مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰
صفحه‌های ۴۷۱-۴۶۱
DOI: 10.22059/jwim.2021.324929.878

مقاله پژوهشی:

بررسی قابلیت استفاده از ضریب تشت تبخیر برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه خرم‌آباد

مبینا احمدی مرادی[۱]، مهری سعیدی‌نیا[۲*]، علی‌حیدر نصرالهی[۲]، مجید شریفی‌پور[۲]
۱. دانشجوی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه لرستان، ایران.
۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه لرستان، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

چکیده
برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع یکی از اجزای مهم در طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت آب برای آبیاری گیاهان می‌باشد. در این پژوهش چهار ضریب تشت تبخیر تشت اشنایدر (۱۹۹۲)، اورنگ (۱۹۹۸)، آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث با استفاده از شاخص‌های RMSE، MAE، AARE، MR و ضریب اسپیرمن مورد ارزیابی قرار گرفتند. اطلاعات مورد نیاز ضرایب مختلف جهت برآورد (ETo) از ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد جمع‌آوری شد. نتایج ارزیابی آماری نشان داد در دوره روزانه ضرایب تشت اورنگ (۱۹۹۸) و اشنایدر (۱۹۹۲) به‌ترتیب با RMSE برابر ۱/۰۰۴ و ۱/۱۳ ($mm.day^{-1}$) به‌عنوان مناسب‌ترین و ضرایب تشت آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) به‌ترتیب با RMSE برابر ۱/۸۳ و ۱/۴۷ ($mm.day^{-1}$) به‌عنوان نامناسب‌ترین ضرایب انتخاب شدند. از طرف دیگر نتایج ارزیابی آماری برای دوره ۱۰ روزه ضرایب تشت کونیکا (۱۹۸۹) و اشنایدر (۱۹۹۲) به‌ترتیب با RMSE برابر ۶/۰۱ و ۸/۲۵ ($mm.day^{-1}$) به‌عنوان مناسب‌ترین ضرایب و ضرایب آلن و پروت (۱۹۹۱) و اورنگ (۱۹۹۸) با RMSE برابر ۱۳/۹۰ و ۹/۴۳ ($mm.day^{-1}$) به‌عنوان نامناسب‌ترین ضرایب انتخاب شدند. هم‌چنین آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که نتایج همه ضرایب، همبستگی قابل قبولی نسبت به روش مرجع دارند.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق مرجع، خرم‌آباد، ضریب تشت، همبستگی.

Investigating the ability to use the evaporation pan coefficient to calculate the evapotranspiration of the reference plant in Khorramabad region

Mobina Ahmadi Moradi[1], Mehri Saeedinia[2*], Ali Haidar Nasrolahi[2], Majid Sharifiipour[2]
1. M.Sc. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Lorestan University, Iran.
2. Assistant Professor of Water Science and Engineering, Lorestan University, Iran.
Received: June 1, 2021 Accepted: September 28, 2021

Abstract
Estimation of evapotranspiration of the reference plant is one of the important components in the design of irrigation systems and water management for irrigation of plants. In this study, four coefficients of evaporation pan Schneider (1992), Aurang (1998), Allen and Perot (1991) and Konica (1989) to estimate the reference evapotranspiration compared to the FAO-Penman-Monteith model using indices RMSE, MAE, AARE, MR and Spearman coefficient were evaluated. Information required for different coefficients for estimation (ETo) was collected from Khorramabad synoptic station. The results of statistical evaluation showed that in the daily period, Orang (1998) and Schneider (1992) pan coefficients with RMSE equal to 1.004 and 1.13 (mm.day-1), respectively, as the most appropriate and Allen and Prot coefficients (1991) and Konica (1989) were selected as the most unsuitable coefficients with RMSE of 1.83 and 1.47 (mm.day-1), respectively. On the other hand, the results of statistical evaluation for the 10-day period of Konica (1989) and Schneider (1992) pan coefficients with RMSE of 6.01 and 8.25 (mm.day-1), respectively, as the most appropriate coefficients and coefficients of Allen and Perot (1991) and Aurang (1998) were selected as the most unsuitable coefficients with RMSE of 13.90 and 9.43 (mm.day-1). Spearman correlation test also showed that the results of all coefficients have an acceptable correlation with the reference method.

Keywords: Correlation, Khorramabad, Pan coefficient, Reference evapotranspiration.

* نویسنده مسئول Email: saeedinia.m@lu.ac.ir

مقدمه

تعیین دقیق مؤلفه‌های بیلان آب در هر منطقه، برای مدیریت بهینه منابع آب ضروری می‌باشد. تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین اجزای بیلان آب در هر منطقه می‌باشد. تعیین میزان دقیق این پارامتر در هر منطقه، برای تعیین نیاز آبی و هیدرومدول آبیاری به‌منظور طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی لازم و ضروری است (Azad Talatapeh *et al*., 2016). برای برآورد تبخیر و تعرق هر پوشش گیاهی لازم است ابتدا تبخیر و تعرق گیاه مرجع با یک روش قابل‌اطمینان محاسبه شود. در سراسر جهان مدل فائو- پنمن- مانتیث به‌عنوان مدل مرجع برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در نظر گرفته می‌شود (Liu *et al*., 2017; Tabari *et al*., 2013). روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع به دو گروه مستقیم و غیر مستقیم (محاسباتی) تقسیم می شوند (Alizadeh., 2010). در روش مستقیم در واقع بخش کوچک و کنترل شده ای از مزرعه مجزا شده و میزان تبخیر و تعرق در یک دوره زمانی به‌طور مستقیم ندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم ازعوامل مختلف اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از طریق ارتباط آن‌ها با تبخیر و تعرق و معادله‌هایی که قبلاً با روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع تخمین زده می‌شود. از نظر علمی روشی مطلوب است که آسان بوده و نتایج حاصله از آن واقع نزدیک‌تر باشند (Mousavi Baigi *et al*., 2008). پژوهش‌های زیادی در سراسر دنیا صحت نتایج مربوط به مدل فائو-پنمن- مانتیث را در شرایط مختلف آب‌وهوایی نشان می‌دهد (Diamam *et al*., 2015). تبخیر و تعرق تابعی از عوامل مختلف نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است (Babamiri & Dinpazhooh, 2014). با توجه به تأثیر عوامل مختلف در تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع، برآورد دقیق این پارامتر سخت می‌باشد. تشت‌های تبخیر کلاس A از جمله ابزاری هستند که به‌علت سادگی و سهولت تفسیرداده‌های آن در سراسر دنیا برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع مورداستفاده قرار می گیرند (Irmak *et al*., 2002). تبخیر از یک تشت تبخیر نشانگر شاخصی از اثر توأم دمای هوا، تشعشع و باد است. به‌خاطر تفاوت آب آزاد و سطوح گیاهی، باید مقدار تبخیر از تشت تبخیر را در یک ضریب تجربی ضرب کرد تا تبخیر و تعرق به‌دست آید (Mousavi & Akhvan, 2002). برخی از معادله‌های تجربی که دارای دقت قابل‌قبولی می‌باشند، معمولاً نیازمند داده‌های مختلف هواشناسی بوده و با وجود دقت خوب این روش‌ها، برای مناطقی که دارای ایستگاه هواشناسی مجهز نمی‌باشند قابل استفاده نیستند. از سوی دیگر برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل می‌توان از اطلاعات تشت تبخیر به‌عنوان یکی از روش‌های قابل‌قبول استفاده نمود (Irmak *et al*., 2002). براساس پیشنهاد FAO، در صورت نبود اطلاعات لایسیمتری، می‌توان معادله فائو پنمن مانتیث را مبنای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق قرار داد (Allen & Pruitt, 1998). از آن جا که در برخی مناطق، آمار تبخیر و تعرق مرجع (چمن) لایسیمتری محدود می‌باشد. لذا از روش فائوپنمن مانتیث به‌عنوان روش استاندارد و قابل‌قبول برای ارزیابی مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست‌آمده از روش‌های تشت استفاده می‌شود. در این زمینه پژوهش‌های متعددی به انجام رسیده است که در ذیل به تعدادی ازآنها اشاره می‌گردد. Amiri *et al*. (2008) جهت تعیین مقادیر ضریب تشت تبخیر در منطقه اصفهان روش‌های مختلف تعیین ضریب تشت را مورد بررسی و مقایسه قرار داده و بیان نمودند که بهترین روش تعیین ضریب تشت تبخیر در تخمین تبخیر و تعرق روزانه به‌ترتیب معادله پریرا و همکاران (۱۹۹۵) و دورنبوس و

پرونیت (۱۹۷۷) می‌باشد. Akbari Nodehi (2010) با انجام پژوهشی در ساری با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه را با روش استاندارد مورد مقایسه قرار دادند. در این پژوهش از چهار روش اشنایدر (۱۹۹۲)، اورنگ (۱۹۹۸)، آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) مقادیر ضریب تشت به‌صورت روزانه و ماهانه محاسبه شد. بررسی‌های رگرسیونی و آماری نشان داد که برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه و ماهانه در ایستگاه ساری روش اورنگ (۱۹۹۸) با مقدار RSME ۰/۵۸ ($mm.day^{-1}$) مناسب‌تر است. Sharifian & Gharaman (2004)، با بررسی‌های رگرسیونی و آماری برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه در منطقه گرگان روش‌های اورنگ (۱۹۹۸) و اشنایدر (۱۹۹۲) را پیشنهاد دادند. Yazdani *et al.* (2011) ضرایب تشت را در منطقه آمل با استفاده از معادله‌های روش اشنایدر (۱۹۹۲)، اورنگ (۱۹۹۸)، آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست‌آمده را با نتایج حاصل از معادله فائو پنمن مانتیث مقایسه نمودند. بررسی نتایج نشان داد که برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه (با کمک داده‌های تشت تبخیر) به‌ترتیب روش‌های کونیکا، اشنایدر آلن و پروت و اورنگ با مقادیر RSME ۱/۱۸، ۱/۱۹، ۱/۱۹ و ۱/۲۱ ($mm.day^{-1}$) مناسب می‌باشند. Kaboosi (2013) در پژوهشی در گرگان ضریب تشت را با استفاده از معادله‌های محاسبه نموده و سپس مقادیر به‌دست‌آمده از روش تشت را با مقادیر به‌دست‌آمده از روش فائو پنمن مانتیث مقایسه کرد و نتیجه گرفت که مقادیر ضریب تشت به‌دست آمده از روش اشنایدر (۱۹۹۲) نسبت به سایر معادله‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. Rahimi khob (2009) در منطقه نوشهر مقادیر Kpm با روش‌های مختلف مورد مقایسه و ارزیابی قرار داد و بیان نمودند که مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از رابطه اورنگ برای دوره‌های روزانه و ماهانه و سالانه با مقدار RSME ۰/۳۲ ($mm.day^{-1}$) بهترین برآورد را داشته است. Kajisa & Ganji (2019) تبخیر و تعرق به روش تشت تبخیر را با ضرایب Cuenca، Orang، Allen & Pruitt، Snyder و Modified Snyder برای مرکز تحقیقات اردوخان در هرات افغانستان محاسبه و با مقادیر برآوردی از روش پنمن مانتیث فائو ۵۶ مقایسه نمودند. نتایج نشان داد دقت روش Modified Snyder با R^2= ۰/۸۷ و RSME= ۱/۷ ($mm.day^{-1}$) در نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر بود. با توجه به این‌که در مناطق مختلف، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است، بنابراین بهتر است که ضریب تشتک تبخیر به‌صورت منطقه‌ای تعیین شد. لذا در این پژوهش قابلیت چهار ضریب تشت تبخیر اشنایدر (۱۹۹۲)، اورنگ (۱۹۹۸)، آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در منطقه خرم‌آباد، با درنظرگرفتن مدل فائو پنمن مانتیث به‌عنوان روشی پایه برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه لرستان واقع در شهرستان خرم‌آباد با ارتفاع ۱۱۴۸ متر از سطح دریا و مختصات جغرافیایی طول ۴۸ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی انجام شد. این منطقه براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است. میانگین مجموع بارش سالیانه این منطقه حدود ۵۰۸ میلی‌متر است که ۵۴ درصد آن در زمستان، ۲۸/۵ درصد آن در پاییز و ۱۷/۳ درصد آن در بهار دریافت می‌شود (Azizi, 2000).

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری میزان تبخیر منطقه، از تشت تبخیر کلاس A در داخل مزرعه آزمایشی دانشکده

کشاورزی، استفاده شد. این تشت دارای استوانه‌ای از جنس آهن گالوانیزه با قطر داخلی ۴۷/۵ اینچ (۱۲۰/۶ سانتی‌متر) و ارتفاع ۱۰ اینچ (۲۵/۴ سانتی‌متر) می‌باشد. برای ایجاد فاصله بین تشت بخیر و زمین و جلوگیری از انتقال حرارت، تشت تبخیر روی یک شبکه چوبی قرار گرفت. علاوه بر این، با این عمل، تبادل هوا در زیر و اطراف تشت به راحتی و بدون مانع صورت گرفت و در نتیجه میزان تبخیر در تشت همانند تبخیر در محیط در نظر گرفته شد. میزان تبخیر از تشت براساس روابط زیر محاسبه شد.

$$ET_o = k_P E_P \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱)، Kp: ضریب تشت و Ep: تبخیر از تشت (mmd^{-1}) و ETo: تبخیر و تعرق مرجع می‌باشد.

Figure 1- View of the Class A evaporation pan located in the research farm of Lorestan University

در این پژوهش، پارامترهای هواشناسی موردنیاز مانند دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی بیشینه و کمینه، میزان بارندگی، سرعت باد، ساعات آفتابی و ... از سازمان هواشناسی خرم‌آباد که در مجاورت دانشکده کشاورزی می‌باشد، اخذ شد.

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیث

در این روش تبخیر- تعرق مرجع از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$ET_0 = \frac{[0.408(R_n - G) + [(900\gamma)/(T+273)] \times U_2 \times (e_a - e_d)]}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34U_2)} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، ETo: تبخیر- تعرق گیاه مرجع، برحسب میلی‌متر بر روز، Rn: تشعشع خالص برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز (مقدار Rn برای عرض‌های جغرافیایی مختلف برای هر ماه به‌دست می‌آید)، G: شار گرمایی خاک، برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، Δ: شیب نمودار فشار بخار اشباع نسبت به دما (برحسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، γ: ثابت سایکرومتری (برحسب کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، ea-ed: کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (بر حسب کیلو پاسکال)، U2: میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین.

تعیین ضریب تشت تبخیر (Kp) و محاسبه تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آن

در این پژوهش برای تعیین ضریب تشت از معادلات کونیکا (۱۹۸۹)، آلن و پروت (۱۹۹۱)، اشنایدر (۱۹۹۲) و اورنگ (۱۹۹۸) استفاده شد، که معادلات مربوطه به شرح زیر می‌باشند.

ضریب تشت در معادله کونیکا براساس رابطه (۳) محاسبه شد.

$$K_{pan} = 0.475 - 2.4 * 10^{-4}U + 5.16 * 10^{-3} * RH + 1.18 * 10^{-3}F - 1.6 * 10^{-5}RH - 1.01 * 10^{-6}F^2 - 8 * 10^{-9}RH^2U - 1 * 10^{-8}RH^2F \qquad (۳)$$

ضریب تشت در معادله آلن و پروت براساس رابطه (٤) محاسبه شد.

$$K_{pan} = 0.108 - 3.31 * 10^{-4}U + 0.0422Ln(F) + 0.1434Ln(RH) - 6.31 * 10^{-4}\left[(Ln(F))^2 Ln(RH)\right] \qquad (٤)$$

ضریب تشت در معادله اشنایدر براساس رابطه (۵) محاسبه شد.

$$K_{pan} = 0.482 - 3.76 * 10^{-4}U + 0.024Ln(F) + 0.0045RH \quad (۵)$$

ضریب تشت در معادله اورنگ براساس رابطه (٦) محاسبه شد.

$$K_{pan} = 0.51206 - 3.21 * 10^{-4}U + 0.031886 * Ln(F) + 0.00288945RH - 1.07 * 10^{-4}RH * Ln(F) \quad (٦)$$

که در روابط (۳) تا (٦)، K_{pan}: ضریب تشت، U: متوسط سرعت باد (کیلومتر برروز)، RH: متوسط رطوبت نسبی(درصد) و F: فاصله سبزینگی از نقطه شروع مزرعه در مسیر باد غالب تا تشت تبخیر است.

پس از جمع‌آوری اطلاعات هواشناسی موردنیاز، میزان ضرائب تشت تبخیر با استفاده از معادلات مربوطه و اطلاعات هواشناسی منطقه به‌دست آمد. سپس براساس این ضرایب، میزان تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس روزانه و در گام‌های زمانی ده روزه محاسبه شد. در نهایت میزان تبخیر و تعرق حاصل از این معادلات، با روش فائو- پنمن- مانتیث مقایسه شد.

شاخص‌های آماری مورداستفاده

به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی معادلات مختلف ضریب تشت تبخیر، میانگین خطای مطلق[۱] (MAE)، از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[۲]، متوسط قدرمطلق خطای نسبی (AARE)[۳]، نسبت میانگین (MR)[٤] و ضریب تبیین (R^2) مطابق روابط (۷) تا (۱۱) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - Y_i)^2} \quad (۷)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i - Y_i|}{n} \quad (۸)$$

$$AARE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|xi - yi|}{yi} \quad (۹)$$

$$MR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{y_i} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2 \sum_{i=1}^{N}(Y_i - \overline{Y})^2}}\right)^2 \quad 0 \le R^2 \le 1 \quad (۱۱)$$

در روابط (۷) تا (۱۱)، Y_i و X_i: به‌ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در گام زمانی iام، N: تعداد گام‌های زمانی، $\overline{X}$ و $\overline{Y}$: به‌ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشند. میانگین خطای مطلق همواره درصد خطای واقعی و اختلاف بین مدل مبنا و مدل مورد نظر را نشان می‌دهد و مقدار بالای آن معرف خطای بیش‌ترمدل موردنظر است. آماره ریشه میانگین مربعات همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار به صفر نزدیک شود. مقدار مثبت آماره متوسط قدرمطلق خطای نسبی بیان‌گر آن است که مدل موردبررسی تبخیر- تعرق مرجع را بیش‌تر برآورد کرده و مقدار منفی آن بیانگر آن است که مدل مقدار تبخیر- تعرق را کمتر برآورد می‌کند و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک باشد حاکی از دقت بالاتر است. شاخص نسبت میانگین به منظور بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل‌ها نسبت به مقدار اندازه‌گیری‌شده، مورداستفاده قرار گرفت. شاخص ضریب تبیین نشانگر دقت تخمین است که مقداری همواره بین ۱- و ۱+ دارد که علامت + و - بیانگر همبستگی مثبت یا منفی است و هرچه به یک نزدیک باشد نشان از همبستگی بیش‌تر بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دارد. علاوه بر شاخص‌های آماری ارایه شده، به منظور بررسی میزان همبستگی نتایج مدل‌ها، از ضریب همبستگی اسپیرمن نیز استفاده شد.

نتایج و بحث

مقایسه تبخیر و تعرق مرجع (Eto) در گام‌های زمانی روزانه

در این پژوهش، ابتدا میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با

استفاده از ضرائب مختلف تشت تبخیر (روش‌های اورنگ (۱۹۹۸)، اشنایدر (۱۹۹۲)، کونیکا (۱۹۸۹) و آلن و پروت (۱۹۹۱)) محاسبه شد و سپس با استفاده از شاخص های آماری مختلف، این مقادیر با میزان تبخیر و تعرق روش فائو- پنمن- مانتیث مقایسه شد.

نمودار پراکنش مقادیر تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از ضرائب مختلف تشت تبخیر، در برابر مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از روش فائو- پنمن- مانتیث در شکل (۲) ارائه شده است.

همان‌طورکه ظاهر نمودارهای شکل (۲) نشان می‌دهند، در منطقه خرم‌آباد، قابلیت استفاده از همه مدل‌ها تا حدود زیادی مشابه می‌باشد. تمام مدل‌ها، عملکرد قابل‌قبولی را نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث داشته‌اند. برای مقایسه بهتر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست‌آمده از مدل‌های مختلف با میزان تبخیر و تعرق مرجع که از مدل فائو- پنمن- مانتیث به‌دست آمده است، شاخص‌های RMSE، MAE، R^2، AARE و MR و ضریب اسپیرمن استفاده شد (جدول ۱).

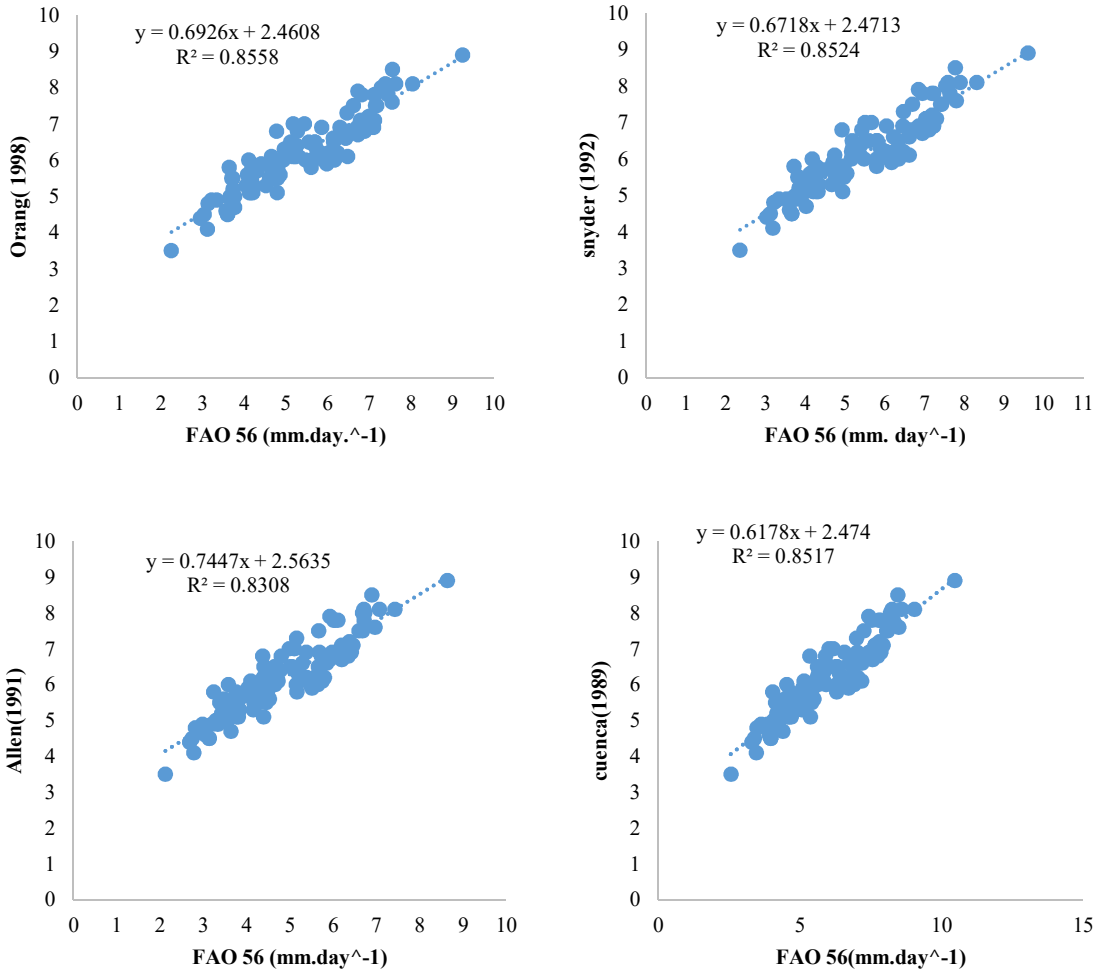

Figure 2. Moist correlation between reference evapotranspiration (mm / day) values estimated by Penman-Montith method and The methods of Orang (1998), Snyder (1992), Cuenca (1989) and Allen and Pruitt (1991).

Table 1. Evaluation of daily performance of four evaporation coefficients of the estimate of reference evapotranspiration compared to FAO-Penman-Monteith

ROW	Model	RMSE ($mm.day^{-1}$)	MAE ($mm.day^{-1}$)	AARE	MR	Spearman coefficient	
						R	P-value
1	Snyder(1992)	1.13	0.835	0.389	1.16	0.926	0
2	Orang(1998)	1.004	0.838	0.350	1.12	0.928	0
3	Allen and Pruitt(1991)	1.83	1.529	0.527	1.46	0.913	0
4	Cuenca(1989)	1.47	0.904	0.412	1.29	0.925	0

براساس شاخص‌های RMSE و MAE، مناسب‌ترین ضریب تشت، به‌ترتیب اورنگ با مقادیر ۱/۰۰٤ و ۰/۸۳۸ ($mm.day^{-1}$)، ضریب تشت اشنایدر (۱۹۹۲) با مقادیر ۱/۱۳ و ۰/۸۳۵ ($mm.day^{-1}$) بودند. بر همین اساس و با در نظرگرفتن شاخص‌های RMSE و MAE، در محل پژوهش به‌ترتیب ضریب تشت آلن و پروت (۱۹۹۱) با مقادیر ۱/۸۳ و ۱/۵۲۹ ($mm.day^{-1}$)، ضریب تشت کونیکا (۱۹۸۹) با مقادیر ۱/٤۷ و ۰/۹۰٤ ($mm.day^{-1}$) در مقایسه با مدل مرجع فائو-پنمن- مانتیث ضعیف‌ترین نتایج را داشتند. شاخص MR به منظور بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. با توجه به این شاخص، به‌ترتیب ضریب تشت اورنگ (۱۹۹۸) با ۱۲درصد، ضریب تشت اشنایدر (۱۹۹۲) با ۱٦ درصد، ضریب تشت کونیکا با ۲۹ درصد و ضریب تشت آلن و پروت (۱۹۹۱) با ٤٦ درصد نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث، مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه را بیش‌تر برآورد کردند. براساس شاخص AARE، ضریب تشت اورنگ (۱۹۹۸) با ۰/۳۵۰ و ضریب تشت اشنایدر (۱۹۹۲) با ۰/۳۸۹ متوسط قدرمطلق خطای نسبی، مناسب‌ترین ضرایب در مقایسه با مدل مرجع فائو- پنمن- مانتیث می‌باشند. بر همین اساس ضرایب آلن و پروت (۱۹۹۱) و کونیکا (۱۹۸۹) به‌ترتیب با مقادیر ۰/۵۲۷ و ۰/٤۱۲ در مقایسه با مدل مرجع فائو- پنمن- مانتیث ضعیف‌ترین نتایج را داشتند. با در نظرگرفتن مقدار آماره P در ضریب همبستگی اسپیرمن، این مقدار برای همه ضرایب کمتر از مقدار حدی ۰/۰۵ می‌باشد. بنابراین نتایج ضرایب مورداستفاده در مقایسه با نتایج مدل فائو- پنمن- مانتیث از همبستگی قابل‌قبولی برخوردار هستند. در یک جمع‌بندی کلی و با در نظرگرفتن همه شاخص‌های ارزیابی در محل پژوهش نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث، رابطه اورنگ (۱۹۹۸)، اشنایدر (۱۹۹۲)، کونیکا (۱۹۸۹) و آلن و پروت (۱۹۹۱) به‌ترتیب مناسب‌ترین ضرایب را داشتند..

بررسی پژوهش‌های سایر پژوهش‌گران نشان می دهد، برای مناطق مختلف، روش‌های مختلفی به‌دست آمده است. به‌عنوان مثال، Estahbanti & Bakhtiari (2016) برای منطقه کرمان، روش آلن و پروت (۱۹۹۱) را برای محاسبه تبخیر و تعرق روزانه پیشنهاد کرده اند. Yazdani *et al.* (2011) در منطقه آمل، به‌ترتیب روش‌های کونیکا، اشنایدر (۱۹۹۲) را بهترین مدل برای محاسبه تبخیر و تعرق روزانه معرفی کرده اند. Shokri *et al.* (2016) برای منطقه اهواز، روش آلن و پروت را پیشنهاد دادند. Keykha & Salehian (2013) و Akbari Nodehi (2010) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که معادله اورنگ بیش‌ترین ضریب همبستگی را با معادله فائو- پنمن- مانتیث داشته است که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. با توجه این‌که برای مناطق مختلف، نتایج مختلفی به‌دست آمده است، به‌نظر می‌رسد بهتر است برای هر منطقه، روش مناسب به‌دست آید. قابل ذکر است که در تمام روش‌های محاسبه‌شده، پارامترهای سرعت باد، رطوبت و فاصله سبزینگی دخالت دارند و میزان حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی ممکن است در

نحوه انتخاب مدل برای هر منطقه، مؤثر باشد. Yazdani *et al.* (2011)، میزان حساسیت مدل‌های مختلف در پارامترهای ورودی را موردبررسی قرار دادند و در نهایت نتایج نشان داد که روش‌های اورنگ، اشنایدر و آلن پروت کمترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ورودی دارند. البته در این زمینه خطاهای انسانی نیز باید در نظر گرفته شود.

مقایسه تبخیر و تعرق مرجع (Eto) در گام‌های زمانی ده روز

در برنامه‌ریزی آبیاری معمولاً دوره آبیاری گیاهان زراعی حدود ده روز می‌باشد (Estahbanti & Bakhtiari, 2016). بر همین مبنا مقادیر تجمعی ETo در گام‌های زمانی ده روز می‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب در برنامه‌ریزی آبیاری موردتوجه و ارزیابی قرار گیرد.مقادیر ETo در گام‌های زمانی ده روزه که با استفاده از ضرایب تشت تبخیر برآورد شده‌اند در مقابل مقادیر ETo روش فائو- پنمن- مانتیث مورد بررسی، در شکل (۳) نشان داده شده است.

همان‌طورکه نمودارهای شکل (۳) نشان می دهند، در گام‌های زمانی ده روز نیز میزان تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست آمده از همه مدل‌ها تا حدود زیادی مشابه می‌باشد. در این حالت نیز، برای مقایسه بهتر، شاخص‌های RMSE، MAE، R^2، AARE و MR، مورداستفاده قرار گرفت (جدول۲).

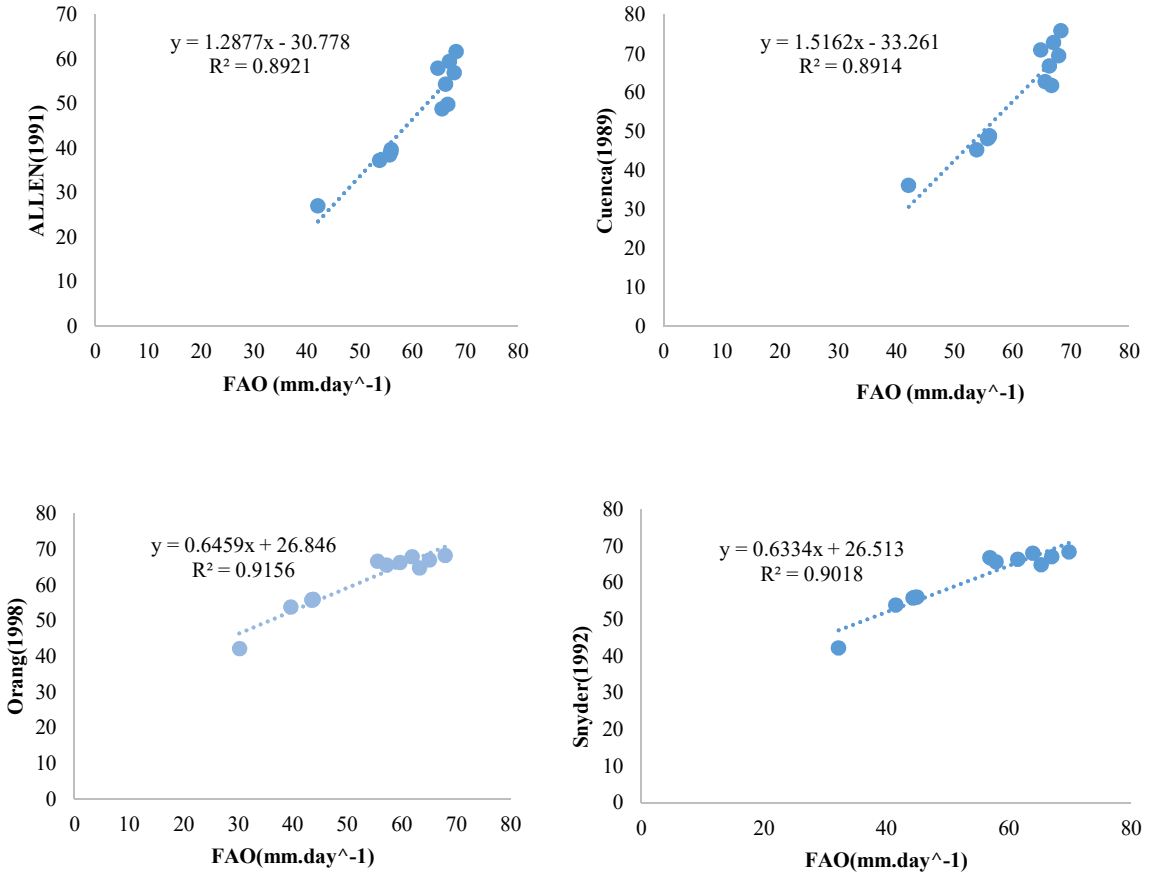

Figure 3. Moist correlation between reference evapotranspiration (mm / day) 10-day values estimated by Penman-Montith method and The methods of Orang (1998), Snyder (1992), Cuenca (1989) and Allen and Pruitt (1991).

Table 2. Evaluation of 10-day performance of four evaporation coefficients of the estimate of reference evapotranspiration compared to FAO-Penman-Monteith

Row	Model	RMSE ($mm.day^{-1}$)	MAE ($mm.day^{-1}$)	AARE	MR	Spearman coefficient	
						R	P-value
1	Snyder (1992)	8.25	6.99	0.15	1.14	0.895	0
2	Orang (1998)	9.43	8.21	0.18	1.18	0.895	0
3	Allen and Pruitt (1991)	13.90	13.27	0.31	1.31	0.89	0
4	Cuenca (1989)	6.01	5.49	0.10	1.05	0.895	0

همان‌طورکه داده‌های جدول (۲) نشان می دهد، براساس شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده، میزان ET_0 با استفاده از ضرایب کونیکا (RMSE= ٦/٠١، MAE= ٥/٤٩ و AARE=٠/١٠ (برحسب $mm.day^{-1}$)) و اشنایدر (۱۹۹۲) (RMSE= ٨/٢٥، MAE=٦/٩٩ و AARE=٠/١٥ (برحسب $mm.day^{-1}$)) بیش‌ترین نزدیکی با مدل فائو- پنمن- مانتیث را دارد. در مقابل مقایسه بین میزان ET_0 با استفاده ضرایب آلن و پروت (RMSE= ١٣/٩٠، MAE= ١٣/٢٧ و AARE=٠/٣١ (برحسب $mm.day^{-1}$)) و اورنگ (۱۹۹۸) (RMSE= ٩/٤٣، MAE= ٨/٢١ و AARE=٠/١٨ (برحسب $mm.day^{-1}$)) با مدل مدل فائو- پنمن- مانتیث نشان می دهد این ضرایب دارای ضعیف‌ترین عملکرد در بین مدل‌های مورد ارزیابی بودند. شاخص MR به‌منظور بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مقادیر ET_0 مربوط به هر یک از مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفت. با توجه به این شاخص، به‌ترتیب ضریب تشت آلن و پروت (۱۹۹۱) با ۳۱ درصد، ضریب تشت اورنگ با ۱۸ درصد، ضریب تشت اشنایدر(۱۹۹۲) با ١٤ درصد و ضریب تشت کونیکا با ٠/٠٥ درصد نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث، مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه را بیش‌تر برآورد کردند. با در نظرگرفتن مقدار آماره P در ضریب همبستگی اسپیرمن، این مقدار برای همه ضرایب کمتر از مقدار حدی ٠/٠٥ می‌باشد. بنابراین نتایج ضرایب مورداستفاده در مقایسه با نتایج مدل فائو- پنمن- مانتیث از همبستگی قابل‌قبولی برخوردار هستند، اما با در نظرگرفتن همه شاخص‌های ارزیابی در محل پژوهش نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث، ترتیب مناسب بودن ضرایب به این شکل می‌باشد؛ کونیکا (۱۹۸۹)، اشنایدر (۱۹۹۲)، اورنگ (۱۹۹۸)، و آلن و پروت (۱۹۹۱).

علت تفاوت عملکرد مدل‌ها در گام‌های زمانی ماهانه و روزانه، ممکن است مربوط به میزان حساسیت مدل‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی باشد. Yazdani *et al.* (2011) نشان دادند که مدل کونیکا، کمترین حساسیت نسبت به تغییرات سرعت باد را دارد و بهترین روش برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق در مقیاس ده روز می‌باشد. این پژوهش‌گران گزارش کردند که در همه روش‌ها حساسیت نسبت به رطوبت نسبی، بیش‌تر از سرعت باد می‌باشد و هم‌چنین، حساسیت کلیه مدل‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی، در فصل‌های گرم سال، نسبت به فصل‌های دیگر بیش‌تر است. Shokri *et al.* (2016) برای مقیاس ده روزه، روش اشنایدر را پیشنهاد دادند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به این‌که، مدل فائو- پنمن- مانتیث برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان روش مرجع در سراسر دنیا معرفی شده است و به‌طور وسیع در حال استفاده است. به‌منظور بررسی قابلیت استفاده از ضریب تشت تبخیر برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه خرم‌آباد نتایج چهار ضریب اورنگ (۱۹۹۸)، اشنایدر (۱۹۹۲)، کونیکا (۱۹۸۹) و آلن و پروت (۱۹۹۱) نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث که کاربرد بیش‌تری دارند به‌صورت روزانه و ده روزه مورد ارزیابی قرار گرفتند. براساس نتایج شاخص‌های آماری برای دوره

روزانه ضریب اورنگ (۱۹۹۸) با خطای ۱/۰۰٤ ($mm.day^{-1}$) از دقت بالایی برای تخمین تبخیر و تعرق در منطقه برخوردار بوده است و در مقابل با نتایج مدل فائو- پنمن- مانتیث کمترین اختلاف را داشته است. در مقابل ضریب آلن و پروت (۱۹۹۱) از عملکرد ضعیفی در منطقه موردمطالعه نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث برخورده بوده است، به‌طوری‌که با خطای ۱/۸۳ ($mm.day^{-1}$) به‌عنوان نامناسب‌ترین ضریب انتخاب شده است.در بررسی دوره‌های ۱۰ روزه روش کونیکا (۱۹۸۹) و آلن و پروت (۱۹۹۱) به‌ترتیب با مقدار خطای ٦/۰۰۱ و ۱۳/۹۰ ($mm.day^{-1}$) نسبت به مدل فائو- پنمن- مانتیث به‌ترتیب به‌عنوان مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین ضرایب برای دوره ۱۰ روزه انتخاب شدند. به‌طورکلی نتایج نشان داد ضریب تشت آلن و پروت (۱۹۹۱) از نظر آماری ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر ضرایب در منطقه موردمطالعه نشان داد. آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که نتایج همه ضرایب دارای همبستگی قابل‌قبولی نسبت به روش مرجع هستند بنابراین نتایج ضرایب مورداستفاده در مقایسه با نتایج مدل فائو- پنمن- مانتیث از همبستگی قابل‌قبولی برخوردار هستند. در نهایت براساس نتایج پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که برای دوره روزانه و ده روزه به‌ترتیب از ضرایب اورنگ (۱۹۹۸) و کونیکا (۱۹۸۹) جهت برآورد تبخیر و تعرق در منطقه موردمطالعه استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

1. MAE: Mean Absolute Error
2. Root Mean Square Error
3. Average Absolute Relative Error
4. Mean Ratio

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

Allen, R. G., & Pruitt, W. O. (1991) FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 110(3), 289-303.

Azad Talatapeh, N., Behmanesh, J., Moktaseri, M., & Verdi Nejhaz, V. (2016). Comparison of Time Series Methods and Artificial Neural Networks in Reference Evapotranspiration Prediction (Case Study: Urmia). *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 75-85. (In Persian).

Alizadeh, A. (2010*).* Astan Quds Razavi Publications *The relationship between water, soil and plants*. (In Persian).

Amiri, M.J., Abedi Kopani, J., & Khazai, M. (2008). The best method for determining the evaporation coefficient of class A in estimating daily evapotranspiration in Isfahan region. *Third Iranian Water Resources Management Conference*. Tabriz. (In Persian).

Akbari Nodehi, D. (2010). Estimation of evaporation pan coefficient to calculate evaporation and transpiration) Case study of Sari synoptic station. *Journal of Research in Crop Sciences*, 2(7), 65-74. (In Persian)

Azizi, Q. (2000). Estimation of effective rainfall in relation to rainfed cultivation (Case: Khorramabad plain). *Geographical Research*, 39, 123-115. (In Persian).

Babamiri, O., & Dinpazhooh, Y. (2014). Comparison of Four Temperature Based Reference Crop Evapotranspiration Estimation Method at Urmia Lake Basin, *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1), 43-54 (In Persian).

Cuenca, R.H. (1989). Irrigation system design Englwood cliffs: *Engineering approach*. Prentice-Hall.

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.

Estahbanati, S., & Bakhtiari, B. (2016) Comparing evapotranspiration obtained from some of pan evaporation equations using ASCE Standard Penman-Monteith model in an arid climate. *Journal Irrigation and water Engineering*, 6(4), 90-102. (In Persian).

Irmak, S., Haman, D., & Jones, J. (2002). Evaluation of Class A Pan Coefficients for Estimating Reference Evapotranspiration in Humid Location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(3), 153-159.

Kaboosi, K. (2012). The investigation of error of pan evaporation data, estimation of pan evaporation coefficient by pandata and its comparison with empirical equations. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(19), 1458-1465. (In Persian).

Kajisa, T., & Ganji, H. (2019) Assessing reference evapotranspiration using Penman Monteith and Pan Methods in the west region of Afghanistan. *International Journal of Geomate*, 16(56), 209-216.

Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*, *184*, 145-155.

Mousavi Baigi, M., Erfanian, M., & Sarmad, M. (2008). Using Minimal Meteorological Data to Estimate Evapotranspiration of Reference Plant and Presenting Correction Coefficients (Case Study: Khorasan Razavi Province). *Journal of Water and Soil (Agricultural Science)*, 23(1), 91-99. (In Persian).

Mousavi, F., & Akhvan, S. (2002). *Principles of irrigation*. Esfahan Kankash Publications. (In Persian)

Niaghi, A.R., Majnooni-Heris, A., Haghi, D.Z., & Mahtabi, G. (2013). Evaluate several potential Evapotranspiration methods for regional Use in Tabriz, Iran. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 3, 31-41. (In Persian).

Orang, M. (1998). Potential accuracy of the popular non-linear regression equation for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished California Departments of Water Resources Report, Sacramento, Calif.

Rahimikhob, A. (2009). An evaluation of common pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in a subtropical climate (north of iran). *Journal of Irrigation Science*, 27(4), 289-296. (In Persian).

Sharifian, H., & Gharaman, B. (2004). Investigation and comparison of evapotranspiration estimated from evaporation pan with ET0 values of standard method in Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(5), 18-28. (In Persian)

Snyder, R. L. (1992). Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 118(6), 977-980.

Shokri, S., Hooshmand, A., & Ghorbani, M. (2016) The Estimation evaopration pan coefficient for calculating reference evapotrancpiration in Ahvaz. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 40(1), 1-12. (In Persian).

Yazdani, V., Liaghat, A., Noori, H., & Zare Abianeh, H. (2011) A Determination of the best model for calculation of pan coefficient in Amol as based on sensitivity analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 42(1), 9-17 (In Persian).