نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۲، فروردین - اردیبهشت ۱۳۹۷، ص. ۲۰۸-۱۹۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 12, Apr.-May. 2018, p. 199-208

انتخاب مناسب‌ترین معادله‌های تجربی تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع و واسنجی ضرایب آن‌ها برای منطقه رشت

هدیه پوریزدان‌خواه[۱]، محمدرضا خالدیان[۲*]، تیمور رضوی‌پور[۳]، مجتبی رضایی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۹

چکیده

با توجه به تغییر اقلیم و خشک‌سالی‌های اخیر، مدیریت صحیح سامانه‌های آبیاری و منابع آب، بسیار با اهمیت است. از طرفی رسیدن به میزان محصول بهینه با توجه به کمبود آب، مستلزم برآورد درست میزان آب مورد نیاز گیاه است به‌طوری که مانع از هدر رفت آب و یا ایجاد تنش آبی در گیاه شود.در این پژوهش، میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع طی سه سال زراعی با استفاده از لایسیمتر اندازه‌گیری شد. سپس با نرم‌افزار Ref-ET، میزان تبخیر-تعرق مرجع با ۱۶ معادله تجربی با استفاده از داده‌های هواشناسی، برآورد شد. معنی‌دار بودن اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از نرم‌افزار SPSSسنجیده شد که معادله‌های تجربی هارگریوز و پریستلی تیلور و پنمن (فائو) به عنوان مناسب‌ترین روش‌ها برای منطقه رشت انتخاب شدند. سپس، برای داده‌های به‌دست آمده از دو سال زراعی و با اعمال رگرسیون غیرخطیدر نرم‌افزار SPSS، ضرایب بهینه برای دو معادله‌ی هارگریوز و پریستلی تیلور برآورد شد و با استفاده از داده‌های به‌دست آمده در سال سوم واسنجی صورت گرفت. مقادیر RMSE وnRMSEبرای ارزیابی محاسبه شد که به‌ترتیب برای معادله هارگریوز بهینه شده ۰/۲۰ میلی‌متر بر روز و ۴/۶۰ درصد و برای معادله پریستلیتیلور بهینه شده به ترتیب ۰/۲۲ میلی‌متر بر روز و ۴/۵ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پریستلی‌تیلور، رشت، رگرسیون غیرخطی، هارگریوز

مقدمه

عمده‌ترین معیار برای تعیین درجه خشکی در یک منطقه، رابطه بین مقدار بارندگی سالانه و توان تبخیر محیط است. هر اندازه مقدار باران نسبت به تبخیر کم‌تر باشد، درجه خشکی آن منطقه بیش‌تر است (نورانی و سیاح‌فرد، ۱۳۹۲). اگرچه باور عمومی بر این بود که استان‌های برنج‌خیز شمالی از این امر مستثنی هستند اما خشک‌سالی-های اخیر، مناطق شمالی ایران را نیز در معرض خطرات کمبود منابع آب قرار داده است. آمارها نشان می‌دهد که میزان بارش و متوسط بلندمدت بارندگی در شهرستان رشت طی سال آبی۸۷-۸۶نسبت به سال‌های قبل آن حدود ۲۵ و ۲۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش در شهرستان‌های دیگر بالغ بر ۳۵ درصد نیز گزارش شده است (بی‌نام، ۱۳۸۷).

برنج زراعت عمده در اراضی استان گیلان بوده و سطح زیر کشت آن با وسعتی نزدیک به ۲۰۵۲۶۹ هکتار، بالغ بر ۳۵/۸۱ درصد از سطح کل برنج‌کاری کشور را شامل می‌شود (ابراهیمی‌راد، ۱۳۸۹). با توجه به اهمیت کشت برنج در استان‌های شمالی کشور، ارزیابی و تعیین نیاز آبی استان و متعاقباً تامین و مدیریت منابع آب استان که عمدتا رودخانه‌ها و استخرهای ذخیره آب است، از مسایل مهم در تخصیص آب در هر منطقه است. از طرفی برای مدیریت صحیح و برنامه‌ریزی زمان و مقدار آبیاری، نیاز است میزان تبخیر-تعرق گیاه در آن منطقه برآورد شود (علیزاده، ۱۳۸۶).تبخیر-تعرق عاملی بسیار مهم برای مدیریت دقیق منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری است (Liu and Luo., 2010) و از عمده‌ترین اجزا چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین درست آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، مطالعات منابع آب و موارد مشابه دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است (Gundekar et al., 2008). تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه ضمن هدر دادن

۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، رشت
۳- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران
۴- استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران
(* - نویسنده مسئول: (Email: khaledian@guilan.ac.ir

آب آبیاری باعث ماندابی شدن اراضی، شستشوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می‌شود. ضمن آن‌که تخمین کم‌تر از حد مورد نیاز گیاه نیز باعث اعمال تنش رطوبتی کنترل شده به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه خواهد داشت (Fathi and Kochakzadeh., 2004).

تبخیر–تعرق گیاه مرجع (ET_0)، همان تبخیر–تعرق پتانسیل (ET_p) برای یک پوشش گیاهی به‌خصوص است که این پوشش گیاهی معمولا چمن یا یونجه انتخاب می‌شود، البته در عمل چمن به‌عنوان گیاه مرجع کاربرد بیش‌تری دارد. در تمام روش‌های محاسباتی نیز تبخیر–تعرق گیاه مرجع محاسبه می‌شود و برای آنکه بتوان آن را به سطوح پوشش مورد نظر تعمیم داد لازم است مقدار تبخیر–تعرق مورد نظر را در ضریب گیاهی (K_c) ضرب نمود تا نیاز آبی گیاه مورد نظر (ET_c) به دست آید (علیزاده، ۱۳۸۶).

نیاز آبی گیاه مورد نظر (ET_c) شامل مجموعه‌ای بسیار پیچیده از فرآیندهایی است که تحت تاثیر عوامل بسیاری است که این عوامل وابسته به موقعیت محل است (Maina et al., 2014). از عوامل محیطی تاثیرگذار بر تبخیر–تعرق، دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی است و از این‌رو معادله‌های تجربی و محاسباتی مختلف بسیاری برای برآورد تبخیر–تعرق به روش غیرمستقیم ارایه شده است (Allen., 2001). تاکنون بیش از ۵۰ روش تبخیر–تعرق گیاه مرجع (ET_0) در قالب روش‌هایترکیبی، آیرودینامیک و تجربی ارایه شده است که اغلب با توجه به داده‌های هواشناسی نتایج متفاوتی دارند (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۸۹). اما انتخاب بهترین روش‌ها برای هر منطقه، مستلزم پژوهش و مقایسه روش‌های مختلف با داده‌های اندازه‌گیری شده از روش مستقیم لایسیمتری و کرت‌هایکنترل شده است و هر روش تجربی با توجه به فرضیات و داده‌های مختلف هواشناسی مورد استفاده در آن نتایج متفاوتی می‌دهد که اغلب تحت واسنجی‌های محلی به‌دست می‌آیند و اعتبار جهانی ندارند (علیزاده، ۱۳۸۳).

در دنیا تحقیقات زیادی در مناطق مختلف انجام شده است تا بهترین معادله تجربی از بین چندین معادله، برای هر منطقه با توجه به شرایط اقلیمی خاص آن محل،انتخاب شود (Racz et al., 2013; Djaman et al., 2015; Xu and Singh., 2002).طی تحقیقی، با توجه به مشکلاتی که در اندازه‌گیری تبخیر–تعرق پتانسیل مرجع به صورت روزانه وجود داشت، در نرم‌افزار EmPEst، معادله پنمن–مونتیث به‌عنوان معادله مرجع در نظر گرفته شد و سایر معادلات تجربی که شامل داده‌های کم‌تری بودند جهت مقایسه با آن انتخاب شدند. مناسب بودن بهترین رابطه براساس مقایسه و تعیین معادله با کم‌ترین اختلاف نسبت به رابطه پنمن–مونتیث بود (Kostinakis et al., 2011).

ازآن‌جا که کشور ایران بسیار وسیع و دارای اقلیم‌های متفاوت است، لازم است در هر منطقه با توجه به داده‌های هواشناسی بهترین روش غیرمستقیم برای برآورد تبخیر–تعرق انتخاب و معرفی شود. البته در بعضی از مناطق ایران مطالعاتی صورت گرفته و روش‌هایی نیز پیشنهاد شده است (زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۸۹؛ انتصاری و همکاران، ۱۳۷۵؛ صمدی و مجدزاده، ۱۳۸۲؛ محمدیان، ۱۳۸۵؛ رحیم-زادگان، ۱۳۷۰)؛ اما متاسفانه تعداد پروژه‌های انجام شده برای تخمین این فاکتور مهم در شالیزارهای شمال کشور، بسیار نادر است.

در تمامی معادلات ارایه شده برای برآورد تبخیر– تعرق،به دلیل ماهیت تجربی آن‌ها، با توجه به شرایط و ویژگی‌های خاص هر منطقه و در بعضی موارد با ساده‌سازی و تطبیق نتایج لایسیمتری، ضرایبی برای معادله‌ها و پارامترهای خاصی از معادله‌ها ارایه شده است که می‌توان به معادله‌های تجربی آیرماک (Irmak et al., 2003)، پنمن– مونتیث (Allen et al., 1998)، تورک(Turc., 1961)، بلانی کریدل (Blaney and Criddle., 1950)، دورنبس–پرویت(Doorenbos and Pruitt., 1977)و بسیاری موارد دیگر اشاره نمود. در نتیجه چنان‌چه عملکرد یک معادله‌ی تجربی برای یک منطقه تایید شود، از آن‌جا که پارامترهای ورودی این معادله‌ها، داده-های هواشناسی هستند، می‌توان با استفاده از روش‌های رگرسیونی، ضرایب بهینه‌شده برای منطقه مورد بررسی را ارایه نمود.

روش‌های آماری، مانند مدل‌های رگرسیونی، بهترین ابزار برای بررسی روابط بین نمونه‌های کوچک از متغیرهای مستقل و وابسته است (Razi and Athappilly., 2005). روش رگرسیون غیرخطی، در واقع رابطه‌ی غیرخطی بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل است که براساس کمینه‌سازی مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده است.

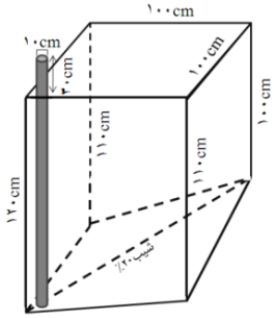
موسوی‌بایگی و همکاران(۱۳۸۸) طی پژوهشی موردی برای استان خراسان رضوی، با استفاده از داده‌های لایسیمتری، مقادیر تبخیر–تعرق گیاه مرجع محاسبه شده با روش فائو پنمن– مونتیث و تشت تبخیر و همچنین اعمال ضرایب اصلاحی ماهانه وسالانه را مورد مقایسه قرار دادند و روابط اصلاحی هر روش را ارایه دادند. همچنین با رگرسیون بین مقادیر دمای هوا، تابش و ضریب رطوبتی معادله ساده ماهانه و سالانه با ضریب تبیین‌های ۰/۹۹ و ۰/۹۲ ارایه نمودند.

بنابراین با بررسی مسایل عنوان شده و به دلیل خطر مواجه با کمبود منابع آب در استان گیلان، هدف از اجرایاین پژوهش انتخاب معادله‌های مناسب برای منطقه مورد بررسی با استفاده از داده‌های هواشناسی و مقایسه آن‌ها با داده‌های لایسیمتری بود که با استفاده از رگرسیون غیرخطی مقدار ضرایب معادله‌ها با در نظر گرفتن دو سال زراعی اصلاح شد و با استفاده از داده‌های سال سوم معادله‌های بهینه شده واسنجی شدند، تا بتوان بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، برای مدیریت صحیح آب در منطقه، میزان تبخیر–تعرق را در کل

منطقه با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد نمود.

مواد و روش‌ها

برایاندازه‌گیری تبخیر-تعرق به روش مستقیم، دو عدد لایسیمتر آهنی ته‌بسته با سطح مقطع ۱×۱متر که از عمق ۱متر در یک گوشه از آن به ۱/۲متر در گوشه روبه‌رو می‌رسد، در موسسه تحقیقات برنج کشور نصب شد. به‌طوری‌که در اضلاع جانبی عمق ۱/۱متر و در کف آن شیب ۲۰٪ ایجاد شد. در قسمت پایین شیب آن، یک لوله پولیکا به‌طور عمودی کار گذاشته شد و سطح آن حدود ۳۰ سانتی‌متر بالای سطح لایسیمتر قرار گرفت (شکل ۱).



شکل۱-نمای ترسیمی از لایسیمتر

زهاب جمع‌آوری شده در لوله به‌وسیله‌ی یک پمپ دستی پلاستیکی به بیرون پمپاژ شد و به‌وسیله‌ی ظروف مدرج اندازه‌گیری شد. زمین اطراف هر لایسیمتر چمن حدود۶۰۰ مترمربع بود که بعد از نصب لایسیمترها در وسط زمین و کاشت گیاه چمن در داخل و خارج لایسیمترها، به‌صورت روزانه اندازه‌گیری‌ها انجام شد و در نهایت محاسبات برای دوره‌های ده روزه براساس معادله‌ی بیلان آبی انجام شد. برایایجاد چاله برای جای دادن لایسیمترها درداخل خاک،۳۰ سانتی‌متر ازهریک ازلایه‌های خاک دریک‌جا جمع‌آوری شد و پس ازقراردادن لایسیمتر در درون خاک، ابتدا۱۰سانتی‌متر آن با شن‌هایی به قطر تقریبا ۷میلی‌متر پر شد و سپس لایه‌های خاکبا رعایت عمق درلایسیمتر ریخته و به‌خوبی‌کوبیده شد. لایسیمترها چند روز به‌طور مرتب آبیاری شدند تالایه‌های خاک حالت طبیعی خود رابه‌دست آوردند.برای جلوگیری ازتنش رطوبتی درگیاه چمن و برای این‌که حد رطوبت ظرفیت زراعی (FC) تقریبا ثابت باشد، آبیاری روزانهبه‌اندازه‌ی تبخیر ازتشت تبخیر و زهکشی در دوره‌های پنج روزه انجام شد.

برای اندازه‌گیری عمق آب در لایسیمترها، در داخل هریک از آن‌ها یک خط‌کش مدرج چوبی کارگذاشته شد. درنهایت مقدار تبخیر-تعرق متوالی برای دوره‌های ده روزه با معادله بیلان آب (رابطه ۱)، براساس آمار روزانه جمع‌آوری شده واز سه سال زراعی متوالی، متوسط‌گیری شد.

$$ET = I + P - RO - Dr - \Delta W \qquad (۱)$$

که در آن، ET مقدار تبخیر - تعرق؛ I مقدار آبیاری؛ P مقدار بارندگی؛ ROرواناب سطحی که از زمین خارج می‌شود که در این تحقیق عملا صفر است؛Drمقدار آب زهکش شده که با پمپ دستی برای اندازه‌گیری، پمپاژ می‌شد و ΔWتغییرات رطوبت در حجم کنترل شده از خاک (لایسیمتر) است. مقدار تبخیر به‌وسیله دو عدد تشتتبخیر از نوع کلاس A ومقدار بارندگی نیز توسط دو عدد باران‌سنج ذخیره‌ای اندازه‌گیری شدند. درطول آزمایش سعی براین بوده است‌که شرایط داخل لایسیمترها با محیط اطراف از نظر رشد گیاهی وسایر شرایط یکسان نگه داشته شود و متوسط عملکرد در واحد سطح نیز یکسان بوده و تفاوتی نداشته باشند.

برای انجام محاسبات مربوط به معادله‌های تجربی، داده‌های هواشناسی مربوط به دوره‌های ده روزه از خرداد تا شهریور در طی سه سال متوالی، از ایستگاه هواشناسی رشت، با موقعیت جغرافیایی به عرض N ۱۵′ ۳۷° و طول E ۳۶′ ۴۹° که در ارتفاع ۶/۹- متری از سطح دریا قرار دارد، تهیه شد. متوسط داده‌های ده روزه ایستگاه هواشناسی فرودگاه رشت به‌عنوان نزدیک‌ترین و قابل اعتمادترین ایستگاه جمع‌آوری شد.

اطلاعات هواشناسی به عنوان ورودی به نرم‌افزار Ref-ET(Allen., 2001)داده شد. نرم‌افزار Ref-ETدر سال ۲۰۰۱ با هدف ایجاد یک برنامه استاندارد برای محاسبه روش‌های مختلف تبخیر- تعرق و امکان مقایسه آن‌ها با یکدیگر، در دانشگاه آیداهو براساس معادلات پیشنهاد شده توسط فائو[1] و انجمن مهندسان عمران آمریکا[2]تهیه شد که، شامل ۱۷ روش است. در این تحقیق، نتایج فرمول‌های تجربی تورک[3](۱۹۶۱)، ماکینک[4](۱۹۵۷)، پریستلی‌تیلور[5](۱۹۷۲)، هارگریوز[6](۱۹۸۵)، تشت تبخیر[7] (فائو)، بلانی-کریدل[8] (فائو ۲۴)، تابش[9] (فائو ۲۴)، پنمن[10] (فائو ۲۴)، پنمن (۱۹۷۹)، پنمن (۱۹۴۸)، پنمن-کیمبرلی[11](۱۹۷۲ و ۱۹۹۶) و پنمن-مونتیث[12] (فائو ۵۶ و انجمن مهندسان عمران آمریکا) و پنمن-مونتیث استاندارد شده برای گیاهان بلند و کوتاه (انجمن مهندسان

1- FAO
2- ASCE
3- Turc
4- Makkink
5- Priestley-Taylor
6- Hargreaves
7- Pan Evaporation
8- Blaney-Criddle
9- Radiation
10- Penman
11- Kimberly Penman
12- Penman-Montieth

عمران آمریکا) موجود در نرم‌افزار Ref-ET با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد. تنها روش پنمن (فائو ۵۶) در این نرم‌افزار انتخاب نشد، زیرا نیاز به داده‌ها به‌صورت ساعتی دارد که در دسترس نبود. با توجه به تحقیقات آیتک (Aytek., 2008) و لین و همکاران (Lin et al., 2008) فرض همبستگی داده‌های هواشناسی و مقادیر تبخیر-تعرق پذیرفته شده است.

برای مقایسه مقادیر حاصل از فرمول‌های تجربی و داده‌های لایسیمتری از شاخص آماریRMSEو ضریب همبستگی (R) استفاده شد. برای مشاهده معنی‌دار بودن این اختلافات در سطح ۵٪ از تستTموجود در نرم‌افزار SPSSبرای مقایسه داده‌های جفت استفاده شد و در بین روش‌های مورد بررسی، روش‌هایی که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر برآورد شده حاصل از آن‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر برای منطقه انتخاب شدند. سپس با استفاده از رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار SPSSو اعمال داده‌های هواشناسی برای دو سال اول، ضرایب معادله‌ها بهینه شد و با استفاده از معادله‌های بهینه شده، مقادیر تبخیر-تعرق برای سال سوم برآورد شدند. مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده حاصل از لایسیمتر در سال سوم با شاخص‌های آماری RMSEو nRMSEو معنی‌دار بودن آن با نرم‌افزار SPSSدر سطح ۵ درصد بایکدیگر مقایسه شدند.

نتایج و بحث

جدول ۱ متوسط سه ساله‌ی مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط هر فرمول را نشان می‌دهد.جدول ۲ مقادیر حاصل از نرم‌افزار SPSSرا نشان می‌دهد، این نتایج نیزنشان می‌دهد که برای فرمول‌های تجربی هارگریوز، پریستلی‌تیلور و پنمن (فائو ۲۴) در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده است که بیانگر این است که مقادیر برآورد شده از طریق این فرمول‌های تجربی با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر شبیه‌اند. طی تحقیقی مشابه که برای منطقه یوبرابا[1] در ایالت میناس گرایس برزیل انجام شد، ده روش جنسن-هایز، بلانی-کریدل، کامارگو[2]، تورنت وایت، ماکینک، هارگریوز-سامانی، تابش خورشیدی، لیناکر[3]،پرستلی تیلور و پنمن با یکدیگر با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه شدند. روش ماکینک و کامارگو بهترین روش‌ها براساس شاخص عملکرد شناخته شدند و روش هارگریوز-سامانی دارای بالاترین ضریب همبستگی بود (Melo and Fernandes., 2012).

جدول۳ ماتریس ضریب همبستگی (R) مقادیر را نسبت به یکدیگر با در نظر گرفتن میانگین سه سال زراعی، نشان می‌دهد. با توجه به این جدول به ترتیب هارگریوز، پریستلی‌تیلور و پنمن (فائو R(۲۴ بیش‌ترین مقدار را دارند. درکل، نتایج نشان داده است که به ترتیب، معادله‌های تجربی هارگریوز، پنمن (فائو ۲۴) و پریستلی‌تیلور برای منطقه رشت، روش‌های قابل‌قبولی هستند که به مقادیر واقعی نزدیک‌ترند. معادله‌ی اصلاح شده‌ی پنمن که توسط متخصصان سازمان فائو ارایه شده است به‌صورت رابطه ۲ ارایه شده است (Doorenbos and Pruitt., 1977).

$$ET_0 = C\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}R_n + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(0.27)(1.0 + 0.01U_{2m})(e_s - e_a)\right] \quad (۲)$$

که در آن ET_0تبخیر-تعرقگیاه مرجع چمن (mm/day)؛ R_nتابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)؛ U_{2day}سرعت باد در ارتفاع ۲متری از سطح زمین (Km/day)؛ Δشیب منحنی فشاربخار اشباع که براساس دمای متوسط هوا محاسبه می‌شود؛ γضریب رطوبتی که براساس دمای هوا و ارتفاع محل از سطح دریا محاسبه می‌شود؛ (e_s-e_a) کمبود فشاربخار اشباع است که با داشتن اطلاعات دمای هوا و رطوبت نسبی قابل برآورد است وCضریب اصلاحی که با داشتن سرعت باد در روز و شب،رطوبت نسبی حداکثر و تابش خورشیدی (R_s) قابل محاسبه است.

پریستلی و تیلور (Priestly and Taylor., 1972) تلاش کردند تا فرآیند تبخیر را با استفاده از مفهوم شرایط تعادل توضیح دهند، حالتی که در آن هوا در تماس با سطح مرطوب از بخار اشباع است. با محاسبه و تعریف فرضیاتی و در نظر گرفتن ضریب ۱/۲۶ رابطه ۳ را معرفی نمودند.

$$ET_0 = 1.26\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right]\left(\frac{R_n + G}{\lambda}\right) \quad (۳)$$

که در آن Gشار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) و λگرمای نهان تبخیر ($MJ\ kg^{-1}$) است. سایر پارامترها در روش پنمن ذکر شد. معادله‌ی هارگریوز- سامانی(Hargreaves and Samani., 1985)به‌صورت رابطه ۴ ارایه شد.

$$ET_\circ = 0.0023R_a(T + 17.8)\sqrt{TR} \quad (۴)$$

که در آن، R_aتابش برون زمینی (mm/day) است که با داشتن فاصله نسبی زمین تا خورشید، عرض جغرافیایی و زاویه میل خورشیدی قابل برآورد است؛ Tمیانگین دمای روزانه و TRاختلاف بیش‌ترین و کم‌ترین دما می‌باشد (°C).

با مقایسه‌ی سه روش هارگریوز، پریستلی‌تیلور و پنمن (فائو ۲۴) مشاهده می‌شود که اطلاعات مورد نیاز در روش هارگریوز و پریستلی‌تیلور برای برآورد تبخیر-تعرق کم‌تر از معادله پنمن (فائو ۲۴) است ولی مطلوبیت روش پنمن را می‌توان ناشی از بیش‌تر بودن پارامترهای تاثیرگذار هواشناسی در میزان تبخیر-تعرق در این مدل

1- Uberaba
2- Camargo
3- Linacre

دانست (Rahimi Khoob., 2008).

جدول ۱- متوسط سه سال مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل محاسبه شده با فرمول‌های تجربی و داده‌های لایسیمتری(mm/day)؛ Lys(data): داده‌های به دست آمده از لایسیمتر؛ PM: پنمن مونتیث؛PMrs: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان بلند؛ stPM: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان کوتاه؛ KPen: کیمبرلی پنمن؛Pen: پنمن؛ RD: تابش؛BC: بلانی کریدل؛ Pan: تشتک تبخیر؛Harg: هارگریوز؛ Prs-Tylr: پریستلی تیلور؛Makk: ماکینک؛ Turc: تورک.

Lys Data	PM ASCE	PMrs ASCE	stPM ASCE	PM فائو۵۶	KPen ۱۹۹۶	Kpen ۱۹۷۲	Pen ۱۹۴۸	Pen فائو۲۴	Pen ۱۹۷۹	Rd فائو۲۴	BC فائو۲۴	Pan فائو	Harg ۱۹۸۵	Prs-Tylr	Makk ۱۹۵۷	Turc ۱۹۶۱	دهه	ماه
۴/۶۹	۴/۰۸	۴/۰۸	۴/۰۸	۴/۰۷	۴/۴۶	۳/۹۸	۴/۵۸	۴/۹۸	۴/۵۸	۴/۷۲	۴/۳۵	۳/۴۵	۴/۶۷	۴/۸۳	۳/۷۰	۵/۴۸	۱	
۴/۷۲	۳/۳۲	۳/۳۲	۳/۳۲	۳/۳۲	۳/۶۳	۳/۱۹	۳/۷۶	۳/۹۰	۳/۷۶	۳/۵۳	۳/۴۴	۳/۱۳	۴/۱۸	۳/۹۶	۲/۸۶	۳/۵۱	۲	۳
۴/۸۷	۳/۸۷	۳/۸۷	۳/۸۷	۳/۸۷	۴/۰۵	۳/۵۰	۴/۳۵	۴/۶۲	۴/۳۵	۴/۳۴	۴/۱۰	۳/۳۴	۴/۶۷	۴/۶۵	۳/۴۳	۴/۱۴	۳	
۴/۷۵	۴/۰۷	۴/۰۷	۴/۰۷	۴/۰۷	۴/۳۱	۳/۷۶	۴/۵۶	۴/۹۲	۴/۵۶	۴/۶۳	۴/۳۸	۳/۴۸	۴/۸۸	۴/۸۴	۳/۶۲	۴/۳۳	۱	
۴/۷۳	۳/۸۹	۳/۸۹	۳/۸۸	۳/۸۸	۳/۹۰	۳/۳۷	۴/۳۵	۴/۶۰	۴/۳۵	۴/۲۲	۴/۱۳	۳/۴۵	۴/۷۷	۴/۶۷	۳/۳۹	۴/۱۲	۲	۴
۵/۰۳	۴/۹۰	۴/۹۰	۴/۸۸	۴/۸۸	۴/۹۴	۴/۳۷	۵/۴۶	۶/۰۴	۵/۴۶	۵/۷۳	۵/۴۵	۴/۱۳	۵/۳۴	۵/۷۶	۴/۳۵	۵/۱۵	۳	
۵/۲۳	۴/۱۰	۴/۱۰	۴/۰۹	۴/۰۹	۴/۲۳	۳/۷۱	۴/۶۱	۴/۹۴	۴/۶۱	۴/۵۴	۴/۴۹	۳/۳۶	۴/۸۳	۴/۸۳	۳/۵۴	۴/۳۹	۱	
۵/۰۰	۴/۳۳	۴/۳۳	۴/۳۱	۴/۳۱	۴/۵۰	۳/۹۵	۴/۸۵	۵/۲۳	۴/۸۵	۴/۹۵	۴/۸۱	۳/۸۹	۵/۰۶	۵/۱۲	۳/۸۴	۴/۶۲	۲	۵
۴/۷۱	۳/۴۸	۳/۴۸	۳/۴۷	۳/۴۷	۳/۷۷	۳/۲۹	۳/۹۱	۴/۰۷	۳/۹۱	۳/۷۳	۳/۷۹	۲/۶۷	۴/۴۱	۴/۰۹	۳/۰۰	۳/۷۲	۳	
۵/۰۳	۳/۳۰	۳/۳۰	۳/۲۹	۳/۲۹	۳/۶۳	۳/۱۶	۳/۳۴	۳/۸۶	۳/۳۴	۳/۵۴	۳/۶۸	۲/۸۹	۴/۳۱	۳/۷۸	۲/۸۲	۳/۵۲	۱	
۴/۷۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۴	۳/۳۴	۳/۸۰	۳/۳۱	۳/۷۷	۳/۹۶	۳/۷۷	۳/۸۱	۳/۸۷	۲/۹۶	۴/۳۴	۳/۸۲	۲/۹۹	۳/۶۹	۲	۶
۴/۰۹	۲/۸۶	۲/۸۶	۲/۸۵	۲/۸۵	۳/۳۵	۲/۹۰	۳/۳۳	۳/۳۱	۳/۲۴	۳/۲۴	۳/۲۸	۲/۹۴	۳/۶۲	۳/۲۴	۲/۵۹	۳/۲۵	۳	

جدول ۲- مقادیر sig. به‌دست آمده از نرم‌افزارSPSS:PM؛ پنمن مونتیث؛ PMrs: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان بلند؛ stPM: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان کوتاه؛ KPen: کیمبرلی پنمن؛ Pen: پنمن؛ RD: تابش؛ BC: بلانی کریدل؛ Pan: تشتک تبخیر؛ Harg: هارگریوز؛ Prs-Tylr: پریستلی تیلور؛ Makk: ماکینک؛ Turc: تورک.

PM ASCE	PMrs ASCE	stPM ASCE	PM فائو۵۶	KPen ۱۹۹۶	KPen ۱۹۷۲	Pen ۱۹۴۸	Pen فائو۲۴	Pen ۱۹۷۹	Rd فائو۲۴	BC فائو۲۴	Pan فائو	Harg ۱۹۸۵	Prs-Tylr	Makk ۱۹۵۷	Turc ۱۹۶۱	
**	**	**	**	**	**	n.s ۰/۰۰۳**	n.s ۰/۱۲۵	۰/۰۰۴**	۰/۱۶*	۰/۰۰۳**	**	n.s ۰/۲۳۶	۰/۰۳۳*	**	n.s ۰/۲۱۹	سال اول
**	**	**	**	۰/۰۰۱**	**	n.s ۰/۰۰۳**	n.s ۰/۲۵۲	۰/۱۶*	۰/۴۶*	۰/۰۱*	۰/۰۱۳*	n.s ۰/۰۵۷	n.s ۰/۱۱۸	**	۰/۰۰۲**	سال دوم
۰/۰۰۱**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۵**	**	۰/۰۶۳	n.s ۰/۵۱۱	n.s ۰/۰۶۳	n.s ۰/۱۰۴	۰/۰۲۷*	**	n.s ۰/۵۱۲	n.s ۰/۴۴۷	**	۰/۰۱۳*	سال سوم

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطوح ۵ و ۱ درصد، n.s اختلاف معنی‌دار نیست

جدول ۳- ماتریس ضریب همبستگی (R) برای متوسط سه سال زراعی؛ Lys (data): داده‌های به دست آمده از لایسیمتر؛ PM: پنمن مونتیث؛ PMrs: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان بلند؛ stPM: پنمن مونتیث استاندارد شده برای گیاهان کوتاه؛ KPen: کیمبرلی پنمن؛ Pen: پنمن؛ RD: تابش؛ BC: بلانی کریدل؛ Pan: تشتک تبخیر؛ Harg: هارگریوز؛ Prs-Tylr: پریستلی‌تیلور؛ Makk: ماکینک؛ Turc: تورک.

		Lys Data	PM ASCE	PMrs ASCE	stPM ASCE	PM فائو۵۶	KPen ۱۹۹۶	KPen ۱۹۷۲	Pen ۱۹۴۸	Pen فائو۲۴	Pen ۱۹۷۹	Rd فائو۲۴	BC فائو۲۴	Pan فائو	Harg ۱۹۸۵	Prs-Tylr	Makk ۱۹۵۷	Turc ۱۹۶۱
Lys	Data	۱																
PM	ASCE	۰/۶۲۷	۱															
PMrs	ASCE	۰/۶۲۷	۱	۱														
stPM	ASCE	۰/۶۲۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱													
PM	فائو۵۶	۰/۶۲۷	۰/۶۲۷	۰/۹۹۹	۱	۱												
KPen	۱۹۹۶	۰/۵۶۴	۰/۹۷۵	۰/۹۷۵	۰/۹۷۵	۰/۹۷۵	۱											
KPen	۱۹۷۲	۰/۵۵۴	۰/۹۶۴	۰/۹۶۴	۰/۹۶۴	۰/۹۶۴	۰/۹۷۷	۱										
Pen	۱۹۴۸	۰/۶۳۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۷۵	۰/۹۶۵	۱									
Pen	فائو۲۴	۰/۶۱۴	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۸۳	۰/۹۷۴	۰/۹۹۸	۱								
Pen	۱۹۷۹	۰/۶۳۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۷۹	۰/۹۶۵	۱	۰/۹۹۹	۱							
Rd	فائو۲۴	۰/۴۵۶	۰/۹۸۷	۰/۹۸۷	۰/۹۸۶	۰/۹۸۶	۰/۹۹۱	۰/۹۸۳	۰/۹۸۶	۰/۹۹۲	۰/۹۸۶	۱						
BC	فائو۲۴	۰/۶۱۴	۰/۹۷۹	۰/۹۷۹	۰/۹۷۷	۰/۹۷۷	۰/۹۷۱	۰/۹۶۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۰	۰/۹۷۷	۰/۹۸۲	۱					
Pan	فائو	۰/۴۲۰	۰/۹۰۱	۰/۹۰۱	۰/۹۰۱	۰/۹۰۱	۰/۸۸۱	۰/۸۷۰	۰/۹۰۰	۰/۹۰۴	۰/۹۰۰	۰/۹۱۵	۰/۸۹۲	۱				
Harg	۱۹۸۵	۰/۷۲۹	۰/۹۶۹	۰/۹۶۹	۰/۹۶۹	۰/۹۶۹	۰/۹۲۲	۰/۹۰۳	۰/۹۶۹	۰/۹۶۱	۰/۹۶۹	۰/۹۳۲	۰/۹۴۴	۰/۸۲۹	۱			
Prs-Tylr		۰/۶۱۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۰/۹۶۹	۰/۹۶۹	۰/۹۶۰	۰/۹۴۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۲	۰/۹۹۵	۰/۹۷۴	۰/۹۵۶	۰/۸۹۶	۰/۹۶۹	۱		
Makk	۱۹۵۷	۰/۵۵۰	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۹۲	۰/۹۸۶	۰/۹۷۷	۰/۹۹۱	۰/۹۹۵	۰/۹۹۱	۰/۹۹۷	۰/۹۷۷	۰/۹۱۷	۰/۹۴۴	۰/۹۸۵	۱	
Turc	۱۹۶۱	۰/۳۹۷	۰/۸۷۱	۰/۸۷۱	۰/۸۷۱	۰/۸۷۱	۰/۹۲۱	۰/۹۳۳	۰/۸۷۲	۰/۸۸۵	۰/۸۷۲	۰/۹۰۴	۰/۸۳۸	۰/۷۸۲	۰/۷۸۸	۰/۸۶۶	۰/۹۰۳	۱

معادله پریستلی‌تیلور در واقع خلاصه شده‌ی معادله پنمن است و برای مناطق بدون تنش آبی و یا تنش آبی کم مناسب می‌باشد زیرا در مناطق با تنش آبی کم ۹۵٪ از آب تبخیر می‌شود (Stagnitti et al., 1989). بنابراین برای دو معادله پریستلی تیلور و هارگریوز، ضرایب ارایه شده در روابط ۳ و ۴ با استفاده از رگرسیون غیرخطی و با تعریف روابط در نرم‌افزار SPSSبرای منطقه رشت بهینه شد.

در محاسبات نیاز آبی به دلیل فرض پوشش کامل گیاه مرجع، شار گرما به داخل خاک صفر فرض می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۶)، بنابراین برای معادله پریستلیتیلور شار گرما به داخل خاک (G) برابر با صفر در نظر گرفته شد و داده‌های هواشناسی دو سال زراعی اول مانند گرمای نهان تبخیر (λ)، تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (R_n)، ضریب رطوبتی (γ) و شیب منحنی فشار بخار (Δ) به عنوان متغیرهای مستقل و تبخیر – تعرق حاصل از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در همان دو سال به‌عنوان متغیر وابسته در نرم‌افزار تعریف شد که ضریب حاصل برابر با ۱/۵۱۸۷ بدست آمد و معادله حاصل برای منطقه رشت به صورت رابطه ۵ است.

$$T_0 = 1.5187\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right]\left(\frac{R_n+G}{\lambda}\right) \quad (۵)$$

برای معادله هارگریوز نیز، تبخیر-تعرق حاصل از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری در طی دو سال زراعی به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تابش برون‌زمینی (R_a)، متوسط دمای روزانه (T) و اختلاف بیش‌ترین و کم‌ترین دما (TR) در دو سال اول به عنوان متغیرهای مستقل برای نرم‌افزار SPSSتعریق شدند و با اعمال رگرسیون غیرخطی، به ترتیب ضرایب ۰/۰۰۱۴۲۸۵ و ۸/۵۸۹۲ حاصل شد که معادله حاصل به صورت رابطه ۶ زیر است.

$$ET_\circ = 0.0014285R_a(T+8.5892)\sqrt{TR} \quad (۶)$$

با استفاده ار داده‌های تبخیر-تعرق لایسیمتری در سال سوم، معادله‌های حاصل واسنجی شدند. مقادیرRMSEو nRMSEبرای ارزیابی محاسبه شد که برای هارگریوز بهینه شده به ترتیب ۰/۲۰ میلی‌متر بر روز و ۴/۶۰ و برای پریستلی‌تیلور بهینه شده ۰/۲۲ میلی-متر بر روز و ۴/۵۰ برآورد شد که RMSEهای حاصل در محدوده‌ی قابل‌قبول هستند و مقدار nRMSEزیر ۱۰درصد است که بیان کننده ارزیابی عالی معادلات می‌باشد(Jamieson et al., 1991). همچنین معنی‌دار بودن اختلاف نیز با تست Tموجود در نرم‌افزار SPSSسنجیده شد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر تبخیر-تعرق لایسیمتری و برآورد شده وجود نداشت (P>٪۵).

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعهواسنجی ضرایب معادله‌های تجربی برای منطقه رشت است. بدین منظور روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق مرجع موجود در نرم‌افزار Ref-ETبا مقادیر اندازه‌گیری‌شده با لایسیمتر مقایسه شدند که سه روش هارگریوز، پریستلی‌تیلور و پنمن (فائو ۲۴) به‌عنوان بهترین روش‌ها شناخته شدند که با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، در نرم‌افزار SPSSو اعمال داده‌های دو سال زراعی و تعریف پارامترهای مستقل و وابسته، ضرایب معادله‌های پریستلی‌تیلور و هارگریوز بهینه شدند که برای پریستلیتیلور ضریب ۱/۵۱۸۷ و برای هارگریوز به ترتیب ضرایب ۰/۰۰۱۴۲۸۵ و ۸/۵۸۹۲ بدست آمد.

معادله‌های حاصل با استفاده از داده‌های لایسمیتری اندازه‌گیری شده در سال سوم اعتبارسنجی شدند و شاخص‌های RMSEو nRMSEبا یکدیگر مقایسه شدند. معنی‌دار بودن این اختلاف نیز با آزمون Tموجود در نرم‌افزار SPSSسنجیده شد که نتایج حاصل نشان داد که معادله‌های بهینه‌شده به خوبی قادر است تبخیر-تعرق را برآورد کند. همچنین اختلاف معنی‌داری نیز بین مقادیر تبخیر-تعرق اندازه-گیری شده در سال سوم و مقادیر برآورد شده‌ی آن وجود نداشت.پیشنهاد می‌شود که با استفاده از داده‌های هواشناسی در سال-های اخیر و با روندیابی، میزان داده‌های هواشناسی در سال‌های آتی پیش‌بینی شود و با استفاده از معادله‌های بهینه‌شده، مقدار تبخیر-تعرق را برای منطقه و متعاقبا نیاز آبی استان برآورد شود تا بتوان با توجه به مساحت سطح زیر کشت برنج در منطقه و اطلاع از حجم منابع آب موجود، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیحی برای تخصیص آب صورت گیرد.

منابع

ابراهیمی‌راد، ح. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات کیفیت آب آبیاری شبکه سفیدرود در دوره‌های مختلف رشد بر عملکرد برنج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی.

انتصاری،م.ر.، نوروزی،م.، سلامت،ع.ر.، احسانی،م.، توکلی،ع.ر. ۱۳۷۵. مقایسه روش پنمن- مانتیث با سایر روش‌های توصیه شده جهت مجاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل (ET_0) در چند منطقه مختلف ایران، مجموعه مقالات هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱: ۲۳۷-۲۲۱.

بی‌نام. ۱۳۸۷. آمار سالیانه هواشناسی استان گیلان، سازمان هواشناسی استان گیلان.

رحیم‌زادگان،ر. ۱۳۷۰. جستجوی روش مناسب برآورد تبخیر-تعرق در منطقه اصفهان.. مجله علوم کشاورزی ایران. شماره ۲۲. ۱ - ۲: ۹-۱.

زارع ابیانه،ح.، بیات ورکشی،م.، سبزی‌پرور،ع.ا.، معروفی،ص.، قاسمی،ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر – تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی: ۱۱۰-۹۵.

صمدی،ح.، مجدزاده،ب. ۱۳۸۲. مقایسه تبخیر – تعرق گیاه مرجع محاسبه شده به وسیله فرمول‌های تجربی با لایسیمتر در کرمان، مجموعه مقالات هشتمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر: ۲۲-۱۹.

علیزاده،ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا. مشهد.

علیزاده،ا. ۱۳۸۶. طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی (جلد اول)، انتشارات دانشگاه امام رضا. مشهد.

محمدیان،ا. ۱۳۸۵. اندازه‌گیری تبخیر- تعرق از روش بیلان انرژی و مقایسه آن با روش مستقیم و غیرمستقیم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

موسوی بایگی،م.، عرفانیان،م.، سرمد،م. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع و ارایه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). مجله آب و خاک شماره ۲۳. ۱: ۹۹-۹۱.

نورانی،و.، سیاح‌فرد،م. ۱۳۹۲. آنالیز حساسیت داده‌های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی به منظور برآورد مقدار تبخیر روزانه، آب و فاضلاب. ۳: ۱۰۰-۸۸.

Allen,R.G. 2001. REF-ET reference evapotranspiration software, version 2.0. For FAO and ASCE standardized equations. Kimberly, Idaho: University of Idaho Research and Extension Center.

Allen,R.G., Pereira,L.S., Raes,D., Smith,M. 1998. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements), FAO irrigation and drainage Paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 300p.

Aytek,A. 2008. Co-active neuro-fuzzy Inference system for evapotranspiration modeling, soft computing-a fusion of foundations, Methodologies and Applications. 13.7: 691-700.

Blaney,H.F., Criddle,W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Paper 96, 48p.

Melo,G.L., Fernandes,A.L.T. 2012. Evalution of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Engenharia Agricola. 32. 5: 875-888.

Djaman,K., Balde,A.B., Sow,A., Muller,B., Irmak,S., NDiaye,M., Manneh,B., Moukoumbi,Y.D., Futakuchi,K., Saito,K. 2015. Evalution of sixteen reference evapotranspirstion methods under sahelian condition in the Senegal River Valley. Journal of Hydrology: Regional Studies. 3: 139-159.

Doorenbos,J., Pruitt,W.O. 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy. 144 p.

Fathi,P., Kochakzadeh,M. 2004. Estimate of greenhouse cucumber transpiration by artifical neural networks. Journal of Soil and Water Science. 18.2: 213-220.

Gundekar,H.G., Khodke,U.M., Sarkar,S. 2008. Evalution of pan coeffient for reference crop evapotranspiration for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. Irrigation Science. 26: 169-175.

Hargreaves,G.L., Samani,Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1.2: 96-99.

Irmak,S., Irmak,A., Allen,R.G., Jones,J.W. 2003. Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 129: 336-347.

Jamieson,P.D., Porter,J.R., Wilson,D.R. 1991. A test of the computer simulationmodel ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field CropsResearch. 27: 337-350.

Kostinakis,K., Xystrakis,F., Theodoropoulos,K., Stathis,D., Eleftheriadou,E and Matzarakis,A. 2011. Estimation of reference potential evapotranspiration with focus on vegetation science-the EmPEst software. Journal of irrigation and drainage engineering. 616-619.

Lin,C.H., Chao,C., Chen,W.F.2008. Estimation of regionalevapotranspiration by adaptive network-based fuzzy inference system forDan-Shui basin in Taiwan, Journal of the Chinese Institute of Engineers. 30.6: 1091-1096.

Liu,Y and Luo,Y. 2010. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. Agriculture water management. 97: 31-40.

Maina,M.M., Amin,M.S.M., Rowshon,M.d.K., Aimrun,W., Samsuzana,A.A and Yazid,M.A. 2014. Effects of crop evapotranspiration estimation techniques and weather parameterson rice crop water requirement. Australian Journal of Crop Science. 8.4: 495-501.

Priestley,C.H.B., Taylor,R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review. 100: 81-92.

Applications. 29:65-74.

Stagnitti,F., Parlange,J.Y., Rose,C.W. 1989. Hydrology of a small wet catchment. Hydrological Processes. 3: 137-150.

Turc,L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date, Annals of Agronomy. 12: 13-49.

Xu,C.-Y and Singh,V.P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Swizerland. Water Resources Management. 16: 197-219.

Racz,C., Nagy,J., Dobos,A.C. 2013. Comparison of Several Methods for calculation of reference evapotranspiration. Acta Silvatica and Lignaria Hungarica. 9: 9-24.

Rahimi Khoob,A. 2008. Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. Irrigation Science.27: 35-39.

Razi,MA., Athappilly,K. 2005. A comparative predictive analysis of neural networks (NNs), nonlinear regression and classification and regression tree (CART) models, Expert System with

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 12, Apr.-May. 2018, p. 199-208

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۲، فروردین - اردیبهشت ۱۳۹۷، ص. ۲۰۸-۱۹۹

Selection of the Best Empirical Equations to Predict Reference Evapotranspirationand their Coefficient Calibration in Rasht Region

H. Pouryazdankhah[1], M.R. Khaledian[2]*, T. Razavipour[3], and M. Rezaei[4]
Recived: Oct.23, 2017 Accepted: Des.20, 2017

Abstract

Regardingthe climate change and recent droughts, the proper management of irrigation systems and water resources is very important. However, achieving the optimum crop yields due to lack of water requires, the accuracy estimating the amount of water by the plants to prevent water loss and or water stress in plants is needed. In this study, the reference evapotranspiration using lysimeter was measured during three cropping seasons. Applying Ref-ET software, the reference evapotranspiration with 16 empirical equations using meteorological data were estimated, the significant difference between measured and estimated was determined using SPSS software. The empirical equations Hargreaves, Priestley-Taylor and Penman (FAO) were determined as the most suitable methods for the studied area. For the obtained data from two growing seasons and by applying nonlinear regression in SPSS software, optimized coefficients for the two Priestley-Taylor and Hargreaves equations were estimated, and then by using obtained data in the third year, thevalidation was done and RMSE as well as nRMSE values were calculated to assess the equations that for optimized Hargreaves were 0.20 mm/day and 4.60% and for optimized Priestley-Taylor equation were 0.22 mm/day and 4.5%, respectively.

Keywords: Hargreaves, Non-linear regression, Optimization, Priestly-Taylor, Rasht

1-PhD student of Irrigation and Drainage, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
2-Water Engineering Dept., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center
3- Assistant Professor,Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran
4- Assistant Professor,Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: khaledian@guilan.ac.ir)