




Evaluation and Calibration of the Makkink Model in Estimating Reference Evapotranspiration in Windy Areas of Iran

Eisa Nadim-Mir¹ | Mohammad Mahdi Chari²  | Parviz Haghghatjo³ | Parisa Kahkhamogaddam⁴ | Mahdi Keikha⁵

1. Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran. he.mir1371@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. mmahdichari@uoz.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. phjou40@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir
5. Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. mahdikeikha1395@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol:	17
No:	63
P:	1-19
Received:	2025-04-18
Revised:	2025-06-12
Accepted:	2025-06-12
Published:	2026-05-01

Keywords:

- Potential evapotranspiration
- Penman–Monteith
- Wind speed
- Adjustment factor
- Empirical equations

Cite this Article:

Nadim-Mir, Eisa., Chari, Mohammad Mahdi., Haghghatjo, Parviz., Kahkhamogaddam, Parisa & Keikha, Mahdi. (2026). Evaluation and Calibration of Makkink Model in Estimating Reference Evapotranspiration in Windy Areas of Iran. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 17(63): 1. 19.

Publisher: Hakim Sabzevari University

The Author(s) retain the copyright and full publishing rights.



 [10.22034/jargs.2025.517506.1194](https://doi.org/10.22034/jargs.2025.517506.1194)

Abstract

Aim: The aim of this research was to investigate the impact of wind speed on the accuracy of the Makkink (MK) method in calculating reference evapotranspiration (ET_0) and to modify the model coefficient for windy regions.

Material & Method: Long-term meteorological data from the Ardabil, Aligoudarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil stations were utilized. The ET_0 values obtained using the MK method were evaluated against those calculated using the FAO Penman-Monteith (PM) method. Finally, the MK model was calibrated, and its coefficient (α) was adjusted for the studied stations.

Finding: For the examined stations, the long-term average monthly ratio of ET_0 estimated by the MK model to that estimated by the PM model versus the average monthly wind speed over the statistical period showed that as wind speed increased, the MK model estimated lower ET_0 values compared to the PM model. The results revealed that the Zabol station, with an NRMSE higher than 5.5 and a d less than 0.65, had the least agreement with the PM model, likely due to its high average wind speed. Ardabil station, with d greater than 0.97, provided the best results and could use the MK model without calibration to represent reference evapotranspiration.

Conclusion: A polynomial regression relationship between parameter α and wind speed was obtained for the Torbat-e Jam, Rafsanjan, and Zabol stations, with correlation coefficients of 0.79, 0.72, and 0.90, respectively. For the Ardabil, Aligoudarz, and Bijar stations, the model adjustment coefficient was derived by minimizing the sum of squared errors.

Innovation: The modified MK model developed in this study shows good agreement with the PM model for the examined stations and can therefore be used as a simpler alternative to the standard PM model, which requires extensive meteorological data.

Extended Abstract

1. Introduction

Accurately determining the amount of irrigation water is crucial for improving agricultural water use efficiency, and this largely depends on properly estimating evapotranspiration (ET₀). The Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations recommends the Penman-Monteith (PM) model as the most reliable method for calculating ET₀. However, the PM model has a drawback: it requires a wide range of climatic variables, such as solar radiation, wind speed, relative humidity, and air temperature. This complexity has led researchers to develop simpler empirical equations that rely on fewer meteorological parameters, making them more practical for use in diverse climatic conditions. Among these, temperature- and radiation-based models have become some of the most widely used methods for estimating ET₀ globally. One such model is the Makkink (MK) model, which is both simple and popular due to its reliance on just two key factors: solar radiation intensity and air temperature. These are, of course, the primary meteorological drivers of ET₀. However, in certain regions, particularly windy areas, wind speed also plays a significant role. This is because wind influences horizontal advection and sensible heat transfer, which can substantially affect ET₀ rates. Therefore, the objectives of this study are, first, to investigate the impact of wind speed on the accuracy of the Makkink model in Iran's windy regions, and second, to improve the performance of this simple model by developing a coefficient for the Makkink model using average wind speed values.

2. Materials and Methods

Based on a review of the literature, the meteorological stations of Ardabil, Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil were selected. The reason for choosing these stations is their high and consistent 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. The PM model was used as the standard method to evaluate and calibrate the Makkink (MK) model. The MK model was first developed in the Netherlands and later successfully applied in the United States. This model can be considered a simplified version of the Priestley-Taylor equation, as it similarly requires only radiation and temperature as input variables. The difference is that instead of using net radiation (R_n) and temperature, the Makkink model uses shortwave radiation (R_s) and temperature. The Makkink model can provide reliable estimates of ET₀. Various researchers have modified the model proposed by Makkink (1957) for different regions. Therefore, in this study, four different versions of the Makkink model were utilized. To calibrate the MK model, three common methods proposed in previous studies were also employed.

3. Results and discussion

The ET₀ values were estimated using the Makkink (MK) model group for the selected stations and compared with the standard method. Interestingly, the results varied significantly across stations. Overall, the Zabol station showed the least agreement with the standard model, with an NRMSE higher than 5.5 and a d-index lower than 0.65 for all evaluated models. This discrepancy is likely due to Zabol's high average wind speed, which seems to have a notable impact on the model's performance. On the other hand, the Ardabil station stood out as an exception, with d-values exceeding 0.97 for all models. This suggests that, even without calibration, the MK model group provides ET₀ estimates that are remarkably close to those of the standard model at this location. For all the examined stations except Ardabil, based on the provided statistical indices (highest r and d values, as well as the lowest RMSE and MBE), the MK4 model demonstrated the highest agreement with the standard model. This is while, for the Ardabil station and based on statistical indices, the MK3 model showed the highest agreement with the standard model, albeit by a slight margin. Among the MK group models for each station, the model that provided the best results according to the statistical indices was selected, and its correction coefficient was adjusted

using three methods. For the Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil stations, the best results were obtained by establishing a regression relationship between the parameter α and wind speed, achieving negative MBE values of 0.019, 0.001, 0.017, and 0.003, respectively, and r values nearly equal to 1. However, for the Ardabil, Aligoodarz, and Bijar stations, no suitable regression relationship was found between the parameter α and wind speed. In these stations, the coefficient of the selected model was optimized by minimizing the sum of squared errors, yielding the best results with MBE values of 0.015, 0.126, and 0.100, and r values equal to 1, with only minor differences compared to the first correction method. Overall, the adjusted MK method demonstrated a very high level of agreement with the ET₀ values obtained using the PM method. This suggests that, with appropriate calibration, the MK model can be a reliable alternative for estimating ET₀, even in regions with varying climatic conditions.

4. Conclusion

The results of this study indicated that the MK model, before calibration, did not provide a satisfactory estimate of ET₀ compared to the standard PM model for the stations of Aligoodarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil. The largest discrepancy was observed for the Zabol station, which also had the highest wind speed among all the examined stations. However, for the Ardabil station, satisfactory results were obtained even before calibration. After applying corrections, the results significantly improved for all stations. Among the correction methods, for the Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil stations, the best results were achieved by establishing a regression relationship between the parameter α and wind speed. For the Ardabil, Aligoodarz, and Bijar stations, the coefficient of the selected model was optimized by minimizing the sum of squared errors, yielding the best results with only slight differences compared to the first correction method. These estimated coefficients have proven to provide reliable estimates across all stations and are highly adaptable to local climatic conditions.


5. Acknowledgement & Funding

This article is derived from a master's thesis conducted with the financial and spiritual support of the University of Zabol and the Islamic Republic of Iran Meteorological Organization.

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی و واسنجی مدل مک کینک برای تخمین تبخیر - تعرق مرجع در مناطق بادخیز ایران

عیسی ندیم میرا، محمد مهدی چاری^۲ , پرویز حقیقت جو^۳، پریسا کهخامقدم^۴، مهدی کیخا^۵

- ۱- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. he.mir1371@gmail.com
- ۲- نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. mmahdichari@uoz.ac.ir
- ۳- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. phjou40@gmail.com
- ۴- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. parisakahkhamoghadam@uoz.ac.ir
- ۵- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. mahdikeikha1395@gmail.com

چکیده

هدف: هدف این پژوهش بررسی تأثیر سرعت باد بر دقت روش مک کینک (MK) در محاسبه تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) و اصلاح ضریب مدل برای مناطق بادخیز است.

روش و داده: از اطلاعات هواشناسی طولانی مدت ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت جام، رفسنجان، زابل و منجیل استفاده گردید. مقدار ET_0 به دست آمده از روش MK با مقدار تبخیر-تعرق به دست آمده از روش فائو پن من-مانتیت (PM) مورد ارزیابی قرار می-گیرد. در انتها به منظور واسنجی مدل MK و اصلاح ضریب مدل (α) برای ایستگاه‌های مورد بررسی از سه روش متداول شامل (۱) نسبت تبخیر-تعرق PM به MK (۲) استفاده از حداقل کردن مجذور مربعات خطا و (۳) ایجاد رابطه رگرسیونی بین سرعت باد و ضریب مدل استفاده می‌شود.

یافته‌ها: برای ایستگاه‌های مورد بررسی نسبت متوسط بلندمدت ماهانه تخمین ET_0 از مدل MK به تخمین ET_0 از مدل PM در برابر مقادیر متوسط ماهانه سرعت باد در طول دوره آماری مورد نظر نشان داد که با افزایش سرعت باد مدل MK مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند. نتایج نشان داد که ایستگاه زابل با NRMSE بالاتر از ۵/۵ و d کمتر از ۰/۶۵ کمترین نزدیکی را با مدل PM داشته است که این امر به علت میانگین بالای سرعت باد در این ایستگاه است. ایستگاه اردبیل با d بالاتر از ۰/۹۷ دارای بهترین نتایج بوده و بدون واسنجی کردن، مدل MK را برای بیان تبخیر-تعرق مرجع استفاده کرد.

نتیجه‌گیری: برای ایستگاه‌های تربت جام، رفسنجان و زابل رابطه رگرسیونی چندجمله‌ای میان پارامتر α و سرعت باد با ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۷۲ و ۰/۹۰ به دست آمد. برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار ضریب تعدیل مدل از طریق حداقل کردن مجذور مربعات خطا به دست آمد.

نوآوری، کاربرد نتایج: مدل MK تعدیل شده در این پژوهش توافق خوبی با مدل PM در ایستگاه‌های مورد بررسی را فراهم می‌کند؛ لذا می‌تواند به عنوان جایگزین ساده‌ای از مدل استاندارد PM که نیاز به داده‌های هواشناسی زیادی دارد مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۷
دوره:	۶۳
صفحه:	۱-۱۹
تاریخ دریافت:	۱۴۰۴/۰۱/۲۹
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۴/۰۳/۲۲
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۴/۰۳/۲۲
تاریخ انتشار:	۱۴۰۵/۰۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- تبخیر-تعرق پتانسیل
- پنمن - مونتیت
- سرعت باد
- ضریب اصلاحی
- معادلات تجربی

نحوه ارجاع به این مقاله:

ندیم میرا، عیسی، چاری، محمد مهدی، حقیقت جو، پرویز، کهخامقدم، پریسا و کیخا، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی و واسنجی مدل مک کینک برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع در مناطق بادخیز ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۷(۶۳): ۱-۱۹.

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسندگان حق نشر و حقوق انتشار کامل را حفظ می‌کنند.

۱- مقدمه

کمبود منابع آب مهم‌ترین عامل محدودکننده برای تولید محصولات کشاورزی، امنیت غذایی و احیای محیط زیست است (Li et al., 2017). 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- تعرق است؛ بنابراین، داده‌های دقیق هواشناسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Zhang et al., 2018). تبخیر- تعرق مرجع (ET_0^1) بیان متمرکزی از اثرات شرایط مختلف هواشناسی بر نیاز آبی محصول است (Wang et al., 2008). استفاده از لایسیمترها اغلب به عنوان روشی دقیق و مؤثر برای تخمین ET_0 در نظر گرفته می‌شود. هزینه زیاد و پیچیدگی لایسیمترها از یک سو و مساحت کوچک آن‌ها از سوی دیگر از جمله مواردی است که استفاده از لایسیمترها را دشوار می‌سازد؛ لذا اندازه‌گیری مستقیم مبتنی بر اطلاعات اقلیمی در ایستگاه‌های هواشناسی برای پیش‌تبخیر-تعرق مناسب هستند (Tabari et al., 2012; Sentelhas et al., 2010). اغلب در عمل برای تخمین ET_0 از داده‌های هواشناسی یک ایستگاه استفاده می‌شود (Xing et al., 2008). روش‌های متعددی برای تخمین ET_0 با استفاده از داده‌های اقلیمی توسعه داده شده است که بر اساس فرضیات و داده‌های ورودی، به روش‌های ترکیبی، مبتنی بر دما، مبتنی بر تشعشع، مبتنی بر تبخیر از تشت و مبتنی بر انتقال جرم طبقه‌بندی می‌شوند (Feng et al., 2016; Liu et al., 2017).

نسخه سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO^2) مدل پنمن-مونتهیث (PM^3) که بر اساس اصول آیرودینامیکی و تعادل انرژی ایجاد شده است و همه عوامل مؤثر بر ET_0 را در نظر گرفته است، بهترین روش برای تخمین ET_0 معرفی کرده است (Allen et al., 1998; Muniandy et al., 2016). محمدی و حیدری با استفاده از محاسبه ET_0 به روش استاندارد PM، اثر خشک شدن دریاچه ارومیه را بر تبخیر-تعرق گیاه گندم مورد مطالعه قرار دادند (Mohammadi and Heidari, 2014). با این حال، مدل PM به متغیرهای آب و هوایی زیادی از جمله تابش خورشیدی، سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا نیاز دارد. گاهی اوقات این متغیرهای ورودی برای یک مکان مشخص به ویژه در کشورهای در حال توسعه ناقص بوده و یا در دسترس نیستند (Traore et al., 2010; Xu et al., 2017). بنابراین، معادلات تجربی ساده که به پارامترهای هواشناسی کمتری نیاز دارند، تحت شرایط آب و هوایی مختلف توسعه داده شده‌اند که می‌توان به مدل هارگریوز-سامانی، تورک، بلانی-کریدل، پرستی-تیلور، مک کینک، تابشی FAO-24، جنسن-هیز و ایرماک اشاره نمود (Kashyap and Panda, 2001; Xu and Singh, 2001; Trajkovic, 2007; Muniandy et al., 2016; Xu et al., 2016). مدل‌های مبتنی بر داده‌های هواشناسی، به مؤلفه‌های هواشناسی از جمله پوشش ابر، مدت زمان تابش آفتاب، دمای هوا و رطوبت نسبی بستگی دارند، که در این میان مدل‌های مبتنی بر تابش و دما از جمله رایج‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های تخمین ET_0 در سراسر جهان هستند (Hargreaves and Samani, 1982; Besharat et al., 2013; Hassan et al., 2016; Fan et al., 2018b).

تابش خورشیدی (Rs^4) ورودی اولیه برای تخمین ET_0 است (Tabari et al., 2016). بهترین روش برای تعیین Rs در هر ایستگاه هواشناسی، نصب ابزارهای اندازه‌گیری مانند پیرانومتر است که بسیار پرهزینه است (Besharat et al., 2013). در واقع، اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد داده‌های Rs در بسیاری از کشورهای در حال توسعه به دلیل ابزارهای گران قیمت، تجهیزات فنی و الزامات نگهداری کمیاب است (Fan et al., 2018a). علاوه بر این، حتی برای ایستگاه‌هایی که Rs اندازه‌گیری می‌شود نیز به علت خرابی تجهیزات و سایر مشکلات، بسیاری از داده‌های Rs ناقص بوده و یا خارج از محدوده مورد انتظار قرار دارند (Abraha and Savage, 2008)؛ لذا از روش‌های جایگزین برای تعیین Rs استفاده می‌شود.

شانزده مدل برای تخمین ET_0 در مقایسه با لایسیمتر وزنی در یک سایت نیمه خشک در چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مدل ترکیبی پنمن دقیق‌تر از مدل تابشی فائو ($FAO-24^5$) و مدل مبتنی بر دما بلانی-کریدل است (Liu et al., 2017). در پژوهشی که بر توسعه شاخص ترکیبی جدیدی برای ارزیابی خشک‌سالی‌های وضعیت آبخوان شهرکرد

1. Reference Evapotranspiration

2. Food and Agriculture Organization

3. Penman-Monteith

4. Solar Radiation

5. FAO-24 Radiation

صورت گرفت، محققین از روش هارگریوز- سامانی برای محاسبه ET_0 در این ایستگاه استفاده نمودند (Asadi Aghbalaghi et al., 2017).

شدت تابش خورشیدی و دمای هوا عوامل اصلی هواشناسی هستند که بر ET_0 تأثیر می‌گذارند (Priestley and Taylor, 1972; Samani, 2000; Martí et al., 2015). با این وجود در بعضی مکان‌ها مانند مناطق بادخیز، مناطق آبیاری شده و مناطق آب و هوایی خشک، سرعت باد نیز به دلیل فرارفت افقی و گرمای محسوس مهم است (Wright, 1996). سرعت باد در مناطق بادخیز از مهم‌ترین عوامل تبخیر-تعرق است. در پژوهشی شش مدل مختلف ترونوت‌وایت در مقایسه با روش PM و همچنین اصلاح آن برای منطقه بادخیز سیستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ایشان نشان داد که معادله اصلی ترونوت‌وایت 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 ترونوت‌وایت اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه، نتایج را بسیار بهبود بخشید (Darabi et al., 2022).

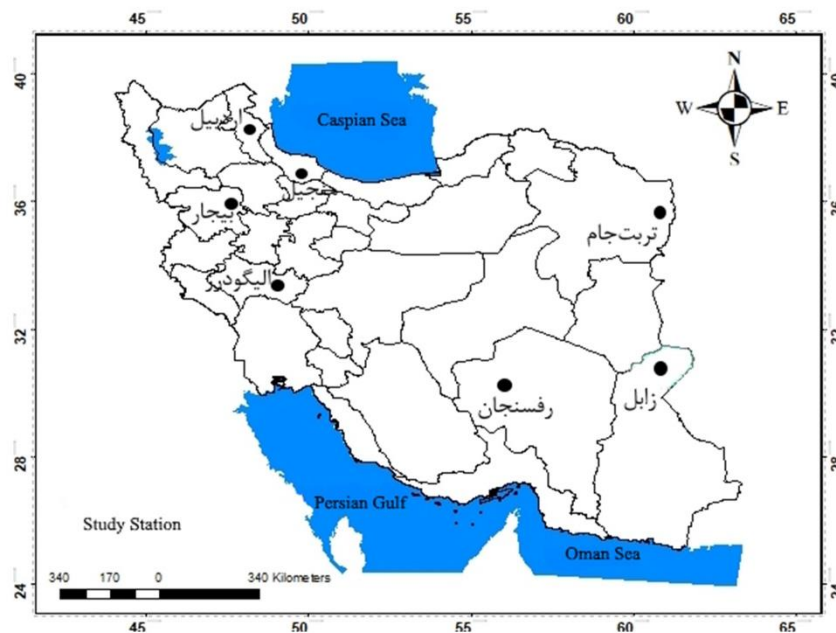
برای پنج ایستگاه در قونیه، پژوهشگران عملکرد شش معادله تجربی تخمین ET_0 شامل پرستلی-تیلور، تورک، مک‌کینک، جنسن-هیز، بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی را در مقایسه با روش PM مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که در غیاب داده‌های مشاهداتی مدل‌های تورک، هارگریوز-سامانی و پرستلی-تیلور که به داده‌های کمتری نیاز دارند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش PM محسوب شوند (Sarlak and Bagcaci, 2020). مدل اصلاح شده هارگریوز-سامانی در شرق ترکیه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رویکرد اصلاح شده هارگریوز-سامانی که توسط توسعه و اصلاح مقادیر ثابت در مدل مذکور شکل گرفته است، 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 15 ایستگاه هواشناسی در نگزاس، 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). اگرچه در سرتاسر جهان برای تخمین تبخیر-تعرق استفاده از مدل PM پیشنهاد شده است؛ اما ماهیت پیچیده و زمان‌بر بودن آن پژوهشگران را به بررسی مدل‌های جایگزین سوق داده است. بدین منظور 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 هستند (Uzunlar and Dis, 2024). در پژوهشی مشابه، دو مدل مبتنی بر تابش خورشیدی در مناطق نیمه‌خشک 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. 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).

علی‌رغم اهمیت ET_0 در توسعه 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. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که هیچ یک از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی پاسخگوی نیاز تمامی شرایط اقلیمی نبوده و تنها در شرایط خاصی جواب‌گو هستند (Landeras et al., 2008). از طرفی استفاده از مدل‌های ET_0 با ورودی‌های کمتر به خصوص در کشورهای در حال توسعه گاهی ضروری به نظر می‌رسد. به همین منظور هدف این پژوهش ابتدا بررسی تأثیر سرعت باد بر دقت مدل مبتنی بر تابش و دما مک‌کینک در مناطق بادخیز ایران و دوم بهبود عملکرد این مدل ساده از طریق توسعه ضریب مدل مک‌کینک، با استفاده از مقادیر میانگین سرعت باد می‌باشد. بدین منظور از اطلاعات هواشناسی روزانه هفت ایستگاه سینوپتیک کشور شامل اردبیل، الیگودرز، بیجار، رفسنجان، زابل و منجیل استفاده می‌گردد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

نظر به این که هدف پژوهش حاضر، تخمین ET_0 با استفاده از مدل مک کینک برای مناطق بادخیز ایران است؛ لذا برای این منظور با توجه به بررسی منابع، ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت جام، رفسنجان، زابل و منجیل انتخاب شد (شکل ۱). دلیل انتخاب ایستگاه‌های مذکور تداوم و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌های سینوپتیک کشور است (Gandomkar, 2010; Rahmani et al., 2014; Delbari et al., 2016; Pishgar-Komleh & Akram, 2017; Hanafi and Iranpour, 2017; Mohamadi et al., 2021). 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 است. میانگین پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش برای ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های مورد بررسی

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

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دما (سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	ساعات آفتابی (ساعت)	سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)
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
تربت جام	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

۲-۲- روش پژوهش

• مدل پنمن - مونتیث فائو

اندازه‌گیری تبخیر- تعرق ساده نیست و برای تعیین آن تجهیزات خاص مانند لایسیمتر مورد نیاز است که اغلب پرهزینه بوده و نیازمند دقت است و تنها توسط محققان آموزش دیده و مجرب قابل اجرا است. سازمان خواربار کشاورزی (FAO) استفاده از روش ترکیبی PM را به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه ET_0 با استفاده از داده‌های هواشناسی معرفی کرده است (Allen et al., 1998); لذا در این پژوهش به علت عدم وجود داده‌های دقیق لایسیمتری، از مدل PM به عنوان روش استاندارد جهت ارزیابی و واسنجی مدل مک‌کینک 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: ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ/m^2d)، G شار گرمایی خاک (MJ/m^2d)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری ($^{\circ}C$)، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa/^{\circ}C$) و γ ضریب ثابت سایکرومتری ($KPa/^{\circ}C$) است. برای به دست آوردن اجزای این معادله از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردیده است.

• مدل مک‌کینک (MK)

مدل MK اولین بار در هلند توسعه یافت و سپس با موفقیت در ایالات متحده استفاده گردید (Amatya et al., 1995). این مدل را می‌توان به عنوان فرمول ساده شده پریستلی- تیلور در نظر گرفت که مانند پریستلی- تیلور تنها به تشعشع و دما به عنوان مؤلفه‌های ورودی نیاز دارد. تفاوت آن این است که به جای استفاده از تابش خالص (R_n) و دما، مدل مک‌کینک از تابش موج کوتاه (R_s) و دما استفاده می‌کند. مدل مک‌کینک می‌تواند تخمین‌های قابل اعتمادی از ET_0 ارائه دهد. این مدل تنها با استفاده از مقادیر R_s و T مقدار ET_0 را به صورت معادله زیر برآورد می‌نماید (Makkink, 1957):

$$ET_0 = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda - 0.12 \quad \text{Makkink, 1957} \quad \text{MK(1)} \quad (2)$$

در این معادله λ گرمای نهان ویژه تبخیر و R_s تابش خورشیدی یا تابش طول موج کوتاه (مگاژول بر مترمربع بر روز) است. سایر پارامترها در مدل PM معرفی شده‌اند. برای به دست آوردن Δ و λ (که هر دو پارامتر تابعی از میانگین روزانه دما هستند) و همچنین R_s از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردیده است. پژوهشگران مختلفی مدل ارائه شده توسط مک‌کینک (۱۹۵۷) را برای مناطق مختلف به صورت زیر اصلاح نمودند:

$$ET_0 = 0.7 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda - 0.12 \quad \text{Castañeda and Rao, 2005} \quad \text{MK(2)} \quad (3)$$

$$ET_0 = 0.65 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda \quad \text{de Bruin, 1981; de Bruin and Lablans, 1998} \quad \text{MK(3)} \quad (4)$$

$$ET_0 = 0.7 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s / \lambda \quad \text{Hansen, 1984} \quad \text{MK(4)} \quad (5)$$

• واسنجی

به منظور واسنجی مدل MK برای ایستگاه‌های مورد بررسی از سه روش استفاده می‌شود:

روش اول: به گفته آلن، کالیبراسیون مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی بر اساس مقایسه آن‌ها با مدل استاندارد PM است (Allen et al., 1998); لذا در این پژوهش ابتدا مقدار تبخیر- تعرق از مدل پنمن - مونتیث ($ET_0(PM)$) و مدل مک‌کینک ($ET_0(MK)$) به صورت روزانه تخمین زده می‌شوند. در ادامه با به دست آوردن نسبت $\frac{ET_0(PM)}{ET_0(MK)}$ مقدار ضریب اصلاحی روش MK (پارامتر α) در مقیاس مذکور به دست می‌آید (Trajkovic & Stojnic, 2007).

روش دوم: مدل‌های گروه مک کینک شباهت به یک معادله رگرسیون خطی دارند که در آن‌ها ET_0 به عنوان متغیر وابسته است. واسنجی این مدل‌ها طبق ویژگی حداقل مربعات خطا است. 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 رگرسیون‌گیری 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 & 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 داده‌های ۱۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) برای واسنجی و از داده‌های ۱۰ ساله (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 ویلمات و بلوچی استفاده گردید که به صورت معادلات زیر ارائه شده است (Willmott, 1984; Bellocchi et al., 2010):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{MK,i} - ET_{PM,i})^2}{n}} \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{MK,i} - ET_{PM,i})^2 / n}}{\overline{ET_{PM}}} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{MK,i} - ET_{PM,i})}{n} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ET_{MK,i}}{\sum_{i=1}^n ET_{PM,i}} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{MK,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_{i=1}^n (|ET_{MK,i} - \overline{ET_{PM}}| + |ET_{PM,i} - \overline{ET_{PM}}|)^2} \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{MK,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{PM,i} - \overline{ET_{PM}})^2} \quad (11)$$

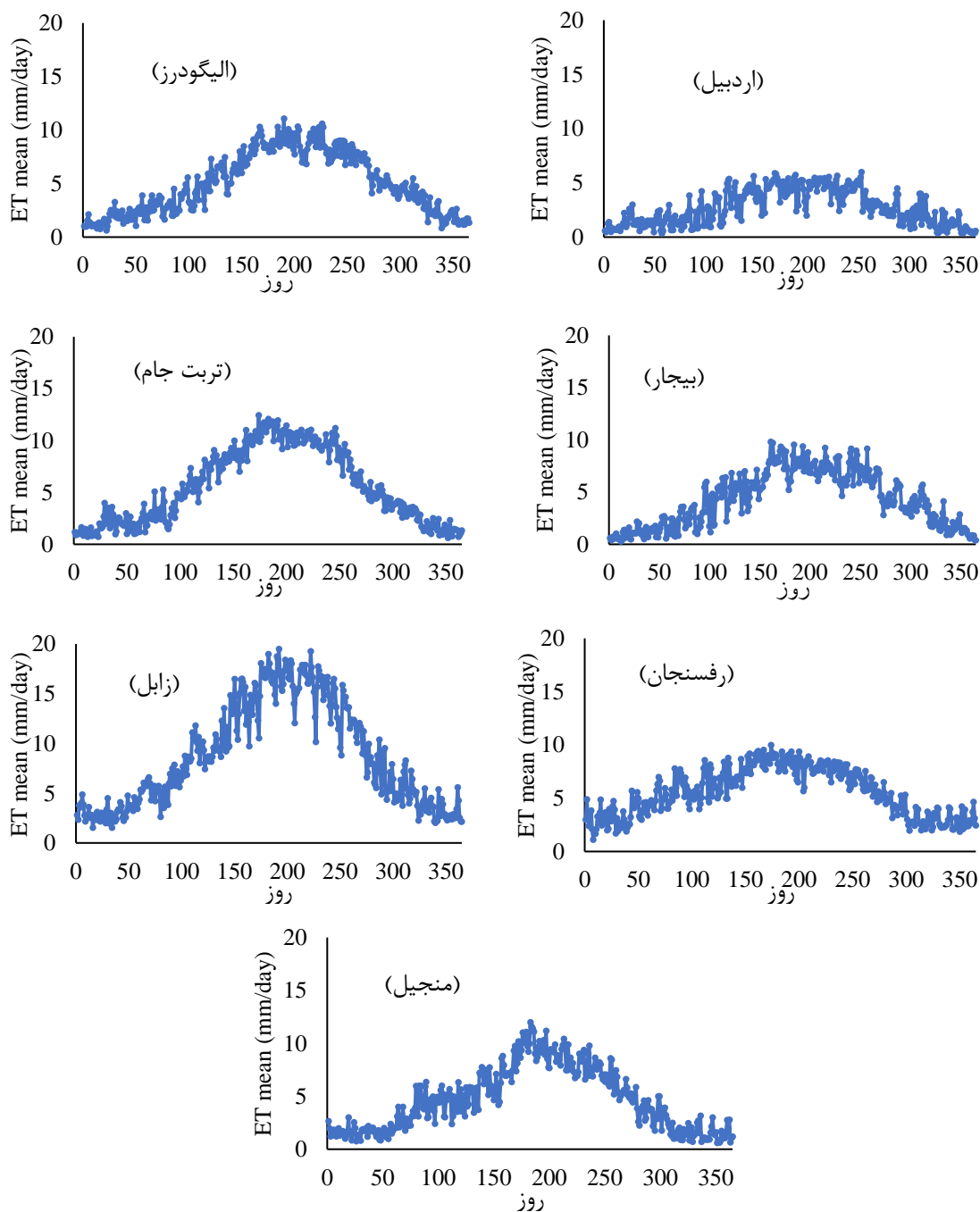
که در آن RMSE ریشه مربع میانگین خطا، NRMSE ریشه مربع میانگین خطا نرمال شده، MBE میانگین انحراف خطا، r نسبت بین مجموع تبخیر- تعرق محاسبه شده از مدل مک کینک (ET_{MK}) به مدل پنمن (ET_{PM})، d ضریب توافق، EF کارایی مدل و n تعداد کل داده‌ها است.

۳- یافته‌ها

تخمین ET_0 با مدل PM و مدل MK(1957)

مقادیر میانگین تبخیر- تعرق روزانه محاسبه شده با استفاده از روش پنمن- مونتیت برای دوره آماری مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان ET_0 برای ایستگاه زابل و کمترین آن مربوط به ایستگاه اردبیل است. دارابی و همکاران 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 است (Darabi et al., 2022) که همان‌طور که در شکل ۲ 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 رخ داده است.

نسبت متوسط بلندمدت ماهانه تخمین ET_0 از مدل MK 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 ۳ آورده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده کرد در مواقعی که سرعت باد زیاد باشد مدل MK مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند. بر اساس مطالعات ایرماک و همکاران اختلاف بین دو مدل کمتر از ۵ درصد محدوده قابل قبولی خواهد بود (Irmak et al., 2003).

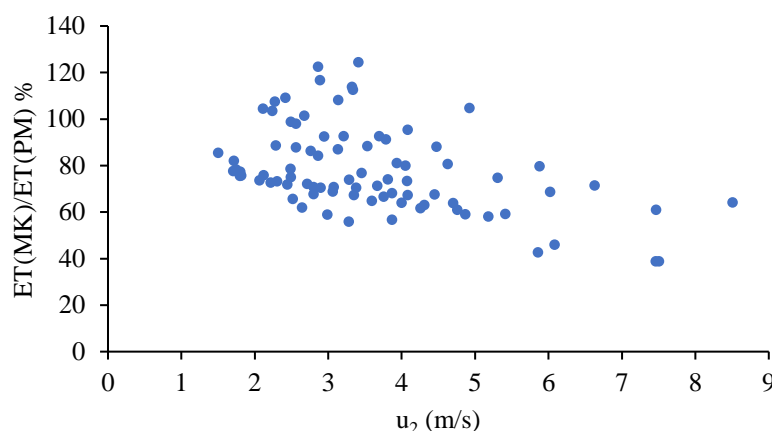


شکل ۲. مقادیر میانگین ET_0 روزانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۰

ارزیابی مدل‌های گروه مک‌کینک

مقادیر ET_0 با استفاده از مدل‌های چهارگانه مک‌کینک برای ایستگاه‌های مورد بررسی به دست آمد و با روش استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر شاخص آماری حاصل از این مقایسه در جدول ۲ ارائه شده است. در حالت کلی ایستگاه زابل با RMSE

بالتر از ۵/۵ و d کمتر از ۰/۶۵ برای تمام مدل‌های مورد بررسی کمترین نزدیکی را با مدل استاندارد داشته است که این امر به علت میانگین بالای سرعت باد در این ایستگاه است. این در حالی است که ایستگاه اردبیل برای تمام مدل‌های مورد بررسی مقادیر d بالاتر از ۰/۹۷ داشته است و بدون واسنجی کردن مدل می‌توان بیان کرد که ارتباط بسیار نزدیکی بین مقادیر تخمین زده شده ET_0 با مدل‌های گروه مک کینک (به خصوص مدل‌های de Bruin, 1981(MK3 و Hansen, 1984(MK4) و مدل استاندارد وجود دارد. برای ایستگاه‌های مورد بررسی به غیر از اردبیل با توجه به شاخص‌های آماری ارائه شده (بیشترین مقادیر r و d و همچنین کمترین مقادیر RMSE و MBE)، مدل Hansen, 1984(MK4 بیشترین تطابق را با مدل استاندارد داشته است. این در حالی است که برای ایستگاه اردبیل و با توجه به شاخص‌های آماری، با اختلاف اندکی بیشترین تطابق را مدل de Bruin, 1981(MK3 با مدل استاندارد داشته است. برای ایستگاه‌های الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل تمامی مدل‌های گروه مک کینک مقادیر ET_0 را کمتر از مدل استاندارد تخمین زده‌اند. این در حال است که برای ایستگاه اردبیل مدل‌های MK3 و MK4 بیش برآورد و مدل‌های MK1 و MK2 کم برآورد داشته‌اند.



شکل ۳. رابطه نسبت ماهانه $ET_0(MK)$ به $ET_0(PM)$ در مقابل میانگین ماهانه سرعت باد برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی (دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۰)

واسنجی مدل‌ها

از میان مدل‌های گروه MK برای هر ایستگاه، مدلی که بر اساس شاخص‌های آماری بهترین نتایج را ارائه کرده بود انتخاب گردید و ضریب اصلاحی آن از سه روش ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، تعدیل شد. جدول ۳ مقادیر شاخص‌های آماری مدل منتخب را بر اساس سه روش واسنجی پارامتر α در مقایسه با مدل واسنجی نشده نشان می‌دهد. در حالت کلی، هر سه روش اصلاحی نتایج تخمین ET_0 را بسیار بهبود بخشیده‌اند. 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 مورد بررسی نتایج رضایت بخشی را ارائه کرده بودند، با این وجود بعد از واسنجی کردن مدل منتخب MK(3)، از هر دو روش $\alpha=0.657$ که از نسبت $ET_0(PM)$ به $ET_0(MK)$ به دست آمده بود و همچنین $\alpha=0.666$ که با استفاده از گزینه solver و حداقل کردن مربعات خطا به دست آمده بود با اختلاف اندکی، مقدار خطا را کاهش و مقادیر ضریب کرائی را افزایش داد. برای ایستگاه الیگودرز و بیجار نتایج تخمین ET_0 با استفاده از هر دو روش اصلاحی ۱ و ۲ بسیار بهبود یافت. در این دو ایستگاه روش حداقل کردن مربعات خطا با نرم افزار solver، با کمترین مقادیر NRMSE (۰/۱۲۹ و ۰/۰۹۷) و MBE (۰/۱۲۶ و ۰/۱۰۰) و بیشترین مقادیر EF (۰/۹۴۳ و ۰/۹۷۲) به ترتیب برای الیگودرز و بیجار با تفاوتی ناچیز نتایج بهتری را ارائه کرد. این در حالی است که برای ایستگاه تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل روش اصلاحی با رابطه رگرسیونی بین پارامتر α و سرعت باد (روش سوم)، با کمترین مقادیر NRMSE (به ترتیب ۰/۰۵۶، ۰/۰۲۲، ۰/۰۶۳ و ۰/۰۶۱) و MBE (با مقادیر منفی به ترتیب ۰/۰۱۹، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱۷، ۰/۰۰۳) و بیشترین مقادیر EF (۰/۹۹) برای تمامی ایستگاه‌های مذکور، بهترین نتایج را ارائه کرده است.

جدول ۲. مقادیر شاخص آماری با استفاده از مدل‌های گروه MK برای محاسبه ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه (دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۰)

ایستگاه	$ET_0(PM)$	مدل	$ET_0(MK)$	RMSE	NRMSE	MBE	r	d
اردبیل	۲/۶۴	MK(1)	۲/۳۱	۰/۳۹	۰/۱۵	-۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۹۷
		MK(2)	۲/۵۹	۰/۱۸	۰/۰۶	-۰/۰۵	۰/۹۸	۰/۹۹
		MK(3)	۲/۶۷	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۲	۱/۰۱	۰/۹۹
		MK(4)	۲/۷۹	۰/۲۲	۰/۰۸	-۰/۱۴	۱/۰۵	۰/۹۹
الیگودرز	۴/۹۵	MK(1)	۲/۹۴	۲/۴۰	۰/۴۸	-۲/۰۰	۰/۵۹	۰/۷۴
		MK(2)	۳/۳۹	۱/۹۲	۰/۳۸	-۱/۵۵	۰/۶۸	۰/۸۲
		MK(3)	۳/۲۶	۲/۰۹	۰/۴۲	-۱/۶۸	۰/۶۵	۰/۷۸
		MK(4)	۳/۵۱	۱/۸۳	۰/۳۷	-۱/۴۳	۰/۷۱	۰/۸۳
بیجار	۴/۲۴	MK(1)	۲/۷۴	۱/۸۲	۰/۴۲	-۱/۵۰	۰/۶۴	۰/۸۱
		MK(2)	۳/۱۶	۱/۳۶	۰/۳۲	-۱/۰۸	۰/۷۴	۰/۹۰
		MK(3)	۳/۰۴	۱/۵۱	۰/۳۵	-۱/۱۹	۰/۷۱	۰/۸۷
		MK(4)	۳/۲۸	۱/۲۶	۰/۲۹	-۰/۹۶	۰/۷۷	۰/۹۱
تربت جام	۵/۴۴	MK(1)	۳/۰۹	۲/۹۸	۰/۵۴	-۲/۳۵	۰/۵۶	۰/۷۳
		MK(2)	۳/۵۶	۲/۴۷	۰/۴۵	-۱/۸۷	۰/۶۵	۰/۸۱
		MK(3)	۳/۴۲	۲/۶۶	۰/۴۸	-۲/۰۲	۰/۶۲	۰/۷۸
		MK(4)	۳/۶۸	۲/۳۸	۰/۴۳	-۱/۷۵	۰/۶۷	۰/۸۲
رفسنجان	۵/۵۵	MK(1)	۳/۴۹	۲/۱۸	۰/۳۹	-۲/۰۵	۰/۶۲	۰/۷۲
		MK(2)	۴/۰۲	۱/۶۲	۰/۲۹	-۱/۵۲	۰/۷۲	۰/۸۳
		MK(3)	۳/۸۵	۱/۸۲	۰/۳۲	-۱/۷۰	۰/۶۹	۰/۷۹
		MK(4)	۴/۱۴	۱/۵۱	۰/۲۷	-۱/۴۰	۰/۷۴	۰/۸۵
زابل	۸/۶۴	MK(1)	۳/۶۱	۶/۱۲	۰/۷۰	-۵/۰۲	۰/۴۱	۰/۶۰
		MK(2)	۴/۱۶	۵/۵۶	۰/۶۴	-۴/۴۷	۰/۴۸	۰/۶۴
		MK(3)	۳/۹۸	۵/۷۷	۰/۶۶	-۴/۶۶	۰/۴۶	۰/۶۲
		MK(4)	۴/۲۸	۵/۴۶	۰/۶۳	-۴/۳۵	۰/۴۹	۰/۶۵
منجیل	۴/۷۴	MK(1)	۲/۷۶	۲/۳۶	۰/۴۹	-۱/۹۷	۰/۵۸	۰/۷۵
		MK(2)	۳/۱۸	۱/۸۹	۰/۴۰	-۱/۵۵	۰/۶۷	۰/۸۴
		MK(3)	۳/۰۷	۲/۰۵	۰/۴۳	-۱/۶۷	۰/۶۴	۰/۸۰
		MK(4)	۳/۳۰	۱/۷۹	۰/۳۷	-۱/۴۳	۰/۶۹	۰/۸۵

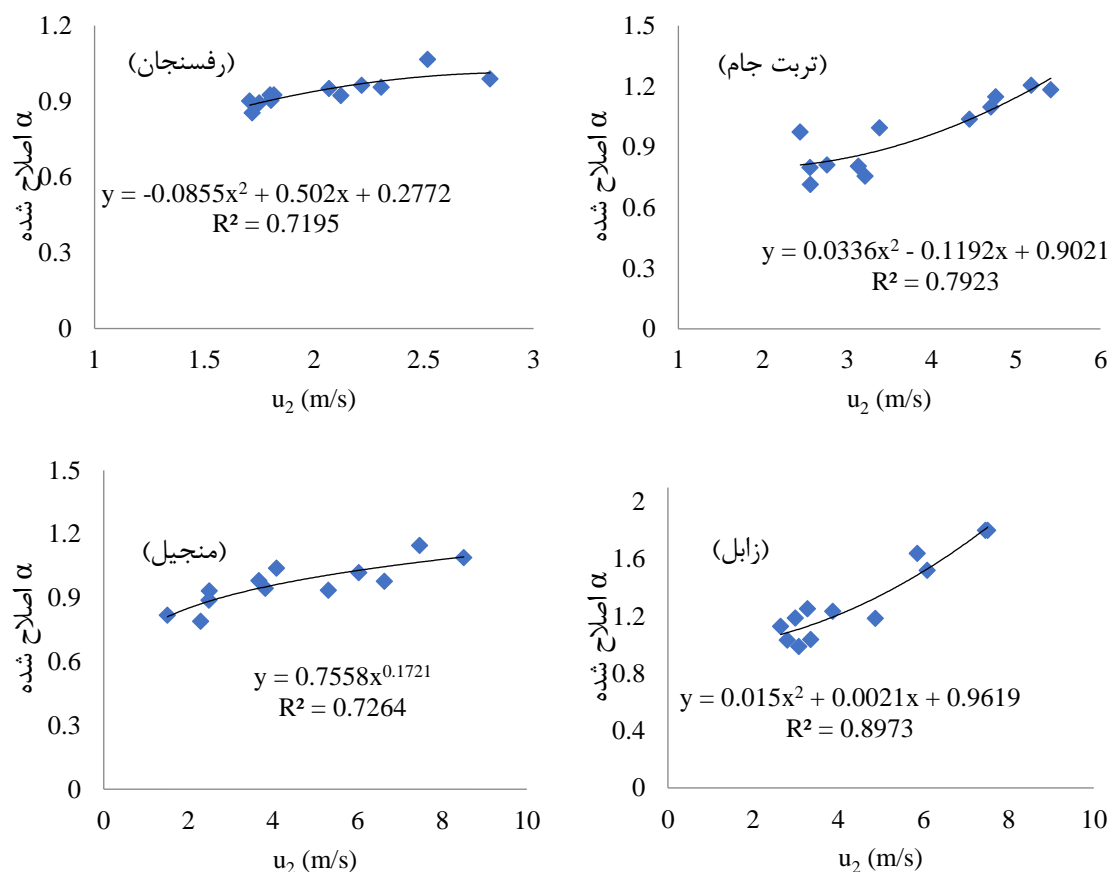
پژوهشگران بیان کردند که در مناطق بادخیز ضریب مدل MK (α_{MK}) بایستی اصلاح گردد (Cristea et al., 2013). برای بررسی تأثیر سرعت باد در اصلاح ضریب مدل MK نمودار مقدار سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح شده مدل مک‌کینک در مقیاس ماهانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی رسم گردید. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار این رابطه معنادار نبود. دلبری و همکاران برای ۱۰۴ ایستگاه سینوپتیک کشور پراکنش مکانی سرعت باد را مورد بررسی قرار دادند (Delbari et al., 2016). 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 هستند. نتایج این پژوهشگران می‌تواند دلیل ارتباط نامناسب مقدار سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح شده مدل منتخب برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز و بیجار را سبب شده باشد. شکل ۴ رابطه رگرسیونی بین مقادیر میانگین ماهانه سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح شده مدل منتخب (میانگین ماهانه ضریب α محاسبه شده از روش اصلاحی اول) برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن بهترین رابطه، از انواع رگرسیون شامل: خطی، لگاریتمی، چند جمله‌ای 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 ۰/۷۹، ۰/۷۲ و ۰/۹۰ به دست آمد. برای ایستگاه منجیل بالاترین

ضریب همبستگی برای رگرسیون توانی و برابر ۰/۷۳ محاسبه گردید. Cristea et al., (2013) بیان کردند که از میان رگرسیون‌های مختلف، بالاترین ضریب همبستگی بین میانگین سرعت باد و ضریب تعدیل مدل MK برای منطقه‌ای در ایالات متحده به صورت رگرسیون چند جمله‌ای است.

جدول ۳. شاخص‌های آماری عملکرد مدل‌های کالیبره شده بر اساس سه روش واسنجی (دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۱۴) در برآورد ET₀ در مقایسه با مدل واسنجی نشده (دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۰)

ایستگاه	alfa	RMSE	NRMSE	MBE	r	d	EF
اردبیل	$\alpha_{MK} = 0.65$	۰/۱۷۱	۰/۰۶۵	۰/۰۲۸	۱/۰۱۰	۰/۹۹۰	۰/۹۷۵
	$\alpha_{MK} = 0.657$	۰/۱۷۰	۰/۰۶۴	-۰/۰۲۱	۰/۹۹۲	۰/۹۹۴	۰/۹۸۴
	$\alpha_{MK} = 0.666$	۰/۱۶۶	۰/۰۶۳	۰/۰۱۵	۱/۰۰۵	۰/۹۹۶	۰/۹۸۶
	α_{MK-u2}	-	-	-	-	-	-
الیگودرز	$\alpha_{MK} = 0.7$	۱/۸۳۴	۰/۳۷۰	-۱/۴۳۴	۰/۷۱۱	۰/۸۳۷	۰/۵۳۴
	$\alpha_{MK} = 0.945$	۰/۷۳۲	۰/۱۴۸	-۰/۱۹۸	۰/۹۶۰	۰/۹۷۷	۰/۹۲۶
	$\alpha_{MK} = 1.010$	۰/۶۳۹	۰/۱۲۹	۰/۱۲۶	۱/۰۲۵	۰/۹۸۴	۰/۹۴۳
	α_{MK-u2}	-	-	-	-	-	-
بیجار	$\alpha_{MK} = 0.7$	۱/۲۶۸	۰/۲۹۸	-۰/۹۶۳	۰/۷۷۳	۰/۹۱۳	۰/۷۳۸
	$\alpha_{MK} = 0.85$	۰/۵۵۳	۰/۱۳۰	-۰/۲۲۶	۰/۹۴۷	۰/۹۸۵	۰/۹۵۰
	$\alpha_{MK} = 0.92$	۰/۴۱۴	۰/۰۹۷	۰/۱۰۰	۱/۰۲۳	۰/۹۹۲	۰/۹۷۲
	α_{MK-u2}	-	-	-	-	-	-
تربت جام	$\alpha_{MK} = 0.7$	۲/۳۸۴	۰/۴۳۸	-۱/۷۵۹	۰/۶۷۷	۰/۸۲۳	۰/۵۲۲
	$\alpha_{MK} = 0.96$	۱/۰۵۸	۰/۱۹۴	-۰/۳۹۰	۰/۹۲۸	۰/۹۶۹	۰/۹۰۶
	$\alpha_{MK} = 1.08$	۰/۷۸۳	۰/۱۴۴	۰/۲۴۳	۱/۰۴۵	۰/۹۸۵	۰/۹۴۸
	α_{MK-u2}	۰/۳۰۷	۰/۰۵۶	-۰/۰۱۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۲
رفسنجان	$\alpha_{MK} = 0.7$	۱/۵۱۱	۰/۲۷۲	-۱/۴۰۶	۰/۷۴۷	۰/۸۵۳	۰/۴۶۴
	$\alpha_{MK} = 0.937$	۰/۲۲۳	۰/۰۴۰	۰/۰۰۲	۱/۰۰۰	۰/۹۹۷	۰/۹۸۸
	$\alpha_{MK} = 0.936$	۰/۲۲۳	۰/۰۴۰	-۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۸۸
	α_{MK-u2}	۰/۱۲۳	۰/۰۲۲	-۰/۰۰۱	۱/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶
زابلی	$\alpha_{MK} = 0.7$	۵/۴۶۴	۰/۶۳۲	-۴/۳۵۵	۰/۴۹۶	۰/۶۴۶	۰/۲۶۴
	$\alpha_{MK} = 1.31$	۲/۰۹۹	۰/۲۴۳	-۰/۵۷۰	۰/۹۳۴	۰/۹۳۴	۰/۸۲۰
	$\alpha_{MK} = 1.47$	۱/۸۰۸	۰/۲۰۹	۰/۴۱۶	۱/۰۴۸	۰/۹۵۶	۰/۸۶۶
	α_{MK-u2}	۰/۵۴۰	۰/۰۶۳	-۰/۰۱۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۸۸
منجیل	$\alpha_{MK} = 0.7$	۱/۸۰۰	۰/۳۸۰	-۱/۴۳۵	۰/۶۹۷	۰/۸۵۳	۰/۵۷۰
	$\alpha_{MK} = 0.96$	۰/۵۵۹	۰/۱۱۸	-۰/۱۸۶	۰/۹۶۱	۰/۹۸۸	۰/۹۵۹
	$\alpha_{MK} = 1.02$	۰/۴۴۴	۰/۰۹۴	۰/۱۱۷	۱/۰۲۵	۰/۹۹۳	۰/۹۷۴
	α_{MK-u2}	۰/۲۹۱	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۸۹

در ادامه مقادیر تخمین زده شده ET₀ با استفاده از مدل‌های منتخب واسنجی شده از سه روش، ترسیم گردید که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر ET₀ روش MK قبل از اصلاح به جز در ایستگاه اردبیل تفاوت زیادی با روش استاندارد داشته است؛ اما بعد از اعمال ضریب تعدیل، تطابق بسیار خوبی را با تبخیر- تعرق به دست آمده با روش استاندارد PM فراهم می‌کند. شاخص‌های آماری نیز نشان می‌دهد که ضرایب تعدیل ارائه شده تخمین قابل اعتمادی را با شرایط اقلیمی هر منطقه نشان می‌دهد. برای ایستگاه اردبیل نیز همان‌طور که قبلاً هم اشاره شده مقادیر تخمین زده شده روش MK قبل از اصلاح نتایج قابل قبولی را ارائه کرده بود که بعد از اصلاح نیز این نتایج به مقادیر روش استاندارد نزدیک‌تر شدند.

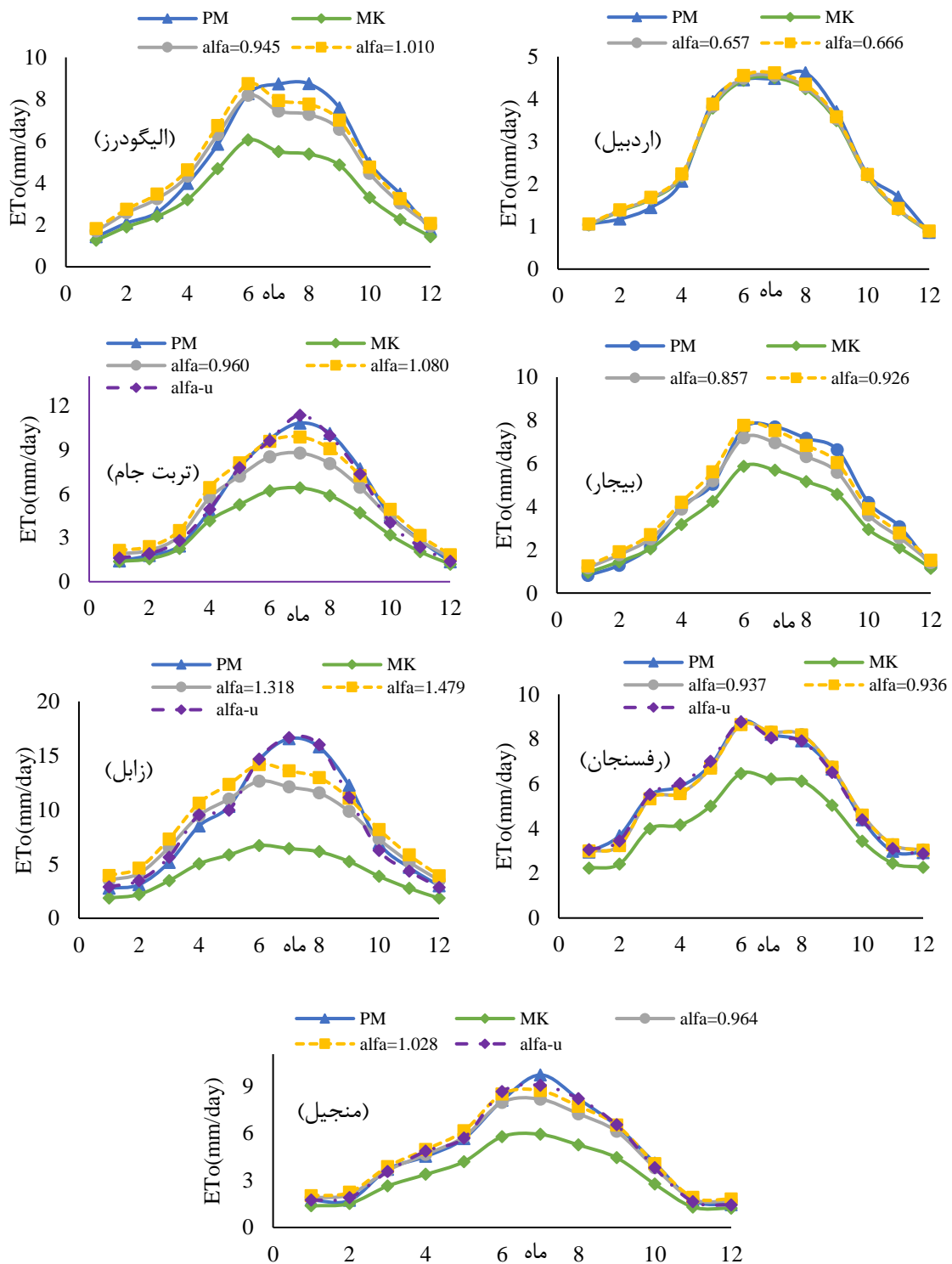


شکل ۴. ضریب اصلاحی مدل منتخب در مقابل میانگین سرعت باد ماهانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی (دوره آماری ۲۰۱۴-۲۰۰۰)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد مدل‌های گروه MK 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 MK 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 MK مقدار ET_0 را کمتر از مدل PM برآورد می‌کند. بررسی نشان می‌دهد در مکان‌های بادخیز معادلات تجربی بر پایه دما و تشعشع میزان ET_0 را کمتر تخمین می‌زنند (Trajkovic & Kolakovic, 2009)، که با نتایج این پژوهش نیز هم‌هنگی دارد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود مدل MK قبل از واسنجی کردن تخمین مناسبی از ET_0 را نسبت به مدل استاندارد PM برای ایستگاه‌های الیگودرز، بیجار، تربت جام، رفسنجان، زابل و منجیل ارائه نمی‌کند و بیشترین اختلاف نیز برای ایستگاه زابل مشاهده شد که نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد بررسی، دارای بیشترین سرعت باد نیز است. این در حالی است که برای ایستگاه اردبیل قبل از واسنجی نتایج رضایت بخشی به دست آمد. نتایج ارزیابی مدل مک کینک در کرمان ایران نشان داد که بدون اصلاح ضرایب آن استفاده آن توصیه نمی‌شود (Bakhtiari et al., 2011). در مطالعه‌ای در مرکز کشاورزی مدرن در مالزی بیست و شش مدل تخمین ET_0 را در برابر داده‌های لایسیمتری مورد مقایسه قرار دادند و دریافتند که مدل پنمن (۱۹۸۴) بهترین مدل برای تخمین ET_0 روزانه است و پس از آن مدل‌های پنمن-مونتیث و مک کینک بهترین تخمین را دارا هستند (Muniandy et al., 2016). عملکرد مدل‌های مختلف ET_0 ممکن است برای یک منطقه مناسب و برای منطقه دیگر نامناسب باشد. برای منطقه‌ای در مالزی از میان هفت مدل مورد بررسی، مدل تورک به عنوان بهترین مدل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد این در حالی است که مدل‌های مک کینک و هارگریوز

سامانی نیز در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بعد از اصلاح ضریب مدل منتخب، برای تمامی ایستگاه‌ها نتایج بسیار بهبود یافت (Goh et al., 2021).



شکل ۵. میانگین ماهانه ET₀ بر اساس مدل PM، مدل اصلاح نشده، مدل MK 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 (دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۱۴)

نتایج این پژوهش نشان داد که برای ایستگاه اردبیل تمامی مدل‌های گروه مک‌کینک بدون اصلاح تطابق خوبی را با روش استاندارد نشان می‌دهند؛ اما برای شش ایستگاه دیگر تمامی مدل‌های مورد بررسی مقادیر ET_0 را کمتر از مدل استاندارد تخمین می‌زنند. بعد از اصلاح ضریب مدل منتخب، برای تمامی ایستگاه‌ها نتایج بسیار بهبود یافت. برای ایستگاه‌های تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل بهترین نتایج از ایجاد رابطه رگرسیون بین پارامتر α با سرعت باد حاصل شد. این در حالی است که برای ایستگاه‌های اردبیل، ایگودرز و بیجار رابطه رگرسیونی مناسبی با پارامتر α و سرعت باد ایجاد نشد. در این ایستگاه‌ها ضریب مدل منتخب از طریق حداقل کردن مجذور مربعات خطا با اندک تفاوتی نسبت به روش اصلاحی اول، بهترین نتایج را ارائه کرد. برای چهار ایستگاه ارومیه، رشت، مشهد و یزد ضریب مدل MK را اصلاح نمودند و اظهار داشتند که بعد از اصلاح مقادیر ET_0 بهبود یافتند (Safari et al., 2022). ارزیابی مدل‌های گروه MK برای دوازده ایستگاه هواشناسی در شمال غربی چین نشان می‌دهد که مدل‌های بهبود یافته نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌کند (Zhang et al., 2018). به طور کلی مدل MK تعدیل شده در این پژوهش توافق خوبی با مدل استاندارد در ایستگاه‌های مورد بررسی فراهم می‌کند؛ لذا می‌تواند به عنوان جایگزین ساده‌ای از مدل استاندارد PM که نیاز به داده‌های هواشناسی زیادی دارد مورد استفاده قرار گیرد.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشجو عیسی ندیم میر است که با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه زابل و سازمان هواشناسی کشور انجام شده است.

۶- فهرست منابع

- اسدی آقبلاغی، فرزانه، میرعباسی نجف‌آبادی، رسول، نصرافهانی، محمدعلی، قاسمی‌دستگردی، احمدرضا. (۱۳۹۶). توسعه‌ی یک شاخص ترکیبی جدید (CDI) برای ارزیابی چندمتغیره خشک‌سالی‌های دشت شهرکرد. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۲۹(۸)، ۱۰۲-۸۷.
- حنفی، علی و ایران‌پور، فخرالدین. (۱۳۹۶). ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل سرعت باد در کشور به‌منظور برنامه‌ریزی جهت تولید برق بادی. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۸(۳۱)، ۸۸-۷۳.
- دارابی، هما، چاری، محمدمهدی، افراسیاب، پیمان، پیری، حلیمه. (۱۴۰۱). ارزیابی و واسنجی معادله ترونت‌وایت برای تخمین تبخیر تفرق در اقلیم بادخیز مطالعه موردی: منطقه سیستان. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۴)، ۵۶۴-۵۴۹.
- دلبری، معصومه، کهخامقدم، پریسا، محمدی، احسان، احمدی، تاریخ. (۱۳۹۵). برآورد الگوی پراکنش مکانی سرعت باد برای پتانسیل تولید انرژی بادی در ایران، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۲(۴۸)، ۲۸۵-۲۶۵.
- صفری، فاطمه، کاویانی، عباس، عزیزیان قطار، اصغر، رضانی، هادی. (۱۴۰۱). اصلاح ضرایب تعدادی از معادلات برآورد تبخیر-تفرق گیاه مرجع. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۸(۲)، ۴۲۶-۴۱۱.
- گندم‌کار، ا. (۱۳۸۸). ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۰(۴)، ۱۰۰-۸۵.
- محمدی، حسین و حیدری، محمدمامین. (۱۳۹۳). مدل‌سازی تغییرات تبخیر و تفرق گیاه گندم دشت مراغه در شرایط خشک شدن دریاچه ارومیه. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵(۱۷)، ۸۶-۷۱.

References

- Abraha, M. G., & Savage, M. J. (2008). Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(3), 401-416. doi: 10.1016/j.agrformet.2007.10.001
- 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, Rome*, 300(9), D05109.
- Amatya, D. M., Skaggs, R. W., & Gregory, J. D. (1995). Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 121(6), 427-435. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:6(427)

- Asadi Aghbalaghi, F., Mirabbasi Najafabadi Mohammad, R., Nasr Esfahani, A., & Ghasemi Dastgerdi, A. R. (2017). Development of a new composite drought index (CDI) based on shannon's entropy theory for multivariate assessment of drought in Shahrekord Plain. *Arid Regions Geographic Studies*, 8(29), 87-102. <https://civilica.com/doc/1157309> [In Persian]
- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A. M., & Hoogenboom, G. (2011). Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, 223-237. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-7524-en.html>
- 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. doi: 10.1051/agro/2009001
- Besharat, F., Dehghan, A. A., & Faghih, A. R. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798-821. doi: 10.1016/j.rser.2012.12.043
- 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. doi: 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. doi: 10.22059/jphgr.2023.350271.1007728 [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. doi: 10.22059/jphgr.2016.59368 [In Persian]
- Fan, J., Chen, B., Wu, L., Zhang, F., Lu, X., & Xiang, Y., 2018a. Evaluation and development of temperature-based empirical models for estimating daily global solar radiation in humid regions. *Energy*, 144, 903-914. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.091
- Fan, J., Wang, X., Wu, L., Zhang, F., Bai, H., Lu, X., & Xiang, Y., 2018b. 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. doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.085
- Feng, Y., Cui, N. B., Zhao, L., Hu, X. T., & Gong, D. Z., 2016. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, 536, 376-383. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.02.053.
- Gandomkar, A. (2010). Wind energy potential estimation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 20(4), 85-100. <https://sid.ir/paper/153205/fa> [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. doi: 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. <https://www.magiran.com/p1888010> [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. doi: 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. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(360)
- 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. doi: 10.1016/S0378-3774(01)00102-0
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., & López, J. J. (2008). Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural water management*, 95(5), 553-565. doi: org/10.1016/j.agwat.2007.12.011
- Li, Y., Huang, C., Hou, J., Gu, J., Zhu, G., & Li, X. (2017). Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe

- River Basin, Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244, 82-97. doi: org/10.1016/j.agrformet.2017.05.023
- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural water management*, 184, 145-155. doi: 10.1016/j.agwat.2017.01.017
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11, 277-288.
- Marti, P., Zarzo, M., Vanderlinden, K., & Girona, J. (2015). Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. *Journal of Hydrology*, 529, 1713-1724. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.054
- Mohamadi, H., & Heidari, M. A. (2014). Modeling evapotranspiration changes wheat crop of Maragheh Plain at the drying conditions the Lake Urmia. *Arid Regions Geographie Studies*, 5(17), 71-86. <https://civilica.com/doc/794881> [In Persian]
- 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). doi: 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. doi: 10.1016/j.agwat.2016.02.019
- 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. doi: 10.1007/s00484-023-02566-5
- 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. doi: 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. doi: 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. doi: 10.20508/ijrer.v4i4.1700.g6434.
- 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. 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. doi: 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. doi: 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. doi.org/10.18400/tekderg.408019
- Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., & Santos, E. A. (2010). Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural water management*, 97(5), 635-644. doi: 10.1016/j.agwat.2009.12.001
- Su, Q., Singh, V. P., & Karthikeyan, R. (2022). Improved reference evapotranspiration methods for regional irrigation water demand estimation. *Agricultural Water Management*, 274, 107979. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107979
- Tabari, H., Hosseinzadehtalaei, P., Willems, P., & Martinez, C. (2016). Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations. *Hydrological Sciences Journal*, 61(3), 610-619. doi: 10.1080/02626667.2014.947293
- Tabari, H., Kisi, O., Ezani, A., & Talaei, P. H. (2012). SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. *Journal of Hydrology*, 444, 78-89. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.007
- Trajkovic, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1), 38-42. doi: 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. doi: 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. doi: 10.2298/FUACE0702107T
- Traore, S., Wang, Y. M., & Kerh, T. (2010). Artificial neural network for modeling reference evapotranspiration complex process in Sudano-Sahelian zone. *Agricultural water management*, 97(5), 707-714. doi: 10.1016/j.agwat.2010.01.002
- Uzunlar, A., & Dis, M. O. (2024). Novel approaches for the empirical assessment of evapotranspiration over the mediterranean region. *Water*, 16(3), 507. doi: 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. doi:10.21605/cukurovaumfd.1230919
- Wang, S. F., Duan, A. W., Zhang, Z. Y., 2008. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Monteith equation during the different hydrological years in the semi-arid region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24 (7), 29-33.
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial statistics and models*, 443-460. doi: 10.1007/978-94-017-3048-8_23
- Wright, J. L. (1996). Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/862>
- Xing, Z., Chow, L., Meng, F. R., Rees, H. W., Monteith, J., & Lionel, S. (2008). Testing reference evapotranspiration estimation methods using evaporation pan and modeling in maritime region of Canada. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(4), 417-424. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(417)
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological processes*, 15(2), 305-319. doi: 10.1002/hyp.119
- Xu, J., Liu, X., Yang, S., Qi, Z., & Wang, Y. (2017). Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation by calibrating canopy resistance model parameters in the Penman-Monteith equation. *Agricultural Water Management*, 182, 55-66. doi: 10.1016/j.agwat.2016.12.010
- 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. doi: 10.1007/s11269-016-1269-y
- Zhang, Q., Cui, N., Feng, Y., Gong, D., & Hu, X. (2018). Improvement of Makkink model for reference evapotranspiration estimation using temperature data in Northwest China. *Journal of Hydrology*, 566, 264-273. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.021.