}یا $k_{0.802}$ استفاده کنیم به نتایج رضایت‌بخشی در محاسبه تبخیر–تعرق در منطقه سیستان می‌رسیم.



شکل ۱۱. رابطه بین سرعت باد و مقدار ضریب k

نتیجه‌گیری

تبخیر– تعرق یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه آب در طبیعت است و تعیین دقیق آن برای مطالعات توازن آبی، آبیاری و مدیریت منابع آب ضروری است. منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز و تغییرات دمایی بالای شبانه‌روز در ایران منحصربه‌فرد است. روش‌های ترونت–وایت و پرستلی تیلور به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز ندارند و کاربرد آن‌ها در مناطقی که داده‌های هواشناسی در دسترس نیست می‌تواند مفید باشد. در این تحقیق مقدار تبخیر–تعرق روش‌های ترونت–وایت و پرستلی تیلور در مقایسه با روش پنمن– مونتیث فائو مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ۶۰ درصد مقدار تبخیر–تعرق منطقه سیستان در چهار ماه June تا

September که بادهای ۱۲۰ روزه می‌وزد اتفاق می‌افتد. ۶ روش مختلف موجود در منابع برای روش ترونت‌وایت مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که اکثر این روش‌ها مقدار تبخیر–تعرق را کم برآورد می‌کند که با نتایج گارسیا و همکاران (۲۰۰۴) برای کشور بلوی و تراجکویچ و همکاران (۲۰۱۹) برای صربستان در اروپا همخوانی دارد.. ضریب تجربی دمای موثر (k) در معادله ترونت‌وایت اصلاح و مقدار بهینه آن در ماه‌های مختلف ارائه گردید. نتایج نشان داد مقدار k بین ۰/۷۵۵ تا ۱/۰۴ در منطقه سیستان متغیر هست. میانگین ضریب k در منطقه سیستان برابر با ۰/۸۲۵ به‌دست‌آمده است. احمدی و فولادمند (۲۰۰۸) نیز مقدار ضریب k را برای تعدادی از شهرهای استان فارس بین ۰/۵۵ تا ۱/۱۲ به دست آوردند. نتایج نشان داد که چنانچه از مقدار k برابر با ۰/۸۰۲ استفاده کنیم نتایج بسیار بهبود می‌یابد. ازاین‌رو، بر اساس این مطالعه، تبخیر– تعرق مرجع را می‌توان به‌راحتی با داده‌های هواشناسی موجود و معادله تورنت‌وایت واسنجی شده برای منطقه بادخیز سیستان محاسبه کرد. در کشورهای درحال‌توسعه که داده‌های با کیفیت خوب نسبتاً کمیاب هستند، استفاده از چنین روش‌های ساده ممکن است برای کشاورزان و سازمان‌های محلی مفید باشد. با توجه به نقش کلیدی آب در کشاورزی پایدار سیستان، برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس برآوردهای ET_O و آموزش کشاورزان برای استفاده از چنین ابزارهای آسان، باعث افزایش آبیاری می‌شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-7644 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱) روشن، غلامرضا؛ خوش‌اخلاق، فرامرز و کرمپور، مصطفی. (۱۳۹۰). ارزیابی و اصلاح مدل مناسب تبخیر و تعرق بالقوه برای ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۳(۷۸)، ۶۸–۴۹.

۲) طالبی، علی؛ پورمحمدی، سمانه و رحیمیان، محمد حسن. (۱۳۸۹). بررسی عوامل موثر در تبخیر تعرق مرجع، با استفاده از آنالیز حساسیت معادله فائو– پنمن– مانتیث (مطالعه موردی: ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۲(۷۳)، ۱۱۰–۹۷.

References

1) Ahmadi, S.H., & Fooladmand, H.R., (2008) Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, south of Iran. *Irrigation Science, 26*(4), 303–312.

2) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirement. *Irrigation and Drainage Paper.No.56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.*

3) Almorox, J., Quej, V.H., & Martí, P., (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology, 528*, 514–522.

4) Amatya, D.M., & Harrison, C.A., (2016). Grass and forest potential evapotranspiration comparison using five methods in the Atlantic coastal plain. *Journal of Hydrology Engineering, 21*(5), 05016007.

5) Aschonitis, V. G., Papamichail, D., Demertzi, K., Colombani, N., Mastrocicco, M., Ghirardini, A., Castaldelli, G., & Fano, E.A. (2017). High-resolution global grids of revised Priestley–Taylor and Hargreaves–Samani coefficients for assessing ASCE-standardized reference crop evapotranspiration and solar radiation. *Earth System Science Data, 9*, 615–638.

6) Aschonitis V.G., Touloumidis D., Veldhuis M.C., & Miriam Coenders-Gerrits, M., (2022). Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices. *Earth System Science Data, 14*, 163–177.
7) Bakundukize, C., Van Camp, M., & Walraevens, K., (2011). Estimation of Groundwater Recharge in Bugesera Region (Burundi) using Soil Moisture Budget Approach. *Geologica Belgica, 14*(1), 85–102.
8) Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C., (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi–arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera, 22*(4), 331–348.
9) Camargo, A.P., Marin, F.R., Sentelhas, P.C., & Picini, A.G., (1999) Adjust of the Thornthwaite's method to estimate the potential evapotranspiration for arid and superhumid climates, based on daily temperature amplitude. *Rev Bras Agrometeorol, 7(*2), 251–257.
10) Chari, M.M., Poozan, M.T. & Afrasiab, P., (2020). Modelling soil water infiltration variability using scaling. *Biosystems Engineering, 196*, 56-66.
11) Dinpashoh Y. (2006). Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. *Agricultue water management 84*, 123-129.
12) Droogers, P., & Allen, R.G., (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation Drainage System, 16*, 33–45.
13) Garcia, M., Raes, D., Allen, R.G., & Herbas, C., (2004). Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology, 125*(1), 67-82.
14) Jain, P. K., & Sinai, G., (1985). Evapotranspiration Model for Semiarid Regions. *Journal Irrigation and Drainage Engineering, 111*, 369–379.
15) Palmer, W.C., (1965) *Meteorological drought*. US weather bureau technical paper, Washington D.C.
16) Pereira, A.R., & Pruitt, W.O., (2004). Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricuture Water Managmen, 66*(3), 251–257.
17) Roshan, G. H., Khoshakhlagh, F., & Karampur, M., (2011). Assessing, Modifying and Synthesizing a Suitable Model for Estimation of Potential Evapotranspiration in Iran. *Physical Geography Research, 43*(78), 49-68. [In Persian].
18) Sepaskhah, A.R., & Razzaghi, F., (2009). Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves-Samani methods for estimation of daily evapotranspiration in a semi-arid region of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science, 55*(1), 51–66.
19) Talebi, A., Poormohammadi, S., & Rahimian, M. H., (2010). Investigation of effective factor on refrence evapotranspiration using sensitivity analysis of FAO- Penman-Monteith equation (Case-study: Yazd, Tabas and Marvast stations). *Physical Geography Research, 42*(73), 79-110. [In Persian].
20) Thornthwaite, C.W., (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review, 38*(1), 55–94.
21) Trajkovic, S., & Kolakovic, S., (2009). Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management, 23*(14), 3057-3067.
22) Trajkovic, S., (2005). Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *Journal Irrigation and Drainage Engineering, 131*(4), 316–323
23) Trajkovic, S., Gocic M., Pongracz, R., & Bartholy, J., (2019). Adjustment of Thornthwaite equation for estimating evapotranspiration in Vojvodina. *Theoretical and Applied Climatology*. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02873-1.
24) Tsakiris G, Vangelis H (2005) Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Water Europe, 9*(10), 3–11.

25) Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *Journal of Climate, 23*(6), 1696–1718.
26) Wang, G., Gong, T., Lu, J., Lou, D., Hagan, D.F.T., Chen, T., (2018). On the longterm changes of drought over China (1948–2012) from different methods of potential evapotranspiration estimations. *International Journal of Climatology, 38*(7), 2954–2966.
27) Zhang, Y., Liu, S., Wei, X., Liu, J., and Zhang, G., (2008). Potential Impact of Afforestation on Water Yield in the Sub-Alpine Region of Southwestern China. *Journal of the American Water Resources Association, 44*, 1144–1153.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی