



## Evaluation and Calibration of Priestley-Taylor Equation for Estimating Monthly Reference Evapotranspiration in Windy Areas of Sistan

Homa Darabi<sup>1</sup> | Mohammad Mahdi Chari<sup>2</sup>✉ | Peyman Afrasiab<sup>3</sup> | Halimeh Piri<sup>4</sup> | Parisa Kahkhamoghadam<sup>5</sup>

1. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [homadara46@gmail.com](mailto:homadara46@gmail.com)

2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [mmahdichari@uoz.ac.ir](mailto:mmahdichari@uoz.ac.ir)

3. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [peymanafraasiab@gmail.com](mailto:peymanafraasiab@gmail.com)

4. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [h\\_piri2880@yahoo.com](mailto:h_piri2880@yahoo.com)

5. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [Keykhamoghadam.parisa@gmail.com](mailto:Keykhamoghadam.parisa@gmail.com)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Oct. 14, 2022

**Revised:** Dec. 10, 2022

**Accepted:** Dec. 14, 2022

**Published online:** Jan. 22, 2022

**Keywords:**

Evapotranspiration,  
Calibration,  
Windy regions.

### ABSTRACT

The FAO Penman-Monteith method as a standard method requires a lot of meteorological data. The accurate preparation of these data is not possible in all regions; as a result, alternative methods that require less data are investigated. Priestley-Taylor method require a few meteorological data and its application can be useful in areas where meteorological data is not available. The Sistan region in the southeast of Iran is one of the regions that is unique in Iran due to the 120-day winds and high day-night temperature changes. The purpose of this research is to evaluate Priestley-Taylor method compared to the PMF-56 method and to modify this equation according to the wind conditions for the region of Sistan. For this purpose, 30 years of meteorological data in Sistan region were used. The coefficient of Priestley-Taylor equation ( $\alpha_{PT}$ ) is one of the most important parameters which is used for evaluation of the equation. The results showed that the value of the evaporation coefficient in the main equation (1.26) for the Sistan region is too low and should be corrected. Its correction value varied between 1.02 and 6.11. The average value of  $\alpha_{PT}$  was equal to 2.16, which is 71% different from the default value (1.26). Also, a regression relationship between wind speed and  $\alpha_{PT}$  was presented. The results show that the amount of evapotranspiration obtained using the correction factor based on the wind speed ( $\alpha_{(PT-U2)}$ ) has the best results.

Cite this article: Darabi, H., Chari, M. M., Afrasian, P., Piri, H., & Kahkhamoghadam, P. (2023). Evaluation and Calibration of Priestley-Taylor Equation for Estimating Monthly Reference Evapotranspiration in Windy Areas of Sistan, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2551-2564. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349900.669375>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349900.669375>



## ارزیابی و واسنجی معادله پریستلی تیلور برای تخمین تبخیر تعرق در اقلیم باد خیز (مطالعه موردی منطقه سیستان)

هما دارابی<sup>۱</sup> | محمدمهدی چاری<sup>۲</sup> | پیمان افراسیاب<sup>۳</sup> | حلیمه پیری<sup>۴</sup> | پریسا کهخامقدم<sup>۵</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [homadarabi46@gmail.com](mailto:homadarabi46@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [mmahdichari@uoz.ac.ir](mailto:mmahdichari@uoz.ac.ir)

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [peymanafraasiab@gmail.com](mailto:peymanafraasiab@gmail.com)

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [h\\_piri2880@yahoo.com](mailto:h_piri2880@yahoo.com)

۵. گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [Keykhamoghadam.parisa@gmail.com](mailto:Keykhamoghadam.parisa@gmail.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

### واژه‌های کلیدی:

تبخیر-تعرق،

واسنجی،

مناطق بادی.

روش فائو پن من ماتیت به عنوان روش استاندارد، به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز دارد. تهیه دقیق این داده‌ها در تمامی مناطق امکان پذیر نیست در نتیجه روش‌های جایگزین که به داده‌های کمتری نیاز دارند مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش پریستلی-تیلور به داده‌های هواشناسی کم نیاز دارند و کاربرد آن‌ها در مناطقی که داده‌های هواشناسی در دسترس نیست می‌تواند مفید باشد. منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز و تغییرات دمایی بالای شبانه‌روز در ایران منحصربه‌فرد است. هدف از این تحقیق ارزیابی تبخیر-تعرق روش پریستلی تیلور در مقایسه با روش پنمن-مونتیت فائو در منطقه بادخیز سیستان و اصلاح این معادله با توجه به شرایط باد برای منطقه سیستان می‌باشد. برای این منظور از داده‌های ۳۰ سال هواشناسی در منطقه سیستان استفاده شد. ضریب معادله پریستلی-تیلور ( $\alpha_{PT}$ ) یکی از مهم‌ترین پارامترهای این معادله است که در ارزیابی معادله به کار می‌رود. در معادله اصلی مقدار آن برابر با ۱/۲۶ می‌باشد. نتایج نشان داد که مقدار ضریب تبخیر در معادله اصلی (برابر با ۱/۲۶) برای منطقه سیستان مناسب نمی‌باشد و باید اصلاح شود. مقدار اصلاحی آن بین ۱/۰۲ تا ۶/۱۱ متغیر بود. میانگین مقدار  $\alpha_{PT}$  برابر با ۲/۱۸ به دست آمد که ۷۳٪ با مقدار معادله اصلی (۱/۲۶) متفاوت است. همچنین یک رابطه رگرسیونی بین سرعت باد و  $\alpha_{PT}$  ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مقدار تبخیر تعرق به دست آمده با استفاده از  $\alpha_{PT}$  با NRMSE برابر با ۱۱/۶ درصد شاخص توافق برابر ۹۸ دارای بهترین نتایج است.

استناد: دارابی، هما؛ چاری، محمد مهدی؛ افراسیاب، پیمان؛ و پیری، حلیمه (۱۴۰۱). ارزیابی و واسنجی معادله پریستلی تیلور برای تخمین تبخیر تعرق در اقلیم باد خیز (مطالعه موردی منطقه سیستان). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۱)، ۲۵۶۴-



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349900.669375>. ۲۵۵۱

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.349900.669375>

## مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی و از جمله عوامل تعیین کننده معادلات انرژی در سطح زمین و توازن آب می باشد و برآورد آن در زمینه های مختلف علمی همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب مورد نیاز است (Sun et al., 2014; Mobilia and Longobardi, 2021).

معمولاً برای اندازه گیری تبخیر- تعرق از لایسیمتر استفاده می شود. با این حال اندازه گیری تبخیر- تعرق با این روش پرهزینه بوده و نیازمند صرف وقت زیاد است. از این رو در غالب موارد، برای این کار از روش های غیرمستقیم که شامل طیف وسیعی از مدل های ساده تجربی (مانند روش های تشعشی، دمایی، رطوبتی و تشت تبخیر) تا روش های پیچیده ترکیبی (مانند پنمن- مونتیت) است، استفاده می شود. تعداد عوامل هواشناسی مورد نیاز در این روش ها هم یکسان نمی باشد. به نظر می رسد تقابلی همسو بین تعداد عوامل هواشناسی مورد نیاز و دقت برآورد وجود داشته باشد. با این حال، به ویژه در کشورهای در حال توسعه تهیه عوامل هواشناسی دشوار بوده است. مطالعاتی که تاکنون انجام شده است نشان می دهد که تعیین ETo در هر منطقه بستگی به شرایط اقلیمی، داده های مورد نیاز و هزینه های مربوط به آن دارد (Xu and Singh 2002; Mehdizadeh et al. (2016). مطالعات پیشین نشان می دهد که مقدار تخمینی ETo از روش پنمن- مونتیت فائو (PMF-56) در اقلیم های مختلف به مقادیر اندازه گیری شده نزدیک تر است (Alen et al., 1998; Jensen et al., 1990).

مدل های تبخیر و تعرق مبتنی بر تشعشع مانند پریستلی- تیلور (۱۹۷۲) (P-T) به طور گسترده در مدل سازی هیدرولوژیکی و اکولوژی استفاده می شوند (Bandaragoda et al. 2004; Wang et al. 2006; Schramm et al. 2007; and Soylu et al. 2011). مدل P-T برای شرایط اشباع و مکان های سطح آزاد آب که در آن اثرات باد ناچیز است، به دست آمده است (Cristea et al., 2017) و در معادله P-T تابع باد ضرب در عبارت کمبود فشار بخار در معادله پنمن (۱۹۴۸) حذف شد و به جای آن ضریب تبخیر  $\alpha$  با مقدار متوسط تخمینی ۱/۲۶ معرفی شده است، در نتیجه برای اصلاح معادله P-T مطالعاتی در اقلیم های مختلف دنیا صورت گرفته است (Gunston and Batchelor 1983; Xu and Singh 2002; Irmak et al. 2003). تحقیقات مختلف مشخص کرد که این ضریب بسته به پوشش زمین و شرایط منطقه متفاوت است و طیف نسبتاً وسیعی از ضریب تبخیر ( $\alpha_{PT}$ ) (بین ۰/۶ تا ۲/۴۷) را شامل می شود.

منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز و تغییرات دمایی بالای شبانه روز در ایران منحصربه فرد است. در این منطقه در بسیاری از ایام سال باد می وزد. از طرفی بخش بسیار زیادی از اشتغال (حدود ۳۸٪) در این منطقه مربوط به بخش کشاورزی می باشد (Chari et al., 2020). در سال های اخیر دولت اقداماتی را برای توسعه کشاورزی در این بخش انجام داده است. لذا مطالعه و بررسی تبخیر- تعرق و میزان آن به منظور برآورد نیاز واقعی و توسعه اقتصادی منطقه ضرورت دارد. از طرفی در این منطقه در بسیاری از مکان ها ایستگاه های هواشناسی و لوازم مورد نیاز برای اندازه گیری تمامی پارامترهای هواشناسی وجود ندارد و استفاده از روش هایی مانند پریستلی- تیلور با توجه به داده های مورد نیاز کمتر می تواند مفید باشد. هدف از این تحقیق ارزیابی مقادیر متفاوت ضریب تبخیر پریستلی- تیلور در منابع مختلف از سال ۱۹۷۲ تاکنون برای منطقه سیستان و همچنین واسنجی معادله پریستلی- تیلور برای منطقه بادخیز سیستان می باشد.

## پیشینه تحقیق

### مطالعات داخلی

کهکها مقدم (۱۳۹۷) از ۳۰ روش معمول برای برآورد تبخیر- تعرق شامل چهار گروه ۱- روش های بر پایه ضریب تشت، ۲- روش های بر پایه دما، ۳- روش های بر پایه تشعشع، و ۴- روش های بر پایه انتقال جرم، در مقایسه با روش PMF-56، استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش های بر پایه انتقال جرم از نظر آماری ضعیف ترین عملکرد را نسبت به سایر روش ها در مقایسه با روش استاندارد دارند. همچنین مدل های دمایی و تشعشی می توانند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتاً پیچیده پنمن- مونتیت فائو، برای اقلیم گرم و خشک شهرستان زاهدان باشند. قبادی و همکاران (۱۳۹۶) ضریب معادله پریستلی- تیلور برای برآورد تبخیر از دریاچه مخزن سد مهاباد را مورد واسنجی قرار دادند. نتایج نشان داد که این ضریب بین ۱/۰۱ تا ۱/۶۸ متغیر بوده و همچنین در ماه های گرم سال مقدار آن کاهش می یابد. ابراهیمی پاک و همکاران (۱۳۹۷) روش های تشتک تبخیر، تورک، مک کینگ، پریستل- تیلور، هارگریوز و سامانی، بلانی- کریدل، فائو ۲۴ اصلاح شده، فائو پنمن- مانتیت را در مقایسه با داده های لایسیمتری گندم زمستانه در دشت قزوین مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد روش فائو پنمن- مانتیت با ۲۴ درصد خطای نرمال شده دارای بهترین نتایج است. به استثناء روش مک کینگ دقت روش پریستلی- تیلور از سایر روش ها کمتر بود و برای استفاده از معادله پریستلی- تیلور نیاز است که ضریب تبخیر در این معادله اصلاح شود.

### مطالعات خارجی

برای کشور کانادا Kustas et al. (1996) and Eaton et al. (2001) نشان دادند که مقادیر  $\alpha$  در مناطق خشک و بادخیز افزایش و در مکان‌های مرطوب کاهش می‌یابد. مقایسه داده‌های لایسیمتر با مدل پریستلی-تیلور با  $\alpha$  برابر با ۱/۲۶ نشان داد که شرایط مرطوب مقدار تبخیر-تعرق را کمی بیش برآورد می‌کند (Yoder et al. 2005) و در شرایط خشک و بادی تبخیر-تعرق را به‌طور قابل توجهی کم برآورد می‌کند (Berengena and Gavilàn 2005; Benli et al. 2010). به‌طور کلی با افزایش کمبود فشار بخار علاوه بر این، مقدار  $\alpha$  به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Szilagyi et al., 2014). مقادیر تخمینی  $\alpha$  در محفظه‌های گلخانه در مدیریتانه مجهز به سیستم تهویه هوای بین ۰/۸۶ تا ۰/۷۲ بود (Nikolaou et al., 2022). در نتیجه ضریب تبخیر در معادله P-T با توجه به شرایط اقلیمی اصلاح شود.

Abtew (1996) ضریب اصلاح‌شده جدید معادله P-T برابر با ۱/۱۸ را برای شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در جنوب فلوریدا ارائه کرد. Berengena and Gavilàn (2005) ضریب تبخیر در معادله P-T برای شرایط اقلیمی نیمه‌خشک در جنوب اسپانیا را اصلاح کرده و مقدار ۱/۶۵ را مناسب این منطقه بیان کردند. Tabari and Hosseinzadeh Talaei (2011) مقدار ضریب اصلاحی برای مناطق سرد و خشک ایران را به ترتیب برابر با ۱/۸۲ و ۲/۱۴ بیان کردند.

در بسیاری از مناطق مقدار ضریب تبخیر در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. Tabari and Hosseinzadeh Talaei (2011) بیان کردند که بیشترین مقدار ضریب اصلاحی شده پریستلی-تیلور در مناطق سرد استان کردستان در زمستان و کمترین در بهار مشاهده شد و در آب‌وهوای خشک استان کرمان ایران نیز بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در اکتبر و می بود. Mehdizadeh et al., (2016) برای استان‌های آذربایجان شرقی و غربی ایران با آب و هوای سرد نشان دادند که مقدار ضریب تبخیر باید اصلاح شود. نتایج Irmak et al. (2003) نشان داد که روش پریستلی-تیلور در ماه‌های فصل زمستان مقدار تبخیر-تعرق را نسبت به روش فائو پی‌ان-مانیتک کم برآورد می‌کند و چنانچه مقدار ضریب تبخیر اصلاح شود دقت نتایج افزایش می‌یابد. در جدول (۱) مقدار ضریب تبخیر معادله پریستلی-تیلور در منابع و مکان‌های مختلف از سال ۱۹۷۲ تاکنون ارائه شده است که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۱. مقدار ضریب معادله پریستلی-تیلور ارائه شده در منابع مختلف

منبع	$\alpha_{PT}$	اقلیم و منطقه مورد مطالعه	منبع	$\alpha_{PT}$	اقلیم و منطقه مورد مطالعه
Didari and Ahmadi (2019)	۱/۹۸	خشک و نیمه خشک- جهرم، جنوب ایران	Didari and Ahmadi (2019)	۲/۳۶	نیمه خشک- ارسنجان، جنوب ایران
Tabari et al. (2011)	۱/۸۲	سرد- کردستان ایران	Tabari et al. (2011)	۲/۱۴	سرد و خشک- کرمان ایران
Mehdizadeh et al. (2016)	۱/۳۴	آب و هوا سرد (ماه‌های گرم)- شمال غربی ایران	Mehdizadeh et al. (2016)	۲/۳۳	آب و هوا سرد (ماه‌های سرد)- شمال غربی ایران
Pereira (2004)	۱/۲۷	چمن-مرطوب و گرمسیر-برزیل	Zhang et al. (2004)	۱/۲۶	گندم زمستانه-نیمه خشک- شمال چین
Castellvi et al. (2001)	۱/۵۵	چمن-نیمه خشک-اسپانیا	Kustas et al. (1996)	۰/۸	مرتع و زراعی-آب و هوای حاره ایبی- اوکلاهاما آمریکا
Flint and Childs (1991)	۰/۹	سایت جنگلی- اورگان آمریکا	Fisher et al. (2005)	۰/۹۴	جنگل کاج- شمال کالیفرنیا آمریکا
Daneshkar Arasteh and Tajrishy (2008)	۲/۴۷	سطح آزاد آب- جنوب شرقی ایران	Daneshkar Arasteh and Tajrishy (2008)	۱/۲	سطح آزاد آب- جنوب شرقی ایران
Gavin and Agnew (2004)	۱/۰۲	علفزار مرطوب- جنوب شرقی انگلستان	Eaton et al. (2001)	۱/۵۱	دریاچه کم عمیق، مانتیو کانادا
Eaton et al. (2001)	۲/۳۲	دریاچه عمیق، شمال غرب کانادا	Souch et al. (1996)	۱/۰۳۵	تالاب- نزدیک دریاچه مشیگان آمریکا
Jensen et al. (1990)	۱/۷۴	نیمه خشک- آمریکا	Stewart and Rouse (1976)	۱/۲۶	دریاچه کم عمیق، انتاریو کانادا
Bello and Smith (1990)	۱/۳۵	دریاچه کم عمق- شمال مانتیو کانادا	Rouse et al. (1977)	۱/۲۶	تالاب- انتاریو کانادا
Rouse et al. (1977)	۰/۹۵	مرتع- انتاریو کانادا	Price et al. (1991)	۱/۲	تالاب- نیوفاندلند کانادا
Jury and Tanner (1975)	۱/۵۷	شرایط ناپایدار- آمریکا	Mukammal and Neumann (1977)	۱/۲۹	چمن، خاک در ظرفیت زراعی، آمریکا
Davies and Allen (1973)	۱/۲۷	گیاه چندساله- آمریکا	McNaughton and Black (1973)	۱/۱۸	جنگل صنوبر- آمریکا
De Bruin and Holtslag (1982)	۱/۱۲	چمن کوتاه- آمریکا	Barton (1979)	۱/۰۴	خاک لخت- آمریکا
Black (1979)	۰/۸۴	صنوبر- آمریکا	Giles et al. (1985)	۰/۷۳	جنگل صنوبر (در طول روز)- آمریکا
Shuttleworth and Calder (1979)	۰/۷۲	جنگل صنوبر- آمریکا	Wang et al. (2004)	۱/۲۸۷	سرد- مانتیو کانادا

## روش‌شناسی

### منطقه مورد مطالعه

سیستان در جنوب شرقی ایران در موقعیت جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و ۳۱ درجه و ۲ دقیقه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا ۴۸۱ متر می‌باشد. آب و هوای شهرستان زابل بر اساس طبقه‌بندی کوپن، جزء اقلیم‌های خشک و بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. براساس آمار ۳۰ ساله ایستگاه هواشناسی میانگین بارش سالانه سیستان ۵۹/۶ میلی‌متر و دمای آن در سال بین ۹/۵- تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. همچنین میانگین حرارت سالانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. یکی از شاخصه‌های اصلی این منطقه وجود بادهای در طول سال است. بادهای ۱۲۰ روزه از اواسط اردیبهشت تا اواسط شهریور می‌وزد. در این تحقیق از داده‌های ۲۰ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۹) اندازه‌گیری شده ایستگاه هواشناسی زابل و ۸ ساله (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۹) ایستگاه هواشناسی زهک استفاده شده است.

### روش محاسبه تبخیر- تعرق با روش فائو پنمن مانیتیت

در این پژوهش از روش پنمن- موتیتیت فائو به عنوان روش استاندارد جهت ارزیابی سایر روش‌ها استفاده شد. با استفاده از این معادله که یکی از مهم‌ترین و عمومی‌ترین معادلات ترکیبی است، مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع به صورت زیر برآورد می‌گردد (Allen et al. 1998):

$$ET_{O(PM)} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/(T + 273)]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{رابطه-۱})$$

که در آن:  $ET_{O(PM)}$  تبخیر- تعرق گیاه مرجع روزانه (mm/day)،  $R_n$  تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ/m<sup>2</sup>d)،  $G$  شار گرمای خاک (MJ/m<sup>2</sup>d)،  $T$  میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (C°)،  $U_2$  میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار اشباع (KPa)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (KPa/C) و  $\gamma$  ضریب ثابت سایکرومتری (KPa/C) می‌باشد. برای به‌دست آوردن اجزای معادله پنمن- موتیتیت فائو از دستورالعمل ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردید.

### روش پریستلی تیلور

معادله به‌کاربرده شده در روش پریستلی- تیلور به صورت زیر است (Priestley and Taylor, 1972):

$$ET_{O(P-T)} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (\text{رابطه-۲})$$

که  $ET_{O(P-T)}$  مقدار تبخیر تعرق به‌دست‌آمده با استفاده از روش پریستلی- تیلور (میلی‌متر بر روز)،  $\alpha$ : ضریب تبخیر گرمای نهان تبخیر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ( $2.45 MJ/kg^{-1}$ );  $R_s$ : تابش خورشیدی (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>), در معادلات بالا  $\Delta$ ,  $G$ , و  $R_n$  پارامترهای معرفی شده در معادله PMF-56 می‌باشند. مقدار ضریب تبخیر در مکان‌های مختلف متفاوت بوده و بر مقدار تبخیر بسیار تأثیر گذار است. در سال‌های گذشته تحقیقاتی زیادی در رابطه با تعیین مقدار ضریب تبخیر انجام شده است. در این تحقیق مقدار ضریب بهینه  $\alpha_{PT}$  برای منطقه سیستان ارائه می‌گردد.

### ارزیابی روش‌های مختلف

در نهایت بر ارزیابی از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و نسبت بین مجموع تبخیر P-T به PM (r)، جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE)، شاخص تطابق (d) و کارایی مدل (EF) استفاده می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (ET_{P-T,i} - ET_{PM,i})^2}{n}} \quad (\text{رابطه-۳})$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{P-T,i} - ET_{PM,i}) \quad (\text{رابطه-۴})$$

$$r = \frac{\sum_i^n ET_{P,i}}{\sum_i^n ET_{PM,i}} \quad (\text{رابطه-۵})$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (ET_{P-T,i} - ET_{PM,i})^2}{n \cdot \overline{ET_{PM}}}} \quad (\text{رابطه-۶})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_i^n (ET_{P-T,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_i^n (|ET_{P-T,i} - \overline{ET_{PM}}| + |ET_{PM,i} - \overline{ET_{PM}}|)^2} \quad (\text{رابطه-۷})$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_i^n (ET_{P-T,i} - ET_{PM,i})^2}{\sum_1^n (ET_{PM,i} - \overline{ET_{PM}})^2} \quad (\text{رابطه-۸})$$

که  $i$  شاخص روز،  $n$  تعداد کل مشاهدات،  $ET_{P-T,i}$  مقدار تبخیر-تعرق روزانه که با استفاده از روش پریستلی-تیلور به دست می‌آید.  $ET_{PM,i}$  مقدار تبخیر-تعرق به دست آمده با استفاده از روش فائو پن من مانتیث،  $\overline{ET_{PM}}$  میانگین تبخیر تعرق محاسبه شده با روش فائو پن من مانتیث است. هرچه مقدار  $RMSE$  و  $MBE$ ،  $NRMSE$  کوچک تر و نزدیک به صفر و مقدار  $d$  و  $r$  و  $EF$  نزدیک به یک باشد نتایج بهتری را شاهد هستیم.

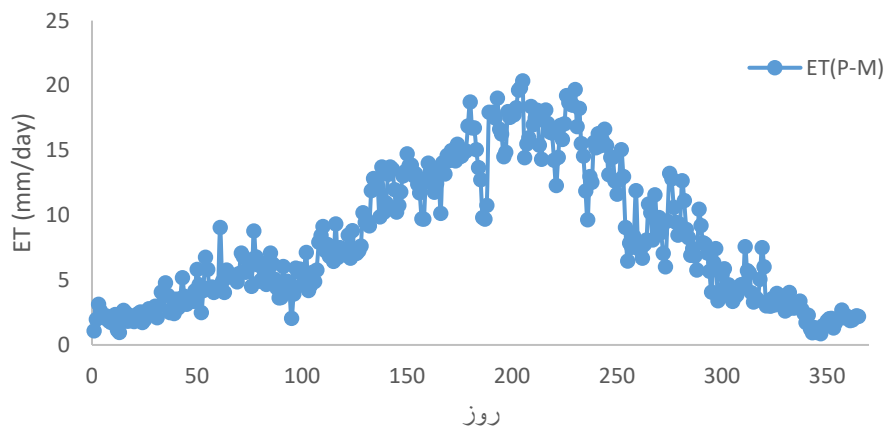
### واسنجی

به منظور واسنجی ابتدا مقدار تبخیر-تعرق به روش  $ET_{O(PM)}$  و  $ET_{O(P-T)}$  به صورت روزانه محاسبه می‌گردد. سپس با به دست آوردن نسبت  $\frac{ET_{O(PM)}}{ET_{O(P-T)}}$  در مقیاس روزانه مقدار ضریب تبخیر اصلاحی روش پریستلی-تیلور از ضرب این نسبت در مقدار  $1/26$  به دست می‌آید. مقدار ضریب تبخیر اصلاحی برای هر ماه از میانگین ماهانه برای دوره مورد استفاده به دست می‌آید. در این تحقیق از داده‌های ۱۲ سال (۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰) ایستگاه هواشناسی زابل و برای واسنجی و داده‌های ۸ سال (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۹) ایستگاه هواشناسی زابل و زهک برای ارزیابی استفاده شده است.

## نتایج و بحث

### معادله پنمن مانتیث فائو ( $ET_{PM}$ )

شکل (۱) مقدار تبخیر-تعرق محاسبه شده با استفاده از روش پن من مانتیث-فائو برای روزهای مختلف سال در منطقه سیستان را نشان می‌دهد. مقدار تبخیر-تعرق روزانه از حدود ۲۱ میلی‌متر در روز در مرداد ماه (July) تا ۰/۷ میلی‌متر در روز در ابتدای دی ماه (December) متغیر بود. حدود ۶۰ درصد مقدار تبخیر-تعرق در چهار ماه June تا September اتفاق می‌افتد. در این چهار ماه بادهای ۱۲۰ روز در منطقه سیستان جریان دارد و عامل اصلی تبخیر-تعرق می‌باشد. مجموع تبخیر در سه ماه January، December و February برابر با ۸ درصد مقدار تبخیر-تعرق سالانه می‌باشد.



شکل ۱. تبخیر-تعرق محاسبه شده با استفاده از فائو روش پن من-مانتیث برای روزهای مختلف سال

### پریستلی-تیلور

#### ارزیابی معادله پریستلی-تیلور بر اساس ضریب معادله ( $\alpha_{PT}$ ) موجود در منابع

ضریب معادله پریستلی-تیلور یکی از مهم‌ترین پارامترهای این معادله است که در ارزیابی معادله به کار می‌رود. در معادله اصلی مقدار آن برابر با  $1/26$  می‌باشد. با توجه به شرایط زمانی و مکانی یک منطقه مقادیر متفاوتی برای آن به کار برده شده است. در این تحقیق سعی شده اکثر مقدار ضریب معادله پریستلی-تیلور ( $\alpha_{PT}$ ) که در سال‌های مختلف و در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گرفته است مورد بررسی قرار گیرد. در جدول (۲) مقدار  $\alpha_{PT}$  به همراه شاخص‌های آماری  $RMSE$  (mm/day)،  $MBE$  (mm/day) و  $NRMSE$  و  $d$  در مقایسه با روش فائو پنمن مانتیث را نشان می‌دهد. مقدار  $\alpha_{PT}$  بر اساس منابع مختلف بین  $0/72$  تا  $2/47$  متغیر بود. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد

که به استثناء چهار مورد که مقدار  $\alpha_{PT}$  برابر با ۲/۳۶، ۲/۳۳، ۲/۴۷ و ۲/۳۲ است در سایر موارد مقدار MBE (mm/day) منفی بوده و نشان دهنده کم‌برآورد نتایج می‌باشد. بهترین نتایج نیز مربوط به همین چهار مورد  $\alpha_{PT}$  است که به صورت پررنگ در جدول نشان داده شده است. ضریب ارایه شده توسط (Eaton et al. (2001)  $(\alpha_{PT} = 2.33)$  با RMSE (mm/day) برابر با ۲/۵۶، MBE برابر با ۰/۱۰ میلی‌متر بر روز و  $r$  برابر با ۱/۰۲، NRMSE برابر با ۳۱/۱ درصد و مقدار شاخص تطابق ۹۱/۱ دارای بهترین نتایج بود همچنین (Mehdizadeh et al. (2016)  $(\alpha_{PT} = 2.32)$  بسیار نزدیک به روش (Eaton et al. (2001) مقدار  $\alpha_{PT} = 2.33$  در روش (Eaton et al. (2001) ۸۵٪ بیشتر از مقدار ضریب  $\alpha_{PT}$  در معادله اصلی (۱/۲۶) می‌باشد. مرجع (Kustas et al. (1996) با  $\alpha_{PT} = 0.8$  دارای ضعیف‌ترین نتایج بود. مقدار ضریب پریستلی-تیلور در این روش ۳۶٪ کمتر از مقدار ضریب  $\alpha_{PT}$  در معادله اصلی (۱/۲۶) است. مقدار MBE این روش برابر با ۵/۳۶- میلی‌متر بر روز و نشان دهنده کم‌برآورد نتایج بود و مقدار NRMSE برابر با ۸۲/۲ درصد است که نشان دهنده خطای زیاد است.

جدول ۲. نتایج آماری مربوط به ارزیابی معادله پریستلی-تیلور بر اساس ضریب ارایه شده در منابع مختلف

مرجع	$\alpha_{PT}$	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	r	NRMSE (%)	d
Didari and Ahmadi (2019)	۱/۹۸	۳/۰۱	-۱/۱۳	۰/۸۶	۳۶/۴	۰/۸۷
Didari and Ahmadi (2019)	۲/۳۶	۲/۵۵	۰/۲۳	۱/۰۳	۳۰/۹	۰/۹۲
Tabari et al. (2011)	۱/۸۲	۳/۳۸	-۱/۷۰	۰/۷۹	۴۱/۱	۰/۸۳
Tabari et al. (2011)	۲/۱۴	۲/۷۲	-۰/۵۶	۰/۹۳	۳۳/۰	۰/۹۰
Mehdizadeh et al. (2016)	۱/۳۴	۴/۸۵	-۳/۴۲	۰/۵۸	۵۸/۹	۰/۶۸
Mehdizadeh et al. (2016)	۲/۳۳	۲/۵۶	۰/۱۲	۱/۰۲	۳۱/۰	۰/۹۲
Pereira (2004)	۱/۲۷	۵/۰۹	-۳/۶۸	۰/۵۵	۶۰/۳	۰/۶۹
Zhang et al. (2004)	۱/۲۶	۵/۱۳	-۳/۷۲	۰/۵۴	۶۲/۲	۰/۶۷
Castellvi et al. (2001)	۱/۵۵	۴/۱۶	-۲/۶۷	۰/۶۷	۵۰/۶	۰/۷۵
Kustas et al. (1996)	۰/۸	۶/۷۶	-۵/۳۶	۰/۳۴	۸۲/۲	۰/۵۷
Flint and Childs (1991)	۰/۹	۶/۴۱	-۵/۰۱	۰/۳۹	۷۷/۸	۰/۵۹
Fisher et al. (2005)	۰/۹۴	۶/۶۶	-۵/۲۶	۰/۳۶	۸۰/۸	۰/۵۷
Daneshkar Arasteh and Tajrishy (2008)	۲/۴۷	۲/۵۹	۰/۶۳	۱/۰۸	۳۱/۲	۰/۹۲
Daneshkar Arasteh and Tajrishy (2008)	۱/۲	۵/۳۳	-۳/۹۳	۰/۵۲	۶۴/۷	۰/۶۵
Gavin and Agnew (2004)	۱/۰۲	۵/۹۷	-۴/۵۸	۰/۴۴	۷۲/۵	۰/۶۵
Eaton et al. (2001)	۱/۵۱	۴/۲۹	-۲/۸۲	۰/۶۶	۵۲/۱	۰/۷۳
Eaton et al. (2001)	۲/۳۲	۲/۵۶	۰/۱۰	۱/۰۲	۳۱/۱	۰/۹۱
Souch et al. (1996)	۱/۰۳۵	۵/۹۲	-۴/۵۲	۰/۴۵	۷۱/۸	۰/۶۲
Jensen et al. (1990)	۱/۷۴	۲/۹۳	۲/۶۶	۰/۷۶	۳۵/۶	۰/۸۷
Stewart and Rouse (1976)	۱/۲۶	۵/۱۳	-۳/۷۲	۰/۵۵	۶۲/۲	۰/۶۷
Bello and Smith (1990)	۱/۳۵	۴/۸۲	-۳/۳۹	۰/۵۸	۵۸/۵	۰/۶۸
Rouse et al. (1977)	۱/۲۶	۵/۱۳	-۳/۷۲	۰/۵۵	۶۲/۲	۰/۶۷
Price et al. (1991)	۱/۲	۵/۳۳	-۳/۹۳	۰/۵۲	۶۴/۷	۰/۶۵
Rouse et al. (1977)	۰/۹۵	۵/۹۰	-۴/۵۱	۰/۴۵	۷۶/۷	۰/۶۱
Jury and Tanner (1975)	۱/۵۷	۴/۱۱	-۲/۶۰	۰/۶۸	۴۹/۸	۰/۷۵
Mukammal and Neumann (1977)	۱/۲۹	۵/۰۲	-۳/۶۰	۰/۵۶	۶۰/۹	۰/۶۷
Davies and Allen (1973)	۱/۲۷	۵/۰۹	۰/۵۶	۰/۵۵	۶۱/۸	۰/۶۶
McNaughton and Black (1973)	۱/۱۸	۵/۵۱	-۴/۰۰	۰/۵۱	۶۵/۶	۰/۶۵
De Bruin and Holtslag (1982)	۱/۱۲	۵/۶۲	-۴/۲۲	۰/۴۸	۶۸/۲	۰/۶۳
Barton (1979)	۱/۰۴	۵/۹۰	-۴/۵۱	۰/۴۵	۷۱/۶	۰/۶۲
Black (1979)	۰/۸۴	۶/۶۳	-۵/۲۲	۰/۳۷	۸۰/۴	۰/۵۸
Giles et al. (1985)	۰/۷۳	۷/۰۳	-۵/۶۲	۰/۳۲	۸۵/۳	۰/۵۶
Shuttleworth and Calder (1979)	۰/۷۲	۷/۰۷	-۵/۶۵	۰/۳۱	۸۵/۸	۰/۵۵
Wang et al. (2004)	۱/۲۸۷	۵/۰۴	-۳/۶۲	۰/۵۶	۶۱/۱	۰/۶۷

#### اصلاح ضریب معادله پریستلی-تیلور

با استفاده از نسبت مقدار تبخیر-تعرق به دست آمده از روش فائو پنمن-مانتیت به مقدار تبخیر-تعرق روش پریستلی-تیلور  $\left(\frac{ET_{o(PM)}}{ET_{o(P-T)}}\right)$  مقدار

ضریب  $\alpha$  برای هرروز به دست می‌آید. برای این منظور از میانگین داده‌های روزانه برای سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ استفاده شده است. جدول (۳) مقدار حداکثر، حداقل و میانگین ضریب  $\alpha$  را برای ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. (Hobbins et al., 2001) بیان کردند که مقدار  $\alpha_{PT}$  در مناطق خشک و نیمه‌خشک از مقدار ۱/۲۶ بیشتر هست و باید اصلاح گردد. حداقل مقدار ضریب  $\alpha$  در ماه آوریل با مقدار ۱/۰۴ دارای کمترین مقدار و در ماه نوامبر با مقدار ۶/۱۲ دارای بیشترین مقدار بوده است. مقدار میانگین ضریب  $\alpha$  بین ۱/۴۲ در ماه دسامبر و ۳/۰۵ در ماه اگوست متغیر بوده و مقدار میانگین آن برابر با ۲/۱۶ است که ۷۱ درصد بیشتر از مقدار ضریب پیش‌فرض (۱/۲۶) می‌باشد. همچنین جدول (۴) مقدار ضریب  $\alpha$  در فصل‌های مختلف سال را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در فصل زمستان مقدار ضریب معادله پریستلی-تیلور دارای کمترین مقدار (۱/۷۹) و در فصل تابستان دارای بیشترین مقدار (۲/۸۰) است. مقدار ضریب  $\alpha$  در زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۴۲٪، ۶۱٪، ۱۲۲٪ و ۶۵٪ با مقدار ضریب  $\alpha$  پیش‌فرض معادله پریستلی-تیلور (۱/۲۶) متفاوت است. دلیل این تفاوت این است که معادله پریستلی-تیلور نمی‌تواند جزء مربوط به آیرودینامیک را در نظر بگیرد و همچنین این معادله برای مناطق مرطوب توسعه یافته است (Tabari et al., 2011) در نتیجه برای هر منطقه باید اصلاح شود. طبری و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که بیشترین و کمترین مقدار ضریب اصلاح شده پریستلی-تیلور در مناطق سرد استان کردستان به ترتیب در دسامبر (با مقدار ۲/۳۵) و می (مقدار ۱/۹۵) مشاهده شد و در آب و هوای خشک استان کرمان نیز بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در اکتبر (مقدار ۲/۱۹) و می (مقدار ۱/۵۳) بود. مهدی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) برای استان‌های آذربایجان شرقی و غربی ایران با آب و هوای سرد نشان دادند که مقدار ضریب اصلاحی در ماه‌های دسامبر (با مقدار ۲/۳۳) و نوامبر (۱/۹۹) دارای بیشترین مقدار و در ماه می با مقدار ۱/۳۴ دارای کمترین مقدار است (Mehdizadeh et al., 2016). نتایج (Irmak et al., 2003) نشان داد که کمترین مقدار نسبت  $\frac{ET_{o(PM)}}{ET_{o(P-T)}}$  مربوط به ژانویه و دسامبر و بیشترین مقدار این نسبت مربوط به جولای می‌باشد، همچنین نشان دادند که روش پریستلی-تیلور در ماه‌های فصل زمستان مقدار تبخیر-تعرق را نسبت به روش فائو پی‌من-مانتیت کم برآورد می‌کند.

 جدول ۳. مقدار ضریب  $\alpha$  معادله پریستلی-تیلور برای ماه‌های مختلف در منطقه سیستان

ضریب $\alpha$	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین
حداقل	۱/۱۴	۱/۲۹	۱/۳۳	۱/۰۴	۱/۳۵	۱/۶۷	۱/۷۰	۱/۸۷	۱/۵۲	۱/۳۵	۱/۵۳	۱/۰۶	۱/۴۳
حداکثر	۱/۷۲	۳/۰۵	۲/۸۷	۲/۷۵	۲/۵۳	۳/۱۸	۳/۵۷	۴/۳۳	۳/۹۸	۵/۳۳	۶/۱۲	۲/۴۱	۳/۵۹
میانگین	۱/۵۶	۱/۸۶	۱/۹۴	۱/۶۸	۱/۹۹	۲/۳۵	۲/۷۸	۳/۰۷	۲/۴۶	۲/۶۴	۲/۲۲	۱/۳۹	۲/۱۸

 جدول ۴. مقدار ضریب  $\alpha$  معادله پریستلی-تیلور برای هر فصل در منطقه سیستان

میانگین	Fall	Summer	Spring	Winter	ضریب $\alpha$
۲/۱۸	۲/۰۸	۲/۸۰	۲/۰۳	۱/۷۹	ضریب $\alpha$
٪۷۳	٪۶۵	٪۱۲۲	٪۶۱	٪۴۲	در صد تفاوت با مقدار پیش‌فرض

مقدار شاخص آماری برای ارزیابی روش پریستلی-تیلور و پریستلی-تیلور اصلاح شده (Adjusted P-T) در مقایسه با روش فائو-پی‌من-مانتیت در جدول (۵) ارائه شده است. قبل از واسنجی معادله پریستلی-تیلور مقدار تبخیر-تعرق را کم‌برآورد پیش‌بینی کرده است به طوری‌که مقدار MBE برابر با ۳/۶۹- بوده است. روش اصلاح شده باعث کاهش مقدار خطا شده است. مقدار RMSE از مقدار ۴/۷۷ میلی‌متر در روز به مقدار ۰/۰۸ میلی‌متر در روز کاهش یافته است و مقدار MBE به ۰/۰۴ میلی‌متر در روز رسیده است. همچنین معادله واسنجی شده با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی زابل برای ایستگاه هواشناسی زهک واقع در منطقه سیستان نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۵) مشخص شده است. مقدار NRMSE برای معادله پریستلی-تیلور قبل از واسنجی برابر با ۶۲ درصد و پس از واسنجی برابر با ۲/۱ درصد بود. مقدار MBE نیز از مقدار ۳/۸۶- میلی‌متر در روز با استفاده از معادله اصلی به مقدار ۰/۲۲ میلی‌متر در روز با استفاده از معادله واسنجی شده رسیده است. نتایج نشان داد که معادله واسنجی شده با دقت مناسبی مقدار تبخیر-تعرق را پیش‌بینی می‌کند.

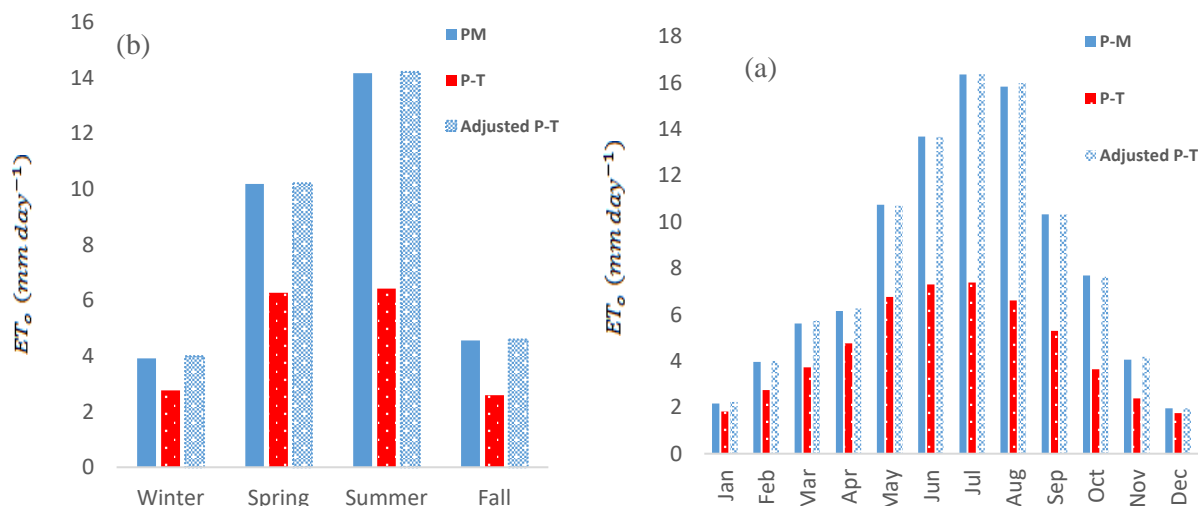
Mehdizadeh et al., (2016) نشان دادند که مقدار تبخیر-تعرق قبل از اصلاح نسبت به فائو پی‌من-مانتیت دارای مقادیر کم برآورد است. همچنین شکل (۲) مقدار میانگین تبخیر-تعرق روش‌های پریستلی-تیلور و پریستلی-تیلور اصلاح‌شده در مقایسه با روش



فائو-پنمن-مانتیت را برای ماه‌های (شکل ۲ a) و فصل‌های (شکل ۲ b) مختلف سال در منطقه سیستان نشان می‌دهد. شکل (۲a) بیان می‌کند که در ماه‌های گرم سال و در زمانی که بادهای ۱۲۰ روز می‌وزد تفاوت بین روش پریستلی-تیلور و فائو-پنمن-مانتیت افزایش می‌یابد. تفاوت بین مقدار پریستلی-تیلور اصلاح‌شده و روش فائو-پنمن-مانتیت بسیار کاهش یافته است به طوری که در اکثر ماه‌های سال نزدیک به یکدیگر می‌باشند. شکل (۲b) نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف بین میانگین تبخیر-تعرق فائو-پنمن-مانتیت و پریستلی-تیلور مربوط به فصل تابستان با مقدار ۷/۷ میلی‌متر و کمترین مربوط به فصل زمستان با مقدار ۱/۲ میلی‌متر است. مقدار میانگین تبخیر-تعرق روش فائو-پنمن-مانتیت و پریستلی-تیلور اصلاح‌شده در هر چهار فصل نزدیک به یکدیگر است.

جدول ۵. مقدار شاخص‌های آماری با استفاده از روش پریستلی-تیلور و پریستلی-تیلور اصلاح‌شده

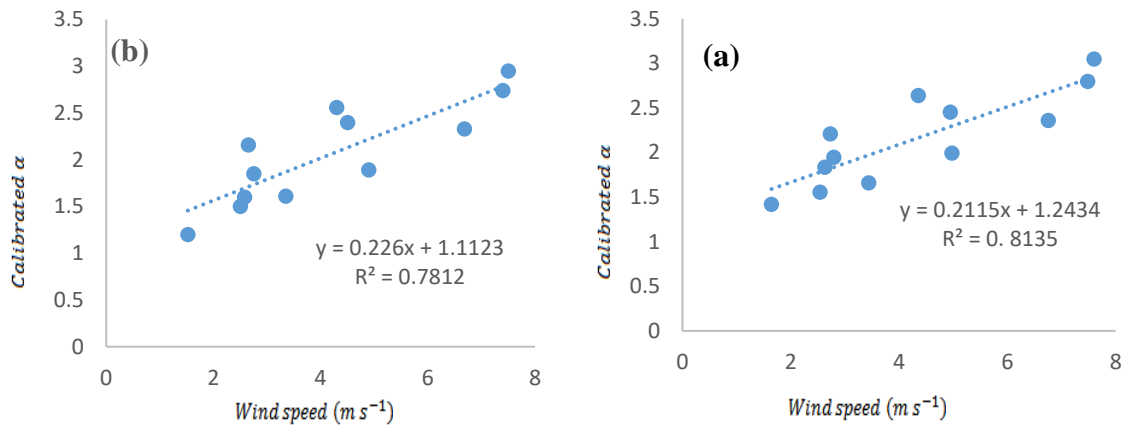
NRMSE(%)		r		MBE (mm/day)		RMSE (mm/day)		ایستگاه
Adjusted P-T	Original P-T	Adjusted P-T	Original P-T	Adjusted P-T	Original P-T	Adjusted P-T	Original P-T	
۰/۹	۵۷	۱/۰۱	۰/۵۴۹	۰/۰۴	-۳/۶۹	۰/۰۸	۴/۷۷	زابل
۲/۱	۶۲	۱/۱۳	۰/۴۸	۰/۲۱	-۳/۸۶	۰/۱۸	۵/۱	زهک



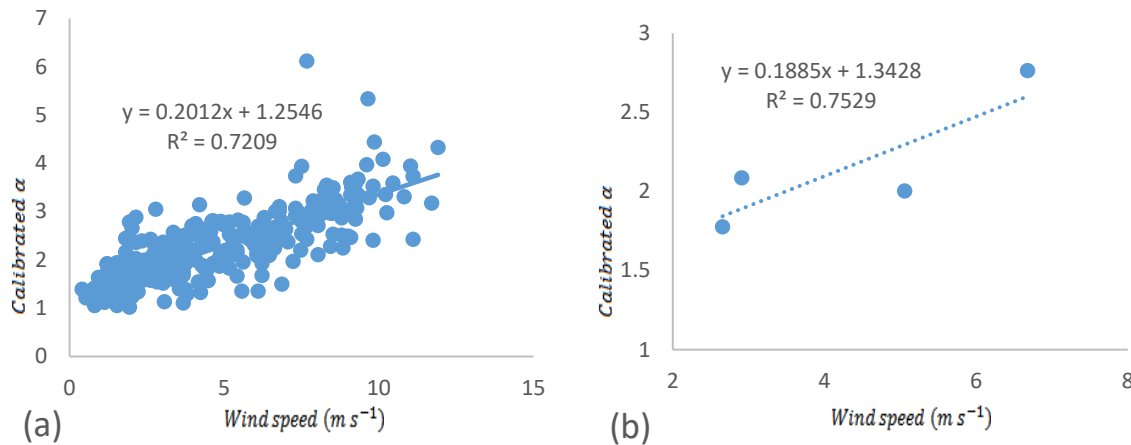
شکل ۲. میانگین ماهیانه تبخیر-تعرق PM، P-T و پریستلی-تیلور اصلاح‌شده

#### تأثیر سرعت باد در $\alpha_{PT}$

Sheffield and Rojas (2013) بیان کردند که در مناطق بادخیز و مرطوب مقدار  $\alpha_{PT}$  باید اصلاح گردد. برای بررسی تأثیر سرعت باد در اصلاح ضریب معادله پریستلی-تیلور، نمودار مقدار سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح‌شده معادله پریستلی-تیلور  $\left(\frac{ET_o(PM)}{ET_o(P-T)}\right)$  برای ماه‌های مختلف برای ایستگاه زابل (شکل ۳a) و ایستگاه زهک (شکل ۳b) رسم شده است. شکل (۳) نشان می‌دهد که رابطه مناسبی بین سرعت باد و  $\alpha_{PT}$  وجود دارد و ضریب همبستگی آن برای ایستگاه زابل ۰/۸۱ و برای ایستگاه زهک برابر با ۰/۷۸ است. شکل (۴) نمودار مقدار سرعت باد در مقابل ضریب اصلاح‌شده معادله پریستلی-تیلور برای ماه‌های مختلف برای ایستگاه زابل در مقیاس روزانه (شکل ۴a) و مقیاس فصلانه (شکل ۴b) را نشان می‌دهد. شکل (۴) مشخص می‌کند که رابطه خطی مناسبی بین سرعت باد و ضریب اصلاحی تبخیر-تعرق معادله پریستلی-تیلور وجود دارد. مقدار ضریب همبستگی در مقیاس روزانه برابر با ۰/۷۲ و در مقیاس فصلانه برابر با ۰/۷۵ است.



شکل ۳. ضریب اصلاحی معادله پریستلی-تیلور در مقابل سرعت باد در ماه‌های مختلف در ایستگاه زابل (a) و ایستگاه زهک (b)

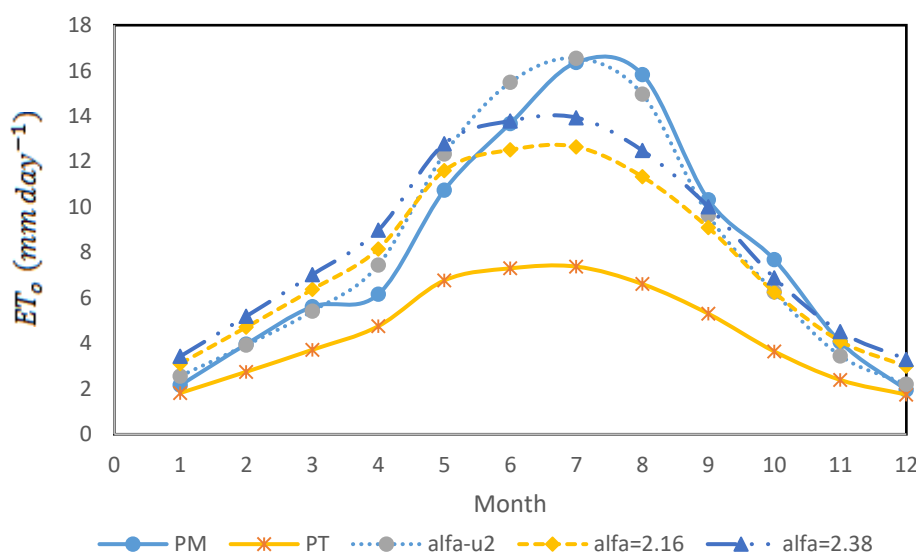


شکل ۴. ضریب اصلاحی معادله پریستلی-تیلور در مقابل سرعت باد در ماه‌های مختلف در ایستگاه زابل در مقیاس روزانه (a) و مقیاس فصلانه (b)

از آنجاکه برای ایستگاه زابل معادله رگرسیونی سرعت باد در مقیاس ماهانه  $(\alpha_{PT-U_2} = 0.2115U_2 + 1.243)$  و روزانه  $(\alpha_{PT-U_2} = 0.2015U_2 + 1.255)$  بسیار نزدیک به یکدیگر هستند، انتظار می‌رود که از هر کدام از معادلات استفاده گردد نتایج تقریباً یکسانی بدست می‌آید. مقدار  $\alpha_{PT}$  با استفاده از معادله رگرسیونی سرعت باد به دست آمده با داده‌های ماهانه برای ایستگاه زابل و مقدار تبخیر-تعرق محاسبه گردید. همچنین با روش حداقل مربعات خطا مقدار بهینه  $\alpha_{PT}$  برابر با  $2/38$  به دست آمد. مقدار میانگین  $\alpha_{PT}$  بر اساس جدول (۳) برابر با  $2/18$  می‌باشد. با استفاده از این مقادیر مقدار تبخیر-تعرق به دست آمد که نتایج آن در جدول (۶) و شکل (۵) موجود است. نتایج جدول (۶) و شکل (۵) نشان می‌دهد که مقدار تبخیر تعرق به دست آمده با استفاده از ضریب اصلاحی بر اساس سرعت باد دارای نتایج قابل قبولی از نظر آماری است. میانگین مقدار RMSE، MBE و  $r$  بر اساس استفاده از  $\alpha_{PT-U_2}$  به ترتیب برابر با  $0/96$ ،  $0/14$  میلی‌متر بر روز و  $1/01$  است. مقدار تبخیر تعرق به دست آمده با استفاده از ضریب اصلاحی بر اساس حداقل مربعات خطا  $(\alpha_{PT} = 2.38)$  دارای RMSE، MBE و  $r$  به ترتیب برابر با  $1/72$ ،  $0/31$  میلی‌متر بر روز و  $1/04$  است. مقدار تبخیر تعرق به دست آمده با استفاده از ضریب اصلاحی بر اساس  $\alpha_{PT} = 2.18$  دارای دقت کمتر از دو روش دیگر است و مقدار MBE در این روش  $-0/47$  است که نشان دهنده کم برآورد این روش هست. مقدار NRMSE روش  $\alpha_{PT-U_2}$  با مقدار  $11/6$  درصد در بین تمامی روش‌ها بهترین بود. بر اساس مقدار EF روش  $\alpha_{PT-U_2}$  با مقدار  $0/96$  دارای بهترین نتایج و پس از آن به ترتیب روش  $\alpha_{PT} = 2.38$  با مقدار  $0/87$  و روش  $\alpha_{PT} = 2.18$  با مقدار  $0/83$  بود. شکل (۵) نیز نشان می‌دهد که روش  $\alpha_{PT-U_2}$  به خصوص در ماه‌های گرم سال (تابستان) دارای بیشترین دقت می‌باشد. در ماه‌های گرم سال در منطقه سیستان بادهای  $120$  روزه می‌وزد که یکی از دلایل اصلی تبخیر-تعرق در منطقه هست، در نتیجه استفاده از ضریب اصلاحی بر اساس سرعت باد  $(\alpha_{PT-U_2} = 0.2115U_2 + 1.243)$  باعث افزایش دقت شده است.

جدول ۶. شاخص‌های آماری معادله پریستلی-تیلور بر اساس  $\alpha_{PT} = 1.26$  بر اساس معادله رگرسیونی سرعت باد در مقیاس ماهانه، بر اساس  $\alpha_{PT} = 2.16$  و بر اساس  $\alpha_{PT} = 2.38$

شاخص‌های آماری	PT ( $\alpha_{PT} = 2.38$ )	PT ( $\alpha_{PT} = 2.18$ )	PT ( $\alpha_{PT-U2}$ )	PT ( $\alpha_{PT} = 1.26$ )
RMSE (mm/day)	۱/۷۲	۱/۸۲	۰/۹۶	۴/۷۷
MBE (mm/day)	۰/۳۱	-۰/۴۷	۰/۱۴	-۳/۶۹
r	۱/۰۴	۰/۹۴	۱/۰۱	۰/۵۴۹
NRMSE	۲۰/۸	۲۲/۲	۱۱/۶	۶۲/۲
d	۹۳	۸۵	۹۸	۶۷
EF	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۰۵



شکل ۴. مقدار تبخیر تعرق در ماه‌های مختلف بر اساس روش PT، مقدار ضریب اصلاحی به دست آمده از معادله رگرسیون سرعت باد، مقدار ضریب اصلاحی با مقدار ثابت ۲/۱۶ و مقدار ثابت ۲/۳۸

برای درک بهتر نتایج جدول (۷)، نتایج ارزیابی معادله رگرسیونی بدست آمده برای مقیاس روزانه ( $PT(\alpha_{U2-day})$ )، ماهانه ( $PT(\alpha_{U2-month})$ ) و فصلی ( $PT(\alpha_{U2-season})$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار NRMSE دارای کمترین مقدار برابر با ۱۰/۹ درصد در مقیاس فصلی و مقدار ۱۱/۶ درصد در مقیاس ماهانه و ۱۶/۱ درصد در مقیاس روزانه می‌باشد. مقدار شاخص تطابق در هر سه حالت با یکدیگر برابر است.  $PT(\alpha_{U2-month})$  با EF برابر با ۰/۹۶ دارای دقت بیشتری نسبت به دو مقیاس دیگر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که معادله رگرسیون برای هر سه مقیاس با دقت مناسبی قابل کاربرد است.

جدول ۷. شاخص‌های آماری معادله پریستلی-تیلور بر اساس معادله رگرسیونی سرعت باد در مقیاس‌های مختلف

شاخص‌های آماری	PT ( $\alpha_{U2-season}$ )	PT ( $\alpha_{U2-month}$ )	PT ( $\alpha_{U2-day}$ )
RMSE (mm/day)	۰/۸۶	۰/۹۶	۱/۱۵
MBE (mm/day)	۰/۰۹	۰/۱۴	-۰/۱۳
r	۱/۰۲	۱/۰۱	۱/۰۲
NRMSE	۱۰/۹	۱۱/۶	۱۶/۱
d	۹۸	۹۸	۹۸
EF	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۳

## نتیجه‌گیری

منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران یکی از مناطقی است که با توجه به بادهای ۱۲۰ روز و تغییرات دمایی بالای شبانه‌روز در ایران منحصربه‌فرد است. روش پریستلی-تیلور به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز ندارند و کاربرد آن‌ها در مناطقی که داده‌های هواشناسی در



دسترس نیست می‌تواند مفید باشد. در این تحقیق مقدار تبخیر-تعرق روش پریستلی-تیلور در مقایسه با روش پنمن-مونتیث فائو مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد ۶۰ درصد مقدار تبخیر-تعرق منطقه سیستان در چهار ماه June تا September که بادهای ۱۲۰ روزه می‌وزد اتفاق می‌افتد. بررسی مقدار  $\alpha_{PT}$  در منابع مختلف از سال ۱۹۷۲ تا اکنون نشان داد که  $\alpha_{PT}$  بین ۰/۷۲ تا ۲/۴۷ متغیر بوده و مقدار  $\alpha_{PT}$  در معادله اصلی (۱/۲۶) در بسیاری از مناطق مناسب نمی‌باشد. نتایج نشان داد که برای منطقه سیستان با توجه به شرایط ویژه منطقه و بادهای ۱۲۰ روزه باید مقدار  $\alpha_{PT}$  اصلاح شود. مقدار  $\alpha_{PT}$  برای ماه‌ها و فصل‌های مختلف متفاوت بوده و به‌طور میانگین بین ۱/۷۹ در زمستان (۴۲٪ بیشتر از مقدار آن در معادله اصلی) تا ۲/۸۰ در تابستان (۱۲۲٪ بیشتر از مقدار آن در معادله اصلی) با میانگین ۲/۱۸ (۷۳٪ بیشتر از مقدار آن در معادله اصلی) متغیر است. چنانچه از مقدار  $\alpha_{PT}$  متغیر برای همراه استفاده گردد مقدار RMSE (mm/day) برابر ۰/۰۷ و مقدار MBE (mm/day) برابر ۰/۰۴ می‌شود. رابطه رگرسیون خطی بین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و  $\alpha_{PT}$  وجود دارد  $(\alpha_{PT-U2} = 0.2115U_2 + 1.243)$ ، و چنانچه از این رابطه استفاده گردد دقت نتایج به شکل معنی‌داری در مقیاس روزانه افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که چنانچه از روش‌های اصلی پریستلی-تیلور در منطقه سیستان استفاده گردد نتایج دارای خطاهای بسیار زیاد است. از طرفی چنانچه از مقادیر اصلاحی معادله‌های پریستلی-تیلور استفاده گردد نتایج این مدل ساده را می‌توان با دقت مناسبی مورد استفاده قرارداد ولی نیازمند واسنجی این مدل در هر ایستگاه می‌باشد.

## سپاسگزاری

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

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## فهرست منابع

- ابراهیمی پاک، ن. ع. تافته، ا. اگدرنژاد، ا. اسدی کپورچال، ص. ۱۳۹۷. تعیین ضرایب تبخیر-تعرق ماهانه گندم زمستانه با استفاده از روش‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق و تشت تبخیر در دشت قزوین. مهندسی آبیاری و آب. ۸(۴): ۱۰۷-۱۲۱.
- قبادی، آ. دانش‌کار آراسته، پ. خضری، س. م. ۱۳۹۶. واسنجی ضریب پریستلی-تیلور در برآورد تبخیر از سطح آزاد آب (مطالعه موردی: مخزن سد مهاباد). اکوهیدرولوژی. ۴(۳): ۸۱۵-۸۰۳.
- کهن‌مقدم، پ. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل‌های تبخیر-تعرق گیاه مرجع برای اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک زاهدن). مجله حفاظت آب و خاک. ۲۵(۱): ۳۰۹-۳۱۷.

## REFERENCE

- Abtew, W. 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. *Journal of American Water Resource Association*, 32, 465-473.
- 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, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Bandaragoda, C., Tarboton, D. G., & Woods, R. (2004). Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 178-201.
- Black, T. A. (1979). Evapotranspiration from Douglas-fir stands exposed to soil water deficits. *Water Resource Research*, 15(1), 164-170.
- Benli, B., Bruggeman, A., Oweis, T., & Ustun, H. (2010). Performance of Penman-Monteith FAO56 in a semiarid highland environment. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 136(11), 757-765.
- Bello, R. L., & Smith, J. D. (1990). The effect of weather variability on the energy balance of a lake in the Hudson Bay Lowlands, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 22(1), 98-107.
- Berengena, J., & Gavilán, P. (2005). Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 147-163.
- Castellvi, F., Stockle, C. O., Perez, P. J., & Ibanez, M. (2001). Comparison of methods for applying the Priestley-Taylor equation at a regional scale. *Hydrological Processes*, 15(9), 1609-1620.
- Chari, M.M., Poozan, M.T. & Afrasiab, P. (2020). Modelling soil water infiltration variability using scaling. *Biosystems Engineering*, 196, 56-66.

- Chuanyan, Z., Zhongren, N., & Zhaodong, F. (2004) GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semiarid climate of the Chinese Loess Plateau. *Journal of Arid Environments*, 58,387– 403.
- Cristea, N., Kampf, S., & Burges, S. (2017). Revised Coefficients for Priestley-Taylor and Makkink-Hansen Equations for Estimating Daily Reference Evapotranspiration. *Journal of Hydrology Engineering*, 18,1289-1300.
- Daneshkar- Arasteh, P., & Tajrishy, M. (2008). Calibrating Priestley-Taylor model to estimate open water evaporation under regional advection using volume balance method—Case study: Chahnimeh Reservoir, Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(22), 4097–4104.
- Davies, J. A., & Allen, C.D. (1973). Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern Ontario. *Journal of Applied Meteorology*, 12(4), 649–657.
- De Bruin, H.A.R., & Holtslag, A.A.M. (1982). A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. *Journal of Applied Meteorology*, 21(11), 1610–1621.
- Didari S. & Ahmadi, S. (2019). Calibration and evaluation of the FAO56-Penman-Monteith, FAO24-radiation, and Priestly-Taylor reference evapotranspiration models using the spatially measured solar radiation across a large arid and semi-arid area in southern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1-2), 441-455.
- Eaton, A. K., Rouse, W. R., Laflour, P. M., Marsh, P., & Blanken, P. D. (2001). Surface energy balance of the western and central Canadian sub arctic: Variations in the energy balance among five major terrain types. *Journal of Climate*, 14(17), 3692–3703.
- Ebrahimipak, N.A., Tafteh, A., Aslan Egdernezhad, A., Safoora Asadi Kapourchal, S. 2017. Determination of monthly evapotranspiration coefficients of winter wheat by different methods of estimating evapotranspiration and evaporation pan in Qazvin plain. *Irrigation and water engineering*, 8(4), 107-121. (In Persian)
- Fisher J B, DeBiase TA, Qi Y, Xu M, & Goldstein AH. (2005). Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software*, 20(6), 783–796.
- Flint, A. L., and Childs, S. W. (1991). Use of the Priestley–Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56(3–4), 247–260.
- Gavin, H., & Agnew, C. A. (2004). Modelling actual, reference and equilibrium evaporation from a temperate wet grassland. *Hydrological Processes*, 18(2), 229–246.
- Ghobadi, A., Daneshkar Arasteh, P., & Khezri, S.M. (2017). Calibration of Priestley-Taylor coefficient in the estimation of evaporation from the free surface of water (case study: Mahabad dam reservoir). *Ecogydrology*, 4(3), 803-815. (In Persian)
- Gunston, H., & Batchelor, C. H. (1983). A comparison of the Priestley- Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. *Agriculture Water Management*, 6(1), 65–77.
- Hobbins, M.T., Ramirez, JA., & Brown, TC. (2001). The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: an enhanced advection-aridity model. *Water Resource Research*, 37,1389–1403.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 336–347.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, ASCE, New York.
- Jury, W. A., & Tanner, C. B. (1975). Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula. *Agronomy Journal*, 67(6), 840–842.
- Kahkhamoghadam, P. (2018). Evaluation of reference evapotranspiration models for warm arid climate (Case study: Zahedan station). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 309-317. (In Persian)
- Kustas, W. P., Stannard, D. I., & Allwine, K. J. (1996). Variability in surface energy flux partitioning during Washita '92: Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82(1–4), 171–193.
- Mehdizadeh, S, Saadatnejadgharahassanlou, H., & Behmanesh, J. (2017). Calibration of Hargreaves–Samani and Priestley–Taylor equations in estimating reference evapotranspiration in the Northwest of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(7), 942-955.
- Mobiliala, M. & Longobardi, A. 2021. Prediction of Potential and Actual Evapotranspiration Fluxes Using Six Meteorological Data-Based Approaches for a Range of Climate and Land Cover Types. *ISPRS*



- International Journal of Geo-Information, 10, 192. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030192>.
- Mukammal, E. I., & Neumann, H. H. (1977). Application of the Priestley Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighing lysimeter and class A pan. *Boundary-Layer Meteorology*, 12(2), 243–256.
- Nikolaou, G. Neocleous, D. Kitta, E. & Katsoulas, N. 2023. Assessment of the Priestley-Taylor coefficient and a modified potential evapotranspiration model. *Smart Agricultural Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100075>.
- Pereira, A. R. (2004). The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(3–4), 305–313.
- 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.
- Price, J. S., Maloney, D. A., & Downey, F. G. (1991). Peatlands of the Lake Melville coastal plain, Labrador. *Northern Hydrology Selected Perspectives: Proc., of the Northern Hydrology Symp., National Hydrology Research Institute, Saskatoon, SK, Canada*, 293–302.
- Rojas, JP., Sheffield, RE. (2013). Evaluation of Daily Reference Evapotranspiration Methods as Compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith Equation Using Limited Weather Data in Northeast Louisiana. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (4), 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000523
- Rouse, W. R., Mills, P. F., & Stewart, R. B. (1977). Evaporation in high latitudes. *Water Resource Research*, 13(6), 909–914.
- Schramm, I., Boike, J., Bolton, W. R., & Hinzman, L. (2007). Application of TopoFlow, a spatially distributed hydrologic model to the Imnavait Creek Watershed, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 112(G4),G04S46. doi:10.1029/2006JG000326.
- Shuttleworth, W J. (1979). Calder IR. Has the Priestley-Taylor equation any relevance to forest evaporation? *Journal of Applied Meteorology*, 18(5), 639–646.
- Souch, C., Wolfe, C. P., & Grimmon, S. B. (1996). Wetland evaporation and energy partitioning: Indian Dunes National Lakeshore. *Journal of Hydrology*, 184(3–4), 189–208.
- Soylu, M. E., Istanbuluoglu, E., Lenters, J. D., and Wang, T. (2011). Quantifying the impact of groundwater depth on evapotranspiration in a semi-arid grassland region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 787–806.
- Stewart, R. B., & Rouse, W. R. (1976). A simple method for determining the evaporation for shallow lakes and ponds. *Water Resource Research*, 12(4), 623–628.
- Sun, S., Chen, H., Ju, W., Yu, M., Hua, W. & Yin, Y. (2014). On the attribution of the changing hydrological cycle in Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 514, 214–225.
- Szilagyi, J. Parlange, M.B. & Katul, G.G. (2014). Assessment of the Priestley-Taylor parameter value from ERA-Interim global reanalysis data. *Journal of Hydro-environment Research*, 2 (1), 1–7.
- Tabari H, & Hosseinzadeh Talae P. (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, 837–845.
- Wang, X., Melesse, A. M., & Yang, W. (2006). Influences of potential evapotranspiration estimation methods on SWAT’s hydrologic simulation in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASABE*, 49(6), 1755–1771.
- Xu, C. Y., and Singh, V. P. (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resource Management*, 16(3), 197–219.
- Yoder, R. E., Odhiambo, L. O., & Wright, W. C. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 197–202.
- Zhang, Y., Liu, C., Yu, Q., Shen, Y., Kendy, E., Kondoh, A., Tang, C., & Sun, H. (2004). Energy fluxes and the Priestley-Taylor parameter over winter wheat and maize in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 18(12), 2235–2246.