مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۳ ■ زمستان ۱۳۹۹
صفحه‌های ٤٥٢-٤٤٣
DOI: 10.22059/jwim.2021.308145.813

مقاله پژوهشی:

بررسی دقت روش‌های ترکیبی برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب (مطالعه موردی ایران)

سعید ناصری[۱]، هوشنگ قمرنیا[۲*]، رضوان خسروی[۳]، یزدان محمدی[۴]، فرهنگ سرگردی[۵]
۱، ۳ و ۴. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲. استاد، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۵. استادیار، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲

چکیده

تخمین میزان دقیق تبخیر و تعرق در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دور آبیاری از اهمیت فراوانی برخوردار است. از طرفی روش‌های متفاوتی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع وجود دارد. هدف از این مطالعه ارزیابی روش‌های ترکیبی به‌منظور معرفی روش برتر در تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب ایران است. در این پژوهش براساس آمار دریافت‌شده از ایستگاه‌های سینوپتیک کشور در بازه زمانی سال‌های ١٣٧٤ لغایت ١٣٩٣ و با استفاده از روش‌های ترکیبی، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع محاسبه و با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ مقایسه شده است. نتایج نشانگر آن است که کلیه روش‌ها به‌جز روش بوزینگر وان باول، همبستگی خوبی با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ دارند. دقت روش بوزینگر وان باول در کلیه مناطق با مقادیر RMSE و MAE به‌ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۹ و ۰/۵۵ میلی‌متر در روز می‌باشد. در مناطق خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران روش‌های پنمن ١٩٤٨ و پنمن رایت ١٩٧٢ با مقادیر RMSE و MAE کم‌تر از ۰/۳۹ میلی‌متر در روز و در مناطق نیمه‌خشک ایران روش‌های پنمن رایت ١٩٧٢ و پنمن ١٩٤٨ با مقادیر RMSE و MAE کم‌تر از ۰/۳۵ میلی‌متر در روز به‌ترتیب بالاترین دقت را دارا می‌باشند.

کلیدواژه‌ها: اقلیم‌نمای دومارتن، بوزینگر وان باول، پنمن رایت، پنمن مانتیس فائو ٥٦.

Evaluation of the Accuracy of Different Combined Methods for Estimating the Potential Evapotranspiration in different Climates (Case Study: Iran)

Saeid Nasseri[1], Houshang Ghamarnia[2*], Rezvan Khosravi[3], Yazdan Mohamadi[4], Farhang Sargordei[5]
1, 3, 4. Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
2. Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
5. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran
Received: August 26, 2020 Accepted: January 11, 2021

Abstract

Estimating the exact value of reference evapotranspiration is very important in irrigation planning and determining the irrigation frequency. There are different methods for estimating the reference crop evapotranspiration. The aim of this study was to find the best combined method for estimating the reference evapotranspiration in arid, semi-arid, semi-humid and humid climates of Iran. In this study, based on different necessary data from first order weather stations in the period of 1995 to 2014, the reference evapotranspiration was calculated by some combined methods and compared with FAO 56 Penman Monteith method. The results showed that all methods except Businger and Van bavel method have a good correlation with FAO 56 Penman Monteith (R^2> 0.96). The accuracy of Businger and Van bavel methods in all regions were low with RMSE and MAE values greater than 0.9 and 0.55 mm per day, respectively. In arid, humid and semi-humid regions of Iran, Penman 1948 and Penman Wright 1972 methods with RMSE and MAE values less than 0.39 mm per day and in semi- arid regions of Iran Penman Wright 1972 methods and Penman 1948 with RMSE and MAE values less than 0.35 mm per day had the highest accuracy.

Keywords: Buzinger van Bavel, De Martonne climate classification, FAO Penman Monteith, Penman Wright.

* نویسنده مسئول
Email: hghamarnia@razi.ac.ir

مقدمه

میزان تولید محصول در گیاهان مختلف به میزان تبخیر و تعرق از آن گیاه بستگی داشته و بر این اساس با فراهم‌نمودن آب موردنیاز جهت تبخیر و تعرق می‌توان حداکثر محصول را تولید کرد (Moradi *et al*., 2020). تخمین میزان دقیق تبخیر و تعرق نه‌تنها در برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین دور آبیاری، بلکه در مطالعات مربوط به مدل‌بندی بیلان آب هر ناحیه از اهمیت فراوانی برخوردار است. این مسأله در کشورهایی که با مشکل بحران آبی روبه‌رو هستند، دارای اهمیت بیش‌تری است. از طرفی با توجه به تنوع محصولات زراعی و شرایط آب‌وهوایی، امکان محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان مختلف به‌صورت مجزا بسیار زمان‌بر و پر هزینه است.

تبخیر و تعرق گیاه مرجع تابعی از عوامل مختلف هواشناسی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است. روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق را می‌توان به روش‌های مستقیم (استفاده از لایسیمتر) و روش‌های غیرمستقیم و محاسبه‌ای تقسیم‌بندی کرد. استفاده از لایسیمتر پرهزینه بوده و نیازمند صرف وقت زیاد است. به همین علت در بیش‌تر موارد برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. این روش‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی میزان تبخیر و تعرق را تخمین می‌زنند (Babamiri and Dinpazhoh, 2016). روش‌های غیرمستقیم و محاسبه‌ای شامل روش‌های آئرودینامیکی[1]، بیلان انرژی، ترکیبی و تجربی است. روش ترکیبی بر مبنای روش اصلی پنمن (۱۹٤۸) بوده که از دو جز اصلی تابش و آئرودینامیک تشکیل می‌شود (Allen *et al*., 1989). مطالعات Al-Omran *et al*. (2004) تأیید کرد که روش پنمن مانتیث بهترین عملکرد را نسبت به روش‌های بلینی کریدل، جنسن هیز، تشتک تبخیر و تورنت ویت دارد. هم‌چنین پژوهش‌گران زیادی به این نتیجه رسیدند که روش فائو پنمن ٥٦ مناسب‌ترین روش برای تخمین دقیق تبخیر و تعرق به‌صورت غیرمستقیم است (de Sousa Lima *et al*., 2013; DehghaniSanij *et al*., 2004; Mohammad, 1997; Allen *et al*., 1998; Berti *et al*., 2014; Djaman *et al*., 2015; Pandey *et al*., 2014; Tabari *et al*., 2013; Temesgen *et al*., 2005; Alblewi, 2012; Ghamarnia *et al*., 2015; Sentelhas *et al*., 2010; Sharifan *et al*., 2006).

پژوهش‌گرانی از قبیل Yuanshi (1995) برای منطقه پکن و Khatua and Pasupalak (2018) برای ایالت اودیشای[2] هند، تحقیقاتی در رابطه با ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع انجام داده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش پنمن رایت ۱۹۷۲ نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار است.

در بیش‌تر نقاط ایران تاکنون مطالعات پراکنده‌ای در زمینه تخمین میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع با روش‌های مختلف و مقایسه یا واسنجی آن‌ها انجام پذیرفته است. از طرفی با توجه به این‌که در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی ایران مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع اندازه‌گیری‌شده توسط لایسیمتر در دسترس نیست، به ناچار از داده‌های به‌دست‌آمده از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ برای مقایسه داده‌های روش‌های مختلف استفاده می‌شود. بررسی و ارزیابی‌های پیشین انجام‌شده از طریق روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ توسط سایر پژوهش‌گران مختلف نشان داده که دقت روش‌های ترکیبی بیش‌تر از سایر روش‌ها است (Valipour, Sharifan *et al*., 2006; Tabari *et al*., 2013; 2014; Rahimi Khoob *et al*., 2006; Upadhyaya, 2006; Gao *et al*., 2017).

McVicar *et al*. (2012) بیان کرد که نتیجه یک آنالیز حساسیت روی سه روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ و پنمن ۱۹٤۸ و تشتک تبخیر نشان داده است که با تغییر سرعت باد به اندازه دو متر بر ثانیه، مقدار تبخیر و تعرق به میزان

۲۰ درصد تغییر می‌کند. او نشان داد که با یک درجه افزایش دما نسبت به دمای میانگین جزء آئرودینامیکی روش‌های ترکیبی از اهمیت بیش‌تری نسبت به جزء تابشی برخوردار خواهد شد.

از طرفی بررسی‌های مختلف نشانگر آن است که تاکنون دقت روش‌های مختلف ترکیبی در سطحی معادل کشور ایران و برای اقلیم‌های مختلف موردبررسی قرار نگرفته است. لذا، در این پژوهش میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع براساس روش‌های مختلف ترکیبی (روش‌های پنمن رایت ۱۹۹۶، پنمن رایت ۱۹۷۲، پنمن ۱۹٤۸، پنمن فائو ۲٤ اصلاح‌شده، پنمن فائو ۱۷ و بوزینگر- وان باول) در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب ایران مربوط به سال‌های ۱۳۷٤ تا ۱۳۹۳ محاسبه و با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ مقایسه شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش اقلیم‌نمای دومارتن[۳] اقلیم‌های مختلف ایران شناسایی شد. ضریب دومارتن طبق رابطه (۱) است.

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (۱)$$

که در آن: I ضریب خشکی دومارتن، P میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر و T میانگین دمای سالانه برحسب درجه سانتی‌گراد است. بر اساس این مدل شش نوع اقلیم به شرح جدول (۱) وجود دارد.

براساس روش دومارتن استان‌های کرمانشاه، کردستان، آذربایجان‌غربی، آذربایجان‌شرقی، گلستان، تهران، زنجان، مرکزی، همدان، لرستان، قزوین و اردبیل دارای اقلیم نیمه‌خشک، استان‌های خوزستان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، قم، اصفهان، بوشهر، هرمزگان، سیستان و بلوچستان، یزد، کرمان، فارس، ایلام و سمنان دارای اقلیم خشک و استان‌های گیلان، مازندران، کهکیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری دارای اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب هستند. در شکل (۱) موقعیت و مشخصات جغرافیایی استان‌های مختلف ارائه شده است.

Table 1. Climatic classification according to De Martonne drought coefficient

Type of climate	Dry	Semi dry	Mediterranean	Semi wet	Wet	Very wet
Drought coefficient range	Lower than 10	10-19.99	20-23.99	24-27.99	28-34.99	More than 35

Figure 1. Arid, semi-arid, humid and semi-humid locations of Iran

داده‌های مورداستفاده در این تحقیق میانگین دمای هوا، کمینه و بیشینه دمای هوا، تابش خالص خورشیدی، رطوبت به‌صورت میانگین، بیشینه و کمینه و سرعت باد در مقیاس ماهیانه می‌باشند که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. با بررسی داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیکی در مناطق مختلف ایران مشخص گردید که در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷٤ تا ۱۳۹۳ داده‌های کامل هواشناسی برای کلیه استان‌ها وجود دارد. لذا، بازه زمانی فوق به‌منظور ارزیابی روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در نظر گرفته شد. هم‌چنین تعداد کمی از داده‌های مذکور ناقص و مفقودشده، براساس میانگین روزهای قبل و بعد از آن روزها، تخمین زده شدند.

در این پژوهش در ابتدا میانگین داده‌های ماهیانه برای هر ایستگاه سینوپتیک محاسبه شد. سپس میانگین ماهیانه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با روش‌های ترکیبی پنمن رایت ۱۹۹٦، پنمن رایت ۱۹۷۲، پنمن ۱۹٤۸، پنمن فائو ۲٤ اصلاح‌شده، پنمن فائو ۱۷ در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷٤ لغایت ۱۳۹۳ محاسبه گردید. لازم به ذکر است که روش بوزینگر وان باول از جمله روش‌های به‌کاررفته در برنامه REF-ET نبوده، به همین دلیل جهت بررسی و تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از این روش، برنامه ریاضی آن در اکسل تهیه و برای همه استان‌ها مورداستفاده قرار گرفت. فرمول روش بوزینگر وان باول نیز از مقاله‌های پژوهش‌گران مختلف استخراج شد (Upadhyaya, 2006; Lascano and Evett, 2007). معادلات روش‌های مختلف ترکیبی مورد استفاده در جدول (۲) آمده است. وجه تمایز این روش‌ها نحوه محاسبه ضرایب سرعت باد است.

Table 2. Different combined reference methods for potential evapotranspiration estimate

Methods	Equation
Penman 1948	$ET_O = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_W \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_S - e_a)\right)/\lambda$ $K_w = 6.43$ $a_W = 1$ $b_w = 0.537$
Penman Wright 1972	$ET_O = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_W \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_S - e_a)\right)/\lambda$ $K_w = 2.62$ $a_W = 0.75$ $b_w = 0.993$
Penman Wright 1996	$ET_O = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_W \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_S - e_a)\right)/\lambda$ $K_w = 2.62$ $a_w = 0.3 + 0.58\, exp\left(\left[-\left(\frac{J-170}{45}\right)^2\right]\right)$ $b_w = 0.32 + 0.54 \exp\left(\left[-\left(\frac{J-228}{67}\right)^2\right]\right)$
FAO 24 corrected Penman	$ET_O = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_W \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_S - e_a)\right)/\lambda$ $K_w = 6.43$ $a_W = 1$ $b_w = 0.862$
FAO plant protection paper 17	$ET_O = \left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_W \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_S - e_a)\right)/\lambda$ $K_w = 6.43$ $a_w = 0.4 + 1.4\, exp\left(\left[-\left(\frac{J-173}{58}\right)^2\right]\right)$ & $b_w = 0.605 + 0.345 \exp\left(\left[-\left(\frac{J-243}{80}\right)^2\right]\right)$
Businger, Monteith & van Bavel	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{(\Delta+\gamma)}\frac{0.622\rho\lambda k^2}{P}\frac{U_z}{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)\right]^2}(e_s - e_a)$ $\rho = \frac{0.46460}{(t+273.15)}(P - 0.0037960 Ue_s)$ & $e_s = 1.3146 \times 10^9 \exp(-\frac{5315.56}{t+273.15})$
FAO 56 Penman Monteith	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$

در رابطه‌های فوق، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر در روز، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلوپاسکال، γ ثابت سایکرومتری بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد، R_n تشعشع خالص بر حسب مگاژول در مترمربع در روز، Δ شیب منحنی فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، λ گرمای نهان تبخیر برحسب مگاژول بر کیلوگرم، G چگالی شار گرمای خاک برحسب مگاژول بر مترمربع در روز، T میانگین بیشینه و کمینه درجه حرارت روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد، U_z سرعت باد در ارتفاع z متری برحسب متر بر ثانیه، z ارتفاع نسبت به سطح زمین برحسب متر، R_s تشعشع خورشیدی برحسب مگاژول بر مترمربع در روز، U_d سرعت روزانه باد برحسب متر بر ثانیه، d ارتفاع جابه‌جایی از سطح صفر تا ایستگاه هواشناسی بر حسب سانتی‌متر و Z_0 ضریب زبری ایستگاه هواشناسی است.

در این پژوهش با توجه به حجم زیاد داده‌های به‌دست‌آمده، در ابتدا میزان تبخیر و تعرق هر کدام از روش‌ها به‌صورت جداگانه با میزان تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ مقایسه شده و برای هر کدام از آنها یک خط رگرسیون برازش داده شد. سپس میزان تبخیر و تعرق براساس معادله خط رگرسیون به‌دست‌آمده توسط آن روش‌ها محاسبه گردید.

به‌منظور ارزیابی دقت روش‌های ترکیبی از طریق مقایسه با نتایج روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ از پارامترهای آماری R^2، RMSE و MAE به شرح روابط (٢) تا (٤) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=0}^{n}(ET_{0.m.i} - \overline{ET_{0.m}}) \times (ET_{0.RS.i} - \overline{ET_{0.RS}}]^2}{\sum_{i=0}^{n}(ET_{0.m.i} - \overline{ET_{0.m}})^2 \times \sum_{i=0}^{n}(ET_{0.RS.i} - \overline{ET_{0.RS}})^2} \quad (٢)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=0}^{n}(ET_{0.m.i} - ET_{0.RS.i})^2} \quad (٣)$$

$$MAE = 1/n \sum_{i=0}^{n} |ET_{0.m.i} - ET_{0.RS.i}| \quad (٤)$$

در روابط بالا، $ET_{0.m.i}$ مقدار اندازه‌گیری‌شده، $\overline{ET_{0.m}}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، $ET_{0.RS.i}$ مقدار پیش‌بینی‌شده، $\overline{ET_{0.RS}}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده و n تعداد داده‌ها است.

نتایج و بحث

مقادیر شاخص‌های R^2، RMSE، MAE محاسبه میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه به روش‌های ترکیبی نسبت به روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ برای مناطق خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران در بازه زمانی ١٣٧٤ تا ١٣٩٣ در جدول (٣) نشان داده شده است. شکل‌های (٢-a, b , c) نمودار مقادیر میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل ماهیانه براساس معادله خط رگرسیون روش‌های ترکیبی نسبت به‌روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ به‌ترتیب برای مناطق خشک، نیمه‌خشک و مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران در بازه زمانی ١٣٧٤ تا ١٣٩٣ را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر این است که کلیه روش‌ها به‌غیر از روش بوزینگر وان باول، همبستگی خوبی با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ داشته‌اند.

براساس نتایج به‌دست‌آمده، دقت روش بوزینگر وان باول در کلیه مناطق با مقادیر RMSE و MAE به‌ترتیب بزرگ‌تر از ٠/٩ و ٠/٥٥ میلی‌متر در روز، کم می‌باشد. هرچند که دقت این روش در مناطق نیمه‌خشک اندکی بهتر است. با بررسی دقیق‌تر مناطق مشاهده می‌شود که مناطق موردنظر جزو مناطق سردسیر ایران هستند. در مناطق سردسیر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع کم‌تر است و طبق شکل (٢)، دقت روش بوزینگر وان باول در مقادیر تبخیر و تعرق کم، بیش‌تر بوده است.

در مناطق خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران روش‌های پنمن ١٩٤٨ و پنمن رایت ١٩٧٢ با مقادیر RMSE و MAE کم‌تر از ٠/٣٩ میلی‌متر در روز و در مناطق

نیمه‌خشک ایران روش‌های پنمن رایت ۱۹۷۲ و پنمن ۱۹٤۸ با مقادیر RMSE و MAE کم‌تر از ۰/۳۵ میلی‌متر در روز به ترتیب بالاترین دقت را دارا می‌باشند. بعد از روش بوزینگر وان باول روش‌های پنمن فائو ۲٤ اصلاح‌شده و پنمن فائو ۱۷ در کلیه مناطق با مقادیر RMSE و MAE به‌ترتیب بیش‌تر از ۰/۷ و ۰/۵۲ پایین‌ترین دقت را دارند. البته دقت این روش‌ها در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب بسیار کم‌تر است. نتایج به‌دست‌آمده با نتیجه مطالعات Yoder *et al.* (2005) هم‌خوانی دارد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در اقلیم مرطوب واقع در جنوب‌شرقی آمریکا روش‌های پنمن ۱۹٤۸ و پنمن رایت ۱۹۷۲ به‌ترتیب از بالاترین دقت برخوردار بوده و روش پنمن فائو ۲٤ مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع را بیش‌تر از مقدار واقع برآورد می‌کند. هم‌چنین دقت بالاتر روش پنمن رایت ۱۹۷۲ نسبت به سایر روش‌ها قبلاً توسط Yuanshi (1995) برای پکن و Khatua and Pasupalak (2018) برای ایالت اودیشای هند نیز به اثبات رسیده است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده، برای مناطق دارای سطح ارتفاع کم‌تر از ۲۰۰ متر از سطح دریا روش بوزینگر وان باول، کارایی چندانی ندارد. بنابراین در استان‌هایی که دارای ارتفاعی کم‌تر از ۲۰۰ متر از سطح دریا هستند (مناطق شمالی و جنوبی ایران شامل استان‌های گلستان، گیلان، مازندران، بوشهر و هرمزگان) تبخیر و تعرق براساس روش بوزینگر وان باول محاسبه نشده است. شکل (۲) نشان می‌دهد که روش بوزینگر وان باول در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ازای مقادیر کم تبخیر و تعرق، میزان تبخیر و تعرق را بیش‌تر از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ و در مقادیر زیاد تبخیر و تعرق، میزان تبخیر و تعرق را کم‌تر از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ و در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب میزان تبخیر و تعرق را بسیار کم‌تر از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ برآورد می‌کند. در مجموع به‌دلیل خطای فاحش این روش، استفاده از آن در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در هیچ‌کدام از اقلیم‌های ایران توصیه نمی‌شود.

Table 3. R^2, RMSE and MAE values of mean monthly reference evapotranspiration calculated by combined methods compared to FAO 56 Penman Monteith method in Iran from 1995 to 2014

Type of climate	Method	R^2	RMSE (mm/day)	MAE (mm/day)
Arid climate	Penman 1948	0.9	0.35	0.22
	Penman Wright 1972	0.99	0.38	0.27
	Penman Wright 1996	0.96	0.71	0.40
	FAO 24 corrected Penman	0.96	0.92	0.53
	FAO plant protection paper 17	0.98	0.96	0.53
	Businger, Monteith & van Bavel	0.91	1.33	0.62
Semi-Arid climate	Penman 1948	0.98	0.35	0.22
	Penman Wright 1972	0.99	0.34	0.27
	Penman Wright 1996	0.97	0.51	0.40
	FAO 24 corrected Penman	0.96	0.74	0.52
	FAO plant protection paper 17	0.98	0.72	0.53
	Businger, Monteith & van Bavel	0.90	0.95	0.62
Humid & Semi-Humid climate	Penman 1948	0.98	0.35	0.34
	Penman Wright 1972	0.98	0.39	0.28
	Penman Wright 1996	0.98	0.54	0.43
	FAO 24 corrected Penman	0.98	2.03	1.89
	FAO plant protection paper 17	0.99	1.57	1.3
	Businger, Monteith & van Bavel	0.83	2.01	1.86

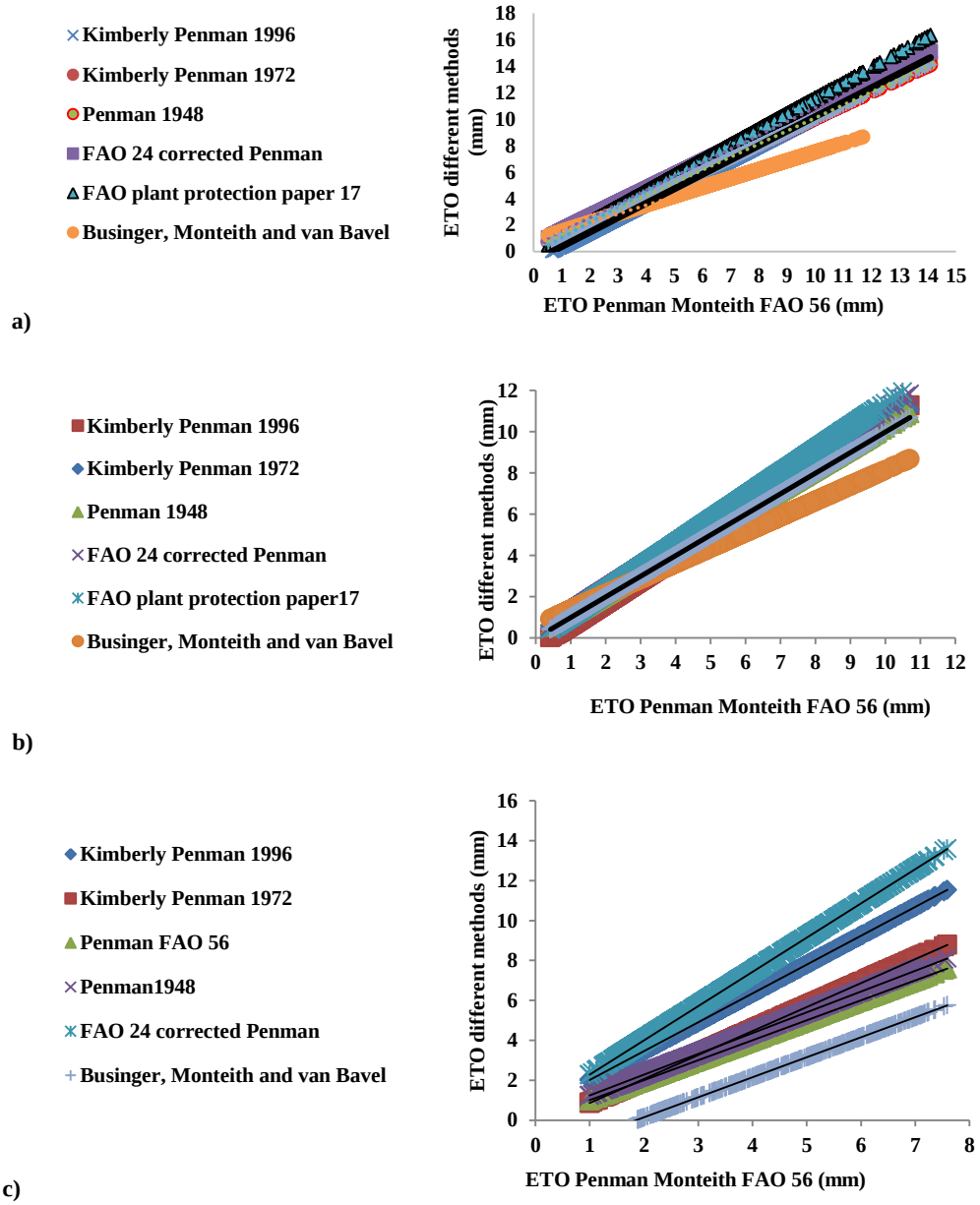

Figure 2. The mean monthly reference evapotranspiration calculated by combined methods in (a) Arid climate (b) Semi-Arid climate and (c) Humid and Semi-Humid climate of Iran from 1995 to 2014

همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است، در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌جز روش بوزینگر وان باول سایر روش‌ها از دقت قابل‌قبولی برخوردارند. Mohammad (1997) نیز ثابت کرد که روش‌های خانواده پنمن در مناطق خشک از دقت بالایی برخوردارند. همان‌طوری که در جدول (۲) مشخص است قسمت دوم معادله روش‌های فوق تابعی از باد و رطوبت نسبی بوده و تغییر ضرایب باد به‌طور مستقیم روی آن قسمت تأثیرگذار است.

در ضمن، پایین‌بودن رطوبت نسبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باعث شده که باد تأثیر چندانی در میزان تبخیر و تعرق پتانسیل نداشته و در صورت فقدان

داده‌های باد و رطوبت نسبی نیز می‌توان با دقت خوبی میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع را محاسبه کرد. این مطلب توسط Sentelhas *et al.* (2010) نیز به اثبات رسیده است. دقت بالای روش‌های مکینگ و هارگریوز در مناطق خشک و نیمه‌خشک که از داده‌های باد و رطوبت نسبی در محاسبه تبخیر و تعرق استفاده نمی‌کنند نیز قبلاً توسط Ghamarnia *et al.* (2015) و Alblewi (2012) به اثبات رسیده است. Valipour (2014) نیز به این نتیجه رسید که روش پنمن در مناطق شرقی ایران (مناطق خشک) از دقت بالایی برخوردار است. Gao *et al.* (2017) نیز نشان داده‌اند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک روش‌های هارگریوز و پرسیتلی تیلور که نیاز به داده‌های باد و رطوبت نسبی ندارند، از دقت مناسبی برخوردار است. اما در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب روش‌های پنمن فائو ۱۷، پنمن فائو ۲٤ و پنمن رایت ۱۹۹٦ مقادیر تبخیر و تعرق را بیش‌تر از روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ برآورد کرده‌اند. در این اقلیم‌ها رطوبت نسبی زیاد باعث کاهش میزان تبخیر و تعرق می‌شود. در این شرایط باد سبب جابه‌جایی هوا و کاهش رطوبت نسبی می‌گردد. بر این اساس در آن مناطق، باد نقش زیادتری در میزان تبخیر و تعرق دارد. این عامل باعث افزایش اختلاف روش‌های ترکیبی با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ شده است. نتیجه پژوهش‌های Khatua and Pasupalak (2018) نیز بیانگر دقت پایین روش‌های بوزینگر وان باول و پنمن فائو ۲٤ در اودیشای هندوستان با اقلیم مرطوب بوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب ایران از شش روش ترکیبی فائو پنمن ٥٦، پنمن رایت ۱۹۹٦، پنمن رایت ۱۹۷۲، پنمن ۱۹٤۸، فائو پنمن ۲٤، فائو پنمن ۱۷ و بوزینگر وان باول استفاده شد. با توجه به این‌که روش فائو پنمن ٥٦ به‌عنوان یک روش استاندارد برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع توصیه شده است، لذا این روش، پایه مقایسه و ارزیابی سایر روش‌ها در نظر گرفته شد.

به‌طورکلی، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که از میان کلیه روش‌های ترکیبی، در مناطق خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب ایران روش‌های پنمن ۱۹٤۸ و پنمن رایت ۱۹۷۲ و در مناطق نیمه‌خشک ایران روش‌های پنمن رایت ۱۹۷۲ و پنمن ۱۹٤۸ به‌ترتیب بالاترین دقت را در رابطه با محاسبه میزان تبخیر و تعرق پتانسیل دارا می‌باشند. در ضمن، روش بوزینگر وان باول در هیچ‌کدام از اقلیم‌های موردمطالعه، همبستگی مناسب و قابل‌قبولی با روش پنمن مانتیس فائو ٥٦ را از خود نشان نداد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

پی‌نوشت‌ها

1. Aerodynamic
2. Odisha
3. De Martonne

منابع

1. Alizadeh, A., Kamali, G., Khanjani, M.J. & Rahnavard, M.R. (2004). Evaluation of evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran. *Iranian Journal of Geographical Research*, 19(2), 97-105. (In Persian).
2. Al-Omran, A., Al-Ghobari, H. & Alazba, A. (2004). Determination of evapotranspiration of tomato and squash. *International Agricultural Engineering Journal*, 13(142), 27-36.
3. Alblewi, B.H. (2012). *Assessment of Evapotranspiration Models under Hyper Arid Environments*. Msc Thesis, Guelph, Ontario, Canada.

4. Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L. & Burman, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy journal*, 81(4), 650-662.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
6. Babamiri, O. & Dinpazhoh, Y. (2016). Comparison and evaluation of twenty methods for estimating reference evapotranspiration based on three general categories: air temperature, solar radiation and mass transfer in the basin of lake urmia. *Iranian Journal of Water and Soil Sci*, 20(77), 145-161. (In Persian).
7. Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F. & Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agricultural Water Management*, 140, 20-25.
8. de Sousa Lima, J.R., Antonino, A.C.D., de Souza, E.S., Hammecker, C., Montenegro, S.M.G.L. & de Oliveira Lira, C.A.B. (2013). Calibration of Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in sub-humid region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(12A), 1-5.
9. DehghaniSanij, H., Yamamoto, T. & Rasiah, V. (2004). Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management*, 64(2), 91-106.
10. Djaman, K., Balde, A.B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneh, B., Moukoumbi, Y.D., Futakuchi, K. & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: regional studies*, 3, 139-159.
11. Gao, F., Feng, G., Ouyang, Y., Wang, H., Fisher, D., Adeli, A. & Jenkins, J. (2017). Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semiarid, and humid regions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(4), 791-808.
12. Ghamarnia, H., Mousabeyg, F., Amiri, S. & Amirkhani, D. (2015). Evaluation of a few evapotranspiration models using lysimetric measurements in a semi-arid climate region. *International Journal of Plant & Soil Science*, 5(2), 100-109.
13. Khatua, R. & Pasupalak, S. (2018). Comparison of methods for estimation of reference evapotranspiration in North-Central Plateau zone of Odisha. *Indian Journal of Agricultural Research*, 52(2), 187-190.
14. Lascano, R.J. & Evett, S.R. (2007). Experimental verification of a recursive method to calculate evapotranspiration. Proceedings of the 28th annual international irrigation show, 687-705.
15. McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y. & Mahowald, N.M. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of hydrology*, 416, 182-205.
16. Mohammad, F.S. (1997). Calibration of reference evapotranspiration equations for alfalfa under arid climatic conditions. *journal of king saud university agricultural sciences*, 9(1), 39-56.
17. Moradi, A., Babaei, H., Alimohamadi, A. & Radiom, S. (2020). Estimation of crop coefficients in the Moghan cultivation industry and the study of relationship between evapotranspiration and yield performance. *Journal of Iranian Remote Sensing & GIS*, 11(4),11-28. (In Persian).
18. Pandey, V., Pandey, P.K. & Mahanta, A.P. (2014). Calibration and performance verification of Hargreaves Samani equation in a humid region. *Irrigation and drainage*, 63(5), 659-667.
19. Rahimi Khoob, A., Behbahani, S.M.R. & Nazarifar, M.H. (2006). Evaluation of using minimum meteorological data for Penman Montieth equation- case study Khuzestan province. *Iranian Journal of Agricultural scirnces*, 12(3), 591-600. (In Persian).
20. Sharifan, H., Ghahraman, B., Alizadeh, A. & Mirlatifi, S.M. (2006). Comparison of different methods for estimating reference evapotranspiration (combined and temperature) by the standard method and investigating the effects of air drought on it. *Iranian Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(1), 19-30. (In Persian).
21. Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J. & Santos, E.A. (2010). Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5), 635-644.
22. Tabari, H., Grismer, M.E. & Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2), 107-117.

23. Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. & Frame, K. (2005). Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 73-84.
24. Upadhyaya, A. (2006). Comparison of Different Methods to Estimate Mean Daily Evapotranspiration from Weekly Data at Patna, *India Irrigation Drainage Systems Engineering*, 5, 1-7.
25. Valipour, M. (2014). Assessment of different equations to estimate potential evapotranspiration versus FAO Penman Monteith method. *Acta Advanced in Agricaltural Science*, 2, 14-27.
26. Yoder, R., 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.
27. Yuanshi, G. (1995). Comparison of the Reference Evapotranspiration Estimated by the Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman Methods [J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis 1.