

Determining the Contribution of Aerodynamic and Energy Balance Components to Reference Evapotranspiration in Windy Regions of Iran

Eisa Nadim-Mir¹, Mohammad Mahdi Chari^{2*}, Parviz Haghightaj², Parisa Kakhmoghadam³, Mahdi Keikha³

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

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

³Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

*Corresponding Author Email: mmahdichari@uoz.ac.ir

Received: 07 Aug. 2025

Accepted: 19 Oct. 2025

Revised: 03 Oct. 2025

Published: 22 Dec. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Among the various approaches used to estimate evapotranspiration (ET_0), the FAO Penman-Monteith (PM) model is recognized as the standard method. However, the requirement for extensive data limits the application of this method. The Penman Group (PG) models, by separating the contributions of aerodynamic and energy balance components, are widely used for calculating d are equal to 0.1 and 0.537, respectively; in the Penman-Kimberly (PK) model, they are 0.75 and 0.993, respectively; and in the Allen-Pruitt (AP) model, they are 0.1 and 0.862, respectively ([Table 2](#)). Therefore, in this study, three different versions of the Penman model were used. To calibrate the investigated models, the sum of squared errors (SSE) method was employed.

Results and Discussion: ET_0 values were calculated using the Penman group models (P, PK, and AP) for the selected stations and compared with the standard method. The results [Fig. 2](#) and [Table 3](#) showed that, for all studied stations, all Penman group models overestimated ET_0 compared to the standard method. The highest agreement was observed for the P model (Penman, 1963), with agreement coefficients of 0.95, 0.98, 0.98, 0.99, 0.97, 1.00, and 0.97, respectively, for Ardabil, Aligoudarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil. The lowest agreement belonged to the PK model (Penman-Kimberly, 1972), with agreement coefficients of 0.91, 0.88, 0.90, 0.90, 0.88, 0.89, and 0.85 for the same stations. Therefore, the P model was selected as the best-performing model for all stations and was calibrated by adjusting the wind function coefficients (F_w) through the error minimization method (least squares). After calibration, the ET_0 values estimated by the adjusted Penman model (Adjusted-P) became closer to those estimated by the standard method. The model efficiency (EF) also improved after calibration, reaching values of 0.99, 0.98, 0.99, 1.00, 1.00, 0.99, and 1.00 for Ardabil, Aligoudarz, Bijar, Torbat-e Jam, Rafsanjan, Zabol, and Manjil, respectively. The relationship between average wind speed and the average contribution of energy balance and aerodynamic components at the daily scale was also plotted for the studied stations. Results indicated that, for all stations, as wind speed increased, the contribution of the aerodynamic component clearly and significantly increased ([Fig. 3](#)). Subsequently, the contributions of the aerodynamic and energy balance components were calculated for the calibrated Penman model. The contribution of the aerodynamic component was found to be considerable across all stations, particularly pronounced at Zabol station, which has the highest average wind speed ([Table 5](#)). Therefore, the role of this component which reflects airflow and wind speed in determining ET_0 values cannot be ignored. Consequently, using simplified alternative models for ET_0 estimation that do not account for wind speed, such as radiation-based or temperature-based models, should be accompanied by appropriate calibration and adjustment of their coefficients to ensure accuracy in windy regions.

Conclusion: The results indicate that as the average wind speed increases, the contribution of the aerodynamic component rises across all investigated stations. Overall, the contribution of the aerodynamic component is

considerable compared to that of the energy balance component at all studied stations, with this effect being particularly pronounced at Zabol station, which has the highest average wind speed. Therefore, given the significant influence of airflow and wind speed on the magnitude of ET_0 in windy regions, implementing measures such as installing natural or artificial windbreaks in these areas could substantially contribute to reducing ET_0 and, consequently, improving water resource management. However, the effectiveness and practical implementation of such measures require further extensive investigation.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تعیین سهم بخش آیرودینامیکی و توازن انرژی در مقدار تبخیر - تعرق مرجع برای مناطق بادخیز ایران

عیسی ندیم میر^۱، محمد مهدی چاری^{۲*}، پرویز حقیقت جو^۲، پریسا کهخامقدم^۳، مهدی کیخا^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: mmahdichari@uoz.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

چکیده: تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) نقش مهمی در مدیریت و استفاده مناسب از منابع آب، مطالعات اقلیمی و چرخه آب دارد. در میان رویکردهای مختلفی که برای تخمین ET_0 استفاده می‌شوند، مدل پنمن-مونتیث فائو (PM) به عنوان روش استاندارد شناخته می‌شود. با این حال، نیاز به داده‌های گسترده، این روش را محدود می‌کند. مدل‌های ترکیبی عملکرد خوبی را برای تخمین ET_0 نشان می‌دهند که در این میان مدل‌های گروه پنمن (PG) با تفکیک سهم مولفه‌های آیرودینامیک و توازن انرژی به طور گسترده برای محاسبه ET_0 مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا این پژوهش با هدف ارزیابی و واسنجی PG برای مناطق بادخیز ایران صورت پذیرفت. برای این منظور از اطلاعات هواشناسی بلند مدت هفت ایستگاه هواشناسی اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت جام، رفسنجان، زابل و منجیل استفاده گردید. نتایج نشان داد مدل پنمن (P) بیشترین نزدیکی را با مدل استاندارد دارد؛ بنابراین با هدف بهبود نتایج، مدل مذکور برای ایستگاه‌های مورد بررسی واسنجی گردید و سهم هر یک از مولفه‌های آیرودینامیک و توازن انرژی با استفاده از مدل واسنجی شده محاسبه شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش سرعت باد، سهم مولفه آیرودینامیک برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی افزایش می‌یابد و این افزایش برای ایستگاه زابل که از سرعت باد بالاتری برخوردار است، بارزتر می‌باشد. با توجه به تاثیر قابل توجه جریان هوا و سرعت باد در مقدار کمی ET_0 برای مناطق بادخیز، ایجاد راهکارهایی مانند احداث بادشکن‌ها اعم از طبیعی و مصنوعی، می‌تواند کمک شایانی به مدیریت منابع آب داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: تابع باد، پنمن-مونتیث، مدل‌های ترکیبی، مدیریت منابع آب.

غذایی شده است؛ لذا علیرغم محدودیت منابع آبی نیاز است تا عملکرد محصولات زراعی افزایش یابد. به همین دلیل حرکت به سمت کشاورزی پایدار که امکان استفاده کارآمد از

۱- مقدمه

افزایش جهانی تقاضای غذا، باعث افزایش فشار به سیستم‌های

که به کاربرد مدل‌ها و فرضیات آنها بستگی دارند (Xiang et al., 2020). مدل‌های تخمین ET_0 به چهار گروه اصلی شامل: روش‌های انتقال جرم، مبتنی بر دما، مبتنی بر تابش و ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند (Proutsos et al., 2024). اما این مدل‌ها تحت شرایط خاص هواشناسی توسعه یافته‌اند و بایستی برای مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند. علاوه بر این، واسنجی محلی و تطبیق این مدل‌ها با شرایط خاص هر منطقه می‌تواند دقت تخمین آنها را افزایش دهد (Yan et al., 2020).

سازمان خواربار کشاورزی ملل متحد (FAO) و سازمان هواشناسی جهانی (WMO) مدل استاندارد پنمن-مونتیت فائو (PM) را برای تخمین ET_0 توصیه می‌کنند (Allen et al., 1998). مدل PM به دلیل دقت آن در اقلیم‌ها و دوره‌های زمانی مختلف شناخته شده است و به عنوان استاندارد برای مقایسه با سایر روش‌های تجربی یا محاسباتی در اکثر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Allen et al., 2005; Xu et al., 2015; Proutsos et al., 2023). از سوی دیگر، کاربرد آن به دلیل نیاز به داده‌های زیاد همیشه امکان‌پذیر نیست.

به دست آوردن داده‌های با کیفیت نیز می‌تواند چالش برانگیز باشد (Droogers and Allen, 2002). بنابراین، توسعه مدل‌هایی که بین دقت و سادگی تعادل برقرار می‌کنند و از پارامترهای هواشناسی کمتری برای تخمین‌های ET_0 در مقایسه با روش PM استفاده می‌کنند، بسیار مهم است. علاوه بر این، تنظیم یا واسنجی مدل‌های ساده‌تر با تعداد مولفه‌های مورد نیاز کمتر، برای تخمین دقیق ET_0 ، به ویژه در مناطقی که داده‌های هواشناسی کمیاب هستند، ضروری می‌باشد (Tabari and Talaei, 2011). در این زمینه، مطالعات زیادی عملکرد مدل‌های مختلف تخمین ET_0 را در مقایسه با مدل PM برای شرایط مختلف اقلیمی ارزیابی کرده‌اند و اظهار داشته‌اند که مدل‌های مبتنی بر ترکیب، بهترین عملکرد را برای تخمین ET_0 نشان می‌دهند و پس از آن مدل‌های مبتنی بر تابش و دما قرار دارند (Paparrizos et al., 2017; Sharafi and Mohammadi Ghalehi, 2021; Islam and Alam, 2021; Proutsos et al., 2023).

منابع آب را نیز فراهم می‌نماید، ضروری است (Gilbert and Hernandez, 2019).

یکی از نکات کلیدی برای رسیدن به شیوه‌های کارآمد کشاورزی، مدیریت مناسب آبیاری است که به تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان بستگی دارد. تبخیر-تعرق معیاری از نیاز آبی محصولات است که مستلزم حرکت بخار آب از زمین به جو به شکل تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاهان می‌باشد (Allen et al., 1998). از این رو، تخمین مناسب تبخیر-تعرق گیاه برای جلوگیری از بیش‌آبیاری و یا کم‌آبیاری، همچنین حفاظت از منابع آبی و در عین حال تولید محصولات کشاورزی لازم و ضروری است. تبخیر-تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد با ضرب کردن ضریب گیاهی در تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) محاسبه و تعیین می‌شود (Allen et al., 1998). برآورد ET_0 می‌تواند به صورت غیر مستقیم و از طریق مدل‌هایی که میزان ET_0 را پیش‌بینی می‌کنند و یا اندازه‌گیری‌های مستقیم در مزرعه صورت گیرد (Ghiat et al., 2021).

اندازه‌گیری مستقیم ET_0 از طریق رویکردهایی مانند لایسیمتر، کوواریانس گردابی و نسبت باون به دلیل تجهیزات گران‌قیمت مورد نیاز و مشکلات عملی، دشوار است (Jia et al., 2006; Hirschi et al., 2017; Proutsos et al., 2024). توجه به پیچیدگی و هزینه بالای اندازه‌گیری مستقیم، تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌های تخمینی ET_0 انجام شده است (Gharsallah et al., 2013). در رابطه با مدل‌های تخمین ET_0 ، اولین مدل توسط پنمن توسعه داده شده است (Penman, 1948). سپس این مدل توسط مونتیت و با اضافه کردن ویژگی‌های فیزیولوژیکی بهبود بیشتری یافت (Monteith et al., 1965). نسخه‌های ساده شده دیگری از مدل پنمن-مونتیت پیشنهاد شده است که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند (Steiner et al., 1991).

مدل‌های ریاضی-تجربی زیادی در سراسر جهان برای تخمین ET_0 با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه داده شده‌اند. این مدل‌ها دارای نقاط قوت و محدودیت‌های خاصی هستند

تجربی و نیمه تجربی بهتر عمل می‌کنند (Shiri, 2017). کاظمی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی مدل پنمن- کیمبرلی برای شش ایستگاه استان سیستان و بلوچستان برای تعیین سهم مولفه‌های آبرودینامیکی و توازن انرژی در مقدار ET_0 پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد نقش هر دو مولفه در فرآیند ET_0 مهم می‌باشد؛ لازم به ذکر است که در این پژوهش مدل پنمن- کیمبرلی واسنجی نشد و ایستگاه بادخیز زابل، مورد بررسی قرار نگرفت. در پژوهشی دارابی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی شش مدل مختلف ترونت‌وایت در مقایسه با روش PM و همچنین اصلاح آن برای منطقه بادخیز سیستان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که معادله اصلی ترونت‌وایت مقدار ET_0 را کمتر از روش استاندارد PM برآورد می‌کند. لذا ضریب موثر مدل مذکور برای منطقه سیستان اصلاح گردید و بدین طریق مدل ترونت‌وایت اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه، نتایج را بسیار بهبود بخشید.

اگرچه در سرتاسر جهان برای تخمین ET_0 استفاده از مدل PM پیشنهاد شده است، اما ماهیت پیچیده و زمان بر 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 به‌طور قابل توجهی بر مقادیر ET_0 موثر می‌باشند (Uzunlar and Dis, 2022). ندیم میر و همکاران (۱۴۰۴) نسخه‌های مختلف مدل مک‌کینک را برای مناطق بادخیز ایران ارزیابی و اصلاح نمودند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که مدل مک‌کینک بعد از اصلاح توافق خوبی با مدل استاندارد PM دارد و می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای مناطق مورد بررسی در نظر گرفته شود.

درک رفتار مدل‌های ET_0 در مناطق بادخیز، برای اطمینان از تخمین‌های دقیق و پیش‌بینی‌های قابل اعتماد در شرایط خاص آب و هوایی بسیار مهم است. از این رو، انجام ارزیابی‌ها در چنین مناطقی می‌تواند منجر به بینش‌های ارزشمندی

زارع‌ایانه و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی ۱۳ مدل تخمین ET_0 برای ۹۱ ایستگاه هواشناسی ایران پرداختند. ایشان نیز بیان کردند که در اکثر مناطق ایران، مدل‌های بر پایه پنمن مناسب‌ترین روش برای برآورد ET_0 محسوب می‌شوند.

اکثر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، به بررسی تفاوت‌ها میان مدل‌های تجربی مختلف تخمین ET_0 از نظر دقت، داده‌های ورودی و محدودیت‌ها می‌پردازند (Gharsallah et al., 2013; Subedi and Chávez, 2015; Abeyasiriwardana et al., 2022). برخی دیگر فقط تکنیک‌های اندازه‌گیری خاص مانند سنجش از دور یا سری زمانی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Zhang et al., 2016; Abedi-Koupai et al., 2022). با این حال، مطالعات کمی وجود دارد که سهم پارامترهای هواشناسی مانند باد در ET_0 را برای مناطق مختلف ارائه نموده باشد. تابش و دمای هوا عوامل اصلی هواشناسی هستند که بر ET_0 تاثیر می‌گذارند (Priestley and Taylor, 1972; Samani, 2000; Marti et al., 2015).

در 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). در مناطق بادخیز، سرعت باد از مهمترین عوامل موثر بر ET_0 می‌باشد (ندیم میر و همکاران، ۱۴۰۴). بررسی عملکرد مدل‌های تخمین ET_0 در مناطق بادخیز به ویژه برای درک بیشتر سهم انرژی و سهم آبرودینامیک در میزان ET_0 و همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف در سرعت‌های باد بالا اهمیت دارد و مدل‌ها ممکن است عدم قطعیت‌های متفاوتی را نشان دهند. با این حال، ارزیابی مقایسه‌ای محدودی از مدل‌های مختلف برای تخمین میزان ET_0 در مناطق بادخیز وجود دارد. در ادامه به برخی از پژوهش‌های مرتبط با مطالعه حاضر پرداخته می‌شود.

در پژوهشی ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف تخمین ET_0 با استفاده از پارامترهای هواشناسی و مقایسه نتایج آنها با مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن در مناطق فوق خشک ایران مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های رایج هارگریوز، پرستلی-تیلور، تورک و پنمن- کیمبرلی کالیبره شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن از مدل‌های

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.

۲-۲- مدل پنمن - مونتیث فائو (PM)

اندازه‌گیری تبخیر- تعرق ساده نمی‌باشد 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 می‌باشد. 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 سایر مدل‌های مورد بررسی 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 گرمای خاک (MJ/m^2d)، T میانگین روزانه دمای هوا ($^{\circ}C$)، 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 ($KPa/^{\circ}C$) می‌باشد. برای به‌دست آوردن اجزای [این معادله](#) از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردیده است (Allen et al., 1998).

شود و قابلیت اطمینان کلی مدل‌های تخمین ET_0 را در مناطق چالش‌برانگیز بهبود بخشد. به این ترتیب، هدف این پژوهش بررسی سهم مولفه آیرودینامیک و مولفه توازن انرژی در میزان ET_0 برای مناطق بادخیز ایران است. در این راستا مدل PM به عنوان مدل استاندارد و سه مدل ترکیبی پنمن، پنمن-کیمبرلی و آلن و پرویت به عنوان مدل‌هایی که سهم بخش آیرودینامیک و توازن انرژی را به صورت مجزا تخمین می‌زنند، انتخاب شدند. همچنین بهبود عملکرد مدل‌های مورد بررسی از طریق واسنجی و تنظیم برای مناطق بادخیز ایران نیز از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد. بدین منظور از اطلاعات هواشناسی روزانه هفت ایستگاه سینوپتیک کشور شامل اردبیل، الیگودرز، بیجار، رفسنجان، زابل و منجیل استفاده گردید.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

نظر به این که هدف پژوهش حاضر، تخمین ET_0 با استفاده از مدل‌های گروه پنمن برای مناطق بادخیز ایران می‌باشد، لذا برای این منظور با توجه به بررسی منابع، ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت جام، رفسنجان، زابل و منجیل انتخاب شدند ([شکل ۱](#)).

دلیل انتخاب ایستگاه‌های مذکور تداوم و سرعت باد بالا نسبت به سایر ایستگاه‌های سینوپتیک کشور می‌باشد (گندم‌کار، ۱۳۸۲؛ دلبری و همکاران ۱۳۹۵؛ حنفی و ایران‌پور، ۱۳۹۶؛ ندیم میر و همکاران، ۱۴۰۴؛ Rahmani et al., 2014; Pishgar-Komleh & Akram, 2017; Mohamadi et al., 2021).

از سازمان هواشناسی ایران داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های مذکور بدست آمد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل پارامترهای دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، تعداد

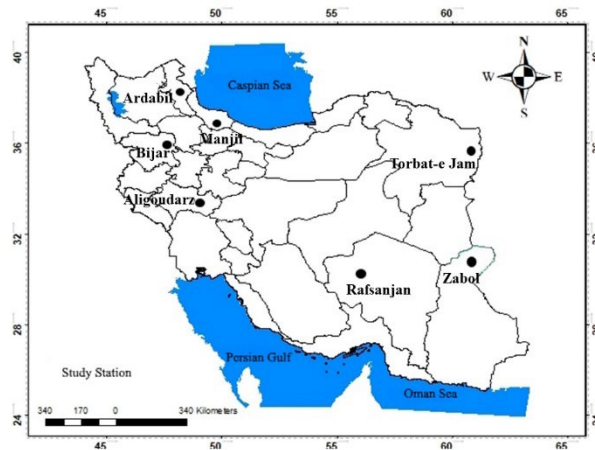


Fig. 1 Study area and distribution of the investigated stations

شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های مورد بررسی

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

Table 1 Geographical specifications and average daily values of meteorological parameters at the investigated stations

Station	Latitude	longitude	Elevation (m)	Temperture	Relative Humidity (%)	Sunshine (hr)	Wind speed (m/sec)
Ardabil	38.219	38.329	1335	9.8	71	6.9	3
Aligudarz	33.408	49.703	2022	13	40	8.7	3.6
Bijar	35.886	47.621	1883	12	48	8.2	2.5
Torbat jam	35.295	60.565	950	16	45	8.6	3.1
Rafsanjan	30.383	55.933	1524	19	26	9.1	2.1
Zabol	31.089	61.543	489	23	29	9.2	5.1
Manjil	36.729	49.410	338	18	60	7.5	4.3

در روابط بالا λ گرمای نهان تبخیر (MJ kg^{-1}) می‌باشد و برای ET_0 در واحد میلی‌متر در روز، مقدار ضریب K_w برابر $6/43$ است. مولفه‌های a_w و b_w ضرایب تجربی تابع باد (F_w) هستند که اغلب واسنجی محلی یا منطقه‌ای دریافت کرده‌اند. سایر پارامترها در مدل PM معرفی شده‌اند. قسمت اول رابطه (۲) بیانگر سهم انرژی و قسمت دوم آن بیانگر سهم آبرودینامیک، در میزان ET_0 می‌باشد. عبارت‌های $\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}$ و $\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}$ در رابطه (۲)، فاکتورهای وزن‌دهی برای ارزیابی تاثیر نسبی تابع دما و تابع باد در مقدار ET_0 می‌باشند (شیری و همکاران، ۱۳۹۵) و مجموع این دو عبارت برابر واحد است. تابع بدون بعد باد (F_w) تاثیر سرعت باد در فرارفت انرژی محسوس در تخمین ET_0 را

۲-۳- مدل‌های گروه پنمن (PG)

فرم عمومی مدل پنمن به صورت رابطه (۲) می‌باشد که با استفاده از این رابطه سهم بخش آبرودینامیک ($\frac{\gamma}{\Delta+\gamma} F_w (e_s - e_a)$) و توازن انرژی ($(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma} (R_n - G))$) به صورت مجزا محاسبه می‌گردد (Penman, 1948):

$$ET_0 = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma} (R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} F_w (e_s - e_a) \right) / \lambda \quad (2)$$

$$F_w = (a_w + b_w u_2) \quad (3)$$

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n}}{\overline{ET}_{PM}} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

که در آن $RMSE$ ریشه مربع میانگین خطا، $NRMSE$ ریشه مربع میانگین خطا نرمال شده، MBE میانگین انحراف خطا، r نسبت بین مجموع ET_0 محاسبه شده از مدل‌های مورد بررسی (P_i) به مدل پنمن-مونتیث فائو (O_i)، d ضریب توافق، EF کارایی مدل، \bar{O} میانگین ET_0 محاسبه شده با روش استاندارد برای دوره مورد بررسی و n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تخمین ET_0 با مدل پنمن-مونتیث فائو (PM)

مقادیر میانگین روزانه ET_0 محاسبه شده با استفاده از روش PM برای دوره آماری مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در [شکل ۲](#) ارائه شده است. این نتایج 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 ۰/۷ میلی‌متر بر روز در ماه دسامبر تا ۲۱ میلی‌متر بر روز در ماه جولای متغیر می‌باشد که همان‌طور که در [شکل ۲](#) نیز قابل مشاهده است، با نتایج این پژوهش نیز هم‌مانگی دارد. برای تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین میزان ET_0 در

جدول ۲ مقادیر ضرایب تابع باد برای مدل‌های گروه پنمن (PG)

Table 2 Values of wind function coefficients for Penman group (PG) models

Mark	Model	Wind empirical coefficients	
P	Penman (1963)	$b_w = 0.537$	$a_w = 1.0$
PK	Penman-Kimberly (1972)	$b_w = 0.993$	$a_w = 0.75$
AP	Allen & Pruitt (1991)	$b_w = 0.862$	$a_w = 1.0$

بیان می‌کند. محققین مختلف ضرایب متفاوتی را برای a_w و b_w ارائه نموده‌اند ([جدول ۲](#)). مقادیر b_w و a_w برای معادله اصلی پنمن به ترتیب برابر ۱/۰ و ۰/۵۳۷ می‌باشند (Penman, 1963; Penman, 1963). مقادیر b_w و a_w در مدل پنمن-کیمبرلی به ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۹۹۳ (Wright and Jensen, 1972) و در مدل آلن و پرویت برابر ۱/۰ و ۰/۸۶۲ می‌باشند (Allen and Pruitt, 1991) می‌باشند.

۲-۴- واسنجی

به منظور واسنجی مدل‌های مورد بررسی از روش مجموع مجذور مربعات خطا استفاده می‌شود. طبق این ویژگی مقادیر b_w و a_w به گونه‌ای تخمین زده می‌شوند 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. در این پژوهش از داده‌های ۱۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) برای واسنجی و از داده‌های ۱۰ ساله (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴) برای ارزیابی استفاده گردید.

۲-۵- معیارهای ارزیابی

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

برای ایستگاه‌های مورد بررسی محاسبه و با روش استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر شاخص آماری حاصل از این مقایسه در [جدول ۳](#) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، تمامی مدل‌های گروه پنمن مقادیر ET_0 را بیشتر از روش استاندارد برآورد می‌کنند.

ماه جون، جولای و آگوست (روز ۱۵۰ تا ۲۵۰) رخ داده است.

۲-۳- ارزیابی مدل‌های گروه پنمن (PG)

مقادیر ET_0 با استفاده از مدل‌های گروه پنمن (P, PK و AP)

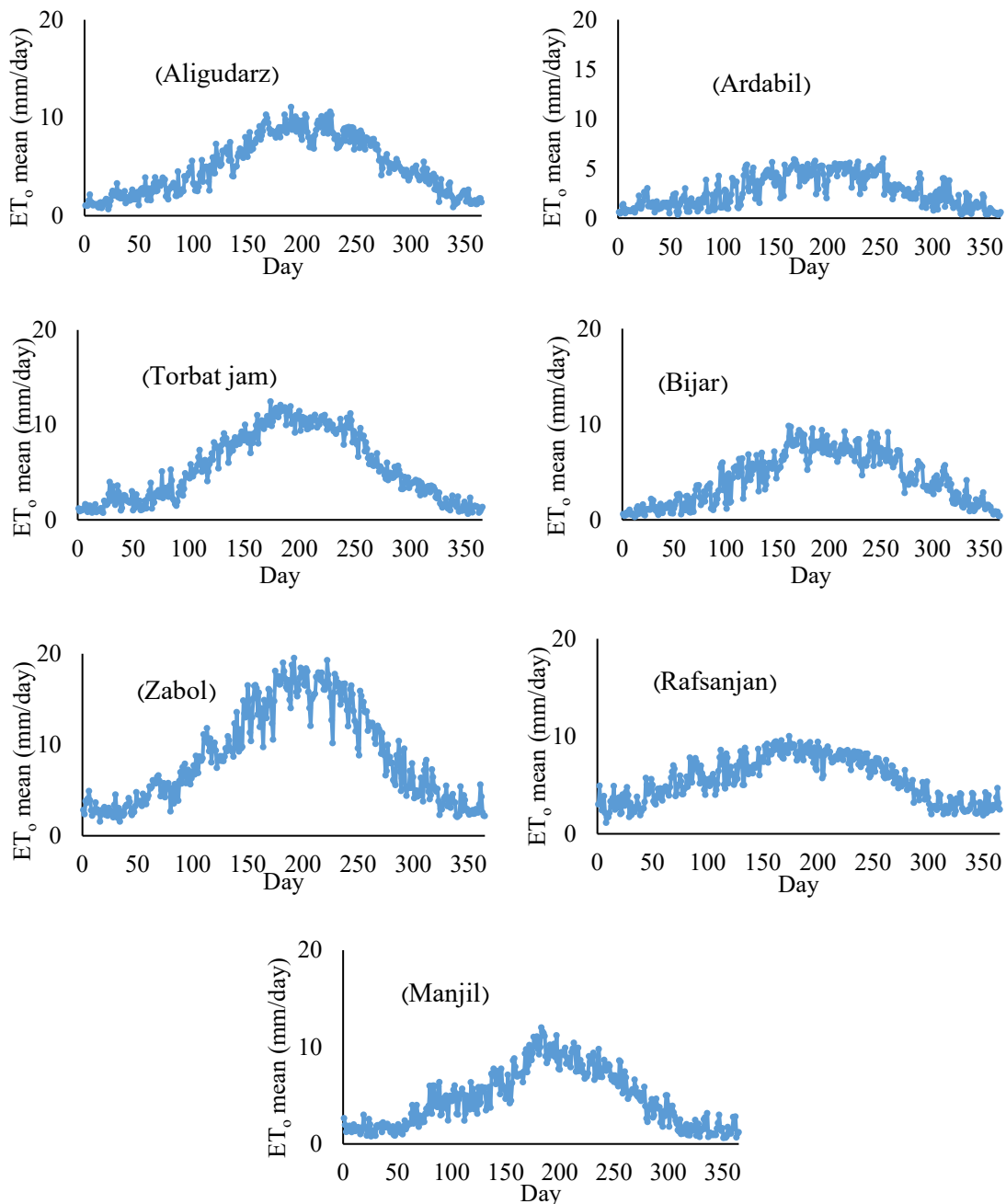


Fig. 2 Average daily values for the investigated stations during the study period

شکل ۲ مقادیر میانگین ET_0 روزانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره آماری مورد مطالعه

جدول ۳ مقادیر شاخص آماری با استفاده از مدل‌های گروه پنمن برای محاسبه ET_0 در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 3 Statistical index values using Penman group models for estimating at the studied stations

Station	$\overline{ET}_{0(PM)}$	Model	$\overline{ET}_{0(PG)}$	RMSE	NRMSE	MBE	r	d
Ardabil	2.64	P	3.31	0.71	0.27	0.67	1.25	0.95
		PK	3.60	1.00	0.38	0.95	1.36	0.91
		AP	3.57	0.96	0.36	0.92	1.35	0.91
Aligudarz	4.95	P	5.73	0.80	0.16	0.77	1.16	0.98
		PK	7.04	2.21	0.45	2.08	1.42	0.88
		AP	6.81	1.95	0.39	1.85	1.37	0.90
Bijar	4.24	P	4.98	0.79	0.19	0.73	1.17	0.98
		PK	5.91	1.81	0.43	1.66	1.39	0.90
		AP	5.77	1.65	0.39	1.52	1.36	0.92
Torbat jam	5.44	P	6.22	0.83	0.15	0.78	1.14	0.99
		PK	7.73	2.69	0.49	2.28	1.42	0.90
		AP	7.46	2.33	0.43	2.01	1.37	0.92
Rafsanjan	5.55	P	6.27	0.73	0.13	0.71	1.13	0.97
		PK	7.14	1.64	0.30	1.59	1.29	0.88
		AP	7.12	1.62	0.29	1.57	1.28	0.89
Zabol	8.64	P	9.20	0.59	0.07	0.56	1.07	1.00
		PK	12.24	4.20	0.49	3.59	1.42	0.89
		AP	11.63	3.40	0.39	2.99	1.35	0.92
Manjil	4.74	P	5.70	1.12	0.24	0.96	1.20	0.97
		PK	7.15	2.92	0.62	2.41	1.51	0.85
		AP	6.85	2.53	0.53	2.11	1.45	0.88

وجود برای نزدیک‌تر شدن تخمین مدل P به مدل استاندارد نیاز به واسنجی مدل مذکور می‌باشد. بنابراین ضرایب تابع باد (F_w) مدل P با روش حداقل کردن مربعات خطا اصلاح گردید. مقادیر اصلاح شده a_w و b_w برای هر ایستگاه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ نشان می‌دهد که برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی، مقادیر ET_0 تخمین زده شده با روش پنمن اصلاح شده (Adjusted-P) به مقادیر ET_0 برآورد شده با روش استاندارد نزدیک‌تر شده است. مقادیر EF نیز بعد از واسنجی بهبود یافته است و برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۹۸، ۰/۹۹، ۱/۰۰، ۱/۰۰ و ۰/۹۹ می‌باشند. برای ایستگاه زابل مقادیر d و EF بعد از واسنجی همچنان بالا و بدون تغییر بوده است با این وجود کاهش مقادیر NRMSE و MBE حاکی از بهبود نتایج و نزدیک‌تر شدن مقادیر ET_0 تخمین زده شده با روش پنمن اصلاح شده در مقایسه با مقادیر ET_0 برآورد شده با روش استاندارد می‌باشد. این امر توسط پژوهشگران زیادی از جمله (Trajkovic &

بیشترین تطابق مربوط به مدل P (Penman, 1963) با ضریب توافق ۰/۹۵، ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۹، ۰/۹۷، ۱/۰۰ و ۰/۹۷ و کمترین تطابق مربوط به مدل PK (Penman- Kimberly, 1972) با ضریب توافق ۰/۸۸، ۰/۹۰، ۰/۹۰، ۰/۸۸، ۰/۹۱، ۰/۸۸ و ۰/۸۹ به ترتیب برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان، زابل و منجیل می‌باشند.

از میان ایستگاه‌های مورد بررسی، مدل P برای ایستگاه زابل، با NRMSE برابر ۰/۰۷ و r برابر ۱/۰۷، بیشترین نزدیکی را با مدل استاندارد دارد. این در حالی است که مدل P برای ایستگاه اردبیل، با NRMSE برابر ۰/۲۷ و r برابر ۱/۲۵، کمترین نزدیکی با مدل استاندارد دارا می‌باشد. Goh et al., (2021) اظهار داشتند که عملکرد مدل‌های مختلف ET_0 ممکن است برای یک منطقه مناسب و برای منطقه دیگر نامناسب باشد.

۳-۳- واسنجی مدل پنمن (P)

مطابق نتایج جدول ۳، برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی مدل P بیشترین تطابق را با مدل استاندارد PM دارد؛ با این

جدول ۴ شاخص‌های آماری عملکرد مدل‌های واسنجی شده در مقایسه با مدل واسنجی نشده

Table 4 Statistical performance indices of calibrated models compared to uncalibrated models

Station	$\overline{ET}_0(PM)$	Model	b_w	a_w	RMSE	NRMSE	MBE	r	d	EF	$\overline{ET}_0(P)$
Ardabil	2.64	P	0.537	1.00	0.71	0.27	0.67	1.25	0.95	0.95	3.31
		Adjusted-P	0.267	0.230	0.32	0.12	0.24	1.09	0.99	0.99	2.89
Aligudarz	4.95	P	0.537	1.00	0.80	0.16	0.77	1.16	0.98	0.91	5.73
		Adjusted-P	0.460	0.500	0.37	0.07	0.11	1.02	0.99	0.98	5.06
Bijar	4.24	P	0.537	1.00	0.79	0.19	0.73	1.17	0.98	0.90	4.98
		Adjusted-P	0.319	0.847	0.30	0.07	0.11	1.03	1.00	0.99	4.35
Torbat jam	5.44	P	0.537	1.00	0.83	0.15	0.78	1.14	0.99	0.94	6.22
		Adjusted-P	0.481	0.411	0.23	0.04	0.04	1.01	1.00	1.00	5.48
Rafsanjan	5.55	P	0.537	1.00	0.73	0.13	0.71	1.13	0.97	0.87	6.27
		Adjusted-P	0.588	0.344	0.10	0.02	0.00	1.00	1.00	1.00	5.56
Zabol	8.64	P	0.537	1.00	0.59	0.07	0.56	1.07	1.00	0.99	9.20
		Adjusted-P	0.528	0.567	0.43	0.05	-0.14	0.98	1.00	0.99	8.50
Manjil	4.74	P	0.537	1.00	1.12	0.24	0.96	1.20	0.97	0.83	5.70
		Adjusted-P	0.370	0.517	0.19	0.04	0.04	1.00	1.00	1.00	4.78

تربت جام، رفسنجان و منجیل سهم جزء توازن انرژی در مقدار ET_0 بیشتر از سهم جزء آبرودینامیک می‌باشد. این در حالی است که برای ایستگاه زابل سهم مولفه آبرودینامیک در مقدار ET_0 حدود هفت درصد بیشتر از سهم مولفه انرژی است. ایستگاه زابل با میزان ET_0 بیش از ۸/۵ میلی‌متر بر روز (جدول ۳)، دارای بیشترین مقدار میانگین دراز مدت ET_0 در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد.

زارع‌ایبانه و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی ۱۳ مدل تخمین ET_0 ، برای ۹۱ ایستگاه هواشناسی ایران پرداختند. ایشان بیان کردند بیشترین مقدار ET_0 در ایستگاه زابل صورت می‌گیرد. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که بالا بودن سهم جزء آبرودینامیک در این ایستگاه باعث زیاد شدن مقدار ET_0 شده است. ایستگاه زابل دارای بیشترین مقادیر سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی ایران (دلبری و همکاران، ۱۳۹۵) است؛ همچنین در سال‌های مختلف رکورددار بیشترین مقادیر دما در دنیا می‌باشد و این دو مهم موجب زیاد شدن مولفه آبرودینامیک برای این ایستگاه شده است.

شیری و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که برای شش ایستگاه هواشناسی در استان آذربایجان شرقی، سهم مولفه آبرودینامیک کمتر از مولفه انرژی است. در پژوهشی مشابه شیری و همکاران (۱۳۹۹) اظهار داشتند برای شش ایستگاه

Kolakovic, 2009; Bakhtiari et al. 2011; Cristea et al., 2018; Zhang et al. 2013) بیان شده است.

۳-۴- تعیین سهم مولفه‌های آبرودینامیک و توازن انرژی

دلیل استفاده از PG در این پژوهش، تفکیک سهم مولفه‌های آبرودینامیک و توازن انرژی است و این یکی از مزایای مدل‌های مذکور در مقایسه با سایر مدل‌های ترکیبی می‌باشد. در شکل ۳ رابطه میانگین سرعت باد در مقابل میانگین سهم مولفه‌های توازن انرژی و آبرودینامیک، در مقیاس روزانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی ارائه شده است. همانگونه که از شکل مذکور قابل مشاهده است، برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی مورد بررسی با افزایش سرعت باد سهم جزء آبرودینامیک به صورت کاملاً واضحی افزایش پیدا می‌کند.

در جدول ۵ درصد سهم مولفه‌های آبرودینامیک و توازن انرژی برای مدل واسنجی شده پنمن به صورت میانگین ماهانه برای کل دوره آماری ارائه شده است. نتایج جدول مذکور نشان می‌دهد که ایستگاه اردبیل و ایستگاه زابل به ترتیب دارای کمترین (۱۲ درصد) و بیشترین (۵۳/۵ درصد) مقدار سهم مولفه آبرودینامیک می‌باشند؛ به این ترتیب بیشترین و کمترین تفاضل این دو مولفه نیز به ترتیب در ایستگاه‌های اردبیل و زابل صورت پذیرفته است. در مقیاس سالانه و در حالت کلی برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز، بیجار،

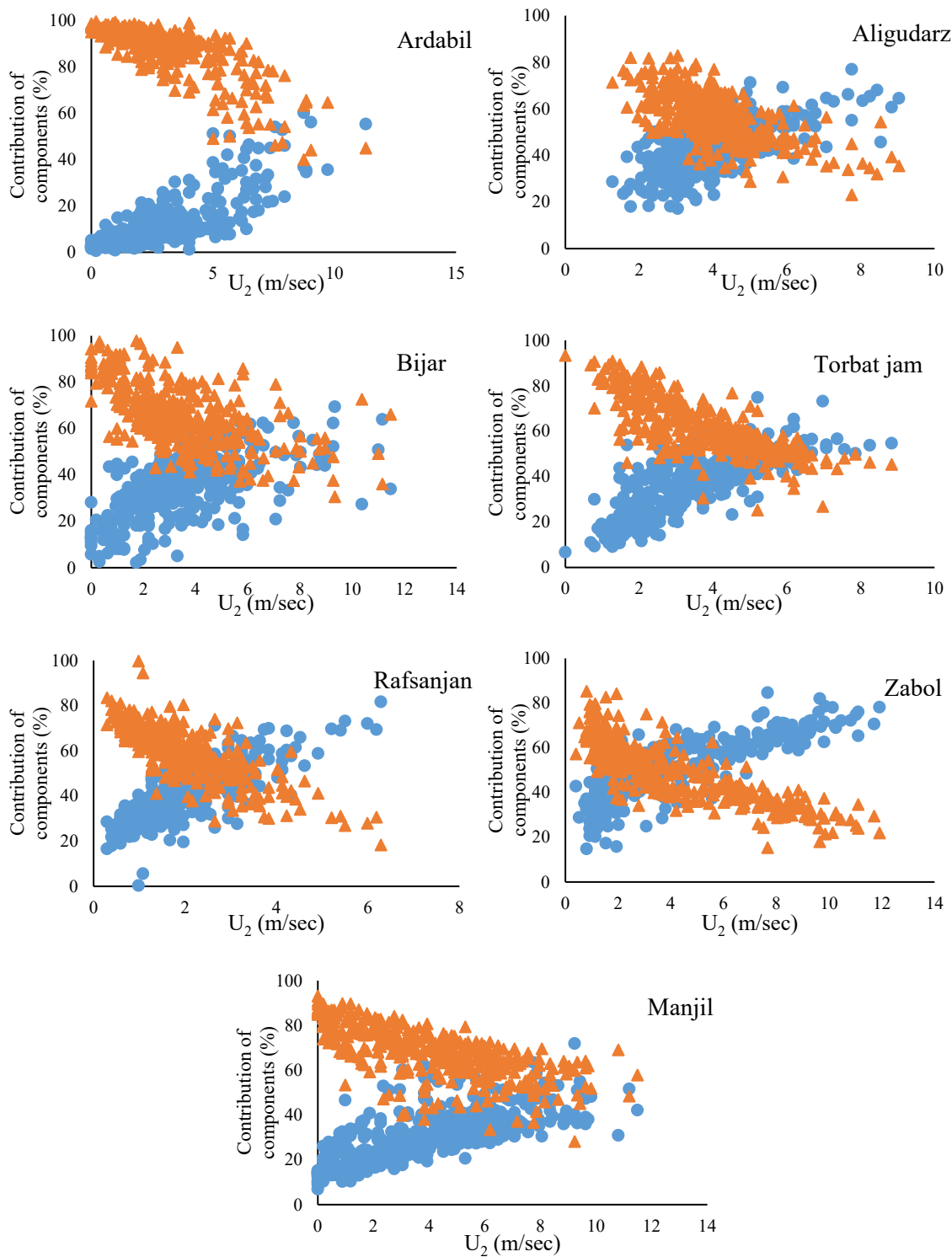


Fig. 3 Relationship between average wind speed and average contribution of energy balance (▲) and aerodynamic (●) components at daily scale for the investigated stations during the study period

شکل ۳ رابطه میانگین سرعت باد در مقابل میانگین سهم مولفه‌های توازن انرژی (▲) و آیرودینامیک (●) در مقیاس روزانه برای ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره آماری مورد مطالعه

جدول ۵ درصد مولفه‌های آیرودینامیک و توازن انرژی در ET_0

Table 5 Percentage of aerodynamic (A) and energy balance components (EB) in

Station	Contribution of components	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annule	Difference A and EB
Ardabil	Aerodynamic	26.2	12.1	7.6	8.6	7.0	5.1	6.6	8.4	9.4	10.0	24.5	18.5	12.0	0.76
	Energy	73.8	87.9	92.4	91.4	93.0	94.9	93.4	91.6	90.6	90.0	75.5	81.5	88.0	
Aligudarz	Aerodynamic	43.4	34.4	29.1	34.1	30.2	33.0	38.8	41.5	42.6	43.5	49.3	43.9	38.6	22.8
	Energy	56.6	65.6	70.9	65.9	69.8	67.0	61.2	58.5	57.4	56.5	50.7	56.1	61.4	
Bijar	Aerodynamic	26.5	22.8	28.0	35.2	24.8	28.7	29.6	32.4	37.8	39.9	47.8	37.0	32.5	0.35
	Energy	73.5	77.2	72.0	64.8	75.2	71.3	70.4	67.6	62.2	60.1	52.2	63.0	67.5	
Torbat jam	Aerodynamic	31.4	32.2	26.2	24.2	38.5	39.2	44.0	46.4	46.4	42.7	42.8	36.9	37.6	24.8
	Energy	68.6	67.8	73.8	75.8	61.5	60.8	56.0	53.6	53.6	57.3	57.2	63.1	62.4	
Rafsanjan	Aerodynamic	43.9	45.5	38.6	36.6	33.2	33.8	32.8	32.3	34.9	33.2	34.5	44.0	36.9	26.2
	Energy	56.1	54.5	61.4	63.4	66.8	66.2	67.2	67.7	65.1	66.8	65.5	56.0	63.1	
Zabol	Aerodynamic	49.8	43.9	42.9	48.6	46.3	56.5	63.5	65.0	62.4	53.5	54.7	55.3	53.5	-7.0
	Energy	50.2	56.1	57.1	51.4	53.7	43.5	36.5	35.0	37.6	46.5	45.3	44.7	46.5	
Manjil	Aerodynamic	37.3	25.8	34.0	34.5	28.1	32.7	37.7	39.4	35.1	36.8	32.6	32.1	33.8	32.4
	Energy	62.7	74.7	66.0	65.5	71.9	67.3	62.3	60.6	64.9	63.2	67.4	67.9	66.2	

هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان نیز سهم مولفه آیرودینامیک (علی‌رغم مهم بودن) کمتر از مولفه توازن انرژی است؛ لازم به ذکر است که در این پژوهش مدل پنمن-کیمبرلی واسنجی نشد و ایستگاه زابل که بادخیزترین و چالشی‌ترین شهر استان مذکور (و البته ایران) می‌باشد در نظر گرفته نشده بود.

در مقیاس ماهانه، برای ایستگاه‌های اردبیل، تربت‌جام، رفسنجان و منجیل با وجود تغییراتی، در تمام ماه‌های سال مولفه توازن انرژی سهم بیشتری از مولفه آیرودینامیک داشته است (جدول ۵). برای ایستگاه‌های الیگودرز و بیجار نیز مشابه این روند وجود داشته است با این وجود در ماه نوامبر سهم دو مولفه نزدیک به هم (درصد مولفه آیرودینامیک و توازن انرژی به ترتیب ۴۹/۳ و ۵۰/۷ برای ایستگاه الیگودرز و ۴۷/۸ و ۵۲/۲ برای ایستگاه بیجار) شده است. این در حالی است که برای ایستگاه زابل در هفت ماه از سال (جون تا دسامبر) مولفه آیرودینامیک سهم بیشتری از مولفه توازن انرژی داشته است؛ برای ایستگاه مذکور بیشترین درصد مولفه آیرودینامیک (بیش از ۶۲ درصد) در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر رخ داده است که مصادف با زمان وقوع بادهای محلی ۱۲۰ روزه سیستان است و می‌تواند به سرعتی بیش از ۱۰۰ کیلومتر در ساعت هم برسد (که‌خامقدم و دلبری، ۱۴۰۴).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی مدل‌های ترکیبی گروه پنمن (PG) در مناطق بادخیز ایران، در مقایسه با مدل استاندارد PM برای تعیین ET_0 مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود نتایج، ضرایب تابع باد (F_w) مدل P برای هر ایستگاه واسنجی گردید. در ادامه با توجه به ساختار مدل P (تفکیک جزء آیرودینامیک و توازن انرژی) سهم هر کدام از مولفه‌های مدل مذکور در مقدار ET_0 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزایش میانگین سرعت باد، سهم مولفه آیرودینامیک در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی افزایش می‌یابد. برای ایستگاه‌های اردبیل، الیگودرز، بیجار، تربت‌جام، رفسنجان و منجیل در مقیاس سالانه سهم جزء توازن انرژی در مقدار ET_0 بیشتر از سهم جزء آیرودینامیک می‌باشد. برای ایستگاه زابل سهم مولفه آیرودینامیک در مقدار ET_0 بیشتر از سهم مولفه انرژی است. در حالت کلی سهم جزء آیرودینامیک در مقایسه با سهم جزء توازن انرژی در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی به غیر از اردبیل قابل توجه می‌باشد که این مسئله برای ایستگاه زابل که میانگین سرعت باد بالاتری دارد، بارزتر است. بنابراین سهم این مولفه در مقدار ET_0 که نشان دهنده سرعت باد است برای مناطق بادخیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. لذا با توجه به تاثیر قابل توجه سرعت باد در مقدار ET_0 برای مناطق بادخیز، ایجاد راهکارهایی مانند نصب بادشکن‌ها اعم از طبیعی و مصنوعی، در این مناطق می‌تواند کمک شایانی به کاهش مقدار ET_0 و در نتیجه مدیریت منابع آب داشته باشد؛ البته چگونگی این مهم نیاز به بررسی‌های گسترده‌تری دارد.

در مقیاس ماهانه، برای ایستگاه‌های اردبیل، تربت‌جام، رفسنجان و منجیل با وجود تغییراتی، در تمام ماه‌های سال مولفه توازن انرژی سهم بیشتری از مولفه آیرودینامیک داشته است (جدول ۵). برای ایستگاه‌های الیگودرز و بیجار نیز مشابه این روند وجود داشته است با این وجود در ماه نوامبر سهم دو مولفه نزدیک به هم (درصد مولفه آیرودینامیک و توازن انرژی به ترتیب ۴۹/۳ و ۵۰/۷ برای ایستگاه الیگودرز و ۴۷/۸ و ۵۲/۲ برای ایستگاه بیجار) شده است. این در حالی است که برای ایستگاه زابل در هفت ماه از سال (جون تا دسامبر) مولفه آیرودینامیک سهم بیشتری از مولفه توازن انرژی داشته است؛ برای ایستگاه مذکور بیشترین درصد مولفه آیرودینامیک (بیش از ۶۲ درصد) در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر رخ داده است که مصادف با زمان وقوع بادهای محلی ۱۲۰ روزه سیستان است و می‌تواند به سرعتی بیش از ۱۰۰ کیلومتر در ساعت هم برسد (که‌خامقدم و دلبری، ۱۴۰۴).

سهم جزء آیرودینامیک در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش به غیر از اردبیل قابل توجه می‌باشد که این مسئله برای ایستگاه زابل که میانگین سرعت باد بالاتری دارد، بارزتر است. لذا نمی‌توان سهم این مولفه در مقدار ET_0 را که نشان دهنده جریان هوا و سرعت باد است، نادیده گرفت و لذا استفاده از مدل‌های جایگزین ساده در تخمین ET_0 که سرعت باد در آنها لحاظ نشده است، مانند مدل‌های مبتنی بر تابش یا مدل‌های مبتنی بر دما بایستی با اصلاح ضرایب این مدل‌ها صورت پذیرد. پیش از این نیز محققین بیان کردند که در مناطق بادخیز ضریب مدل‌های تجربی تابشی-دمایی که مولفه باد در آن لحاظ نشده است، بایستی اصلاح گردد (Trajkovic and Stojnic, 2007; Trajkovic and)

5- List of symbols

a_w, b_w (unitless)	Empirical coefficients of the wind function
e_a (KPa)	Actual vapor pressure
e_s (KPa)	Saturated vapor pressure
ET_o (mm/day)	Reference plant evapotranspiration
F_w (unitless)	Wind function
K_w (unitless)	Units constant
G (MJ/m ² d)	Soil heat flux
R_n (MJ/m ² d)	Incoming radiation
T (°C)	Average daily air temperature
U_2 (m/s)	Daily wind speed at a height of two meters
Δ (KPa/°C)	Slope of vapor pressure curve
γ (KPa/°C)	Psychrometric constant coefficient
λ (MJ/kg)	latent heat of vaporization
O_i	The evapotranspiration calculated by the FAO Penman–Monteith model
P_i	The evapotranspiration estimated by the evaluated models
\bar{O}	The mean evapotranspiration calculated by the FAO Penman–Monteith model

Acknowledgments

We would like to thank the Meteorological Organization for its cooperation and provision of meteorological data.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (M. M. Ch. and P. K.); Methodology, (E. N. M., M. M. Ch. and P. K.); Software, (E. N. and P. K.); data analysis, (E. N., M., M. M. Ch., P. H and P. K.); Writing-Original Draft Preparation, (E. N., M. M. Ch., P. K. and M. K.); Writing-Review and Editing, (M. M. Ch., P. K. and M. K.); Supervision, (M. M. Ch., P. H and P. K). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This study was funded by the University of Zabol [grant number: IR-UOZ-GR-7644].

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abedi-Koupai, J., Dorafshan, M. M., Javadi, A., & Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Estimating potential reference evapotranspiration using time series models (case study: synoptic station of Tabriz in northwestern Iran). *Applied Water Science*, 12(9), 212. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01736-x>
- Abeysiriwardana, H. D., Muttill, N., & Rathnayake, U. (2022). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by three methods with FAO Penman–Monteith method across Sri Lanka. *Hydrology*, 9(11), 206. doi.org/10.3390/hydrology9110206
- Allen, R. G., Clemmens, A. J., Burt, C. M., Solomon, K., & O'Halloran, T. (2005). Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 24-36. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(24))
- 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.
- Allen, R. G., & Pruitt, W. O. (1991). FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 117(5), 758-773. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:5\(758\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:5(758))
- 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](https://doi.org/10.1051/agro/2009001)
- 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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000679)
- Darabi, H., Chari, M. M., Afrasiab, P., and 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.59368) (In Persian).
- Droogers, P., and Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45.
- 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).
- Gharsallah, O., Facchi, A., & Gandolfi, C. (2013). Comparison of six evapotranspiration models for a surface irrigated maize agro-ecosystem in Northern Italy. *Agricultural Water Management*, 130, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.009>
- Ghiat, I., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2021). A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications. *Water*, 13(18), 2523. <https://doi.org/10.3390/w13182523>
- Gilbert, M. E., & Hernandez, M. I. (2019). How should crop water-use efficiency be analyzed? A warning about spurious correlations. *Field Crops Research*, 235, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.017>
- 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).
- Hirschi, M., Michel, D., Lehner, I., & Seneviratne, S. I. (2017). A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1809-1825. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1809-2017>
- Islam, S., & Alam, A. R. (2021). Performance evaluation of FAO Penman-Monteith and best alternative models for estimating reference evapotranspiration in Bangladesh. *Heliyon*, 7(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07487>
- Jia, X., Dukes, M. D., Jacobs, J. M., & Irmak, S. (2006). Weighing lysimeters for evapotranspiration research in a humid environment. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 401-412. doi: [10.13031/2013.20414](https://doi.org/10.13031/2013.20414)
- Kahkhamoghaddam, P., & Delbari, M. (2025). Feasibility of wind energy potential in Zabol using Weibull distribution. 15(1), 159-178. doi: [10.30488/gps.2025.478128.3779](https://doi.org/10.30488/gps.2025.478128.3779) (In Persian).
- Kazemi MH., Shiri J., Majnooni Heris A., Nazemi AH. (2020). Estimating Daily Reference Evapotranspiration Ratios and Determining the Aerodynamic and Energy Balance Components Contributions in Evapotranspiration (Case study: Sistan-Va-Baluchestan Province). *Water and soil science*. 30 (3): 133-144. doi: [20.1001.1.20085133.1399.30.3.11.1](https://doi.org/20.1001.1.20085133.1399.30.3.11.1) (In Persian).
- 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](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). doi: [10.1016/j.heliyon.2021.e07234](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07234)
- Monteith, J. L., Szeicz, G., & Waggoner, P. E. (1965). The measurement and control of stomatal resistance in the field. *Journal of Applied Ecology*, 345-355.
- Nadim-Mir E., Chari M.M., Haghightajo P., Kahkhamoghaddam P., Keikha M. (2025). Evaluation and Calibration of Makkink Model in Estimating Reference Evapotranspiration in Windy Areas of Iran. *Accept*. [10.22034/JARGS.2025.517506.1194](https://doi.org/10.22034/JARGS.2025.517506.1194). (In Persian).
- Paparrizos, S., Maris, F., & Matzarakis, A. (2017). Sensitivity analysis and comparison of various potential evapotranspiration formulae for selected Greek areas with different climate conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 745-759. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1728-z>
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Penman, H.L. 1963. "Vegetation and hydrology". Technical Communication No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 pp.
- 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](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. doi: [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)
- Proutsos, N. D., Fotelli, M. N., Stefanidis, S. P., & Tigkas, D. (2024). Assessing the accuracy of 50 temperature-based models for estimating Potential Evapotranspiration (PET) in a Mediterranean mountainous forest environment. *Atmosphere*, 15(6), 662. <https://doi.org/10.3390/atmos15060662>
- Proutsos, N. D., Tigkas, D., Tsevreni, I., Alexandris, S. G., Solomou, A. D., Bourletsikas, A., Stefanidis, S., & Nwokolo, S. C. (2023). A thorough evaluation of 127 potential evapotranspiration models in two mediterranean urban green sites. *Remote Sensing*, 15(14), 3680. <https://doi.org/10.3390/rs15143680>
- 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](https://doi.org/10.20508/ijrer.v4i4.1700.g6434).
- 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\(265\)](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. doi: [10.1007/s11269-013-0480-3](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0480-3)
- Sharafi, S., & Mohammadi Ghaleni, M. (2021). Calibration of empirical equations for estimating reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3), 925-939. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03654-5>
- Shiri, J. (2017). Evaluation of FAO56-PM, empirical, semi-empirical and gene expression programming approaches for estimating daily reference evapotranspiration in hyper-arid regions of Iran. *Agricultural water management*, 188, 101-114.
- Shiri J., Dinpashoh Y., Sadraddini A.A., and Nazemi AH. (2017). Estimating Daily Alfalfa to Grass Reference Evapotranspiration Ratios and Determining the Aerodynamic and Energy Balance Components Contribution in Evapotranspiration (Case study: East Azerbaijan Province). *Water and soil science*. 27 (2): 119-130. (In Persian).
- Steiner, J. L., Howell, T. A., & Schneider, A. D. (1991). Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum. *Agronomy Journal*, 83(1), 240-247. <https://doi.org/10.2134/agronj1991.00021962008300010055x>
- Subedi, A., & Chávez, J. L. (2015). Crop evapotranspiration (ET) estimation models: a review and discussion of the applicability and limitations of ET methods. *Journal of Agricultural Science*, 7(6), 50. DOI:10.5539/jas.v7n6p50
- Tabari, H., & Talaei, P. H. (2011). Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10), 837-845. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000003)
- Trajkovic, S., and 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.2009.002b>
- Trajkovic, S., and 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
- Uzunlar, A., Oz, A., and Dis, M. O. (2022). The Effect of Modified Approaches on Evapotranspiration Estimates: Case Study over Van. *Cukurova UMFĐ*, 37, 973-988. doi:10.21605/cukurovaumfd.1230919
- 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](https://doi.org/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>
- Wright, J. L., and Jensen, M. E. (1972). Peak water requirements of crops in southern Idaho. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 98(2), 193-201. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0013020>
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review. *Agricultural Water Management*, 232, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>
- Xu, L., Shi, Z., Wang, Y., Zhang, S., Chu, X., Yu, P., Xiong, W., Zuo, H., & Wang, Y. (2015). Spatiotemporal variation and driving forces of

- reference evapotranspiration in Jing River Basin, northwest China. *Hydrological Processes*, 29(23), 4846-4862.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.1048200>
- Yan, H., Huang, S., Zhang, C., Gerrits, M. C., Wang, G., Zhang, J., Zhao, B., Acquah, S. J., Wu, H., & Fu, H. (2020). Parameterization and application of Stanghellini Model for estimating greenhouse cucumber transpiration. *Water*, 12(2), 517.
<https://doi.org/10.3390/w12020517>
- Zhang, K., Kimball, J. S., & Running, S. W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834-853.
<https://doi.org/10.1002/wat2.1168>
- 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.
- Zareabayneh H., Bayat Varkeshi M., Sabziparvar A.A., Marofi S., and Ghasemi A. (2011). Evaluation of different reference evapotranspiration methods and their zonings in Iran. *Physical geography research*. 42 (4): 95-109. (In Persian).