

واسنجی و ارزیابی سه روش تجربی برآورد تبخیرتغرق مرجع در برخی از شهرهای ایران

پریسا پاشاخواه^۱، نادر پیرمادیان^۱، نیما خزدوز^۲، حسین نشاگر^۳، محمد مشفق^۲

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲- کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

۳- نویسنده مسئول

چکیده

آگاهی از نیاز آبی گیاه یکی از ملاحظات مهم در اصلاح بهره‌وری آب در کشاورزی فاریاب است. بنابراین، برآورد دقیق تبخیرتغرق مرجع از مهم‌ترین عوامل ارتقاء مدیریت آب است. روش پنمن مانتیس فائو بعنوان فرمول استاندارد برآورد تبخیرتغرق مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی این روش دارای محاسبات طولانی و پیچیده بوده و نیاز به اطلاعات زیادی دارد. با توجه به عدم برداشت برخی از اطلاعات مورد نیاز این روش در تمام مناطق، استخراج معادلات منطقه‌ای مناسب برای محاسبه تبخیرتغرق با تکیه بر حداقل داده‌های هواشناسی ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور، سه معادله تجربی بلانی کریدل اصلاحی، هارگریوز و تورنت وایت انتخاب و بر اساس معادله پنمن مانتیس فائو برای پنج اقلیم مختلف و به دو روش رگرسیون خطی و بهینه‌سازی غیرخطی واسنجی شد. داده‌های مربوط به یک دوره ۱۰ ساله برای ایستگاه‌ها استخراج و به دو گروه ۵ سال اول و ۵ سال دوم تقسیم شدند. با داده‌های ۵ سال اول معادلات واسنجی شده و ارزیابی معادلات با استفاده از اطلاعات ۵ سال دوم و توسط معیارهای آزمون F و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) انجام شد که در آن مشخص شد واسنجی به روش رگرسیون خطی دارای خطای نسبی کمتری بود. همچنین نتایج بیان می‌دارد در شرایطی که در اقلیم‌های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز، برآورد تبخیرتغرق مرجع از روش پنمن مانتیس فائو ممکن نباشد، با بهره‌گیری از معادلات واسنجی شده می‌توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش پنمن مانتیس فائو دست یافت.

کلمات کلیدی: تبخیرتغرق مرجع، پنمن مانتیس فائو، هارگریوز، بلانی کریدل، تورنت وایت.

۱- مقدمه

برداشت آب از منابع موجود در سرتاسر جهان دارای محدودیت‌هایی است. با نگاهی به آمار و ارقام، بیش از دو میلیارد نفر به سبب توزیع ناعادلانه این منبع در مکان و زمان، در مناطق کم آب یا نواحی بحرانی از نظر آب زندگی می‌کنند (Oki and Knae, 2006). بسیاری از پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که بیش از ۵۹٪ از مردم جهان تا سال ۲۰۵۸ کمبود آب را تجربه خواهند کرد (Rockstorm et al., 2009). در بسیاری از مناطق ایران، حتی در مناطق مدرن شهری هم کمبود آب آشامیدنی سالم محسوس است، از اینرو در چنین مناطقی ارزیابی صحیح و قاطع توزیع و درخواست آب، برای بهبود مدیریت و اجتناب از کمبود آب بسیار مهم و تعیین کننده است (Maeda et al. 2010). بطور کلی ۷۰٪ از برداشت‌های آب شیرین صرف مصارف کشاورزی می‌شود (FAO, 2005). در بیشتر مناطق ایران کشاورزی در کنار صنعت یکی از مهمترین فعالیت‌های اقتصادی به شمار می‌آید. در مناطق گرم و خشک ایران، مثل نواحی جنوب غربی، شمال شرقی و جنوبی، کشاورزی از رونق خاصی برخوردار است. اما کمبود آب، حتی برای مصارف خانگی هم در این مناطق حس می‌شود. لذا مدیریت منابع آب برای مصارف کشاورزی و تعیین صحیح و دقیق آب مورد نیاز برای این منظور، دارای ارزش حیاتی است.

یکی از نیازمندی‌های بنیادی برای برآورد مقدار آب مورد نیاز محصولات کشاورزی فهمیدن روابط بین شرایط آب و هوایی و تبخیر تعرق است (Maeda et al., 2010). تبخیر تعرق بوسیله دو فرآیند مجزا تعریف می‌شود که در آن آب از طرفی بوسیله تبخیر از سطح خاک و از طرف دیگر بوسیله تعرق از اندام گیاه خارج می‌گردد (Allen et al., 1998). برآورد تبخیر تعرق به طرق مختلف صورت می‌گیرد. به طور معمول تبخیر تعرق واقعی گیاه از حاصل ضرب تبخیر تعرق مرجع در یک ضریب گیاهی مناسب برآورد می‌شود. بنابراین بدست آوردن تبخیر تعرق مرجع ضروری است.

تبخیر تعرق مرجع را می‌توان توسط روش‌های فیزیکی، تئوری یا تجربی بدست آورد. اندازه‌گیری‌های مستقیم تبخیر تعرق گیاهی به ندرت در دسترس هستند (Summer and Jacobs, 2005) و این نکته که برآورد تبخیر تعرق کاری سخت و هزینه‌بردار است، امری اجتناب‌ناپذیر است. از اینرو مدل‌هایی بر پایه داده‌های هواشناسی در سطح جهانی توسعه یافته‌اند. این مدل‌های برآورد تبخیر تعرق مرجع، معمولاً براساس اصول فیزیکی، معادلات تجربی و یا ترکیبی از این دو روش هستند (Maeda et al., 2010). روش‌های تجربی بر اساس آنالیزهای آماری و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی و معمولاً برای یک منطقه یا شرایط آب و هوایی یا اقلیمی خاص برداشت می‌شوند (Bos et al., 2009). از طرفی دیگر مدل‌های فیزیکی بیشتر هدف‌شان شبیه‌سازی اصول بنیادی مثل تعادل انرژی و جابجایی جرم است. برای مثال تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد تعدادی از داده‌های مهم برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع بر اساس مدل‌های فیزیکی هستند (Maeda et al., 2010). روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر تعرق مرجع در دهه‌های گذشته استفاده شده‌است. از جمله آن‌ها می‌توان به روش پنمن مانتیس فائو (Allen et al., 1998)، معادله استاندارد (ASCE) (Walter et al., 2000)، پریستلی تیلور اصلاح شده (Snyder, 1992 و Pereira et al., 1995) و معادله هارگریوز سامانی (Hargreaves and Samani, 1982, 1985) اشاره نمود. در این میان روش رگرسیون چند متغیره، به شرطی که در شرایط خوبی واسنجی شود، می‌تواند روشی مناسب و سودمند باشد (Lee et al., 2005). روش تشت تبخیر می‌تواند یک ابزار مناسب برای برآورد دقیق تبخیر تعرق مرجع باشد (Pereira et al., 1995). اما ایجاد شرایط مناسب برای احداث تجهیزات تشت تبخیر برای همه در دسترس نیست و کاری پر هزینه و فرآیندی وقت‌گیر است. آلن و همکاران (۱۹۹۸) گزارش کردند که روش پنمن مانتیس اصلاحی و ترکیب آن با معادله سازمان خوار و بار جهانی (FAO) می‌تواند بعنوان فرمول استاندارد برآورد تبخیر تعرق مرجع مورد استفاده قرار گیرد. این معادله در مجامع جهانی مورد قبول قرار گرفته است، زیرا با روش‌های دقیق برآورد تبخیر تعرق

مانتیس فائو و با بهره‌گیری از اقلیم‌نمای یونسکو (Ghafari et al., 2004)، پنج ایستگاه هواشناسی بجنورد در قسمت شمال‌شرقی کشور در طول جغرافیایی $19^{\circ} 57'$ شرقی و عرض جغرافیایی $28^{\circ} 37'$ شمالی با ارتفاع ۱۰۹۱ متر از سطح دریا و آب و هوای نیمه خشک سرد گرم (SA-K-W)، شوشتر در قسمت جنوب غربی کشور با طول جغرافیایی $50^{\circ} 48'$ شرقی و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 32'$ شمالی با ارتفاع ۶۷ متر از سطح دریا و آب و هوای خشک معتدل گرم (A-M-W)، زرقان در نواحی مرکزی کشور در دشت مرودشت با طول جغرافیایی $43^{\circ} 52'$ شرقی و عرض جغرافیایی $47^{\circ} 29'$ شمالی با ارتفاع ۱۵۹۶ متر از سطح دریا با آب و هوای نیمه خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW)، گرمسار در قسمت مرکزی کشور با طول جغرافیایی $16^{\circ} 52'$ شرقی و عرض جغرافیایی $12^{\circ} 35'$ شمالی با ارتفاع ۸۲۵/۲ متر از سطح دریا و آب و هوای خشک خنک گرم (A-C-W) و بابلسر در قسمت شمالی کشور با طول جغرافیایی $39^{\circ} 52'$ شرقی و عرض جغرافیایی $43^{\circ} 36'$ شمالی با ارتفاع ۲۱- متر از سطح دریا و آب و هوای خیلی مرطوب خنک گرم (PH-C-W). انتخاب شدند. مشخصات و میانگین سالانه داده‌های هواشناسی برای ایستگاه‌های مذکور، در جدول ۱ آمده است. همچنین در جدول ۲ طبقه‌بندی اقلیمی کشور بر اساس اقلیم‌نمای یونسکو مشخص شده است.

مرجع همچون تشت تبخیر و لایسومتر مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج بسیار خوبی از خود نشان داده است (Blany and Criddle, 2005; Allen, 1996; Garcia et al., 2004; Summer and Jacobs, 2005). اما استفاده از روش پنمن مانتیس فائو نیازمند وجود طیف وسیعی از داده‌های هواشناسی است (Maeda et al., 2010). از اینرو در شرایطی که داده‌های کامل در اختیار نباشد، استخراج معادلات ساده و قابل استفاده با حداقل داده‌های هواشناسی با دقت قابل قبول، ضروری است. از طرفی معادلات حاصله ممکن است در اقلیم‌های مختلف دارای عملکردی متفاوت باشند. بنابراین لازم است معادلات مستخرج قبل از توصیه، برای اقلیم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا، در مطالعه حاضر سعی در واسنجی و ارزیابی سه معادله بلانی کریدل اصلاحی، هارگریوز و تورنت وایت در پنج ایستگاه به نمایندگی از اقلیم‌های اصلی ایران، بر پایه روش پنمن مانتیس فائو گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ایستگاه‌های مورد مطالعه

با هدف واسنجی و ارزیابی سه معادله بلانی کریدل اصلاحی، هارگریوز و تورنت وایت بر پایه روش پنمن

جدول شماره ۱- اطلاعات جغرافیایی و داده‌های میانگین سالانه هواشناسی برای ایستگاه‌های انتخاب

ایستگاه					مشخصه
گرمسار	شوشتر	زرقان	بجنورد	بابلسر	
۸۲۵/۲	۶۷	۱۵۹۶	۱۰۹۱	-۲۱	ارتفاع از سطح دریا
$16^{\circ} 52'$	$48^{\circ} 50'$	$43^{\circ} 52'$	$19^{\circ} 57'$	$39^{\circ} 52'$	طول جغرافیایی (شرقی)
$12^{\circ} 35'$	$32^{\circ} 30'$	$47^{\circ} 29'$	$28^{\circ} 37'$	$43^{\circ} 36'$	عرض جغرافیایی (شمالی)
۱۹/۰۲	۲۶/۷۵	۱۶/۴۷	۱۳/۵۳	۱۷/۸۸	درجه حرارت (درجه سانتیگراد)
۱/۴۹	۲/۱۹	۱/۰۲	۱/۸۸	۱/۶۶	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۳۹/۶	۳۷/۳۶	۳۸/۷	۶۰/۵	۸۱/۱	رطوبت نسبی (درصد)
۱۲۸/۶۹	۳۲۶/۴۹	۳۵۴/۶۶	۲۷۷/۸۸	۸۱۵/۲۸	بارش (میلی‌متر در سال)
۹/۰	۸/۶۵	۹/۲۲	۷/۶۶	۵/۷۵	ساعات آفتابی (ساعت در روز)

جدول شماره ۲- انواع اقلیم‌ها بر اساس اقلیم‌نمای یونسکو

نوع اقلیم	علامت اختصاری
خیلی مرطوب خنک گرم	PH-C-W
نیمه خشک سرد گرم	SA-K-W
نیمه خشک خنک خیلی گرم	SA-C-VW
خشک خنک گرم	A-C-W
خشک معتدل گرم	A-M-W
خشک خنک خیلی گرم	A-C-VW

شد که از منطقه‌ای در کالیفرنیا استخراج و برای مناطقی از جهان چون، استرالیا، هائیتی و بنگلادش آزمایش و صحت عملکرد آن تایید شد. رابطه ارائه شده به صورت زیر است:

$$ET_0 = 0.0023 R_A(T + 17.8)\sqrt{T_R} \quad (3)$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق مرجع، R_A تابش خورشیدی، T دمای متوسط هوا و T_R تفاوت حداکثر و حداقل دما است. واحد تبخیر تعرق همان واحدی است که برای R_A انتخاب می‌شود.

۲-۳-۳- معادله بلانی کریدل اصلاحی

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محاسبه تبخیر تعرق، معادله تجربی بلانی کریدل است که بعدها توسط پرویت یکی از اساتید دانشگاه کالیفرنیا مورد واسنجی قرار گرفت. این روش، تبخیر تعرق را برای مناطق گرم و خشک نزدیک به واقعیت و برای مناطق مرطوب تبخیر تعرق را ۱۶٪ بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. زیرا این مدل بر اساس داده‌های بخش خشک غربی ایالات متحده واسنجی و کارایی آن اثبات شده است (Maeda et al., 2010). این معادله در بسیاری از مدیریت‌های آبیاری بطور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است (Fooladmand and Ahmadi, 2009). معادله مذکور بصورت زیر است:

$$ET_0 = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad (4)$$

که در آن ET_0 مقدار تبخیر تعرق مرجع، P ضریب مربوط به طول روز یا میانگین درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که بصورت

۲-۲- معادلات برآورد تبخیر تعرق مرجع

۲-۲-۱- معادله پنمن ماننيس فائو

این معادله بصورت زیر بیان می‌شود (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، T میانگین شار گرمایی خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (درجه سانتی-گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع هوا (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی هوا (کیلوپاسکال)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و R_n تابش خالص خورشیدی در سطح پوشش (مگاژول بر متر مربع بر روز) است. مقدار شار گرمایی بصورت زیر قابل محاسبه است (Allen et al., 1998):

$$G_i = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (2)$$

که در آن i شماره ماه مورد نظر است.

۲-۲-۲- معادله هارگریوز

معادله هارگریوز بوسیله سامانی در سال ۱۹۸۵ توسعه یافت. سامانی این معادله را برای کل ایران وفق داد. در این روش فقط به داده‌های دمای هوا نیاز است. برای توسعه این روش از داده‌های روزانه لایسمتر برای دوره ۸ ساله استفاده

پنج سال اول و پنج سال دوم تقسیم شدند. مقادیر تبخیر تفرق مرجع با استفاده از چهار روش مذکور برای تمام ایستگاه‌ها با داده‌های پنج سال اول بدست آمد. سپس ضرایب واسنجی برای معادلات هارگریوز - سامانی، بلانی کریدل اصلاحی و تورنت وایت بر پایه مقادیر بدست آمده از روش پنمن مانتیس (۹) برآورد گردید. به منظور استخراج ضرایب واسنجی معادلات از دو روش استفاده شد:

(۱) روش رگرسیون خطی که در آن رابطه بین مقادیر تبخیر تفرق حاصل از روش پنمن مانتیس فائو ($ET_0 PMF$) و محاسبه شده توسط معادلات تجربی ($ET_0 EMP$) مذکور به شکل زیر است:

$$ET_{0 PMF} = a + b ET_{0 EMP} \quad (10)$$

که ضرایب a و b با استفاده از رگرسیون خطی بدست می‌آیند.
(۲) روش بهینه‌سازی غیرخطی بر پایه کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا که محاسبات این روش با استفاده از امکانات Solver در نرم‌افزار Excel انجام شد. این روش بر اساس تغییر ضرایب انتخاب شده‌ی رابطه مربوطه، معادله را واسنجی می‌کند.

با داده‌های هواشناسی پنج سال دوم، ابتدا مقدار تبخیر تفرق مرجع با استفاده از معادلات واسنجی شده محاسبه شد و در مرحله بعد نتایج حاصله با مقادیر بدست آمده از روش پنمن مانتیس فائو برای پنج سال دوم مورد مقایسه قرار گرفت. در فرآیند ارزیابی معادلات واسنجی شده، از آزمون F با سطح احتمال ۱٪ جهت مقایسه خط رگرسیون حاصل از مقادیر بدست آمده از این معادلات در مقابل مقادیر بدست آمده از روش پنمن مانتیس فائو با خط یک به یک ($y=x$) استفاده شد. همچنین معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطای نسبی ($RRMSE$) بصورت زیر جهت انتخاب و توصیه معادلات برتر مورد استفاده قرار گرفت.

$$RRMSE = [1/n \sum_{i=1}^n (ET_{0 EMP_i} - ET_{0 PMF_i})^2]^{0.5} \left(\frac{100}{MET_{0 EMP}} \right) \quad (11)$$

در رابطه بالا، $ET_{0 EMP_i}$ و $ET_{0 PMF_i}$ به ترتیب مقادیر تبخیر تفرق حاصل از معادلات واسنجی شده و روش پنمن مانتیس فائو، $MET_{0 EMP}$ میانگین مقادیر تبخیر تفرق حاصل از معادلات واسنجی شده و n تعداد مشاهدات است.

روزانه توصیف شده، T متوسط دمای ماهانه و a و b ضرایب اقلیمی هستند که بصورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$a = 0.0043(RH_{min}) - \left(\frac{n}{N}\right) - 1.41 \quad (5)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07 \left(\frac{n}{N}\right) + \quad (6)$$

$$0.066(U) + 0.006(RH_{min}) \left(\frac{n}{N}\right) 0.0006(RH_{min})(U)$$

که در این روابط N حداکثر ساعات آفتابی ممکن، n ساعات آفتابی واقعی در طول روز، U سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و RH_{min} حداقل رطوبت نسبی (درصد) است.

۲-۲-۴- معادله تورنت وایت اصلاحی

روش تورنت وایت بر اساس یک رابطه تجربی بین مقدار تبخیر تفرق مرجع و میانگین درجه حرارت هوا ارائه شده است (Maeda et al., 2010). معادلات این روش بصورت زیر است:

$$ET_0 = 16N_m \left(\frac{10T_i}{I}\right)^a \quad (7)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.51} \quad (8)$$

که در آن T_i متوسط دمای هوا در ماه مورد نظر (در صورتیکه متوسط دما در یک ماه صفر یا منفی شود عبارت $\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.51}$ که شاخص حرارتی ماهانه است، برای آن ماه صفر در نظر گرفته می‌شود)، N_m ضریب اصلاحی برای عرض‌های مختلف جغرافیایی و ماه‌های مختلف و I شاخص حرارتی سالانه، و a بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + \quad (9)$$

$$0.01792 I.492$$

۲-۳- روش پژوهش

ابتدا داده‌های مورد نیاز برای یک دوره ده ساله (۱۹۹۶ الی ۲۰۰۵) و بصورت ماهانه برای هر شش ایستگاه منتخب از پایگاه داده‌های سازمان هواشناسی ایران استخراج شد. پس از انجام بررسی‌های لازم شامل تشخیص خلأهای آماری و بازسازی آن‌ها و همچنین آزمون همگنی، داده‌ها به دو دسته

۳- نتایج

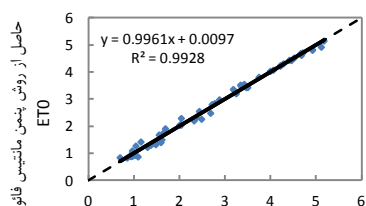
معادلات واسنجی شده محاسبه تبخیر تعرق مرجع برای ایستگاه‌های مختلف با استفاده از اطلاعات پنج سال اول و برای دو روش واسنجی رگرسیون خطی و بهینه‌سازی غیر خطی در جدول ۳ آمده است. به منظور ارزیابی معادلات واسنجی شده مقادیر تبخیر تعرق مرجع با استفاده از این معادلات و برای اطلاعات پنج سال دوم بدست آمد. مقایسه خط روند مقادیر تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فائو با خط ۱:۱ در شکل‌های ۱ تا ۵ ارائه شده است. در اشکال ذکر شده خط چین‌ها خطوط یک به یک جهت مقایسه و خطوط پر رنگ خط برازش معادلات است. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقدار R^2 بین مقادیر تبخیر تعرق مرجع حاصل از معادلات واسنجی و تبخیر تعرق مرجع حاصل از معادله پنمن مانتیس فائو از ۰/۷۷ تا ۰/۹۹ بدست آمده است. با توجه به مقادیر R^2 ، برای ایستگاه‌های بابلسر با اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم، بجنورد با اقلیم نیمه خشک سرد گرم و شوشتر با اقلیم خشک معتدل گرم بهترین نتیجه حاصل از کاربرد معادله واسنجی شده بلانی-کریدل بوده و معادلات هارگریوز و ترنت وایت به ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. برای ایستگاه‌های زرقان با اقلیم نیمه خشک خنک خیلی گرم و گرمسار با اقلیم خشک خنک گرم بهترین نتیجه حاصل از کاربرد معادله واسنجی شده هارگریوز بوده و معادلات بلانی-کریدل و ترنت وایت در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر معادلات حاصل، مقایسه شیب و عرض از مبدا خط روند مقادیر تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فائو با شیب و عرض از مبدا خط ۱:۱ با بهره-

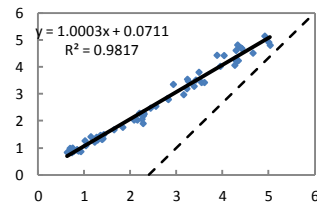
گیری از آزمون F در سطح معنی‌داری یک درصد انجام شد. نتایج بدست آمده در جدول ۴ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از معادله واسنجی شده بلانی کریدل حاصل از هر دو روش واسنجی در ایستگاه‌های بابلسر، بجنورد و گرمسار قابل توصیه است. استفاده از معادله هارگریوز واسنجی شده از روش رگرسیون خطی فقط در ایستگاه گرمسار و معادله حاصل از روش بهینه‌سازی غیرخطی فقط در ایستگاه بابلسر توصیه می‌شود. در خصوص معادله ترنت وایت، معادلات واسنجی شده از روش رگرسیون خطی در ایستگاه‌های بابلسر، زرقان، شوشتر و گرمسار قابل توصیه بوده و استفاده از معادلات ترنت وایت واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیرخطی در هیچکدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه توصیه نمی‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر و انتخاب برترین معادله واسنجی شده در هر اقلیم از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) استفاده شد. بر این اساس و با توجه به جدول ۴، برای معادلاتی که بر اساس آزمون F تفاوت برآوردهای تبخیر تعرق مرجع توسط آنها با نتایج حاصل از روش پنمن مانتیس فائو معنی‌دار نبود، مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نسبی برآورد تبخیر تعرق مرجع محاسبه گردید (جدول ۵). همچنین برای مقادیر تبخیر تعرق مرجع حاصل از معادلات اصلی بلانی-کریدل، هارگریوز و ترنت وایت قبل از انجام واسنجی نیز این شاخص محاسبه شد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۵، برای ایستگاه بابلسر بهترین نتیجه را معادله بلانی-کریدل واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی حاصل نموده است در حالی که به نظر می‌رسد نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از معادله اصلی بلانی-کریدل بسیار نزدیک است. در ایستگاه‌های بجنورد و گرمسار نیز بهترین برآورد حاصل از کاربرد معادله بلانی-کریدل واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی بوده است. برای ایستگاه‌های زرقان و شوشتر تنها معادله ترنت وایت واسنجی شده از روش رگرسیون خطی قابل توصیه است.

جدول شماره ۳- معادلات واسنجی شده بر آورد تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه‌های مختلف.

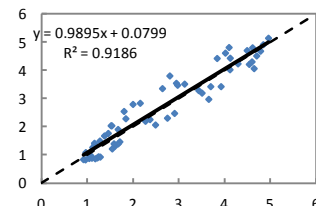
ایستگاه	اقلیم	روش	واسنجی شده با روش بهینه سازی غیر خطی	واسنجی شده با روش رگرسیون خطی
بابلسر	PH-C-W	(BC) بلانی-کریدل	$ET_0 = a + b[P(0.3685T + 9.5921)]$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.2190 + 0.8916 ET_{0\text{ BC}}$
		(H) هارگریوز	$ET_0 = 0.0030 R_A(T + 7.5048)\sqrt{T_R}$	$ET_{0\text{ PMF}} = -0.4504 + 1.1093 ET_{0\text{ H}}$
		(TW) ترنت وایت	$ET_0 = 10.9570(11.4971 t_i/I)^a$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.7000 + 0.7177 ET_{0\text{ TW}}$
بجنورد	SA-K-W	(BC) بلانی-کریدل	$ET_0 = a + b[P(0.2766T + 9.9539)]$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.4693 + 0.7682 ET_{0\text{ BC}}$
		(H) هارگریوز	$ET_0 = 0.0031 R_A(T + 8.3550)\sqrt{T_R}$	$ET_{0\text{ PMF}} = -0.4034 + 1.0981 ET_{0\text{ H}}$
		(TW) ترنت وایت	$ET_0 = 54.7018(5.4162 t_i/I)^a$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.7686 + 1.1954 ET_{0\text{ TW}}$
زرقان	SA-C-VW	(BC) بلانی-کریدل	$ET_0 = a + b[P(0.1824T + 10.9779)]$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.9246 + 0.6147 ET_{0\text{ BC}}$
		(H) هارگریوز	$ET_0 = 0.0014 R_A(T + 30.8061)\sqrt{T_R}$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.2908 + 0.7727 ET_{0\text{ H}}$
		(TW) ترنت وایت	$ET_0 = 26.7512(8.5808 t_i/I)^a$	$ET_{0\text{ PMF}} = 1.7080 + 0.8443 ET_{0\text{ TW}}$
شوشتر	A-M-W	(BC) بلانی-کریدل	$ET_0 = a + b[P(0.3660T + 8.8031)]$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.0932 + 0.8619 ET_{0\text{ BC}}$
		(H) هارگریوز	$ET_0 = 0.0036 R_A(T + 7.7400)\sqrt{T_R}$	$ET_{0\text{ PMF}} = -0.6183 + 1.3384 ET_{0\text{ H}}$
		(TW) ترنت وایت	$ET_0 = 94.7496(5.4410 t_i/I)^a$	$ET_{0\text{ PMF}} = 3.1464 + 0.3239 ET_{0\text{ TW}}$
گرمسار	A-C-W	(BC) بلانی-کریدل	$ET_0 = a + b[P(0.3145T + 8.4254)]$	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.1016 + 0.7645 ET_{0\text{ BC}}$
		(H) هارگریوز	$ET_0 = 0.0031 R_A(T + 7.3265)\sqrt{T_R}$	$ET_{0\text{ PMF}} = -0.6522 + 1.1322 ET_{0\text{ H}}$
		(TW) ترنت وایت	$ET_0 = 31.8102(7.6422 t_i/I)^a$	$ET_{0\text{ PMF}} = 1.3640 + 0.8810 ET_{0\text{ TW}}$



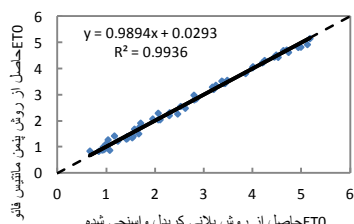
ETO حاصل از روش بلانی کریدل واسنجی شده



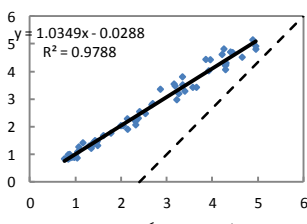
ETO حاصل از روش هارگریوز واسنجی شده



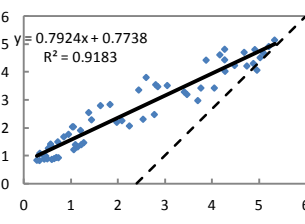
ETO حاصل از روش ترنت وایت واسنجی شده



ETO حاصل از روش بلانی کریدل واسنجی شده



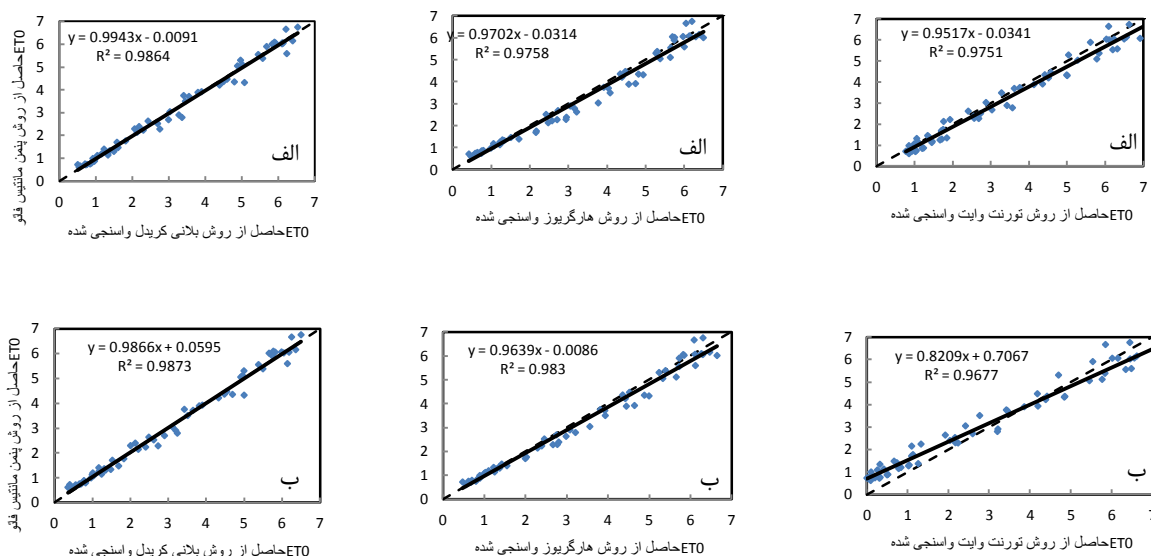
ETO حاصل از روش هارگریوز واسنجی شده



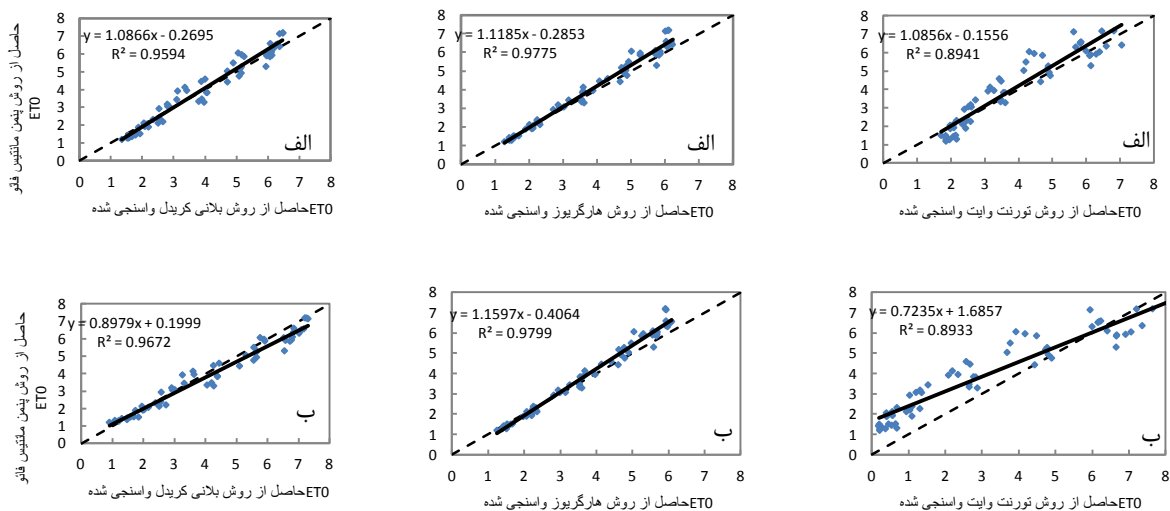
ETO حاصل از روش ترنت وایت واسنجی شده

شکل شماره ۱- مقایسه خط روند تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فانو با خط یک به یک برای ایستگاه بابلسر

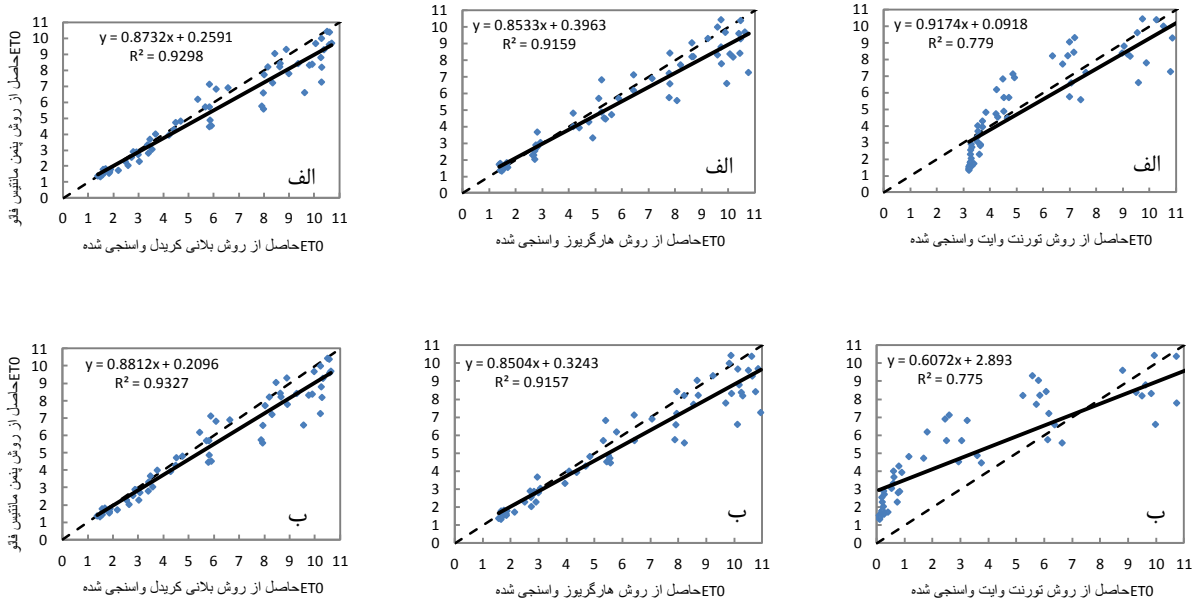
(الف- روش واسنجی رگرسیون خطی، ب- روش واسنجی بهینه‌سازی غیر خطی)



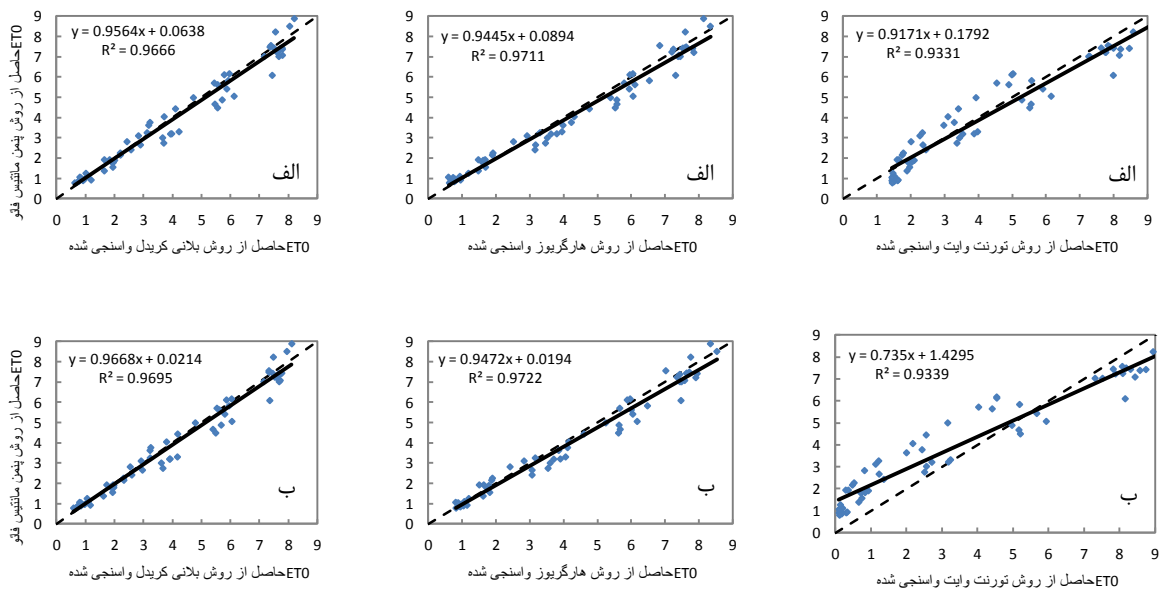
شکل شماره ۲- مقایسه خط روند تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فائو با خط یک به یک برای ایستگاه بجنورد (الف- روش واسنجی رگرسیون خطی، ب- روش واسنجی بهینه‌سازی غیر خطی)



شکل شماره ۳- مقایسه خط روند تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فائو با خط یک به یک برای ایستگاه زرقان (الف- روش واسنجی رگرسیون خطی، ب- روش واسنجی بهینه‌سازی غیر خطی)



شکل شماره ۴- مقایسه خط روند تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فانو با خط یک به یک برای ایستگاه شوشتر (الف- روش واسنجی رگرسیون خطی، ب- روش واسنجی بهینه‌سازی غیر خطی)



شکل شماره ۵- مقایسه خط روند تبخیر تعرق مرجع بدست آمده از روابط واسنجی شده در مقابل مقادیر حاصل از روش پنمن مانتیس فانو با خط یک به یک برای ایستگاه گرمسار (الف- روش واسنجی رگرسیون خطی، ب- روش واسنجی بهینه‌سازی غیر خطی)

جدول شماره ۴- نتایج حاصل از آزمون F در سطح احتمال ۱٪: A: عرض از مبدأ، B: شیب خط

روش بهینه سازی غیر خطی			روش رگرسیون خطی			معادلات	ایستگاه ها
A	B	معادله خط	A	B	معادله خط		
N.S	N.S	$Y = 0.029 + 0.9894X$	N.S	N.S	$Y = 0.0096 + 0.9961X$	بلانی-کریدل	بابلسر
N.S	N.S	$Y = -0.0288 + 1.0349X$	S	N.S	$Y = 0.0710 + 1.0002X$	هارگریوز	
S	S	$Y = 0.7737 + 0.7924X$	N.S	N.S	$Y = 0.0799 + 0.9895X$	ترنت وایت	
N.S	N.S	$Y = 0.0594 + 0.9866X$	N.S	N.S	$Y = -0.0090 + 0.9942X$	بلانی-کریدل	بجنورد
S	N.S	$Y = -0.0086 + 0.9638X$	S	N.S	$Y = -0.0314 + 0.9701X$	هارگریوز	
S	S	$Y = 0.7067 + 0.8209X$	S	N.S	$Y = -0.0341 + 0.9517X$	ترنت وایت	
S	S	$Y = 0.1999 + 0.8979X$	N.S	S	$Y = -0.2694 + 1.0865X$	بلانی-کریدل	زرقان
S	S	$Y = -0.4064 + 1.1597X$	S	S	$Y = -0.2853 + 1.1184X$	هارگریوز	
S	S	$Y = 1.6857 + 0.7235X$	N.S	N.S	$Y = -0.1555 + 1.0856X$	ترنت وایت	
S	S	$Y = 0.2095 + 0.8811X$	S	S	$Y = 0.2591 + 8732X$	بلانی-کریدل	شوشتر
S	S	$Y = 0.3242 + 0.8504X$	S	S	$Y = 0.3963 + 8533X$	هارگریوز	
S	S	$Y = 2.8929 + 0.6071X$	N.S	N.S	$Y = 0.0917 + 0.9174X$	ترنت وایت	
N.S	N.S	$Y = 0.0214 + 0.9668X$	N.S	N.S	$Y = 0.0637 + 0.9564X$	بلانی-کریدل	گرمسار
S	N.S	$Y = 0.0194 + 0.9471X$	N.S	N.S	$Y = 0.0893 + 0.9444X$	هارگریوز	
S	S	$Y = 1.4294 + 0.7350X$	N.S	N.S	$Y = 0.1792 + 0.9171X$	ترنت وایت	

جدول شماره ۵- مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) در برآورد تبخیر تعرق مرجع

RRMSE (%)			معادله	اقلیم	ایستگاه
معادله واسنجی شده از روش بهینه سازی غیر خطی	معادله واسنجی شده از روش رگرسیون خطی	معادله اصلی			
4.25	4.48	8.46	بلانی-کریدل	PH-C-W	بابلسر
8.21	-	9.36	هارگریوز		
-	15.18	25.52	ترنت وایت		
7.28	7.51	23.99	بلانی-کریدل	SA-K-W	بجنورد
-	-	12.58	هارگریوز		
-	-	34.25	ترنت وایت		
-	-	34.45	بلانی-کریدل	SA-C-VW	زرقان
-	-	17.86	هارگریوز		
-	16.57	40.95	ترنت وایت		
-	-	32.83	بلانی-کریدل	A-M-W	شوشتر
-	-	19.28	هارگریوز		
-	26.09	124.97	ترنت وایت		
11.15	11.76	39.81	بلانی-کریدل	A-C-W	گرمسار
-	11.45	12.36	هارگریوز		
-	17.07	28.79	ترنت وایت		

جدول شماره ۶- اولویت بندی معادلات پیشنهادی جهت برآورد تبخیرتعرق مرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه

اولویت	معادله پیشنهادی	اقلیم	ایستگاه
۱	$ET_0 = a + b[P(0.3685T + 9.5921)]$	PH-C-W	بابلسر
۲	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.2190 + 0.8916 ET_{0\text{ BC}}$		
۳	$ET_0 = 0.0030 R_A(T + 7.5048)\sqrt{T_R}$		
۴	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.7000 + 0.7177 ET_{0\text{ TW}}$		
۱	$ET_0 = a + b[P(0.2766T + 9.9539)]$	SA-K-W	بجنورد
۲	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.4693 + 0.7682ET_{0\text{ BC}}$		
۱	$ET_{0\text{ PMF}} = 1.7080 + 0.8443 ET_{0\text{ TW}}$	SA-C-VW	زرقان
۱	$ET_{0\text{ PMF}} = 3.1464 + 0.3239 ET_{0\text{ TW}}$	A-M-W	شوشتر
۱	$ET_0 = a + b[P(0.3145T + 8.4254)]$	A-C-W	گرمسار
۲	$ET_{0\text{ PMF}} = -0.6522 + 1.1322 ET_{0\text{ H}}$		
۳	$ET_{0\text{ PMF}} = 0.1016 + 0.7645 ET_{0\text{ BC}}$		
۴	$ET_{0\text{ PMF}} = 1.3640 + 0.8810 ET_{0\text{ TW}}$		

۴- نتیجه گیری

واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی بوده و معادلات هارگریوز، بلانی-کریدل و ترنت وایت واسنجی شده از روش رگرسیون خطی در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج مطالعه حاضر بیان می‌دارد در شرایطی که در اقلیم‌های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز، برآورد تبخیرتعرق مرجع از روش پنمن مانیتیس فائو ممکن نباشد، با بهره‌گیری از معادلات واسنجی شده می‌توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش پنمن مانیتیس فائو دست یافت.

به عنوان یک نتیجه کاربردی، اولویت بندی معادلات پیشنهادی جهت برآورد تبخیرتعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف در جدول ۶ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد برای ایستگاه بابلسر با اقلیم خیلی مرطوب خنک گرم استفاده از معادله بلانی-کریدل واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی در اولویت بوده و معادله بلانی-کریدل واسنجی شده از روش رگرسیون خطی، معادله هارگریوز واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی و معادله ترنت وایت واسنجی شده از روش رگرسیون خطی در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. در ایستگاه بجنورد با اقلیم نیمه خشک سرد گرم، معادله بلانی-کریدل واسنجی شده از روش بهینه‌سازی غیر خطی و واسنجی شده از روش رگرسیون خطی به ترتیب در اولویت اول و دوم برآورد تبخیرتعرق گیاه مرجع قرار گرفته‌اند. در خصوص ایستگاه‌های زرقان و شوشتر به ترتیب با اقلیم‌های نیمه خشک خنک خیلی گرم و خشک معتدل گرم تنها معادله قابل استفاده بر اساس نتایج این پژوهش، معادله ترنت وایت واسنجی شده از روش رگرسیون خطی است. برای ایستگاه گرمسار با اقلیم خشک خنک گرم، اولویت استفاده با معادله بلانی-کریدل

منابع

- Ahmadi, S. H., & Fooladmand, H. R. 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthait equation: a cas study, south of iran. *Irrigation Science*, 26(4), 303-312.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirement*. Irrigation and Drainage Paper.No.56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Blaney, H.F., Crridle, W.D., 1950. *Determining water requerments in irrigated*

- models in a region with limited data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(2011), 251-258.
- 12- Oki, T., & Kanae, S., 2006 Global hydrological cycle and world water resources. *Science*, 313(1068), 1068-1072.
 - 13- Pereira, A. R., Nova, N. A. V., Pereira, A. S., Barbieri, v. 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agriculture for Meteorologic*. 76, 75-82.
 - 14- Rockstorm, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. 2009. Future water Availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research*, 45, W00A12. Doi: 10.1029/2007WR006767.
 - 15- Snyder, R.L., 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118, 977-980.
 - 16- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman - Monteith, Priestly - Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *J. Hydrol.* 308, 81-140.
 - 17- Walter, I. A., Allen, R. G., Elliott, R., Mecham, B., Jensen, M. E., Itenfisu, D., Howell, T. A., Snyder, R., Brown, P., Eching, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Cuenca, R. H., Right, J. L., Martin, D., 2000. ASCE standardize reference evapotranspiration equation. In: Evans, R. G., Benham, B. L., Trooien, T. P., (Eds), *Proceedings of the Nation Irrigation Symposium, ASAE*, November 14-16, Phoenix, AZ, pp. 209-215
- areas from climatologically and irrigation data. USDA, SCS. SCS-TP-96, 48.
- 4- Bos, M.G., R.A.L. Kselik, R.G. Allen, and D.J. Molden. 2009. *Water Requirements for Irrigation and the Environment*. Springer, 186p.
 - 5- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nation, Land and Water Development Division. 2005. AQUASTAT information system on water and agriculture: Online database. Rome: FAO.
 - 6- Fooladmand, H. R., Ahmadi, S. H., 2009. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ET_0 in south of Iran. *Irrigation and Drainage*, 58(2), 234-245.
 - 7- Gavilan, P., Lorite, I. J., Tornero, S., & Berengena, J. 2006. Regional calibration of Hrgereaves equation for estimate reference ET in semiarid environment. *Agriculture Water Management*, 81, 257-281.
 - 8- Ghafari, A., Ghasemi, V. and Depao, V., 2004, Agricultural climate zone classification with UNESCO method, *Drought and drought*, 12: 30-35.
 - 9- Li, Y., Chen, Z.S., Zhang, B., Wang, J.S., 2005, Study on the method of reference crop evapotranspiration by dependence analysis. *J. Xinjiang Agric. Univ.* 28 (1), 70-72
 - 10- Li, Y., Horton, R., Ren, T., Chen, C. 2009. Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data. *Agricultural Water management*. 97(2010), 300-308.
 - 11- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., Pellikka, P. K. E., 2010. Estimating reference evapotranspiration using sensing empirical