

Modification of the Turc Model Coefficient for Estimating Reference Evapotranspiration in Windy Regions of Iran

Eisa Nadim-Mir¹, Mohammad Mahdi Chari²✉, Parviz Haghighatjo³, Parisa Kahkhamogaddam⁴, Mahdi Keikha⁵

1. Department of Water Engineering, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: hc.mir1371@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Water Engineering, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: mmahdichari@uoz.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: phjou40@uoz.ac.ir

4. Department of Water Engineering, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir

5. Department of Water Engineering, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: mahdikeikha@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

2 April 2026

Received in revised form:

8 June 2026

Accepted:

3 July 2026

Available online:

16 August 2026

Keywords:

Potential
Evapotranspiration,
Penman-Monteith,
Wind Speed,
Adjustment Factor.

ABSTRACT

Combination-based equations such as the Penman-Monteith (PM) model provide robust estimates, they require extensive meteorological data, which are often unavailable. Simpler empirical models such as the Turc (T) model which relies primarily on radiation and temperature are widely adopted as practical alternatives. In addition to radiation and air temperature, wind speed plays a critical role, particularly in regions prone to high winds. This study investigates the impact of wind speed on the accuracy of the Turc method and to develop a modification coefficient for the mentioned model in seven windy regions of Iran, including Ardabil, Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil. The study utilized 25 years of daily meteorological observations. The original coefficients of the Turc model group were not suitable for the stations in Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil. The best corrective coefficients for the selected model at the Aligoodarz and Bijar stations, calculated using the sum of squared errors method, were 0.18 and 0.0169, respectively. For the stations in Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil, a regression relationship was established between wind speed and the corrective coefficient of the selected model. The ET_0 values obtained through this approach exhibited excellent agreement with the standard Penman-Monteith (PM) method, as evidenced by NRMSE values of 0.04, 0.05, 0.07, and 0.06, respectively, and EF values exceeding 0.98 for all four stations. In contrast, for the Ardabil station, the original coefficients of the Turc model group yielded acceptable results, with an NRMSE below 0.21.

Citation: Nadim-Mir, E., Chari, M.M., Haghighatjo, P., Kahkhamogaddam, P., & Keikha, M. (2025). Modification of the Turc Model Coefficient for Estimating Reference Evapotranspiration in Windy Regions of Iran. *Geographical planning of space quarterly journal*, 16 (2), 61-79.
<http://doi.org/10.30488/gps.2026.542318.3859>



Extended Abstract

Introduction

Water scarcity has emerged as one of the most critical environmental constraints on plant growth in many regions worldwide. Accordingly, accurate evapotranspiration (ET) estimation is vital for determining crop water requirements. The FAO-recommended Penman-Monteith (PM) model is the globally accepted standard for calculating reference evapotranspiration (ET_0). However, its application is often hindered by the need for extensive meteorological data, which are frequently incomplete or unreliable. Due to these limitations, scholars increasingly turn to simpler models requiring fewer inputs. Among these alternatives, radiation- and temperature-based models are the most widely used for ET_0 estimation. Among these, the Turc model is one of the simplest and most accurate empirical methods. Solar radiation intensity and air temperature are the primary meteorological factors influencing ET_0 . Nevertheless, in certain locations, such as windy areas, wind speed also plays a crucial role. Thus, the objectives of this study are twofold: first, to investigate the impact of wind speed on the accuracy of the Turc model in the windy regions of Iran, and second, to enhance the performance of this simple model by developing a modification coefficient for the Turc model employing average wind speed values.

Methodology

In this study, based on a review of the literature, the meteorological stations of Ardabil, Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil were selected. These stations were chosen due to their consistently high wind speeds compared to other synoptic stations in the country. The meteorological data used include air temperature, solar radiation, relative humidity, sunshine hours, and wind speed on a daily scale for the time period from 2000 to 2024. In this research, the Penman-Monteith (PM) model was utilized as the standard method for evaluating and calibrating the Turc model. The Turc model (T) is one of the simplest and most accurate

empirical models, which was first applied in Western Europe. The Turc model can provide reliable estimates of ET_0 . Various researchers have modified the model proposed by Turc (1961) for different regions. Several studies have shown that the T model tends to underestimate ET_0 in windy areas. Therefore, in this study, three different versions of the Turc model were employed. To calibrate the T model, three commonly adopted methods from previous research were applied. Method 1) Reference evapotranspiration values are estimated daily using the Penman-Monteith ($ET_0(\text{PM})$) and Turc ($ET_0(\text{T})$) models. Subsequently, by calculating the ratio $ET_0(\text{PM})/ET_0(\text{T})$, the correction factor for the Turc method (parameter α) is obtained at the specified scale.

Method 2: The Turc-group models are expressed as regression equations of the form $y=ax$, in which ET_0 is considered the dependent variable. Calibration of these models is based on the least squares criterion. According to this criterion, the parameter α is estimated such that the sum of squared errors (observed values minus predicted values) is minimized as much as possible. This procedure is performed using the Solver option in Microsoft Excel.

Method 3) A regression relationship is developed between the parameter α calculated from Method 1 and wind speed (treated as the independent variable). Therefore, in this method, α is not merely a single constant value, but rather a regression equation adjusted based on wind speed.

In this study, 60% of the data (15 years: 2000–2014) were used for calibration, and 40% of the data (10 years: 2014–2024) were used for evaluation. In order to comprehensively evaluate the models, the performance criteria RMSE, NRMSE, MBE, r , d , and EF were utilized in this study.

Results and Discussion

The results indicated that the T model, prior to calibration, did not provide a suitable estimate of ET_0 compared to the standard PM model for the stations of Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and

Manjil. The Zabol station exhibited the weakest results, with RMSE values exceeding 5.5 and d values lower than 0.64 for all evaluated models. In contrast, the Ardabil station, without calibration, indicated a very close agreement with the ET_0 values estimated by the standard model, achieving d values higher than 0.96 and RMSE values below 0.56 for all evaluated models. Across all studied stations, and based on the provided statistical indices (highest values of r and d , and lowest values of RMSE and MBE), the T(2) model demonstrated the highest agreement with the standard model. Therefore, the T(2) model was selected as the preferred model, and its correction coefficient was adjusted employing three methods.

For the stations of Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil, all three correction methods substantially improved the ET_0 estimation results. However, the correction method according to the regression relationship between parameter α and wind speed (Method 3) provided the best results, with NRMSE values of 0.04, 0.05, 0.07, and 0.06, EF values of 0.99, 0.98, 0.98, and 0.98, and d values of 0.99 for all the aforementioned stations, respectively.

For the stations of Ardabil, Aligudarz, and Bijar, no significant relationship was found between parameter α and wind speed. At the Ardabil station, all the investigated models had already produced satisfactory results before correction; however, after calibrating the selected T2 model, both approaches $\alpha=0.0126$ obtained from the ratio $ET_0(PM)/ET_0(T)$, and $\alpha=0.0117$ obtained utilizing the Solver option by minimizing the squared error slightly reduced the error and increased the efficiency coefficients.

For the Aligudarz and Bijar stations, the ET_0 estimation results were also greatly improved using both of the aforementioned methods. In these two stations, the least-squares error minimization method using the Solver tool provided slightly better results, with the highest EF values (0.94 and 0.97) and the lowest NRMSE values (0.12 and 0.09) and MBE values (−0.02 and −0.13) for Aligudarz and Bijar, respectively.

The evaluation results at the monthly scale exhibited that, for the Ardabil station, the ET_0 values obtained from the Turc (T) method before and after correction differed only slightly from those of the standard method, and after correction, these results became even closer to the standard method. In contrast, for the stations of Aligudarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil, the ET_0 values estimated by the selected method showed considerable differences from the standard method before correction. However, after applying the correction coefficient, they exhibited very good agreement with the standard Penman–Monteith (PM) method.

Conclusion

Radiation- and temperature-based models are among the most common and widely used approaches for estimating reference evapotranspiration (ET_0) worldwide. However, in windy regions, in addition to solar radiation intensity and air temperature, wind speed also plays a very important role in ET_0 estimation. In this study, the performance of Turc-group models with their original coefficients was evaluated against the standard Penman–Monteith (PM) model for seven windy synoptic stations in Iran. The results indicated that, for all survey stations, the T2 model demonstrated the highest agreement with the standard model. For the stations of Ardabil, Aligudarz, and Bijar, no suitable regression relationship was found between the parameter α and wind speed, and the best results were obtained using the least-squares error minimization method. At the Ardabil station, model calibration improved the results with NRMSE and EF values of 0.06 and 0.99, respectively. At the Aligudarz station, the results also enhanced after calibration, with NRMSE and EF values of 0.12 and 0.94, respectively. Similarly, for the Bijar station, calibration improved the results, yielding NRMSE and EF values of 0.09 and 0.97, respectively. For the stations of Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil, the best results were obtained by establishing a regression relationship between the parameter α and wind speed. At the Torbat-e Jam station, model calibration upgraded the results with

NRMSE and EF values of 0.04 and 0.99, respectively. At the Rafsanjan station, the results ameliorated after calibration with NRMSE and EF values of 0.05 and 0.98, respectively. Similarly, calibration improved the results for the Zabol station with NRMSE and EF values of 0.07 and 0.98, and for the Manjil station with values of 0.06 and 0.98, respectively.

The agricultural sector is the largest consumer of freshwater worldwide. Accurate determination of irrigation water requirements is crucial for improving the efficiency of agricultural water use, which in turn requires reliable estimation of evapotranspiration. Therefore, the results may prove beneficial in areas characterized by limited availability of meteorological data components.

Limitations and Suggestions: Despite the satisfactory performance of the corrected Turc (T) model in windy regions, this study is subject to several limitations: a) Due to the lack of access to long-term lysimeter data, the Penman-Monteith (PM) model was used as the standard method, which may involve uncertainty in certain climatic conditions. b) The estimation of solar radiation (R_s) may affect the accuracy of the calculated correction coefficient. c) The limited number of stations investigated may somewhat restrict the generalizability of the correction relationships to all windy regions throughout Iran.

In forthcoming research, it is recommended that the validation of the proposed correction coefficients be performed with direct lysimeter data whenever possible, and that the spatial scope of the study be expanded to a larger number of synoptic stations. Furthermore, the proposed relationship between the correction coefficient (α) and wind speed can be employed as a practical tool in irrigation scheduling systems and decision support systems, enabling rapid correction of ET_o estimates in windy and data-scarce regions.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Isa Nadim-Mir contributed to the research design, data analysis, and writing of the Results section. Mohammad Mehdi Chari was responsible for developing the main idea, preparing the theoretical framework, and writing the Discussion and Conclusion sections. Parviz Haghighatjo contributed to data collection and manuscript review. Parisa Kahkhamogaddam participated in the research design, data collection, selection of stations, writing of the Introduction section, and critical review of the scientific content. Mehdi Keikha contributed to data preparation and critical review of the scientific content.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This article is derived from a Master's thesis conducted with the support of the University of Zabol and the National Meteorological Organization. The authors also express their sincere appreciation to all those who contributed to the quality evaluation of the manuscript.



اصلاح ضریب مدل تورک در برآورد تبخیر - تعرق مرجع برای مناطق بادخیز ایران

عیسی ندیم میر^۱، محمدمهدی چاری^۲✉، پرویز حقیقت‌جو^۳، پریسا کهخامقدم^۴، مهدی کیخا^۵۱- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: he.mir1371@gmail.com۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mmahdichari@uoz.ac.ir۳- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: phjou40@uoz.ac.ir۴- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir۵- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mahdikeikha@uoz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

معادلات ترکیبی مانند مدل پنمن - مونتیث فائو (PM) به عوامل هواشناسی زیادی نیاز دارند که همیشه در دسترس نیستند. لذا مدل‌های تجربی ساده مانند مدل تورک (T) که مبتنی بر تابش و دما می‌باشد اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. باین وجود علاوه بر تابش و دمای هوا، سرعت باد به خصوص در مناطق بادخیز بسیار مهم است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سرعت باد بر دقت روش تورک و همچنین توسعه ضریب مدل مذکور برای هفت منطقه بادخیز ایران شامل: اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل صورت پذیرفت. برای این منظور از اطلاعات هواشناسی روزانه ۲۵ ساله استفاده گردید. نتایج حاکی از آن بود برای ایستگاه‌های الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل ضرایب اصلی مدل‌های گروه تورک مناسب نمی‌باشد. بهترین ضریب اصلاحی مدل منتخب برای ایستگاه‌های الیگودرز و بیجار با روش مجموع مجذور مربعات خطا به ترتیب ۰/۱۸ و ۰/۱۶۹ محاسبه گردید. برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل یک رابطه رگرسیونی بین سرعت باد و ضریب اصلاحی مدل منتخب ارائه شد و مقادیر ET_0 به دست آمده با این روش به ترتیب با مقادیر NRMSE برابر ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ و همچنین مقادیر EF بالاتر از ۰/۹۸ برای هر چهار ایستگاه مذکور، تطابق بسیار مناسبی در مقایسه با روش استاندارد PM ارائه نمودند. این در حالی است که برای ایستگاه اردبیل ضرایب اصلی مدل‌های گروه تورک با NRMSE کمتر از ۰/۲۱ نتایج قابل قبولی را ارائه کرد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۱/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۴/۱۲

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۵/۲۵

واژگان کلیدی:

تبخیر - تعرق پتانسیل،

پنمن - مونتیث،

سرعت باد،

ضریب اصلاحی.

استناد: ندیم میر، عیسی؛ چاری، محمدمهدی؛ حقیقت‌جو، پرویز؛ کهخامقدم، پریسا و کیخا، مهدی. (۱۴۰۵). اصلاح ضریب مدل تورک در برآورد

تبخیر - تعرق مرجع برای مناطق بادخیز ایران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۶ (۲)، ۶۱-۷۹.<http://doi.org/10.30488/gps.2026.542318.3859>

مقدمه

کمبود آب در بسیاری از مناطق جهان، به عنوان مهم ترین محدودیت محیطی برای رشد گیاهان تبدیل شده است، بنابراین دانستن تبخیر- تعرق برای برآورد نیاز آبی گیاهان ضروری است (Diouf et al., 2016). پدیده تبخیر- تعرق ارتباط نزدیکی با مسئله کمبود آب دارد (Kartal, 2024). تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) یک متغیر کلیدی در هیدرولوژی و منابع آب است (Dinpashoh & Allahverdipour, 2025). در سراسر جهان و برای اقلیم های مختلف جهت تخمین ET_0 ، از مدل استاندارد پنمن- مونتیث فائو (PM) که در سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) توصیه شده است استفاده می گردد (Allen et al., 1998; Muniandy et al., 2016). برتری مدل PM نسبت به سایر مدل های تخمین ET_0 به این دلیل است که مبتنی بر فیزیک است و بدون نیاز به هیچ گونه تنظیم پارامترهای ورودی می توان از آن در سراسر جهان استفاده کرد و در طیف وسیعی از نرم افزارها نیز پیاده سازی شده است (Alexandris & Kerkides, 2003; Kahkhamoghadam et al., 2024). با این حال تخمین ET_0 توسط مدل PM تا حد زیادی به دسترس بودن داده های هواشناسی محدود می شود. علاوه بر این ناقص بودن داده های هواشناسی و یا فقدان داده های قابل اعتماد نیز بسیار رایج است (دهقان و مکاری، ۱۳۹۸). این کاستی ها در کاربرد مدل PM پژوهشگران را به استفاده مدل های ساده که نیاز به داده های هواشناسی کمتری دارند سوق داده است (Allen & Pruitt, 1986; Maeda et al., 2010). از مدل های تجربی ساده دیگری که برای تخمین ET_0 توسط پژوهشگران ارائه شده است، می توان به مدل های هارگریوز- سامانی، تورک، بلانی- کریدل، پریستلی- تیلور، مک کینک، تابشی FAO-24، جنسن- هیز و ایرماک اشاره نمود (Kashyap & Panda, 2001; Xu & Singh, 2001; Trajkovic, 2007; Muniandy et al., 2016; Xu et al., 2016). مدل های مذکور به مؤلفه های هواشناسی از جمله پوشش ابر، مدت زمان تابش آفتاب، دمای هوا و رطوبت نسبی بستگی دارند، که در این میان مدل های مبتنی بر تابش و دما از جمله رایج ترین و پرکاربردترین مدل های تخمین ET_0 در سراسر جهان می باشند (Hargreaves & Samani, 1982; Besharat et al., 2013; Hassan et al., 2016; Fan et al., 2018b). در این میان، مدل تورک یکی از ساده ترین و دقیق ترین روش های تجربی است که از دما و تابش خورشیدی برای تخمین ET_0 استفاده می کند (Trajkovic & Kolakovic, 2009; Goh et al., 2021). با این وجود ارزیابی عملکرد مدل های مختلف تخمین ET_0 یک کار چالش برانگیز می باشد (Pandey et al., 2016) و برای استفاده از مدل های جایگزین نیاز به اعتبارسنجی و در صورت نیاز کالیبراسیون محلی است. اعتبارسنجی را می توان بر اساس اندازه گیری های لایسمتری یا مدل استاندارد PM انجام داد (Tabari et al., 2013). در ادامه به برخی از تحقیقات گذشته که در این ارتباط می باشند، اشاره می گردد. Yoder et al. (2005) هشت مدل تخمین ET_0 در مقایسه با اندازه گیری های لایسمتری در منطقه کامبرلند در جنوب شرقی ایالات متحده را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان بیان کردند که مدل PM بهترین تطابق را با اندازه گیری های لایسمتری دارد با این حال مدل تورک جایگزین مناسبی برای روش پیچیده PM می باشد زیرا مدل تورک به پارامترهای ورودی کمتری (فقط میانگین دمای هوا و تابش خورشیدی) نیاز دارد. در پژوهشی که جهت تخمین مقدار ET_0 در شرایط کمبود داده برای خط ساحلی شمال و جنوب ایران صورت گرفت چاری و کهخامقدم (۱۳۹۸) بیان کردند که در میان مدل های مورد بررسی، برای ایستگاه های خط ساحلی شمال، روش تورک و برای ایستگاه های واقع در خط ساحلی جنوبی نیز روش پریستلی- تیلور بهترین نتایج را در مقایسه با مدل PM ارائه می دهند. در پژوهشی دیگر سه مدل مختلف تخمین ET_0 در مقایسه با مدل استاندارد PM برای حوضه دریاچه ارومیه صورت گرفت، در این پژوهش دین پژوه و همکاران (۱۴۰۲) اظهار داشتند که مدل تورک مناسب ترین مدل

جهت تخمین ET_0 در حوضه مذکور می‌باشد. در اکثر پژوهش‌های مذکور به بررسی بهترین مدل‌های برآورد ET_0 با ضرایب اصلی آن‌ها پرداخته شد، اما مدل‌ها برای مناطق مورد مطالعه مورد واسنجی محلی قرار نگرفتند. دیوف^۱ و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی مدل تورک به عنوان جایگزینی برای مدل استاندارد PM در سنگال پرداختند. ایشان بیان کردند که مقادیر ET_0 محاسبه شده با مدل تورک تطابق مناسبی با مدل استاندارد ندارد و بعد از اصلاح ضرایب تجربی آن، و با فرض مستقل بودن از رطوبت نسبی توافق بهتری حاصل شد. برای پنج ایستگاه در قونیه، پژوهشگران عملکرد شش معادله تجربی تخمین ET_0 شامل پرستلی-تیلور، تورک، مک‌کینک، جنسن-هیز، بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی را در مقایسه با روش PM مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که در غیاب داده‌های مشاهداتی مدل‌های تورک، هارگریوز-سامانی و پرستلی-تیلور که به داده‌های کمتری نیاز دارند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش PM محسوب شوند (Sarlak & Bagcaci, 2020). در پژوهشی دیگر مدل اصلاح شده هارگریوز-سامانی در شرق ترکیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رویکرد اصلاح شده هارگریوز-سامانی، نسبت به رویکرد اصلاح نشده آن نتایج بهتری را ارائه می‌دهد (Uzunlar et al., 2022). مدل‌های مبتنی بر دما و تشعشع به طور گسترده برای تخمین ET_0 به خصوص در مناطق با داده‌های آب و هوایی محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا برای ۱۵ ایستگاه هواشناسی در تگزاس، پژوهشگران عملکرد سه مدل مبتنی بر دما و پنج روش مبتنی بر تابش را مورد ارزیابی قرار داده و با استفاده از روش PM کالیبره نمودند. نتایج این پژوهش حاکی از عملکرد خوب مدل‌های مبتنی بر دما و تشعشع به خصوص در فصول گرم سال بود (Su et al., 2022). در پژوهشی دیگر دو مدل مبتنی بر تابش خورشیدی در مناطق نیمه خشک و گرم مدیترانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که مدل‌های مبتنی بر تشعشع در تخمین ET_0 مشروط بر اینکه ثابت تجربی کالیبره شده باشد در مناطق مورد مطالعه دقیق هستند. همچنین در این پژوهش بیان شد که با توجه به محدودیت‌های داده‌های اقلیمی در بسیاری از مکان‌ها برای برنامه‌ریزی مناسب آبیاری، می‌توان از معادلات تجربی ساده مبتنی بر تابش خورشیدی استفاده کرد (Nikolaou et al., 2024). در پژوهشی عملکرد چندین روش تخمین ET_0 مبتنی بر دما در مقابل مدل استاندارد PM با استفاده از پارامترهای اقلیمی روزانه مورد ارزیابی قرار گرفت. این پژوهش نشان داد که علاوه بر دما عواملی مانند ارتفاع، ویژگی‌های زمین، شیب، موقعیت جغرافیایی، تابش خورشیدی و شرایط آب و هوایی به طور قابل توجهی بر مقادیر ET_0 مؤثر می‌باشند (Uzunlar & Dis, 2024). در پژوهش‌های ذکر شده در بالا علاوه بر انتخاب بهترین مدل جهت تخمین ET_0 ، به اصلاح و کالیبراسیون محلی مدل‌های منتخب، تنها با یک روش خاص اکتفا شده و در اصلاح آن‌ها به اثر مؤلفه باد پرداخته نشده است.

شدت تابش خورشیدی و دمای هوا عوامل اصلی هواشناسی هستند که بر ET_0 تأثیر می‌گذارند (Priestley & Taylor, 1972; Samani, 2000; Martí et al., 2015). باین وجود در بعضی مکان‌ها مانند مناطق بادخیز، مناطق آبیاری شده و مناطق آب و هوایی خشک، سرعت باد نیز به دلیل فرا رفت افقی و گرمای محسوس مهم است (Wright, 1996). سرعت باد در مناطق بادخیز از مهم‌ترین عوامل تبخیر-تعرق می‌باشد. در پژوهشی دارابی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی شش مدل مختلف ترون-وایت در مقایسه با روش PM و همچنین اصلاح آن برای منطقه بادخیز سیستان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که معادله اصلی ترون-وایت مقدار ET_0 را کمتر از روش استاندارد PM برآورد می‌کند. لذا ضریب مؤثر معادله مذکور برای منطقه سیستان اصلاح گردید و بدین طریق مدل ترون-وایت اصلاح شده برای منطقه

مورد مطالعه، نتایج را بسیار بهبود بخشید. در پژوهشی مشابه دارابی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی و واسنجی معادله پریستلی-تیلور برای تخمین ET_0 در مقایسه با روش استاندارد برای منطقه بادخیز سیستان پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب معادله پریستلی-تیلور برای منطقه سیستان دارای خطاها زیادی بوده و مناسب نمی‌باشد و پس از اصلاح این ضریب با استفاده از میانگین سرعت باد، مقدار ET_0 به دست آمده بهبود یافت. ندیم‌میر و همکاران (۱۴۰۴) بیان کردند که با افزایش سرعت باد سهم مؤلفه آیرودینامیک در مقایسه با مؤلفه توازن انرژی در برآورد ET_0 افزایش می‌یابد و لذا سهم مؤلفه آیرودینامیک که نشان‌دهنده جریان هوا و سرعت باد است، برای مناطق بادخیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که از پژوهش‌های پیشین مشاهده شد، به دلیل شرایط اقلیمی و توپوگرافی مختلف، شناسایی مناسب‌ترین مدل جهت تخمین ET_0 دشوار است. از طرفی مدل استاندارد PM تا حد زیادی به دسترس بودن داده‌های هواشناسی محدود می‌شود. لذا شناخت مدل‌های ET_0 که نیاز به داده‌های هواشناسی کمتری داشته باشد و بتواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مدل استاندارد بکار رود، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه ضروری می‌باشد. همچنین پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد از دقت مدل‌های تجربی در مقایسه با مدل استاندارد کاسته می‌شود و لذا استفاده از این مدل‌ها نیازمند اصلاح و واسنجی است. به همین منظور هدف این پژوهش ابتدا بررسی تأثیر سرعت باد بر دقت مدل‌های گروه تورک در مناطق بادخیز ایران و دوم بهبود عملکرد این مدل ساده از طریق اصلاح ضریب تجربی آن، با استفاده از سه روش الف) نسبت $\frac{ET_0(PM)}{ET_0(T)}$ ، ب) مجموع مجذور مربعات خطا و ج) ایجاد رابطه رگرسیونی بین پارامتر α و سرعت باد می‌باشد. بدین منظور از روش PM به‌عنوان روش استاندارد استفاده گردید. ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل اردبیل، الیگودرز، بیجار، رفسنجان، زابل و منجیل می‌باشند.

مبانی نظری

در بسیاری از مناطق جهان آب گران و کمیاب می‌باشد، لذا برنامه‌ریزی اصولی آبیاری برای کسانی که با امور آبیاری سروکار دارند بسیار حائز اهمیت است. با وجود اینکه هدف آبیاری نگه‌داشتن شرایط مناسب رطوبتی برای گیاه است، اما بایستی آبیاری با تخمین مناسب آب مورد نیاز گیاه برنامه‌ریزی شود (Turner, 1990). تخمین ET_0 به روش مستقیم پرهزینه و زمان‌بر بوده، لذا در غالب موارد از روش‌های غیرمستقیم که شامل طیف وسیعی از روش‌های تجربی (شامل مدل‌های تشعشعی، رطوبتی، دمایی و تشت تبخیر) تا روش‌های ترکیبی (پنمن-مونتیث) می‌باشد، استفاده می‌گردد (Sabziparvar et al., 2010). پژوهشگران در سراسر جهان برای تخمین تبخیر-تعرق بر اساس اقلیم و شرایط آب و هوایی منطقه و همچنین داده‌های جزئی هواشناسی مدل‌های بسیاری را توسعه داده‌اند که موضوع اصلی مورد توجه در اقلیم‌های مختلف، شناخت عملکرد این مدل‌ها می‌باشد (Perreira et al., 2014).

علی‌رغم اهمیت تبخیر-تعرق در توسعه استراتژی‌های مدیریت آبیاری، وابستگی آن به مؤلفه‌های اقلیمی از یک سو و تأثیرپذیری این مؤلفه‌ها از یکدیگر از سوی دیگر تخمین تبخیر-تعرق را با مشکل روبه‌رو ساخته است. همچنین هیچ‌یک از مدل‌های تجربی و نیمه تجربی پاسخگوی نیاز تمامی شرایط اقلیمی نبوده و تنها در شرایط خاصی جوابگو می‌باشند. باین‌حال وابستگی شدید تبخیر-تعرق به انرژی تشعشع و سرعت باد کاملاً پذیرفته شده است (Flores-Velazquez et al. 2022). کشور ایران با توجه به وسعت آن دارای مناطقی هست که سرعت و تداوم باد در آن مناطق محسوس می‌باشد. در این مناطق سرعت باد از مهم‌ترین عوامل تبخیر-تعرق می‌باشد.

روش پژوهش

نظر به این که هدف پژوهش حاضر، تخمین ET₀ با استفاده از مدل تورک برای مناطق بادخیز ایران است، لذا برای این منظور با توجه به بررسی منابع، ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل انتخاب شد. آستانه سرعت باد معمول برای بسیاری از توربین‌های بادی بیش از ۴ متر بر ثانیه می‌باشد، علاوه بر این تداوم سرعت باد در کل سال از دیگر معیارهای انتخاب مناطق بادخیز است (کهخامقدم و دلبری، ۱۴۰۴). دلیل انتخاب ایستگاه‌های مذکور نیز تداوم و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌های سینوپتیک کشور می‌باشد (گندم‌کار، ۱۳۸۲؛ دلبری و همکاران ۱۳۹۵؛ حنفی و ایران‌پور، ۱۳۹۶؛ جانبازقبادی، ۱۴۰۰؛ Pishgar- Mohamadi et al., 2021; Rahmani et al., 2014; Komleh & Akram, 2017). از سازمان هواشناسی ایران داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های مذکور به دست آمد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل پارامترهای دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد در مقیاس روزانه برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ می‌باشد. میانگین پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش برای ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و مقادیر میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (°E)	طول جغرافیایی (°N)	ارتفاع (m)	دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	ساعات آفتابی (h)	سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m s ⁻¹)
اردبیل	۳۸/۲۱۹	۴۸/۳۲۹	۱۳۳۵	۹/۸	۷۱	۶/۹	۳
الیگودرز	۳۳/۴۰۸	۴۹/۷۰۳	۲۰۲۲	۱۳	۴۰	۸/۷	۳/۶
بیجار	۳۵/۸۸۶	۴۷/۶۲۱	۱۸۸۳	۱۲	۴۸	۸/۲	۲/۵
تربت‌جام	۳۵/۲۹۵	۶۰/۵۶۵	۹۵۰	۱۶	۴۵	۸/۶	۳/۱
رفسنجان	۳۰/۳۸۳	۵۵/۹۳۳	۱۵۲۴	۱۹	۲۶	۹/۱	۲/۱
زابل	۳۱/۰۸۹	۶۱/۵۴۳	۴۸۹	۲۳	۲۹	۹/۲	۵/۱
منجیل	۳۶/۷۲۹	۴۹/۴۱۰	۳۳۸	۱۸	۶۰	۷/۵	۴/۳

مدل پنمن- مونتیث فائو (PM)

به علت عدم وجود داده‌های دقیق لایسیمتری، در این پژوهش از مدل PM به عنوان روش استاندارد جهت ارزیابی و واسنجی مدل تورک استفاده گردید. این مدل یکی از مهم‌ترین و عمومی‌ترین معادلات ترکیبی است و مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) را از معادله زیر برآورد می‌نماید (Allen et al., 1998):

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

در این معادله: ET₀ تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n 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 این معادله از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردیده است.

مدل تورک (T)

مطالعات زیادی برتری مدل PM را نشان داده‌اند، با این وجود استفاده از روش استاندارد در بسیاری از مناطق به دلیل فقدان و کمبود اطلاعات کامل هواشناسی محدود است، لذا در چنین شرایطی مدل‌های مبتنی بر تابش و دما برای تخمین ET_0 استفاده می‌شود (Samaras et al., 2014). مدل T یکی از ساده‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های تجربی است که اولین بار در اروپای غربی به صورت زیر ارائه گردید (Turc, 1961):

$$ET_0 = 0.013 \times C \times \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \times (23.88 \times R_s + 50) \quad T(1) \quad (2)$$

$$C = 1 + \frac{50 - RH}{70} \quad \text{if } RH < 50\% \quad (3)$$

$$C = 1 \quad \text{if } RH \geq 50\% \quad (4)$$

این مدل سپس در فلوریدا جنوبی به صورت زیر اصلاح گردید (Abtew, 1996):

$$ET_0 = 0.012 \times \frac{T_{max}}{T_{max} + 15} \times (23.88 \times R_s + 50) \quad T(2) \quad (5)$$

چندین مطالعه نشان دادند که برای مناطق بادخیز مدل T مقدار ET_0 را کمتر تخمین می‌زند لذا Xu and Singh (2000) تلاش کردند تا دقت مدل T را از طریق کالیبراسیون مجدد ضریب آن بهبود ببخشند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب جدید (۰/۰۱۵ به جای ۰/۰۱۳) نیز برآورد مدل را به طور قابل ملاحظه‌ای اصلاح نمی‌کند. Trajkovic and Kolakovic (2009) برای اولین بار برای حل مشکل تأثیر باد معادله زیر را ارائه نمودند:

$$ET_0 = C_u \times 0.013 \times \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \times (23.88 \times R_s + 50) \quad T(3) \quad (6)$$

$$C_u = -0.012 \times U_2^2 + 0.1109 \times U_2 + 0.9004 \quad (7)$$

در این معادلات T_{mean} و T_{max} به ترتیب میانگین و حداکثر روزانه دمای هوا ($^{\circ}C$)، R_s تابش خورشیدی یا تابش طول موج کوتاه (MJ/m^2d) و C_u ضریب تعدیل سرعت باد می‌باشد. سایر پارامترها در مدل PM معرفی شده‌اند. به دلیل عدم اندازه‌گیری تابش خورشیدی مقدار R_s از رابطه زیر محاسبه گردید (Allen et al., 1998):

$$R_s = \left[a_s + b_s \frac{n}{N} \right] R_a \quad (8)$$

در این معادله n و N به ترتیب ساعات آفتابی واقعی و حداکثر ساعات آفتابی (hr) و R_a تابش فرازمینی (MJ/m^2d) می‌باشد. برای به دست آوردن R_s از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردیده است.

واسنجی

به منظور واسنجی مدل T برای ایستگاه‌های مورد بررسی از سه روش استفاده می‌شود. روش اول: به گفته Allen et al. (1998)، کالیبراسیون مدل‌های تجربی و نیمه تجربی بر اساس مقایسه آن‌ها با مدل استاندارد PM می‌باشد. لذا در این پژوهش ابتدا مقدار تبخیر-تعرق از مدل پنمن-مونتیث ($ET_0(PM)$) و مدل تورک ($ET_0(T)$) به صورت روزانه تخمین زده می‌شوند. در ادامه با به دست آوردن نسبت $\frac{ET_0(PM)}{ET_0(T)}$ ، مقدار ضریب اصلاحی روش T (پارامتر α) در مقیاس مذکور به دست می‌آید (Trajkovic and Stojnic, 2007).

روش دوم: مدل‌های گروه تورک به شکل معادله رگرسیون ($y=a \cdot x$) می‌باشند که در آن‌ها ET_0 به عنوان متغیر وابسته می‌باشد. کالیبراسیون این مدل‌ها طبق ویژگی حداقل مربع می‌باشد. طبق این ویژگی پارامتر α طوری تخمین زده می‌شود که مجموع مجذور مربعات خطا (مقادیر مشاهده شده منهای پیش‌بینی شده) تا حد امکان کوچک باشد (Samaras et al., 2014). این روش با استفاده از گزینه solver در نرم‌افزار Excel صورت می‌پذیرد.

روش سوم: برای توسعه معادلات تجربی از رگرسیون گیری با میانگین سرعت باد استفاده می‌شود. به این صورت که رابطه رگرسیونی بین پارامتر α محاسبه شده از روش اول، و سرعت باد (که می‌توان آن را به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفت) ارائه می‌شود (Trajkovic and Stojnic, 2007; Cristea et al., 2013). لذا در این روش α فقط یک عدد نیست بلکه یک رابطه رگرسیونی است که با سرعت باد اصلاح شده است. در این پژوهش از ۶۰ درصد داده‌ها (۱۵ سال: ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) برای واسنجی و از ۴۰ درصد داده‌ها (۱۰ سال: ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴) برای ارزیابی استفاده گردید.

معیارهای ارزیابی

چندین روش آماری توسط نویسندگان مختلف برای ارزیابی عملکرد مدل (اعتبارسنجی) ایجاد و پیشنهاد شده است. در این پژوهش به منظور ارزیابی کامل مدل‌ها، از معیارهای ارزیابی پیشنهاد شده در پژوهش Willmott (1984) و Bellochi et al. (2010) استفاده گردید که به صورت معادلات زیر ارائه شده است:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{T,i} - ET_{PM,i})^2}}{n} \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{T,i} - ET_{PM,i})^2 / n}}{\overline{ET}_{PM}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{T,i} - ET_{PM,i})}{n} \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ET_{T,i}}{\sum_{i=1}^n ET_{PM,i}} \quad (12)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{T,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_{i=1}^n (|ET_{T,i} - \overline{ET}_{PM}| + |ET_{PM,i} - \overline{ET}_{PM}|)^2} \quad (13)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{T,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{PM,i} - \overline{ET}_{PM})^2} \quad (14)$$

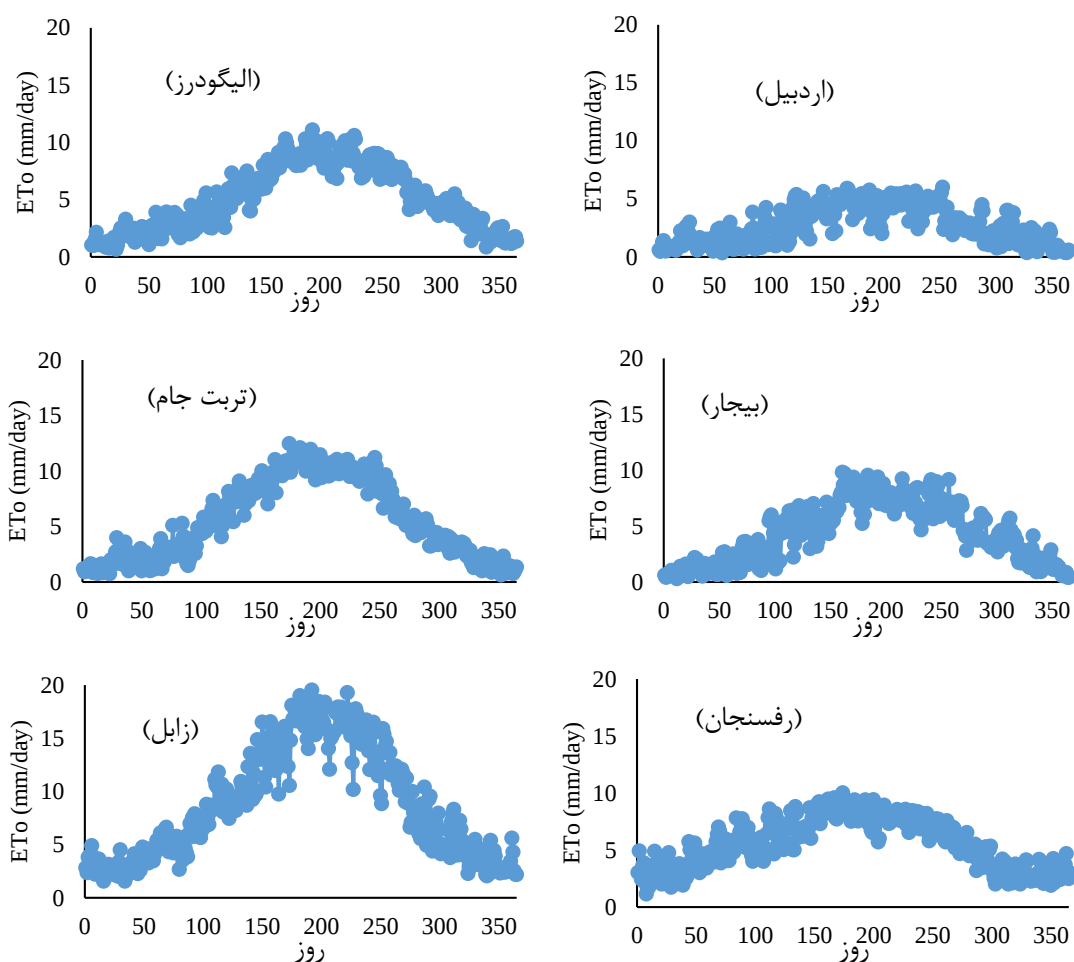
که در آن RMSE ریشه مربع میانگین خطا، NRMSE ریشه مربع میانگین خطا نرمال شده، MBE میانگین انحراف خطا، r نسبت بین مجموع تبخیر- تعرق محاسبه شده از مدل تورک (ET_T) به مدل پنمن (ET_{PM})، d ضریب توافق، EF کارایی مدل و n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

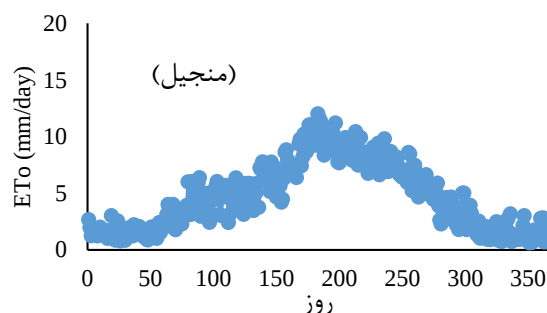
یافته‌ها

تخمین ET_0 با مدل PM و مدل T

مقادیر میانگین ET_0 روزانه محاسبه شده با استفاده از روش استاندارد PM برای دوره آماری مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج این نشان می‌دهد که بیشترین میزان ET_0 برای ایستگاه زابل و کمترین آن مربوط به ایستگاه اردبیل می‌باشد. دارابی و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که میزان ET_0 روزانه در ایستگاه زابل از حدود ۲۱ میلی‌متر بر روز در ماه جولای تا ۰/۷ میلی‌متر بر روز در ماه دسامبر متغیر می‌باشد که همان‌طور که در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است، با نتایج این پژوهش نیز هماهنگی دارد. برای تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین میزان ET_0 در ماه جون، جولای و آگوست (روز ۱۵۰ تا ۲۵۰) رخ داده است.

نسبت متوسط بلندمدت ماهانه تخمین ET_0 از مدل T به تخمین ET_0 از مدل PM در برابر مقادیر متوسط ماهانه سرعت باد برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی در طول دوره آماری مورد نظر در شکل ۲ آورده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده کرد در مواقعی که سرعت باد زیاد باشد مدل T مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند.

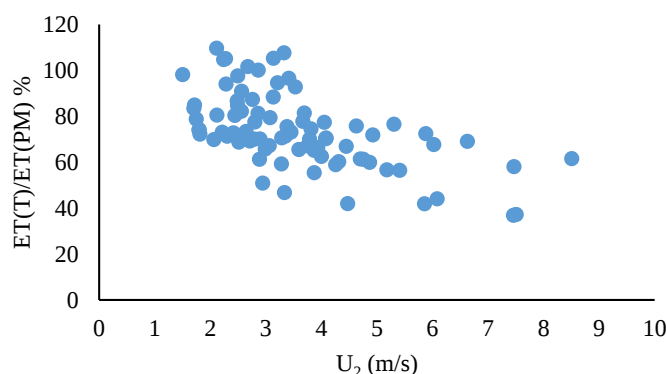




شکل ۱. مقادیر میانگین ET₀ روزانه برای ایستگاه‌های موردبررسی در دوره آماری مورد مطالعه

ارزیابی مدل‌های گروه تورک

جدول ۲ مقادیر شاخص آماری حاصل از مقایسه مقادیر ET₀ تخمین زده شده با استفاده از مدل‌های سه گانه تورک را برای ایستگاه‌های موردبررسی، در مقایسه با روش استاندارد نشان می‌دهد. در میان ایستگاه‌های موردبررسی، اردبیل با مقادیر d بالاتر از ۰/۹۶ و مقادیر RMSE کمتر از ۰/۵۶، برای تمام مدل‌های موردبررسی (به‌خصوص مدل Abteew, (T2) 1996) بدون کالیبره کردن ارتباط بسیار نزدیکی را با مقادیر تخمین زده شده ET₀ مدل استاندارد نشان داد. این در حال است که ایستگاه زابل با d کمتر از ۰/۶۴ و RMSE بالاتر از ۵/۵ برای تمام مدل‌های موردبررسی کمترین نزدیکی را با مدل استاندارد داشته است که این امر می‌تواند به علت میانگین بالای سرعت باد در این ایستگاه باشد. با توجه به شاخص‌های آماری، برای تمام ایستگاه‌های موردبررسی مدل T2 بیشترین تطابق را با مدل استاندارد داشته است. برای ایستگاه‌های الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل تمامی مدل‌های گروه تورک مقادیر ET₀ را کمتر از مدل استاندارد تخمین زده‌اند. این در حال است که برای ایستگاه اردبیل مدل‌های T1 و T3 کم برآورد و مدل T2 بیش برآورد داشته است. (Goh et al. (2021) اظهار داشتند که عملکرد مدل‌های مختلف ET₀ ممکن است برای یک منطقه مناسب و برای منطقه دیگر نامناسب باشد. ایشان بیان کردند که برای منطقه مالزی از میان هفت مدل موردبررسی، مدل تورک به‌عنوان بهترین مدل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲. رابطه نسبت ماهانه ET₀(T) به ET₀(PM) در مقابل میانگین ماهانه سرعت باد برای تمام ایستگاه‌های موردبررسی

جدول ۲. مقادیر شاخص آماری با استفاده از مدل‌های گروه T برای محاسبه ET₀ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	$\overline{ET}_{o(PM)}$	مدل	$\overline{ET}_{o(T)}$	RMSE	NRMSE	MBE	r	d
اردبیل	۲/۶۴	T(1)	۲/۲۱	۰/۵۶	۰/۲۱	-۰/۴۲	۰/۸۳	۰/۹۶
		T(2)	۲/۶۶	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۲	۱/۱۰	۰/۹۸
		T(3)	۲/۳۱	۰/۵۵	۰/۲۰	-۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۹۷
الیگودرز	۴/۹۵	T(1)	۲/۸۶	۲/۲۶	۰/۴۵	-۲/۰۹	۰/۵۷	۰/۸۰
		T(2)	۳/۲۵	۲/۰۰	۰/۴۰	-۱/۶۹	۰/۶۵	۰/۸۲
		T(3)	۲/۸۶	۲/۲۶	۰/۴۵	-۲/۰۹	۰/۵۷	۰/۸۰
بیجار	۴/۲۴	T(1)	۲/۶۱	۱/۷۰	۰/۴۰	-۱/۶۳	۰/۶۱	۰/۸۷
		T(2)	۲/۹۲	۱/۴۶	۰/۳۴	-۱/۳۲	۰/۶۸	۰/۸۹
		T(3)	۲/۶۷	۱/۶۴	۰/۳۸	-۱/۵۷	۰/۶۲	۰/۸۸
تربت جام	۵/۴۴	T(1)	۳/۳۶	۲/۵۶	۰/۴۷	-۲/۰۷	۰/۶۱	۰/۷۹
		T(2)	۳/۵۶	۲/۴۷	۰/۴۵	-۱/۷۸	۰/۶۷	۰/۸۰
		T(3)	۳/۲۵	۲/۸۰	۰/۵۱	-۲/۱۸	۰/۵۹	۰/۷۶
رفسنجان	۵/۵۵	T(1)	۳/۸۸	۱/۷۵	۰/۳۱	-۱/۶۶	۰/۶۹	۰/۸۱
		T(2)	۴/۱۰	۱/۶۰	۰/۲۸	-۱/۴۶	۰/۷۳	۰/۸۴
		T(3)	۴/۰۲	۱/۶۲	۰/۲۹	-۱/۵۲	۰/۷۲	۰/۸۲
زابل	۸/۶۴	T(1)	۴/۱۷	۵/۵۷	۰/۶۵	-۴/۴۶	۰/۴۸	۰/۶۲
		T(2)	۴/۳۳	۵/۵۵	۰/۶۴	-۴/۳۱	۰/۵۰	۰/۶۴
		T(3)	۳/۵۶	۶/۶۶	۰/۷۷	-۵/۰۸	۰/۴۱	۰/۵۵
منجیل	۴/۷۴	T(1)	۳/۲۷	۱/۸۸	۰/۳۹	-۱/۴۶	۰/۶۹	۰/۸۲
		T(2)	۳/۳۲	۱/۸۳	۰/۳۸	-۱/۴۱	۰/۷۰	۰/۸۴
		T(3)	۲/۵۵	۳/۱۱	۰/۶۵	-۲/۱۸	۰/۵۳	۰/۶۰

واسنجی مدل‌ها

در ادامه برای هر ایستگاه بهترین مدل بر اساس شاخص‌های آماری از گروه T انتخاب گردید و ضریب مدل منتخب از سه روش ارائه‌شده در مواد و روش‌های اصلاح شد. مقادیر شاخص‌های آماری مدل منتخب اصلاح‌شده بر اساس سه روش واسنجی پارامتر α ، در مقایسه با مدل واسنجی نشده در جدول ۳ ارائه‌شده است.

جدول ۳. شاخص‌های آماری عملکرد مدل‌های کالیبره شده بر اساس سه روش واسنجی در برآورد ET_o در مقایسه با مدل واسنجی نشده

ایستگاه	alfa	RMSE	NRMSE	MBE	r	d	EF
اردبیل	$\alpha_T = 0.012$	۰/۱۷۴	۰/۰۶۵	۰/۰۲۱	۱/۱۰	۰/۹۸	۰/۹۷
	$\alpha_T = 0.0126$	۰/۱۷۰	۰/۰۶۴	۰/۰۲۱	۱/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۸
	$\alpha_T = 0.0117$	۰/۱۶۱	۰/۰۶۰	-۰/۰۱۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
الیگودرز	α_{T-u2}	-	-	-	-	-	-
	$\alpha_T = 0.012$	۲/۰۰	۰/۴۰	-۱/۶۹	۰/۶۵	۰/۸۲	۰/۴۴
	$\alpha_T = 0.021$	۱/۳۱	۰/۲۶	۰/۹۹	۱/۱۹	۰/۹۵	۰/۷۶
بیجار	$\alpha_T = 0.018$	۰/۶۳	۰/۱۲	-۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۴
	α_{T-u2}	-	-	-	-	-	-
	$\alpha_T = 0.012$	۱/۴۶	۰/۳۴	-۱/۳۲	۰/۶۸	۰/۸۹	۰/۶۴
تربت جام	$\alpha_T = 0.0168$	۰/۳۸	۰/۰۹	-۰/۱۴	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۶
	$\alpha_T = 0.0169$	۰/۳۹	۰/۰۹	-۰/۱۳	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۷
	α_{T-u2}	-	-	-	-	-	-
تربت جام	$\alpha_T = 0.012$	۲/۴۷	۰/۴۵	-۱/۷۸	۰/۶۷	۰/۸۰	۰/۴۸
	$\alpha_T = 0.016$	۱/۱۸	۰/۲۱	-۰/۴۰	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۸۸
	$\alpha_T = 0.018$	۰/۹۱	۰/۱۶	۰/۲۷	۱/۰۵	۰/۹۷	۰/۹۲

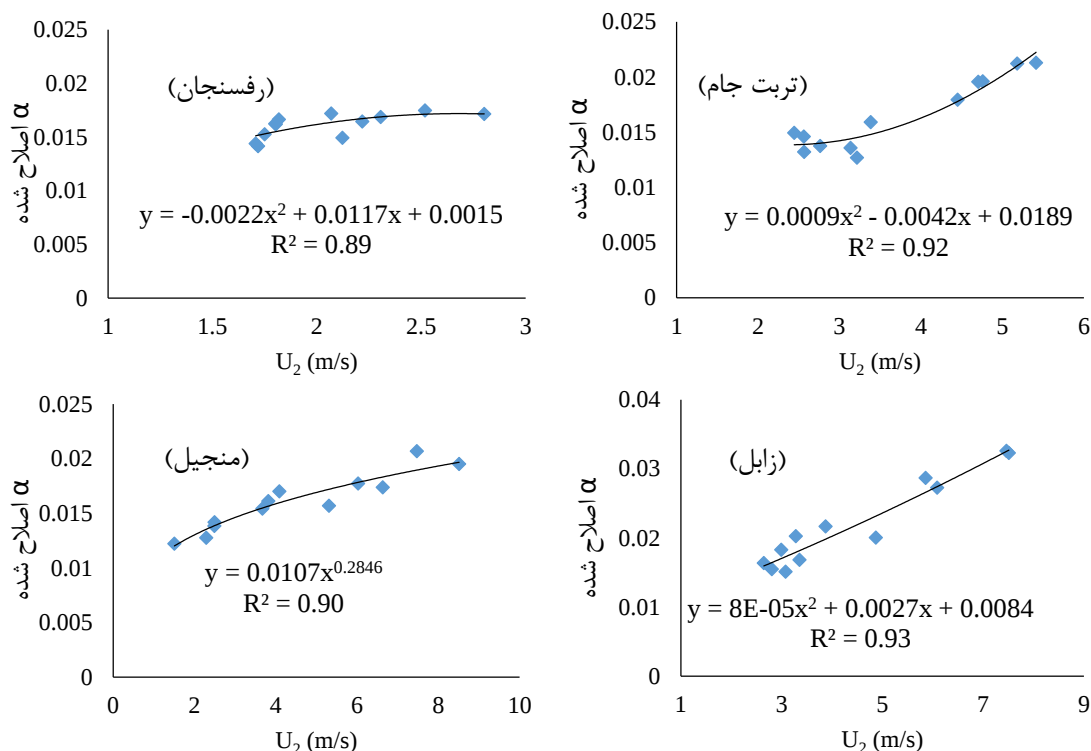
						α_{T-u2}
	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۲۵
	۰/۴۲	۰/۸۴	۰/۷۳	-۱/۴۶	۰/۲۸	۱/۶۰
	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	-۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۳۰
	۰/۹۷	۰/۹۸	۱/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۲۸
	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	-۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۷
	۰/۳۹	۰/۶۴	۰/۵۰	-۴/۳۱	۰/۶۴	۵/۵۵
	۰/۷۳	۰/۸۸	۰/۹۲	-۰/۶۷	۰/۲۹	۲/۵۵
	۰/۷۹	۰/۹۲	۱/۰۶	۰/۵۱	۰/۲۵	۲/۲۳
	۰/۹۸	۰/۹۹	۱/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۶۲
	۰/۵۳	۰/۸۴	۰/۷۰	-۱/۴۱	۰/۳۸	۱/۸۳
	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۹۳	-۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۸۲
	۰/۹۴	۰/۹۸	۱/۰۴	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۶۳
	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	-۰/۰۱۵	۰/۰۶	۰/۳۰
						α_{T-u2}
						$\alpha_T = 0.012$
						$\alpha_T = 0.0160$
						$\alpha_T = 0.0164$
						α_{T-u2}
						$\alpha_T = 0.012$
						$\alpha_T = 0.022$
						$\alpha_T = 0.025$
						α_{T-u2}
						$\alpha_T = 0.012$
						$\alpha_T = 0.016$
						$\alpha_T = 0.0178$
						α_{T-u2}

رفسنجان T(2)

زابل T(2)

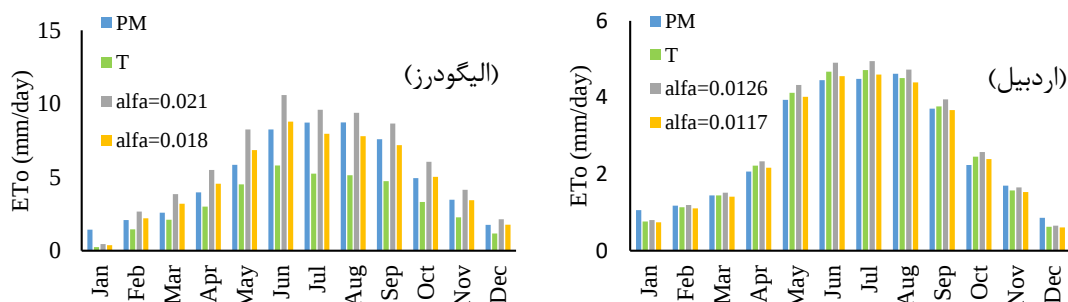
منجیل T(2)

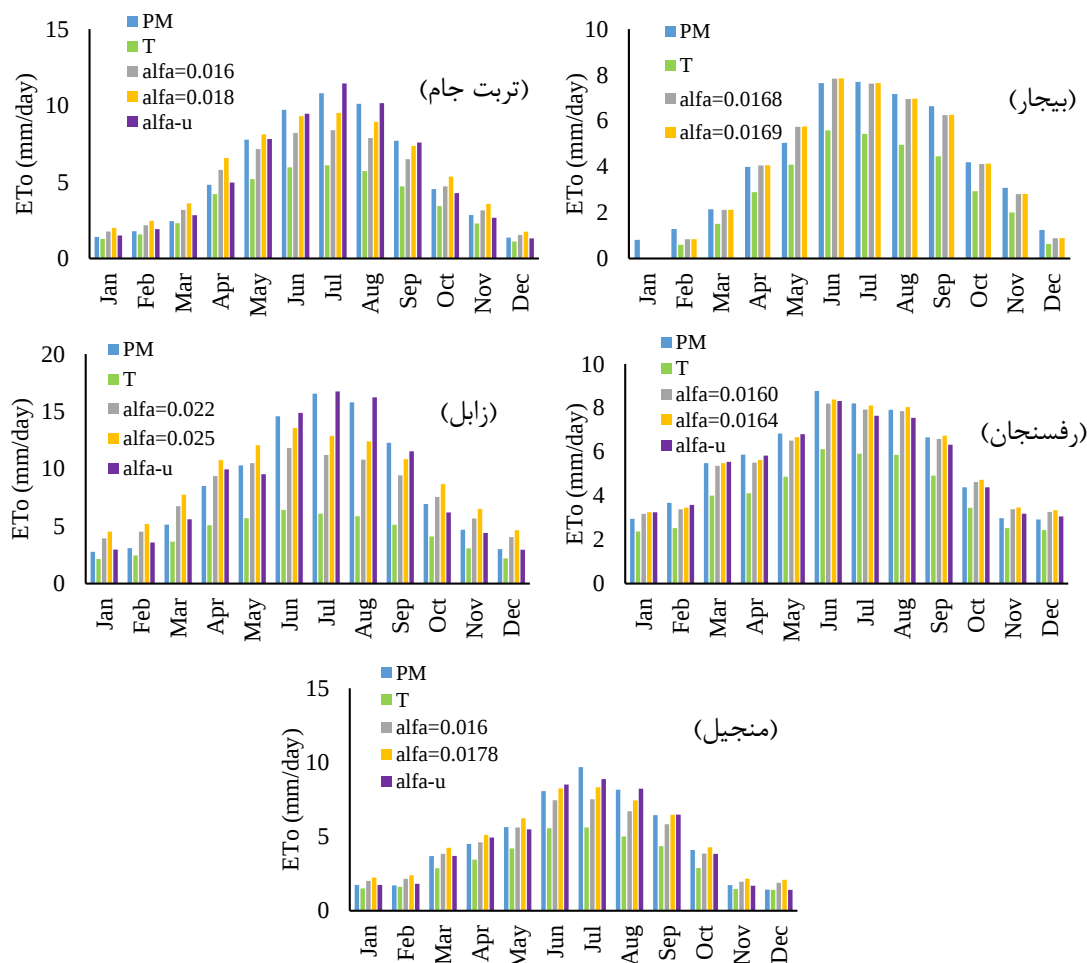
برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل هر سه روش اصلاحی نتایج تخمین ET_0 را بسیار بهبود بخشیده‌اند. باین‌وجود روش اصلاحی با رابطه رگرسیونی بین پارامتر α و سرعت باد (روش سوم)، با مقادیر NRMSE به ترتیب ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ و EF به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۹۸ و مقادیر d برابر ۰/۹۹ برای تمامی ایستگاه‌های مذکور، بهترین نتایج را ارائه کرده است. برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار رابطه معناداری میان پارامتر α و سرعت باد وجود نداشت. برای ایستگاه اردبیل در حالت قبل از اصلاح تمام مدل‌های موردبررسی نتایج رضایت بخشی را ارائه کرده بود، باین‌وجود بعد از کالیبره کردن مدل منتخب T2، از هر دو روش $\alpha=0.0126$ که از نسبت $ET_0(PM)$ به $ET_0(T)$ به‌دست‌آمده بود و همچنین $\alpha=0.0117$ که با استفاده از گزینه solver و حداقل کردن مربعات خطا به‌دست‌آمده بود با مقادیر جزئی، مقدار خطا را کاهش و مقادیر ضریب کارائی را افزایش داد. برای ایستگاه الیگودرز و بیجار نیز نتایج تخمین ET_0 از هر دو روش مذکور، بسیار بهبود یافت. در این دو ایستگاه روش حداقل کردن مربعات خطا با نرم‌افزار solver، با بیشترین مقادیر EF (۰/۹۴ و ۰/۹۷) و کمترین مقادیر NRMSE (۰/۱۲ و ۰/۰۹) و MBE (با مقادیر منفی ۰/۰۲ و ۰/۱۳) به ترتیب برای الیگودرز و بیجار با تفاوتی ناچیز، نتایج بهتری را ارائه کرد. دلبری و همکاران (۱۳۹۵) برای ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیک کشور پراکنش مکانی سرعت باد را موردبررسی قرار دادند. این پژوهشگران از داده‌های ساعتی سرعت باد استفاده نمودند و بیان کردند که ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار از مناطق بادخیز کشور محسوب می‌شوند، اما در مقایسه با ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان و زابل از تداوم سرعت باد کمتر و همچنین درصد ساعات کمتری از سال که در آن میانگین سرعت باد بیش از ۴ متر بر ثانیه باشد، برخوردار می‌باشند. نتایج این پژوهشگران می‌تواند دلیل ارتباط نامناسب مقدار سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح‌شده مدل منتخب برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار را سبب شده باشد. شکل ۳ رابطه رگرسیونی بین مقادیر میانگین ماهانه سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح‌شده مدل منتخب برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن بهترین رابطه، از انواع رگرسیون شامل: خطی، لگاریتمی، چندجمله‌ای مرتبه دوم و سوم، توانی و نمایی، در نرم‌افزار Excel استفاده شد. برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان و زابل بالاترین ضریب همبستگی برای رگرسیون چندجمله‌ای و به ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۸۹ و ۰/۹۳ به دست آمد. برای ایستگاه منجیل بالاترین ضریب همبستگی برای رگرسیون توانی و برابر ۰/۹۰ محاسبه گردید.



شکل ۳. ضریب اصلاحی مدل منتخب در مقابل میانگین سرعت باد ماهانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی

شکل ۴ مقادیر ET_0 تخمین زده شده با استفاده از مدل منتخب کالیبره شده با روش‌های مختلف را در مقایسه با روش منتخب قبل از کالیبراسیون در مقیاس ماهانه نشان می‌دهد. نتایج این شکل حاکی از آن است که برای ایستگاه اردبیل مقادیر ET_0 روش قبل از اصلاح و بعد از اصلاح تفاوت ناچیزی با روش استاندارد داشته است که بعد از اصلاح نیز این نتایج به مقادیر روش استاندارد نزدیک‌تر شدند. این در حالی است که برای ایستگاه‌های الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل مقادیر ET_0 روش منتخب قبل از اصلاح تفاوت زیادی با روش استاندارد داشته است، اما بعد از اعمال ضریب اصلاحی، تطابق بسیار خوبی را با روش استاندارد PM فراهم می‌کند. در پژوهشی برای چهار ایستگاه ارومیه، رشت، مشهد و یزد، پنج مدل مختلف تخمین ET_0 (شامل مدل تورک، مک‌کینک، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل و پرستلی-تیلور) با مدل استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش ضرایب مدل‌های مورد بررسی اصلاح شد و نتایج نشان داد که بعد از اصلاح مقادیر ET_0 بهبود می‌یابد (صفری و همکاران، ۱۴۰۱).





شکل ۴. میانگین ماهانه ET_0 بر اساس مدل PM، مدل T اصلاح نشده، مدل T اصلاح شده از روش نسبت $\frac{ET_0(PM)}{ET_0(MK)}$ اصلاح شده از روش مجموع مجذور مربعات خطا و اصلاح شده از روش معادله رگرسیون سرعت باد

بحث

در این پژوهش عملکرد مدل‌های گروه T با ضرایب اصلی خود با مدل PM با استفاده از اطلاعات هواشناسی روزانه هفت منطقه بادخیز ایران مورد مقایسه قرار گرفت. با ترسیم نسبت متوسط بلندمدت ماهانه تخمین ET_0 از مدل T به تخمین ET_0 از مدل PM در برابر مقادیر متوسط ماهانه سرعت باد مشاهده شد که در مواقعی که سرعت باد زیاد باشد مدل T مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند. بر اساس مطالعات Irmak et al. (2003) اختلاف بین دو مدل کمتر از ۵ درصد محدوده قابل قبولی خواهد بود. ندیم میر و همکاران (۱۴۰۴) بیان کردند که با افزایش سرعت باد، سهم مؤلفه آیرودینامیک که نشان‌دهنده جریان هوا و سرعت باد است، در مقایسه با مؤلفه توازن انرژی در برآورد ET_0 افزایش می‌یابد. لذا می‌توان چنین اظهار داشت که با توجه به اینکه مدل ساده تورک برآورد ET_0 را تنها با مؤلفه‌های تابش و دما انجام می‌دهد لذا در مناطق بادخیز با کاهش دقت و کم برآورد کردن همراه است. این مهم به این علت است که در مناطق بادخیز سهم مؤلفه باد در مقدار ET_0 با افزایش سرعت، بیشتر می‌شود و لذا به کار بردن آن در چنین مناطق چالشی نیازمند اصلاح است. این موضوع در پژوهش‌های پیشین نیز ارائه شده است. (Trajkovic & Stojnic, 2007) به بررسی عملکرد مدل تجربی تورک که بر پایه تابش و دما می‌باشد در مقایسه به مدل استاندارد PM پرداختند. ایشان از ترسیم نسبت تخمین ET_0 از مدل تورک به تخمین ET_0 از مدل PM در برابر سرعت باد نشان دادند که هر چه سرعت باد

بیشتر باشد مدل تورک مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند. (Trajkovic & Kolakovic, 2009) نیز بیان کردند که در مکان‌های بادخیز معادلات تجربی بر پایه دما و تشعشع میزان ET_0 را کمتر تخمین می‌زنند. Diouf et al. (2016) به بررسی مدل تجربی تورک در مقایسه با مدل استاندارد پرداختند. ایشان بیان کردند که مدل T بدون اصلاح ضرایب آن برای منطقه سنگال قابل توصیه نمی‌باشد. Pandey et al. (2016) بیان کردند که کالیبراسیون منطقه‌ای مدل‌های مبتنی بر دما و تشعشع تحت شرایط آب و هوایی مختلف می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد که با نتایج این پژوهش نیز هماهنگی دارد.

بنابراین به توجه به مطالب ذکر شده بهترین مدل از گروه تورک انتخاب و ضریب آن برای هر ایستگاه اصلاح گردید. بعد از اصلاح ضریب مدل منتخب، برای تمامی ایستگاه‌ها نتایج بسیار بهبود یافت. از میان روش‌های اصلاح ضریب مدل T، برای ایستگاه تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل بهترین نتایج از ایجاد رابطه رگرسیون بین پارامتر α با سرعت باد حاصل شد. (Cristea et al. 2013) بیان کردند که از میان رگرسیون‌های مختلف، بالاترین ضریب همبستگی بین میانگین سرعت باد و ضریب تعدیل مدل‌های موردبررسی، برای منطقه‌ای در ایالات متحده به صورت رگرسیون چندجمله‌ای می‌باشد. دارابی و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که مناسب‌ترین رابطه رگرسیونی بین سرعت باد و ضریب اصلاحی مدل پریستلی-تیلور، رابطه خطی است. (Samaras et al. 2014) مدل‌های گروه T را برای پنج ایستگاه هواشناسی در یونان مورد ارزیابی قرار دادند و بیان کردند که مدل‌های بهبودیافته نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کند. لذا می‌توان چنین بیان کرد که کاربرد مدل T در هر منطقه بایستی موردبررسی قرار گیرد و اصلاح ضریب آن باعث افزایش چشمگیری در دقت مدل خواهد شد. همچنین نتایج این پژوهش حاکی از آن است که بکار بردن روش اصلاح ضرایب مدل نیز در هر منطقه بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد و بکار بردن تنها یک روش اصلاحی خاص ممکن است با افزایش دقت همراه نباشد.

نتیجه‌گیری

مدل‌های مبتنی بر تابش و دما از جمله رایج‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های برآورد ET_0 در سراسر جهان می‌باشند. با این وجود در مناطق بادخیز علاوه بر شدت تابش خورشیدی و دمای هوا، سرعت باد نیز در تخمین ET_0 بسیار مهم می‌باشد. در این پژوهش عملکرد مدل‌های گروه تورک با ضرایب اصلی در مقایسه با مدل استاندارد PM، برای هفت ایستگاه سینوپتیک بادخیز ایران موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که برای تمام ایستگاه‌های موردبررسی، مدل T2 بیشترین تطابق را با مدل استاندارد دارد. برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار رابطه رگرسیونی مناسبی بین پارامتر α و سرعت باد ایجاد نشد و بهترین نتایج به روش حداقل کردن مجذور مربعات خطا حاصل گردید. در ایستگاه اردبیل، واسنجی مدل باعث بهبود نتایج با مقادیر NRMSE و EF به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۹۹ گردید. در ایستگاه الیگودرز نیز نتایج NRMSE و EF به ترتیب با مقادیر ۰/۱۲ و ۰/۹۴ بعد از واسنجی بهبود یافتند. به طور مشابه برای ایستگاه بیجار واسنجی مدل باعث بهبود نتایج با مقادیر NRMSE و EF به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۹۷ شد. برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل بهترین نتایج از ایجاد رابطه رگرسیون بین پارامتر α با سرعت باد حاصل شد. در ایستگاه تربت‌جام، واسنجی مدل باعث بهبود نتایج با مقادیر NRMSE و EF به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۹۹ گردید. در ایستگاه رفسنجان نیز نتایج NRMSE و EF به ترتیب با مقادیر ۰/۰۵ و ۰/۹۸ بعد از واسنجی بهبود یافتند. به طور مشابه برای ایستگاه زابل واسنجی مدل باعث بهبود نتایج با مقادیر NRMSE و EF به ترتیب ۰/۰۷ و

۰/۹۸ و برای ایستگاه منجیل با مقادیر NRMSE و EF به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۹۸ شد. بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در سراسر جهان می‌باشد. تعیین دقیق میزان آب آبیاری برای بهبود بهره‌وری از منابع آب کشاورزی اهمیت حیاتی دارد که این امر خود مستلزم دانستن تخمین درستی از تبخیر- تفرق می‌باشد. لذا نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در مناطقی که دارای محدودیت مؤلفه‌های هواشناسی است، مورد استفاده قرار گیرد. عدم وجود داده‌های لایسیمیتری در مناطق مورد بررسی از محدودیت‌های این پژوهش می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای سایر مناطق ایران اصلاحاتی مشابه پژوهش حاضر در خصوص مؤلفه‌های غالب اقلیمی و توپوگرافی در هر منطقه برای مدل‌های گروه تورک صورت پذیرد. برای بسط نتایج این پژوهش به سایر مناطق بادخیز ایران باید بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. با این وجود آنچه نتایج این پژوهش توصیه می‌کند این است که مدل‌های تجربی گروه تورک نباید بدون اصلاح ضرایب آن برای مناطق بادخیز مورد استفاده قرار گیرند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

عیسی ندیم‌میر در طراحی روش پژوهش، تحلیل داده و نگارش بخش یافته‌ها مشارکت داشته است. محمدمهدی چاری توسعه ایده اصلی، تدوین مبانی نظری و نگارش بخش‌های بحث و نتیجه‌گیری را بر عهده داشته است. پرویز حقیقت‌جو در گردآوری داده‌ها و بازبینی مشارکت داشته است. پریسا کهخامقدم طراحی روش پژوهش، گردآوری داده‌ها و تعیین ایستگاه‌ها و نگارش بخش مقدمه و بازبینی انتقادی محتوای علمی مشارکت داشته است. مهدی کیخا در آماده‌سازی داده‌ها و بازبینی انتقادی محتوای علمی مشارکت داشته است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد است که با حمایت‌های دانشگاه زابل و سازمان هواشناسی کشور انجام شده است. همچنین نویسندگان از همه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- جانبازقبادی، غلامرضا. (۱۴۰۰). پتانسیل‌سنجی انرژی باد جهت تعیین مکان بهینه برای احداث توربین‌های بادی در استان مازندران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۹(۳۴)، ۲۲۴-۲۰۹. doi:10.30488/gps.2020.121201.2742
- چاری، محمدمهدی و کهخامقدم، پریسا (۱۳۹۸). برآورد تبخیر- تفرق مرجع در شرایط کمبود داده و ارزیابی روش‌های والیاتنس برای خط ساحلی شمال و جنوب ایران. *نیوار*، ۱۰۴-۱۰۵، ۱۲۳-۱۳۵. doi:10.30467/NIVAR.2019.147472.1106
- حنفی، علی و ایران‌پور، فخرالدین. (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سرعت باد در کشور به منظور برنامه‌ریزی جهت تولید برق بادی. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۸(۳۱)، ۷۳-۸۸.
- دارابی، هما؛ چاری، محمدمهدی؛ افراسیاب، پیمان و پیری، حلیمه. (۱۴۰۱). ارزیابی و واسنجی معادله ترونوت‌وایت برای تخمین تبخیر تفرق در اقلیم بادخیز مطالعه موردی: منطقه سیستان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۴)، ۵۶۴-۵۴۹. doi: 10.22059/jphgr.2023.350271.1007728

- دارابی، هما؛ چاری، محمدمهدی؛ افراسیاب، پیمان؛ پیری، حلیمه و کهخامقدم، پریسا. (۱۴۰۱). ارزیابی و واسنجی معادله پریستلی تیلور برای تخمین تبخیر تعرق در اقلیم بادخیز (مطالعه موردی منطقه سیستان). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۱)، ۲۵۶۴-۲۵۵۱. doi:10.22059/ijswr.2022.349900.669375
- دلبری، معصومه؛ کهخامقدم، پریسا؛ محمدی، احسان و احمدی، تارخ. (۱۳۹۵). برآورد الگوی پراکنش مکانی سرعت باد برای پتانسیل تولید انرژی بادی در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸ (۲)، ۲۶۵-۲۸۵. doi: 10.22059/jphgr.2016.59368
- دهقان، هادی و مکاری، مهدی. (۱۳۹۸). ارزیابی و اصلاح مدل‌های والیانتر برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۹ (۳۶)، ۹۷-۸۶. doi:10.22125/iwe.2019.90251
- دین‌پژوه، یعقوب؛ جهانبخش‌اصل، سعید و موسوی‌جهانی، لیلا. (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی سه مدل تجربی در تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه). *نشریه دانش آب و خاک*، ۳۳ (۳)، ۳۲-۱۹. doi:10.22034/ws.2021.46416.2419
- صفری، فاطمه؛ کاویانی، عباس؛ عزیزیان قطار، اصغر و رمضانی، هادی. (۱۴۰۱). اصلاح ضرایب تعدادی از معادلات برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع. *محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۸ (۲)، ۴۲۶-۴۱۱. doi.org/10.22034/jewe.2021.293310.1593
- کهخامقدم، پریسا. دلبری، معصومه. (۱۴۰۴). امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد در زابل با استفاده از توزیع ویبول. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۵ (۱)، ۱۷۸-۱۹۵. http://doi.org/10.30488/gps.2025.478128.3779
- گندم‌کار، امیر. (۱۳۸۸). ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۰ (۴)، ۱۰۰-۸۵.
- ندیم‌میر، عیسی؛ چاری، محمدمهدی؛ حقیقت‌جو، پرویز؛ کهخامقدم، پریسا و کیخا، مهدی. (۱۴۰۴). تعیین سهم بخش آبرودینامیکی و توازن انرژی در مقدار تبخیر-تعرق مرجع برای مناطق بادخیز ایران. *پژوهش‌های مهندسی آب ایران*، ۳ (۴)، ۱۵-۳۲. doi:10.22034/ijwer.2025.538428.1103

References

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 32(3), 465-473. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>
- Alexandris, S., & Kerkides, P. (2003). New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 60, 157-180. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00172-5)
- 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). FAO.
- Allen, R. G., & Pruitt, W. O. (1986). Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(2), 139-155.
- Bellocchi, G., Rivington, M., Donatelli, M., & Matthews, K. (2010). Validation of biophysical models: Issues and methodologies. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 109-130. <https://doi.org/10.1051/agro/2009001>
- Besharat, F., Dehghan, A. A., & Faghil, A. R. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798-821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>
- Chari, M. M., & Kahkhamoghaddam, P. (2019). Estimation of reference evapotranspiration in the condition of data deficiency and assessment of Valiantzas methods for the coastlines in the north and south of Iran. *Nivar*, 104, 124-136. <https://doi.org/10.30467/NIVAR.2019.147472.1106> [In Persian]
- Cristea, N. C., Kampf, S. K., & Burges, S. J. (2013). Revised coefficients for Priestley-Taylor and Makkink-Hansen equations for estimating daily reference evapotranspiration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10), 1289-1300. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000679](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000679)
- Darabi, H., Chari, M. M., Afrasiab, P., & Piri, H. (2022). Evaluation and calibration of Thornthwaite equation for estimating reference evapotranspiration in windy regions (Case

- study: Sistan Region). *Physical Geography Research Quarterly*, 54(4), 549-564. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.350271.1007728> [In Persian]
- Darabi, H., Chari, M. M., Afrasiab, P., Piri, H., & Kahkhamoghdam, P. (2023). Evaluation and calibration of Priestley-Taylor equation for estimating monthly reference evapotranspiration in windy areas of Sistan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(11), 2551-2564. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349900.669375> [In Persian]
- Dehghan, H., & Mokari, M. (2019). Evaluation and modification of Valiantzas models for the reference evapotranspiration estimation by lack of data. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 9(4), 86-97. <https://doi.org/10.22125/IWE.2019.90251> [In Persian]
- Delbari, M., Kahkhamoghaddam, P., Mohammadi, E., & Ahmadi, T. (2016). Estimation of the spatial distribution pattern of wind speed for assessment of wind energy potential in Iran. *Physical Geography Research*, 48(2), 265-285. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.59368> [In Persian]
- Dinpashoh, Y., & Allahverdipour, P. (2025). Monitoring and predicting changes in reference evapotranspiration in the Moghan Plain according to CMIP6 of IPCC. *Environment and Water Engineering*, 11(1), 47-56. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.466037.1947> [In Persian]
- Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh-Asl, S., & Mosavi Jahani, L. (2023). Evaluation of the three empirical models in estimation of potential evapotranspiration (Case study: Urmia Lake basin). *Water and Soil Science*, 33(3), 21-32. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.46416.2419> [In Persian]
- Diouf, O. C., Ba, L., Weihermüller, K., Faye, S. C., Faye, S., & Vereecken, H. (2016). Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith formula in Senegal. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 110(1), 117-137. <https://doi.org/10.12895/jaeid.20161.417>
- Fan, J., Wang, X., Wu, L., Zhang, F., Bai, H., Lu, X., & Xiang, Y. (2018). New combined models for estimating daily global solar radiation based on sunshine duration in humid regions: A case study in South China. *Energy Conversion and Management*, 156, 618-625. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.085>
- Flores-Velazquez, J., Akrami, M., & Villagran, E. (2022). The role of radiation in the modelling of crop evapotranspiration from open field to indoor crops. *Agronomy*, 12(11), 2593. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112593>
- Gandomkar, A. (2010). Wind energy potential estimation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 20(4), 85-100. [In Persian]
- Goh, E. H., Ng, J. L., Huang, Y. F., & Yong, S. L. S. (2021). Performance of potential evapotranspiration models in Peninsular Malaysia. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3170-3186. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.018>
- Hanafi, A., & Iranpour, F. (2017). Evaluation and zoning of wind speed potential in the country in order to plan for wind power generation. *Journal of Climate Research*, 8(31), 73-88. [In Persian]
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., Ali, M. A., & Hanafy, A. A. (2016). New temperature-based models for predicting global solar radiation. *Applied Energy*, 179, 437-450. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.006>
- Irmak, S., Allen, R. G., & Whitty, E. B. (2003). Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 360-370. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:5\(360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(360))
- Janbazghobadi, G. (2020). Potentiometric analysis of wind energy to determine the optimum location for wind turbines in Mazandaran Province. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 9(34), 209-224. <https://doi.org/10.30488/gps.2020.121201.2742> [In Persian]
- Kahkhamoghaddam, P., & Delbari, M. (2025). Feasibility of wind energy potential in Zabol using Weibull distribution. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 15(1), 159-178. <https://doi.org/10.30488/gps.2025.478128.3779> [In Persian]

- Kahkhamoghaddam, P., Ziaei, A. N., Davary, K., Kanooni, A., & Sadeghi, S. (2024). Optimal land allocation and irrigation scheduling to maximize the economic utility. *International Journal of Plant Production*, 18(2), 289-300. <https://doi.org/10.1007/s42106-024-00283-6>
- Kartal, V. (2024). Prediction of monthly evapotranspiration by artificial neural network model development with Levenberg–Marquardt method in Elazig, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(14), 20953-20969. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32464-1>
- Kashyap, P. S., & Panda, R. K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), 9-25. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00102-0)
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., & Pellikka, P. K. E. (2010). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.011>
- Martí, P., Zarzo, M., Vanderlinden, K., & Girona, J. (2015). Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. *Journal of Hydrology*, 529, 1713-1724. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.054>
- Mohamadi, H., Saeedi, A., Firoozi, Z., Zangabadi, S. S., & Veisi, S. (2021). Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran. *Heliyon*, 7(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07234>
- Muniandy, J. M., Yusop, Z., & Askari, M. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum annum*. *Agricultural Water Management*, 169, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.019>
- Nadim-Mir, E., Chari, M. M., Haghighatjo, P., Kahkhamoghaddam, P., & Keikha, M. (2025). Determining the contribution of aerodynamic and energy balance components to reference evapotranspiration in windy regions of Iran. *Journal of Iranian Water Engineering Research*. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.538428.1103> [In Persian]
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Manes, A., & Kitta, E. (2024). Calibration and validation of solar radiation-based equations to estimate crop evapotranspiration in a semi-arid climate. *International Journal of Biometeorology*, 68(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02566-5>
- Pandey, P. K., Dabral, P. P., & Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1), 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.02.003>
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2014). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Pishgar-Komleh, S. H., & Akram, A. (2017). Evaluation of wind energy potential for different turbine models based on the wind speed data of Zabol region, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.007>
- 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. [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)
- Rahmani, K., Kasaeian, A., Fakoor, M., Kosari, A., & Alavi, S. (2014). Wind power assessment and site matching of wind turbines in Lootak of Zabol. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(4), 965-976. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v4i4.1700.g6434>
- Sabziparvar, A. A., Tabari, H., Aeni, A., & Ghafouri, M. (2010). Evaluation of Class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold-semi arid and warm arid climates. *Water Resources Management*, 24, 909-920. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9478-2>
- Safari, F., Kaviani, A., Azizian Ghatar, A., & Ramezani Etedali, H. (2022). Modification of the coefficients of some equations for estimation of evapotranspiration of the reference plant. *Environment and Water Engineering*, 8(2), 411-426. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.293310.1593> [In Persian]
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))

- Samaras, D. A., Reif, A., & Theodoropoulos, K. (2014). Evaluation of radiation-based reference evapotranspiration models under different Mediterranean climates in central Greece. *Water Resources Management*, 28, 207-225. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0480-3>
- Sarlak, N., & Bagcaci, S. C. (2020). The assessment of empirical potential evapotranspiration methods: A case study of Konya Closed Basin. *Teknik Dergi*, 565, 9755-9772. <https://doi.org/10.18400/tekderg.408019>
- Su, Q., Singh, V. P., & Karthikeyan, R. (2022). Improved reference evapotranspiration methods for regional irrigation water demand estimation. *Agricultural Water Management*, 274, 107979. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107979>
- Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31, 107-117. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0295-z>
- Trajkovic, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1), 38-42. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:1\(38\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38))
- Trajkovic, S., & Kolakovic, S. (2009). Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration at humid European locations. *Hydrology Research*, 40(1), 45-52. <https://doi.org/10.2166/nh.2009.002>
- Trajkovic, S., & Stojnic, V. (2007). Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 5(2), 107-113. <https://doi.org/10.2298/FUACE0702107T>
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- Turner, N. C. (1990). Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management*, 17(1-3), 59-73. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90056-5)
- Uzunlar, A., & Dis, M. O. (2024). Novel approaches for the empirical assessment of evapotranspiration over the Mediterranean region. *Water*, 16(3), 507. <https://doi.org/10.3390/w16030507>
- Uzunlar, A., Oz, A., & Dis, M. O. (2022). The effect of modified approaches on evapotranspiration estimates: Case study over Van. *Cukurova UMFD*, 37, 973-988. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1230919>
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial statistics and models* (pp. 443-460). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23
- Wright, J. L. (1996). *Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration*. <https://eprints.nwsl.ars.usda.gov/id/eprint/862>
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15(2), 305-319. <https://doi.org/10.1002/hyp.119>
- Xu, J., Wang, J., Wei, Q., & Wang, Y. (2016). Symbolic regression equations for calculating daily reference evapotranspiration with the same input to Hargreaves-Samani in arid China. *Water Resources Management*, 30, 2055-2073. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1269-y>
- Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., & Wright, W. C. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 197-202. <https://doi.org/10.13031/2013.18153>