

تعیین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل واقعی و بهترین مدل برآورد نیاز آبی زعفران در تربت حیدریه

پروین علی اکبری^۱، امیر سالاری^{۲*}، عباس خاشعی سیوکی^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، پژوهشگر پژوهشکده زعفران دانشگاه تربت حیدریه

۲. استادیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، پژوهشگر پژوهشکده زعفران دانشگاه تربت حیدریه

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۲۵)

چکیده

گیاه نیمه گرمسیری زعفران، به دلیل نیاز آبی کم و درآمد زیاد، جایگاه ویژه‌ای در الگوی کشت مناطق خشک و نیمه‌خشکی همچون منطقه خراسان رضوی دارد. در تحقیق حاضر، به تعیین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و مناسب‌ترین مدل برآورد تبخیر و تعرق زعفران در منطقه تربت حیدریه (قطب تولید زعفران جهان) پرداخته شد. به این منظور، روش‌های مختلف فائوپنمن‌مانتیث، بلانی کریدل، هارگریوزسامانی، تورنت‌وایت، جنسن هیز و تورک ارزیابی شدند. بررسی مقایسه نتایج به دست آمده از روش فائو با سایر روش‌ها با استفاده از آزمون کای اسکوتر انجام شد. نتایج مقایسه روش‌های مختلف با روش فائوپنمن‌مانتیث به عنوان روش استاندارد و مبنا نشان داد روش‌های بلانی کریدل، جنسن هیز و هارگریوزسامانی به ترتیب دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. مقدار نیاز آبی سالانه زعفران در اقلیم منطقه تربت حیدریه با استفاده از روش استاندارد فائوپنمن‌مانتیث، ۱۷۳۱ مترمکعب در هکتار به دست آمد. از آنجا که در معادله هارگریوزسامانی برای محاسبه تبخیر و تعرق فقط به دو عامل دما و تشعشع خورشیدی نیاز است و تعیین عوامل یادشده در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی امکان‌پذیر است، پیشنهاد می‌شود در برآوردهای تخمینی اولیه و سریع نیاز آبی گیاه زعفران از این روش استفاده شود.

کلیدواژه‌گان: فائوپنمن‌مانتیث، قطب تولید زعفران جهان، نیاز آبی.

مقدمه

سالانه حدود ۲۰۰ تن زعفران در جهان تولید می شود [۱]. ایران با بیش از ۹۵ درصد تولید جهانی، بزرگ‌ترین تولیدکننده این گیاه محسوب شده [۲] و سهم درخورد توجهی در تولید جهانی این محصول دارد. استان‌های خراسان رضوی و جنوبی به ترتیب با سطح زیر کشت بیش از ۷۰ هزار هکتار (تولید سالانه ۱۴۸ تن) و ۱۱ هزار هکتار (تولید سالانه ۴۱ تن) به‌عنوان عمده‌ترین مراکز تولید زعفران، به ترتیب رتبه‌های اول و دوم تولید استانی زعفران در ایران را به عهده دارند [۳ و ۴]. از مجموع ۷۰ هزار هکتار اراضی زیر کشت زعفران استان خراسان رضوی، هشت هزار هکتار یعنی معادل حدود ۱۲ درصد آن مربوط به شهرستان تربت حیدریه است. در حالی که میانگین تولید زعفران در استان خراسان رضوی چهار کیلوگرم در هکتار است، این رقم در تربت حیدریه ۴/۲ کیلوگرم است که میزان تولید سالانه آن در این شهرستان به ۳۲ تن زعفران خشک می‌رسد. قیمت زیاد این محصول، سبب شده واحد خرید و فروش این گیاه به‌عنوان گران‌بهارترین گیاه زراعی جهان، به جای تن و کیلوگرم، گرم باشد [۵].

گیاه نیمه‌گرمسیری زعفران (*Crocus sativus L.*) در نقاطی با زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم و خشک و دمای بین ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد و ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۲۳۰۰ متر از سطح دریا، رشد و عملکرد مناسبی دارد. با آبیاری این گیاه در اوایل پاییز، رشد آن آغاز شده و پس از یک دوره دوهفته‌ای، به گل می‌رود. سپس، گیاه تا اواخر بهار به رشد سبزینه‌ای و زیرزمینی خود ادامه می‌دهد و تابستان را به‌صورت راکد تا آغاز دوره بعدی رشد در اوایل پاییز، طی می‌کند [۶].

اهمیت طراحی و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری به‌منظور استفاده بهتر از هر واحد آب آبیاری درباره همه محصولات و در همه مناطق، اهمیت ویژه‌ای دارد. به این منظور، اندازه‌گیری دقیق نیاز آبی زعفران در شهرستان تربت حیدریه به‌عنوان عمده‌ترین مرکز کشت این محصول نیز، برای برنامه‌ریزی آبیاری و حصول بیشینه تولید اقتصادی ممکن، اهمیت زیادی دارد. این در حالی است که در نظام‌های سنتی کشاورزی و آبیاری منطقه، هدررفت زیاد منابع آبی گزارش شده است [۷]. بررسی میزان تبخیر و تعرق از اساسی‌ترین نیازهای طراحی سامانه‌های آبیاری

است و تخمین دقیق آن در ارتقای سطح بهره‌برداری از منابع آب در کشاورزی مؤثر است و وجود خطای برآورد تبخیر و تعرق می‌تواند در تعیین نیاز آبی گیاهان و راندمان‌های آبیاری اثر منفی داشته باشد [۸].

به منظور محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مختلف، به تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع نیاز است و طی نیم‌قرن اخیر، روش‌های زیادی برای تعیین تبخیر تعرق گیاه مرجع ارائه شده است [۹]. دقیق‌ترین روش برآورد مقدار تبخیر و تعرق، روش لایسیمتر وزنی است، اما به دلیل هزینه زیاد اجرای این روش و در دسترس نبودن آمار مربوط به آن، از روش‌های تجربی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع استفاده می‌شود [۱۰]. مطالعات گذشته نشان می‌دهد روش فائوپنمن‌مانتیت نسبت به سایر روش‌های تجربی موجود، دقت بیشتری در تعیین مقدار تبخیر و تعرق مرجع دارد و در شرایطی که داده‌های لایسیمتری در دسترس نباشد، می‌تواند به‌عنوان روشی استاندارد استفاده شود [۱۱-۱۳]. اما از آنجا که در همه ایستگاه‌های هواشناسی، تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری پارامترهای روش استاندارد فائوپنمن‌مانتیت وجود ندارد، لزوم استفاده از معادلات دیگری که به پارامترهای هواشناسی کمتری نیاز داشته و امکان اندازه‌گیری‌های پارامترهای مورد نیاز آن، در ایستگاه‌های هواشناسی سطح کشور وجود داشته باشد، ضروری است. به این منظور، در مطالعات زیادی به مقایسه روش‌های مختلف با روش فائوپنمن‌مانتیت پرداخته شده تا دقیق‌ترین و بهترین روش ممکن انتخاب شود و در همه این ارزیابی‌ها، روش فائوپنمن‌مانتیت به‌عنوان روش مبنا و شاهد استفاده می‌شود [۱۴].

نتایج تحقیقی با عنوان «ارزیابی روش‌های مختلف در برآورد میزان تبخیر و تعرق مرجع در مناطق مرطوب و ساحلی شرق آمریکا» نشان داد روش تورک دقت بیشتری در این مناطق دارد [۱۵]. مطالعات دیگری نیز در زمینه مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع انجام شده است [۱۶]. نتایج تعیین میزان تبخیر و تعرق مرجع در شهرهای تبریز، اردبیل و ارومیه در شمال غرب کشور با استفاده از ۱۴ روش ارائه‌شده، نشان داد روش‌هایی که مبنا و اساسشان بر روش پنمن استوار است، در بیشتر مناطق، دقت بهتری در برآورد تبخیر و تعرق مرجع دارند [۱۷]. نتایج مقایسه روش‌های مختلف فائوپنمن‌مانتیت،

ماکینگ، بهترین همبستگی و کمترین اختلاف را با مقادیر برآوردی با روش فائوپنمن مانتیث دارد.

بررسی‌های یادشده نشان می‌دهد روش فائوپنمن مانتیث در هر شرایط آب و هوایی، روش هارگریوزسامانی در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و روش تورک در اقلیم مرطوب دقت بیشتری دارند. از آنجا که در منطقه نیمه‌خشک تربت حیدریه، آزمایشی درباره تعیین میزان نیاز آبی زعفران انجام نشده بود، در تحقیق حاضر، به تعیین میزان نیاز آبی گیاه زعفران، مناسب‌ترین روش تبخیر و تعرق پتانسیل و همچنین ارائه یک مدل ساده و دقیق برای تعیین سریع نیاز آبی گیاه زعفران در منطقه تربت حیدریه پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

شهرستان تربت حیدریه با وسعت ۶۱۷۵ کیلومترمربع، در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی قرار دارد. ارتفاع شهرستان یادشده از سطح دریا ۱۳۳۳ متر است، هوای منطقه در تابستان‌ها تحت تأثیر هوای گرم و خشک کویری و در زمستان‌ها نیز تحت تأثیر سیکلون‌های هوای سرد بوده و اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک تا خشک است. بیشترین و کمترین دمای مطلق هوا در ایستگاه سینوپتیک تربت حیدریه به ترتیب ۴۳ و ۲۲- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. بارندگی منطقه بیشتر در سه ماه اسفند، فروردین و اردیبهشت صورت می‌گیرد و نزولات جوئی در زمستان‌ها، به‌ویژه در ارتفاعات اغلب به صورت برف است. متوسط بارندگی (۲۸ ساله) در ایستگاه تربت حیدریه رقم ۲۶۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. تبخیر منطقه به دلیل زیادبودن دمای هوا نسبتاً زیاد بوده و میزان متوسط سالانه آن در ایستگاه تربت حیدریه (بر اساس روش تشت تبخیر کلاس A) ۲۳۲۸ میلی‌متر است (شکل ۱).

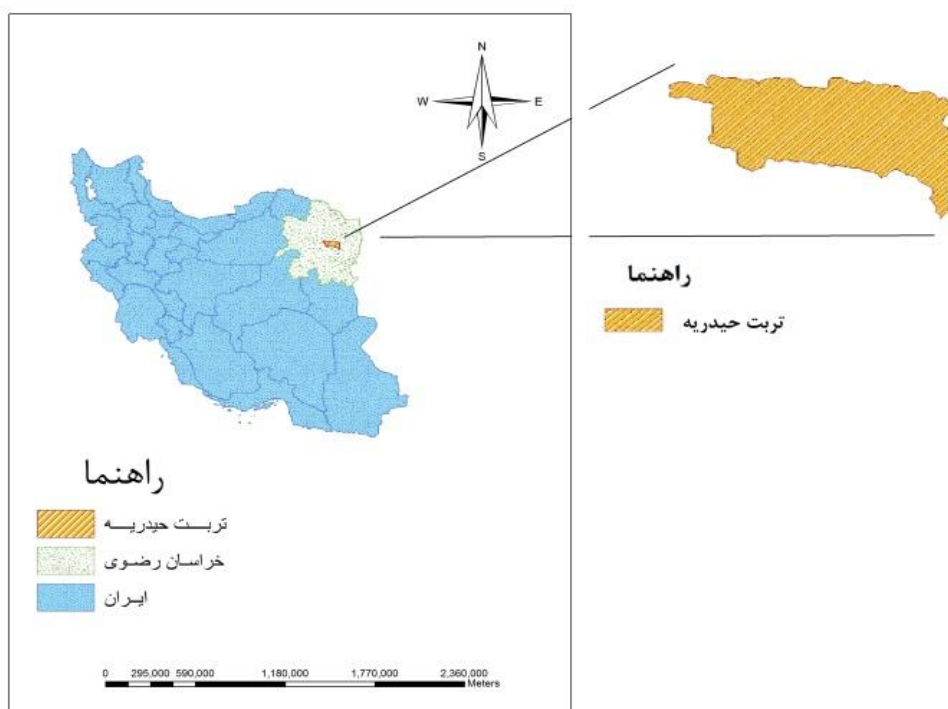
پژوهش حاضر با هدف بررسی نیاز آبی زعفران در شهرستان تربت حیدریه انجام شد. به این منظور، روش‌های مختلف فائوپنمن مانتیث، بلانی کریدل، هارگریوزسامانی، تورک، تورنت‌وایت و جنسن‌هیز ارزیابی و استفاده شد. به منظور یکسان‌سازی نتایج کلیه معادلات، از متوسط ماهیانه داده‌ها استفاده شد. روش‌های استفاده شده در محاسبه تبخیر و تعرق، در روابط ۱ تا ۶ نشان داده شده است.

هارگریوزسامانی، جنسن‌هیز، تورنت‌وایت و بلانی کریدل برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط آب و هوایی مختلف نشان داد پس از روش لایسیمتر وزنی، روش فائوپنمن مانتیث هم در شرایط آب و هوایی خشک و هم در شرایط آب و هوایی مرطوب دقیق‌ترین روش است [۱۸]. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن با استفاده از داده‌های ۹۱ ایستگاه هواشناسی و داده‌های لایسیمتر و ۱۳ روش تجربی در ایران نشان داد در ۵۶ درصد از ایستگاه‌های مطالعه‌شده، روش‌های با پایه پنمن و در ۲۲ درصد ایستگاه‌ها، دو روش بلانی کریدل و هارگریوزسامانی برای برآورد تبخیر و تعرق مناسب بوده‌اند [۱۹]. بررسی نیاز آبی زعفران در استان اصفهان نشان داد مناطق شرقی این استان، نیاز آبی بیشتری دارند [۲۰].

نتایج ارزیابی و واسنجی سه معادله پنمن فائو، پنمن فائو مانتیث و هارگریوزسامانی در منطقه نیمه‌خشک باجگاه استان فارس نشان داد روش هارگریوزسامانی نتایج نزدیکی با روش فائوپنمن مانتیث دارد، ولی میزان تبخیر و تعرق مرجع را برای همه سال‌ها کمتر از روش فائوپنمن برآورد می‌کند [۲۱].

نساجی‌زواره و صادقی‌فر [۲۲] با بررسی روش‌های مختلف برای تعیین میزان تبخیر و تعرق در کرج نتیجه گرفتند که روش هارگریوزسامانی دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. پاکدین و همکارانش [۲۳] در حوضه آبخیز آق‌چربی فاروج با استفاده از روش‌های مختلف در برآورد میزان تبخیر و تعرق پتانسیل نتیجه گرفتند که روش تورک دقیق‌ترین روش محاسبه تعیین تبخیر و تعرق در منطقه یادشده است.

نتایج ارزیابی روش‌های تبخیر و تعرق پتانسیل و تشت تبخیر با مقادیر لایسیمتر در یک اقلیم نیمه‌خشک نشان داد روش تجربی هارگریوزسامانی با کمترین خطای برآورد، بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل است [۲۴]. کوچک‌زاده و نیک‌بخت [۲۵] طی تحقیقی با مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف، نتیجه گرفتند که در اقلیم‌های خشک بیابانی، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای، روش هارگریوزسامانی و در اقلیم‌های فراخشک، مرطوب و بسیار مرطوب نوع «ب» روش تورک و در اقلیم بسیار مرطوب نوع «الف» روش



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

$$ETO = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{900}{T_{min} + \frac{T_{max}}{2} + 273} \right] U^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U^2)} U^2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

فائو پنمن مانیتش

رابطه ۳: هارگریوز سامانی

$$ETO = 0.0022 Ra \left(T_{min} + \frac{T_{max}}{2} + 17/8 \right) (T_{min} + T_{max})^{0.5} \quad (3)$$

اجزای رابطه ۳ عبارت‌اند از: T متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$)، R_a تابش ماورای زمینی ($mm \cdot day^{-1}$)، T_{min} دمای کمینه ($^{\circ}C$) و T_{max} دمای بیشینه ($^{\circ}C$).

رابطه ۴: تورنت‌وایت

$$ETO = 16 Nm \left(\frac{1}{I} \right)^a \left(\frac{D}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \quad (4)$$

اجزای رابطه ۴ عبارت‌اند از: T متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$)، Nm ضریب اصلاحی (تابعی از طول جغرافیایی منطقه و ماه مد نظر)، D متوسط بیشترین ساعت‌های آفتابی ممکن در هر ماه در عرض جغرافیایی مد نظر، N تعداد روزهای ماه مد نظر و I شاخص حرارتی سالانه.

رابطه ۵: جنسن‌هیز

$$ETO = \frac{23/9 (0.025T + 0.8) Rs}{59} \quad (5)$$

که در رابطه یادشده T متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$)، R_n تابش خالص در سطح زمین ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)، $e_s \cdot e_a$ کمبود فشار بخار اشباع هوا (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دمای T_{min} ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)، R_s کل تابش خورشیدی ($KPa \cdot C^{-1}$)، T_{max} دمای بیشینه ($^{\circ}C$)، G چگالی شار حرارتی خاک ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d$) و U^2 سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m \cdot s^{-1}$) که از معادله γ به دست می‌آید است.

رابطه ۲: بلانی کریدل

$$ETO = a + b \left\{ P \left(0.46T + 8/13 \right) \right\} \quad (2)$$

$$a = 0.0043 RH - \frac{n}{N} - 1.41$$

$$b = f \left(RH_{min}, \frac{n}{N}, Ud \right)$$

در رابطه ۲: T متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$)، RH درصد رطوبت نسبی متوسط، RH_{min} درصد رطوبت نسبی حداقل، N تعداد روزهای ماه مد نظر، n/N نسبت ساعت‌های آفتابی به مدت روشنایی روز و α ضریب ثابت پریستلی تیلور و برابر $1/26$ است.

مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برآزش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برآزش بهتر داده‌هاست [۲۶].

تبخیر و تعرق واقعی گیاه به عامل ضریب گیاهی (Kc) نیز بستگی دارد. برای تعیین نیاز آبی زعفران از ضریب گیاهی ارائه‌شده در جدول ۱ استفاده شد [۲۷]، عواملی که در ضریب گیاهی تأثیر دارند، عبارت‌اند از: صفات مشخصه گیاه (نوع گیاه، مرحله رشد و ارتفاع گیاه)، تاریخ شروع رویش، میزان رشد، طول دوره رویش و شرایط اقلیمی. در این میان، تواتر بارندگی به‌خصوص در مرحله اول رشد اهمیت بیشتری دارد (میزان ضریب Kc زمانی که محدودیت آب وجود دارد کمتر از یک است).

آزمون کای اسکوئر

برای بررسی وجود داشتن یا نداشتن تفاوت معنادار بین روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق از آزمون کای اسکوئر استفاده شد. این آزمون که با استفاده از معادله ۱۲ محاسبه شده است با یک فرض صفر و یک فرض یک آغاز می‌شود [۲۸]. فرض صفر (H0) و یک (H1) استفاده شده در این آزمون چنین است:

H0: نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه روش فائو و سایر روش‌ها (تورک، تورنت‌وایت، بلانی کریدل، هارگریوزسامانی و جنسن‌هیز)، نزدیک به هم و مشابه‌اند.

H1: نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه روش فائو و سایر روش‌ها (تورک، تورنت‌وایت، بلانی کریدل، هارگریوزسامانی و جنسن‌هیز)، با همدیگر تفاوت معناداری دارند.

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (12)$$

در رابطه یادشده، O_i میزان تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده توسط روش فائو به‌عنوان مقادیر مشاهداتی و E_i تبخیر و تعرق سایر روش‌ها به‌عنوان مقادیر مورد انتظار است. برای تعیین کوچکی یا بزرگی مقدار χ^2 از دو پارامتر درجه آزادی (DF) و سطح معناداری استفاده می‌شود [۲۸] و مقدار درجه آزادی از رابطه ۱۳ به‌دست می‌آید:

$$DF = (n - 1) \times (k - 1) \quad (13)$$

(۱ - تعداد روش‌های مقایسه‌شده)

در رابطه یادشده T متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$) و R_s کل تابش خورشیدی ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) است.

رابطه ۶: تورک

$$ET_o = 0.13dT \frac{(T_{min} + T_{max}) / 2 + 23 / 1885R_s + 50}{T_{min} + T_{max} + 15} \quad (6)$$

$$RH \geq 50 \quad dT = 1$$

$$RH < 50 \quad dT = 1 + (50 - RH) / 70$$

در رابطه ۶ Δ گرمای نهان تبخیر (MJ/Kg)، R_s کل تابش خورشیدی ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)، RH درصد رطوبت نسبی متوسط، T_{min} دمای کمینه ($^{\circ}C$) و T_{max} دمای بیشینه ($^{\circ}C$) است.

رابطه ۷: معادله سرعت باد

$$U_z = U_z \frac{4 / 87}{Ln(67 / 8z - 5 / 42)} \quad (7)$$

برای ارزیابی مدل‌های ارائه‌شده، روش فائوپنمن‌مانتیت به‌عنوان مدل استاندارد و پایه در نظر گرفته شد. به منظور محاسبات مربوط به روش فائوپنمن‌مانتیت، از نرم‌افزار کراپوات^۱ استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه میزان دقت روش‌ها، از آماره‌های R^2 ، RMSE، MBE و EF استفاده شد. این آماره‌ها به‌ترتیب در روابط ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است [۲۵].

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - O)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - p)(O_i - O))^2}{\sum (P_i - p)^2 \sum (O_i - O)^2} \quad (11)$$

در روابط یادشده P_i ، O_i و P و O به‌ترتیب مقادیر برآوردشده، اندازه‌گیری‌شده، میانگین مقادیر برآوردشده و میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و n تعداد مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر روش است. مقدار مثبت آماره MBE نشان می‌دهد مدل میزان تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. مقدار EF نشان‌دهنده صحت برآزش داده‌ها است و از

جدول ۱. ضریب گیاهی زعفران طی فصل رشد [۲۷]

دوره	۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت	۱۰ اسفند تا ۱۱ فروردین	۱۲ بهمن تا ۹ اسفند	۱۱ دی تا ۱۱ بهمن	۱۰ آبان تا ۹ آذر	۱۰ آذر تا ۹ مهر	مقدار
	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۶۸	۰/۸۴	۰/۴۶	۰/۳۸	

فائوپنمنمانتیت دارند. یکی از عیوب روش‌های با دقت زیاد، تعدد پارامترهای ورودی مورد نیاز است که کاربرد آنها را با چالش جدی مواجه کرده است.

بر اساس آماره MBE، روش تورنت، بلانی کریدل و جنسن هیز، کمترین میزان خطا را نسبت به سایر روش‌ها داشته و روش هارگریوزسامانی با MBE برابر با ۱/۵۲، بیشترین خطا را به دست داد. نتایج نشان داد از نظر آماره EF، روش هارگریوزسامانی بهترین مدل است. روش‌های جنسن هیز و بلانی کریدل، EF زیادی داشتند.

با در نظر گرفتن همه آماره‌ها، به ترتیب روش‌های بلانی کریدل، جنسن هیز و هارگریوزسامانی، به عنوان مناسب‌ترین روش‌های برآورد نیاز آبی زعفران در منطقه تربت حیدریه معرفی می‌شود. این نتایج با مشاهدات ساعد [۱۷] مطابقت دارد. محقق یادشده برای مناطق گرم و خشک عربستان، روش‌های بلانی کریدل اصلاح شده، جنسن هیز و هارگریوزسامانی را به عنوان بهترین روش‌های تعیین نیاز آبی معرفی کرد. همچنین، صمدی و مجدزاده [۲۹] با اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع (چمن) توسط لایسیمتر در کرمان تعدادی از روش‌های محاسباتی را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که معادله بلانی کریدل مناسب‌ترین روش برای استفاده در مناطق خشک است. احمدی و همکارانش [۲۶] نیز با در نظر گرفتن همه آماره‌ها، روش‌های بلانی کریدل، جنسن هیز اصلاح شده و هارگریوزسامانی را به عنوان مناسب‌ترین روش‌های تخمین نیاز آبی زعفران در دشت بیرجند معرفی کردند.

اگر برای هر روش محاسبه شده، $O=E$ و $\chi^2 = 0$ باشد، آن‌گاه نتایج هر دو روش کاملاً بر هم منطبق است و هیچ‌گونه تفاوتی با هم ندارند. اما اگر $O \neq E$ و $\chi^2 \neq 0$ بوده و مقدار χ^2 محاسبه شده کوچک‌تر از کای اسکوتر بحرانی باشد، آن‌گاه نتایج به دست آمده از هر دو روش تفاوت چندانی با همدیگر نداشته و فرض صفر تأیید می‌شود. در صورتی که $O \neq E$ و $\chi^2 \neq 0$ باشد اما مقدار χ^2 محاسباتی بزرگ‌تر از مقدار کای اسکوتر بحرانی باشد، نتایج با همدیگر تفاوت معنادار داشته و فرض صفر رد و فرض مقابل پذیرفته خواهد شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد روش تورک، با ضریب تبیین ۰/۸۶، نسبت به سایر روش‌های ارزیابی شده در منطقه مطالعه شده دقت کمتری دارد. در سایر تحقیقات نیز کارایی این روش بیشتر مناسب آب و هوای مرطوب گزارش شده است [۳۰]. طبق جدول ۲، روش‌های جنسن هیز، هارگریوزسامانی، تورنت‌وایت و بلانی کریدل با مقادیر ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۷، ۰/۹۶ و ۰/۹۴ دقت بیشتری داشتند. این در حالی است که روش جنسن هیز به دلیل تعدد پارامترهای مورد نیاز، در محاسبات سریع، کاربرد چندانی ندارد.

بر اساس آماره RMSE، روش جنسن هیز، تورک و بلانی کریدل به ترتیب با مقادیر ۰/۶۵، ۰/۷۶ و ۰/۸۶ میلی‌متر بر روز، کمترین میزان خطا و روش هارگریوزسامانی و تورک به ترتیب با مقادیر ۱/۵۷ و ۱/۵۴ میلی‌متر بر روز بیشترین میزان خطا را نسبت به روش

جدول ۲. مقایسه روش‌های مختلف تعیین تبخیر و تعرق با روش فائوپنمنمانتیت

روش						
آماره	تورک	هارگریوزسامانی	جنسن هیز	بلانی کریدل	تورنت‌وایت	
RMSE	۰/۷۶	۱/۵۷	۰/۶۵	۰/۸۶	۱/۰۵	
EF	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۱	
MBE	۰/۸۶	۱/۵۲	۰/۴۶	۰/۲۴	-۰/۷۴	
R²	۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۶	

هارگریوزسامانی، تورک و تورنت‌وایت به‌ترتیب ۱۱۰، ۷۸، ۵۹، ۴۸ و ۳۶ درصد محاسبه شد (جدول ۳).

از آنجا که تمامی تخمین‌های روش تورک نسبت به روش فائوپنمن‌مانتیث، بیشتر از خط نسبت ۱:۱ قرار گرفت، مشخص می‌شود که روش تورک مقادیر تبخیر و تعرق را طی فصل رشد همواره کمتر برآورد می‌کند. کم‌برآوردی روش جنسن‌هیز نسبت به روش تورک، کمتر شده و نشان‌دهنده این موضوع است که روش یادشده به‌رغم کم‌برآوردی، نسبت به روش تورک دقیق است (شکل ۲).

با مقایسه روش‌های تورک، تورنت‌وایت، بلانی‌کریدل، جنسن‌هیز و هارگریوزسامانی نسبت روش فائوپنمن‌مانتیث مشخص شد که به‌ترتیب روش‌های بلانی‌کریدل، تورنت‌وایت و هارگریوزسامانی، مقادیر تبخیر و تعرق طی فصل رشد را بیشتر محاسبه کرده‌اند (شکل ۲ و جدول ۴). میزان بیش‌برآوردی مجموع نیاز آبی فصل رشد روش‌های بلانی‌کریدل، تورنت‌وایت و هارگریوزسامانی به‌ترتیب ۸۳، ۳۷ و ۲۸ درصد و میزان کم‌برآوردی مجموع نیاز آبی فصل رشد روش‌های تورک و جنسن‌هیز نیز به‌ترتیب ۳۹ و ۹ درصد نسبت به روش فائوپنمن‌مانتیث به‌دست آمد (جدول ۴).

میانگین عددی مجموع ماهانه عدد نیاز آبی خالص و ناخالص و تبخیر و تعرق زعفران در جدول ۵ ارائه شده است.

بررسی مقایسه نتایج به‌دست آمده از روش فائو با سایر روش‌ها با استفاده از آزمون کای‌اسکوئر در جدول ۶ نشان داده شده است. مقدار کای‌اسکوئر محاسبه‌شده در هر روش متفاوت است. با توجه به درجه آزادی محاسبه‌شده در سطح معناداری یک هزارم، مقدار کای‌اسکوئر بحرانی از جدول (χ^2) ، برابر با ۲۰/۵۱ به‌دست آمد. در روش بلانی‌کریدل، تورنت‌وایت، جنسن‌هیز و تورک، کای‌اسکوئر محاسبه‌شده، بزرگ‌تر از کای‌اسکوئر بحرانی به‌دست آمد. این نشان‌دهنده تفاوت معنادار این روش با روش فائوپنمن‌مانتیث است. در روش هارگریوزسامانی، کم‌تر بودن کای‌اسکوئر محاسبه‌شده نسبت به کای‌اسکوئر جدول نشان داد این روش با روش فائوپنمن‌مانتیث تشابه و نزدیکی زیادی دارد (جدول ۶).

نیاز آبی زعفران در منطقه مطالعه شده بر اساس روش فائوپنمن‌مانتیث، ۱۷۳۱ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد. این در حالی است که مقدار آب به‌کار برده‌شده توسط کشاورزان، ۱۸۰۰ مترمکعب در هکتار است. مقایسه بین مقدار برآوردی روش فائوپنمن‌مانتیث و مقدار کاربردی کشاورزان منطقه نشان داد این دو مقدار بسیار بهم نزدیک بوده و بیش‌آبیاری جزئی کاربردی توسط کشاورزان، می‌تواند به‌عنوان جزء آبشویی در نظر گرفته شود و در نهایت مقدار آب کاربردی توسط کشاورزان را مقداری دقیق و درست دانست. به عکس در تحقیق احمدی و همکارانش [۲۶] در دشت بیرجند مشخص شد که کشاورزان استراتژی کم‌آبیاری را برگزیده‌اند. در تحقیق یادشده مقدار نیاز آبی زعفران محاسبه‌شده توسط روش فائوپنمن‌مانتیث، ۲۳۵۰ مترمکعب در هکتار برای یک فصل رشد به‌دست آمد. در تحقیق احمدی و همکارانش [۲۶] اختلاف بین نیاز آبی محاسباتی توسط روش فائوپنمن‌مانتیث و کاربردی توسط کشاورزان، ۱۱۸۴/۱۷ مترمکعب در هکتار برای یک فصل رشد به‌دست آمد.

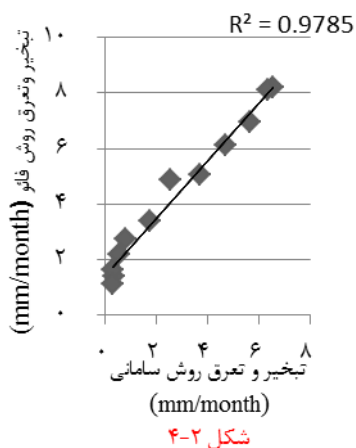
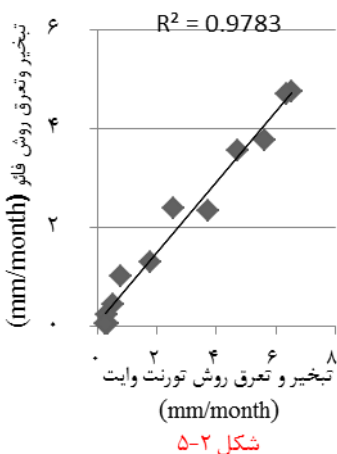
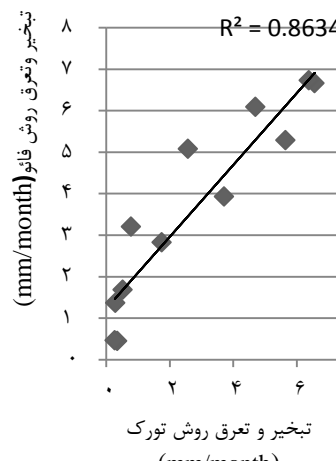
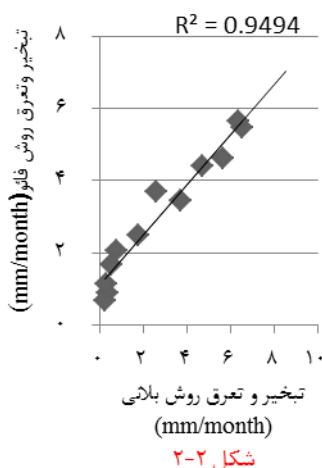
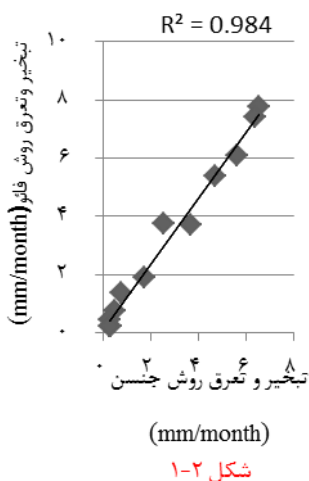
علیزاده و همکارانش [۳۰] طی تحقیقی، مجموع تبخیر و تعرق زعفران طی فصل رشد را برابر ۲۴۲ میلی‌متر گزارش کردند. مهدوی [۳۱] نیز طی تحقیق دیگری، نیاز آبی زعفران را برابر سه هزار مترمکعب در هکتار گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر اختلاف دارد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های هارگریوزسامانی، جنسن‌هیز و بلانی‌کریدل، مناسب‌ترین روش‌های تعیین تبخیر و تعرق در دشت تربت حیدریه، عمده‌ترین دشت تولید زعفران جهان، هستند (جدول ۳ و شکل ۲). از آنجا که در معادله هارگریوزسامانی برای محاسبه تبخیر و تعرق فقط به دو عامل دما و تشعشع خورشیدی نیاز است و تعیین عوامل یادشده در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی امکان‌پذیر است، در برآوردهای اولیه و سریع می‌توان از این روش برای تعیین نیاز آبی گیاه زعفران استفاده کرد. این نتایج با نتایج سایر محققان در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطابقت دارد [۱۲، ۳۲ و ۳۳].

نتایج نشان داد در کل دوره اندازه‌گیری، تمامی روش‌ها، مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر برآورد کرده‌اند. میزان بیش‌برآوردی روش‌های جنسن‌هیز، بلانی‌کریدل،

جدول ۳. نتایج تبخیر و تعرق روش‌های استفاده‌شده در تحقیق (میلی‌متر بر روز)

تبخیر و تعرق						
تورنت‌وایت	تورک	هارگریوزسامانی	جنسن‌هیز	بلانی‌کریدل	فائوپنمن‌مانتیث	
۰/۰۵	۰/۴۵	۱/۳۸	۰/۲۵	۰/۹۱	۰/۳۵	۱
۰/۴۳	۱/۶۹	۲/۲۰	۰/۷۷	۱/۶۶	۰/۵۲	۲
۱/۳۱	۲/۸۳	۳/۳۸	۱/۹۲	۲/۵۰	۱/۷۵	۳
۲/۳۴	۳/۹۳	۵/۰۶	۳/۷۰	۳/۴۶	۳/۷۱	۴
۳/۷۸	۵/۲۹	۶/۹۴	۶/۱۰	۴/۶۳	۵/۶۴	۵
۴/۷۵	۶/۶۷	۸/۲۲	۷/۷۵	۵/۴۹	۶/۵۶	۶
۴/۷۱	۶/۷۳	۸/۱۰	۷/۳۹	۵/۶۷	۶/۳۸	۷
۳/۵۶	۶/۰۹	۶/۱۲	۵/۴۱	۴/۴۳	۴/۷۰	۸
۲/۴۰	۵/۰۸	۴/۸۵	۳/۷۵	۳/۷۱	۲/۵۷	۹
۱/۰۰	۳/۲۰	۲/۷۴	۱/۳۸	۲/۰۸	۰/۷۸	۱۰
۰/۲۳	۱/۳۷	۱/۶۴	۰/۴۵	۱/۱۶	۰/۲۹	۱۱
۰/۰۵	۰/۴۶	۱/۱۳	۰/۲۱	۰/۶۹	۰/۲۷	۱۲
۲۴/۶۱	۴۳/۷۹	۵۱/۷۶	۳۹/۰۸	۳۶/۳۹	۳۳/۵۲	مجموع
۰/۷۸	۱/۱۰	۰/۵۹	۰/۴۸	۰/۳۶		درصد تغییرات نسبت به روش فائوپنمن‌مانتیث



شکل ۲. مقایسه بین روش‌های مختلف تعیین تبخیر و تعرق و روش فائوپنمن‌مانتیث

جدول ۴. نتایج نیاز آبی محاسباتی طی فصل رشد محاسبه شده توسط روش های استفاده شده در تحقیق (میلی متر بر روز)

نیاز آبی						
ماه	فائوپنمن مانیتیت	بلانی کریدل	تورنت وایت	تورک	هارگریوز سامانی	جنسن هیز
	۰/۲۹	۰/۷۶	۰/۰۴	۰/۳۸	۱/۱۶	۰/۲۱
	۰/۳۵	۱/۱۳	۰/۲۹	۱/۱۵	۱/۵۰	۰/۵۲
	۰/۸۸	۱/۲۵	۰/۶۵	۱/۴۱	۱/۶۹	۰/۹۶
	۱/۵۲	۱/۴۲	۰/۹۶	۱/۶۱	۲/۰۸	۱/۵۲
	۲/۰۹	۱/۷۱	۱/۴۰	۱/۹۶	۲/۵۷	۲/۲۶
	۰/۳۰	۰/۷۹	۰/۳۸	۱/۲۲	۱/۰۴	۰/۵۳
	۰/۱۳	۰/۵۳	۰/۱۱	۰/۶۳	۰/۷۶	۰/۲۱
	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۰۴	۰/۳۶	۰/۸۸	۰/۱۶
	۵/۷۷	۸/۱۳	۳/۸۷	۸/۷۲	۱۱/۶۸	۶/۳۷
مجموع						
درصد تغییرات نسبت به روش						
	-۰/۰۹	-۰/۰۹	۰/۲۸	-۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۸۳
فائوپنمن مانیتیت						

جدول ۵. میانگین عددی ماهانه عدد نیاز آبی خالص و ناخالص و تبخیر و تعرق مورد نیاز زعفران

فائو پنمن مانیتیت	بلانی کریدل	جنسن هیز	سامانی	تورک	تورنت وایت
۲/۷۹	۳/۰۳	۳/۲۵	۴/۳۱	۳/۶۵	۲/۰۵
۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۹۷	۰/۷۵	۰/۳۲
۱۴۴/۲۷	۲۰۳/۳۵	۱۵۸/۹۳	۲۹۱/۶۵	۲۱۷/۷۸	۹۶/۸۴

جدول ۶. مقادیر کای اسکوتر محاسبه شده

تورنت وایت	تورک	سامانی	جنسن هیز	بلانی کریدل	روش
۵۸/۵۱	۲۳/۶۴	۱۷/۱۲	۲۷/۶۷	۳۳/۴۴	کای اسکوتر محاسبه شده

نتیجه گیری

دانشمندان و متخصصان جهان روش های تجربی متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از متغیرهای اقلیمی مختلف معرفی کرده اند. طبق نتایج به دست آمده، روش های بلانی کریدل، هارگریوز سامانی و جنسن هیز به دلیل تعیین دقیق تر تبخیر و تعرق مرجع نسبت به سایر روش های استفاده شده، به عنوان روش های پیشنهادی تعیین نیاز آبی زعفران در منطقه تربت حیدریه معرفی می شود. با استفاده از روش بلانی کریدل، هارگریوز سامانی و جنسن هیز نیاز آبی زعفران در منطقه مطالعه شده به ترتیب ۲۴۴۰، ۳۴۹۹ و ۱۹۰۷ مترمکعب در هکتار برای یک فصل زراعی به دست آمد که از آب آبیاری استفاده شده کشاورزان منطقه، بیشتر است. بر اساس روش استاندارد و مبنای فائوپنمن مانیتیت، نیاز آبی زعفران در منطقه تربت حیدریه، ۱۷۳۱ مترمکعب

در هکتار برای یک فصل زراعی تعیین شد. از آنجا که در روش هارگریوز سامانی برای محاسبه تبخیر و تعرق فقط به دو عامل دما و تشعشع خورشیدی نیاز است و تعیین عوامل یاد شده در بیشتر ایستگاه های هواشناسی امکان پذیر است. در برآوردهای اولیه و سریع می توان از این روش برای تعیین نیاز آبی گیاه زعفران استفاده کرد. مقایسه نتایج به دست آمده از روش فائو با سایر روش ها با استفاده از آزمون کای اسکوتر نشان داد فقط در روش هارگریوز سامانی کای اسکوتر محاسبه شده کوچک تر از کای جدول است، بنابراین با نتایج روش فائو مشابه و نزدیک به هم هستند. روش بلانی کریدل برای مناطقی که داده های هواشناسی آن فقط دمای هوا است توصیه شد. کارایی روش های یاد شده برای مناطق مختلف توسط محققان بسیاری بررسی شده است. نساجی زواره و صادقی فر [۲۲] با بررسی روش های

- [11]. Allen R.G, Pereira L.S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998; NO. 56. Rome. Italy.
- [12]. Hargreaves G.H. Defining and using reference evapotranspiration. Irrigation and Drainage Engineering ASCE, 1994; 120(6): 1132-1139.
- [13]. Jensen ME, Burman R.D, Allen R.G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, 1990; No. 70. American Society of Civil Engineers, NY.
- [14]. Shih S.F. Data requirement for evapotranspiration estimation. Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 1984; 110(3): 263-274.
- [15]. Amatya D.M, Skaggs R.W, Gregory J.D. Comparison of methods for estimating REF-ET. Irrigation and Drainage Engineering, 1995; 121(6): 427-435.
- [16]. Saeed M. The estimation of evapotranspiration by some equations under hot and arid conditions. Transaction American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1986; 29(2): 434-438.
- [17]. Baiat Varkeshi M, Zare Abyaneh H, Ghasemi A. Provide the Best Empirical Evapotranspiration Relationship Compared With FAO-Penman-Monteith in the North West. 3rd Iran Water Resources Management Conference. Tabriz, Iran. 2008. (In Persian)
- [18]. Zandilak H. Select the Appropriate Method for Estimating Evapotranspiration in Yazd. 1st Regional Water Resources Development Conference. Abarkoh. 2011. (In Persian).
- [19]. Zare Abianeh H, Biat Varkeshi M, Sabzi Parvar AK, Maroofi S, Ghasemi A. Evaluation of estimating reference evapotranspiration methods in Iran. Journal of natural geographic researches. 2010; 74: 95-110. [Persian].
- [20]. FallahGhalhari GA, Ahmadi H. The estimation of phenological thresholds of Saffron cultivation in Isfahan province based on the daily temperature statistics, Saffron Agronomy and Technology, 2015; 3 (1):65-49. [In Persian].
- [21]. Fooladmand H. R, Sepaskhah A. R. Evaluation and calibration of three evapotranspiration equations in a Semi-Arid region. 2005.
- [22]. Nasaji Zavareh M, Sadeghifar R. Estimation of reference crop evapotranspiration using different methods (Case study: Karaj). 9th Conference on Irrigation and Evaporation Reduction. Kerman, Iran. 2007. (In Persian).

مختلف برای تعیین میزان تبخیر و تعرق در کرج نتیجه گرفتند که روش هارگریوزسامانی دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، نتایج مشابهی نیز توسط احمدی و همکارانش [۲۶] و صالح و سندیل [۳۳] به دست آمد.

منابع

- [1]. Ehsanzadogh P, Yadollahi A.A, Maibodi A.N.M. Productivity, growth and quality attributes of 10 Iranian saffron accessions under climatic conditions of Chahar-Mahal Bakhtrazi, Central Iran. In: Proceeding of the 1st International Symposium on Saffron. Albacete. Spain. 2004. p. 183-188.
- [2]. Mollafilabi A. Experimental findings of production and ecophysiological aspects of saffron (*Crocus sativus* L.). Acta Horticulturae (ISHS), 2004; 650: 195-200.
- [3]. Kafi M, Koocheki A, Rashed M.H, Nassiri M. (Eds.). Saffron (*Crocus sativus*) Production and Processing. Science Publishers, Enfield. (In Persian). 2006.
- [4]. Kafi M, Rashed Mohasel M.H, Koocheki A, Molafilabi A. Saffron Production and Processing. Ferdowsi University of Mashhad Publications, Mashhad, Iran. 2002. (In Persian).
- [5]. Rashed M.H, Kafi M, Koocheki A, Nassiri M. Saffron (*Crocus sativus*) Production and Processing. Science Publications, 2006; 87-96. (In Persian).
- [6]. Bari Abarghohi H, Ghalavand A, Mazaheri D, Noor Mohammadi G, Sanei M. Temperature effect on flowering and yield performance accessions on Iranian saffron. Pajouhesh Va Sazandgi, 2001; 4: 65-69. (In Persian with English Summary).
- [7]. Stegman E.C, Bauer A. Sugar beet response to water stress in sandy soils. Transaction of the American Society of Agriculture Engineering, 1977; 20: 469-472.
- [8]. Khashei Siuki A, Hashemi S.R, Ahmadee M. The effect of Pottasic Zeolite and irrigation scheduling on saffron yield. Reserch Project in University of Birjand. 2015. (In Parsian).
- [9]. Burman R, Pochop L.O. Evaporation, Evapotranspiration and Climate Data. Elsevier Science B.V. 1994.
- [10]. Allen R.G, Smith M, Pereira L.S, Raes D. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 1994; 43(2): 35-92.

- [23]. Pakdin M, Shahnavaaz Y, Roostaei S, Alipoor H. Study of potential and actual evapotranspiration in Faruj basin. The 1st National Conference on Solutions to Access Sustainable Development in Agriculture, Natural Resources and the Environment (sdconf). Tehran, Iran. 2012. (In Persian).
- [24]. Nazari R, Kaviani A. Evaluation of potential evapotranspiration methods and evaporation pan with lysimeter in semiarid climate (case study: Qazvin plain). *Ecohydrology journal*. 2016; 3(1): 19-30.
- [25]. Koochakzadeh M, Nikbakht G. Evaluating of reference evapotranspiration methods with FAO-56 in different climate in Iran. *Journal of Agricultural science*. 2003; 10(3): 43-57. [Persian]
- [26]. Ahmadee M, Khashei Siuki A, Sayyari, M.H. Comparison efficiency of different equations to estimate the water requirement in saffron (*Crocus sativus* L.) (Case study: Birjand plain, Iran). *Journal of Agroecology*, 2017; 8(4): 505-520. (In Persian with English Summary).
- [27]. Sepaskhah A.R, Kamgar-Haghighi A.A. Saffron irrigation regime. *International Journal of Plant Production*, 2009; 3(1): 1-16.
- [28]. Asghari Jafarabadi M, Mohammadi SM. Statistical Series: An Introduction to Inferential Statistics (Point Estimation, Confidence Interval and Hypothesis Testing). *Journal of Diabetes and Metabolic Disorders* 2013 Under Press [In Persian].
- [29]. Samadi H, Majdzadeh B. Comparison of reference evapotranspiration calculated by empirical formulas with lysimeters in Kerman. 8th Conference on Irrigation and Evaporation Reduction. Kerman, Iran. 2003. (In Persian).
- [30]. Alizadeh A, Mahdavi M, Iranloo M, Bazari M.E. Evapo-transpiration and crop coefficient of saffron (*Crocus sativus*). *Geographical Research*, 1999; 54 and 55: 29-42. (In Persian with English Summary).
- [31]. Mahdavi M. Plant coefficient and saffron evapotranspiration on standard condition. MSc thesis. Faculty of Agriculture. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. 1999. (In Persian)
- [32]. Doorenbos J, Pruitt W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, 1977; NO. 24. Rome. Italy.
- [33]. Salih A.M.A, Sendil U. Evapotranspiration under extremely arid climates. *Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1984; 110 (3): 289-303.