

ارزیابی روش‌های تبخیر و تعرق پتانسیل و تشت تبخیر با مقادیر لایسی متر در یک اقلیم نیمه خشک (مطالعه موردی: دشت قزوین)

رستا نظری^۱، عباس کاویانی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد رشته آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره)

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ره)

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۱۷؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۱/۱۷)

چکیده

سرزمین ایران در کمربند خشک و بیابانی جهان قرار دارد. چنین موقعیتی در بسیاری از مناطق کشور از جمله دشت قزوین محدودیت‌هایی را از نظر اقلیم و آب و هوای مناسب و مساعد کشاورزی به وجود آورده است. در بیان پتانسیل توسعه کشاورزی و منابع آب و خاک واژه تبخیر و تعرق اهمیت شایان توجهی دارد. روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق وجود دارد؛ اما عملکرد این معادلات در شرایط اقلیمی گوناگون متفاوت است. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر بررسی روش‌های مختلف تجربی و ترکیبی تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت قزوین است. در این راستا با توجه به داده‌های ایستگاه هواشناسی از ۲۸ روش تجربی و ترکیبی در بازه زمانی یک‌ساله به صورت روزانه استفاده شد. با مرجع قراردادن داده‌های لایسی متری و تشت تبخیر، معادله‌های مختلف ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی‌های آماری نشان داد روش تجربی هارگریوز سامانی از گروه دمایی با $r = 0/87$ و $RMSE = 0/34$ و $MBE = -0/71$ میلی متر در روز بهترین روش برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت قزوین است. همچنین در میان روش‌های بررسی شده ضریب تشت، روش اورنگ در مقیاس زمانی روزانه برآورد مناسبی از داده‌های لایسی متر داشت. از میان روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطح آزاد آب با نتایج محاسبه شده تشت تبخیر به روش ضریب تشت اورنگ، روش پنمن ۱۹۴۸ دارای بیشترین ضریب همبستگی $0/70$ و کمترین خطای استاندارد و کمترین میانگین خطای مطلق به ترتیب به مقدار $1/65$ و $8/63 \times 10^{-6}$ میلی متر در روز و با میانگین تبخیر $10/18$ میلی متر در روز به منزله روشی مناسب برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب توصیه می‌شود.

کلیدواژگان: تبخیر و تعرق پتانسیل، تشت تبخیر، قزوین، لایسی متر، هارگریوز سامانی.

مقدمه

آب عامل محدودکننده توسعه کشاورزی است. رشد کشاورزی از دو طریق افزایش سطح کشت و بالابردن عملکرد محصول در واحد سطح میسر است که برآورد دقیق نیاز آبی می‌تواند عاملی مؤثر در جهت رسیدن به اهداف یادشده باشد. برآوردهای دقیق تبخیر و تعرق در مطالعاتی از قبیل تغییر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و کنترل منابع آب نقش مهمی بازی می‌کند [۱]. پدیده تبخیر و تعرق سبب تلفات آب و رطوبت از سطوح آبی، خاک و پوشش گیاهی می‌شود و برآورد آن از طریق روشی مناسب با توجه به میزان اندک نزولات جوی و محدودیت منابع آب در ایران اهمیت زیادی دارد. منظور از تبخیر و تعرق پتانسیل یا بالقوه، بیشترین مقدار آبی است که اگر بدون محدودیت وجود داشته باشد، می‌تواند توسط سطوح مرطوب خاک و گیاه از آنها خارج شود [۲].

روش‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق وجود دارد که هر یک با توجه به فرضیات و داده‌های مختلف هواشناسی استفاده شده در آنها در مناطق مختلف، اغلب نتایج متفاوتی به دست می‌دهند. به‌طور کلی، اندازه‌گیری تبخیر و تعرق به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. تبخیر و تعرق به‌طور مستقیم توسط لایسی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. دقیق‌ترین روش برآورد مقدار تبخیر و تعرق استفاده از لایسی‌متر وزنی است که دقت نتایج به دست آمده روش‌های مختلف تخمین تبخیر و تعرق را می‌توان با آن بررسی کرد. اما از آنجا که احداث این نوع لایسی‌متر هزینه بسیار زیادی به همراه دارد، عموماً فقط در ایستگاه‌های تحقیقاتی بزرگ استفاده می‌شود. اندازه‌گیری تبخیر و تعرق به‌صورت غیرمستقیم توسط روش‌های تجربی متعددی صورت می‌گیرد که عملکردشان بسته به شرایط اقلیمی مختلف تغییر می‌کند. این روش‌ها در پنج گروه ترکیبی، دمایی، تشعشعی، رطوبتی و تشت تبخیر طبقه‌بندی می‌شوند [۳]. در روش‌های ترکیبی از دو جزء آئروپنایمیکی و توازن انرژی استفاده می‌شود. از نخستین معادلات ترکیبی ارائه شده می‌توان به روش پنمن^۱ اشاره کرد که در سال ۱۹۴۸ توسط پنمن معرفی شد [۴]. در سال ۱۹۹۸ سطح مرجع روش پنمن مانیتث به‌صورت یک گیاه مرجع فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، مقاومت سطح ثابت

۷۰ ثانیه بر متر و آلبیدو ۰/۲۳ در نظر گرفته شد. این روش به فائو پنمن مانیتث^۲ معروف است [۵]. در سال ۱۹۹۹ به درخواست کمیته نیاز آبیاری دفتر انجمن مهندسی عمران امریکا^۳ به‌منظور تعیین یک معادله تبخیر و تعرق استاندارد که به‌منزله الگو قابلیت کاربرد کلی‌تری داشته باشد، معادله استاندارد پنمن مانیتث^۴ را برای دو سطح مرجع چمن برای گیاهان کوتاه و یونجه برای گیاهان بلند پیشنهاد کرد و در دنیا برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع روزانه و ساعتی قبول شد [۶]. آلن و همکارانش (۱۹۹۸) روش ترکیبی فائو پنمن مانیتث را به‌عنوان روشی معتبر برای تخمین تبخیر و تعرق توصیه کردند [۵]. با وجود دقت زیاد این روش، وابستگی به پارامترهای متعدد هواشناسی ضعف این روش محسوب می‌شود و بنابراین، استفاده از این معادله در همه زمان‌ها و مکان‌ها میسر نمی‌شود. در معادلات گروه دمایی پارامتر اصلی دمای هوا است و معمولاً برای ایستگاه‌هایی که فاقد آمار کامل هواشناسی هستند، به‌کار می‌رود. در معادلات گروه تشعشعی از انرژی خورشید به‌عنوان عامل اصلی در تبخیر و تعرق استفاده می‌شود و در معادلات گروه رطوبتی هم عواملی نظیر رطوبت نسبی و دما مؤثرند. همچنین برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل می‌توان از داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر به‌عنوان روش مقبول استفاده کرد. در این زمینه می‌توان مقادیر اندازه‌گیری شده تشت تبخیر را با داده‌های لایسی‌متر واسنجی کرد. برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از داده‌های تشت باید از ضریب تشت^۵ استفاده کرد. به‌گونه‌ای که داده‌های به دست آمده تشت تبخیر در این ضریب ضرب می‌شوند و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل را به دست می‌دهند. ضریب تشت (K_{pan}) به عواملی همچون سرعت باد، رطوبت و فاصله سبزی‌نگی از جهتی که باد به سمت تشت می‌وزد، بستگی دارد [۷]. محاسبه ضریب تشت توسط روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به روش کونیکا (۱۹۸۹)، آلن و پروت (۱۹۹۱)، اورنگ (۱۹۹۸) و اشنایدر (۱۹۹۲) [۹] اشاره کرد [۹، ۱۰، ۱۱ و ۸]. در این زمینه مطالعه‌ای در منطقه گرگان انجام شد که نشان داد ضریب تشت برآورد شده به روش‌های اورنگ و اشنایدر

2. FAO Penman Monteith

3. American Society of Civil Engineers (ASCE)

4. ASCE-Penman Monteith equation

5. Pan coefficient

1. Penman

به‌عنوان روش مرجع در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک کشور با چهار ناحیه آب و هوایی در وضعیت نبود پارامترهای هواشناسی ارزیابی کردند. نتایج واسنجی‌ها نشان داد که مقدار تابش خورشیدی برآوردشده با استفاده از پارامترهای دمایی در نواحی مرطوب و گرم و نیمه‌خشک منجر به کاهش و در مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب افزایش دقت معادلات تخمینی شد که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر پارامترهای دمایی در این نواحی است [۱۷]. بنابراین، با توجه به اینکه هر معادله در منطقه‌ای خاص و با شرایط آب و هوایی محل استخراج شده است، واسنجی روابط برآورد تبخیر در مناطق مختلف لازم است [۱۸]. بنابراین، هدف از این تحقیق مقایسه ۲۸ روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل شامل روش‌های تجربی و ترکیبی و نیز بررسی روش‌های تخمین ضریب تشت برای تعیین دقت برآورد روش‌های استفاده‌شده براساس داده‌های لایسی متر و تشت تبخیر و در نهایت تعیین مناسب‌ترین روش‌ها در دشت قزوین است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

محدوده مطالعه‌شده اراضی پایین‌دست شبکه آبیاری دشت قزوین است که در فواصل جغرافیایی بین عرض‌های شمال $36^{\circ}00'00''$ تا $36^{\circ}00'20''$ و طول‌های شرقی $49^{\circ}40'00''$ تا $50^{\circ}35'35''$ قرار گرفته است. در این تحقیق از آمار هواشناسی روزانه و ماهانه ایستگاه هواشناسی قزوین با موقعیت جغرافیایی به عرض $36^{\circ}15'$ درجه شمالی و طول $50^{\circ}03'$ درجه شرقی که در ارتفاع $1279/2$ متری از سطح دریا قرار دارد، برای بازه زمانی یک‌ساله (۱۳۸۰) استفاده شد. داده‌های مربوط به اندازه‌گیری تبخیر و تعرق پتانسیل توسط لایسی متر از مرکز تحقیقات آب و خاک اسماعیل‌آباد تهیه شدند. این آزمایش در یک لایسی متر به ابعاد 1×2 مترمربع و به عمق $1/5$ متر از سطح زمین در مرکز تحقیقات آب و خاک اسماعیل‌آباد اجرا شد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر یکنواخت‌نبودن میکروکلیم^۱ به دلیل حرکت افقی گرما، لایسی متر در مرکز قطعه زمینی به ابعاد 40×50 متر واقع شده است و مساحتی حدود ۲ مترمربع را می‌پوشاند. به‌منظور اندازه‌گیری آب زهکش لایسی متر چاهک مشاهده‌ای در کنار

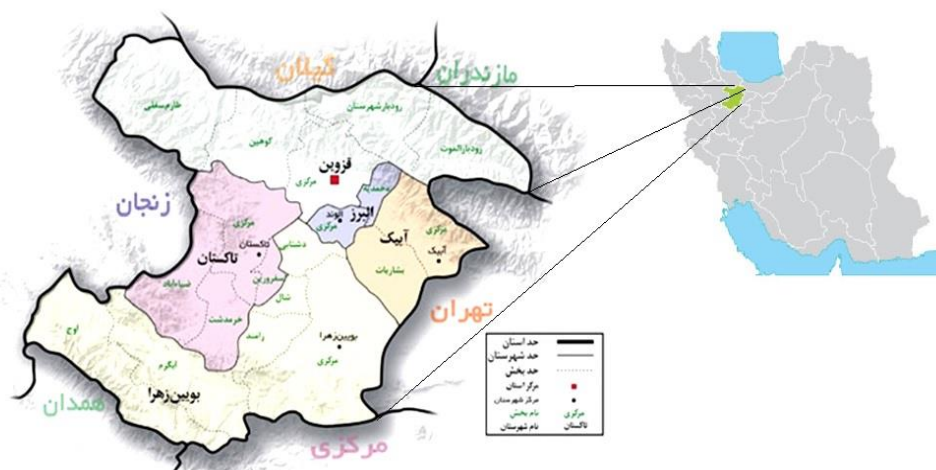
اصلاحی برای دوره‌های روزانه و روش‌های کونیکا، آلن پروت و شنایدر اصلاحی برای دوره‌های ده‌روزه و روش‌های کونیکا و شنایدر اصلاحی برای تبخیر و تعرق ماهیانه مناسب‌اند [۳].

نتایج مقایسه معادله‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل (۲۰ روش) با داده‌های لایسی‌متری در مناطق مختلف جهان (۱۱ منطقه با شرایط متفاوت آب و هوایی)، بیانگر دقت زیاد روش پنمن مانتیث فائو در مقایسه با سایر روش‌های تجربی است [۶]. در یک تحقیق روش تجربی جنسن‌هیز برای کالیبره کردن روابط تجربی در مناطقی با اقلیم خشک مانند عربستان مناسب تشخیص داده شد [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، روش‌های جنسن‌هیز و هارگریوز برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد شدند [۱۳]. کوچک‌زاده و نیکبخت (۱۳۸۳) به مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران با روش استاندارد فائو پنمن مانتیث پرداختند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه برآوردشده در اقلیم‌های خشک بیابانی، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای از طریق روش هارگریوز سامانی و در اقلیم‌های فراخشک، مرطوب و خیلی مرطوب نوع «ب» از طریق روش تورک و در اقلیم خیلی مرطوب نوع «الف» از طریق روش ماکینک بهترین همبستگی و کمترین اختلاف با مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه برآوردشده از طریق روش فائو پنمن مانتیث دارد [۱۴]. در تحقیق دیگری که به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران پرداخته شده بود، تبخیر و تعرق با استفاده از میانگین‌های درازمدت متغیرهای اقلیمی ۹۱ ایستگاه هواشناسی و داده‌های لایسی‌متر و نتایج ۱۳ روش تجربی به کمک روش‌های زمین‌آمار پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که روش‌های با پایه پنمن در ۵۶ درصد از ایستگاه‌های مطالعه‌شده به‌عنوان بهترین روش و در ۲۲ درصد ایستگاه‌ها دو روش بلانی کریدل و هارگریوز سامانی برای برآورد تبخیر و تعرق مناسب‌اند [۱۵]. یزدان‌خواه و میرلطیفی (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های تابشی در اقلیم مرطوب و مدل‌های دمایی در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک عملکرد بهتری دارند [۱۶]. مساعدی و قبایی سوق (۱۳۹۲) ۱۱ معادله تجربی و تخمینی را با روش استاندارد فائو پنمن مانتیث

1. Climate Micro

دوره رشد چمن طولانی است و طی دوران رشد و پس از رسیدن به بیشترین پوشش سطح زمین تبخیر و تعرق را در بیشترین مقدار آن روز حفظ می‌کند. بنابراین، با داده‌برداری‌های کوتاه‌مدت و در بازه‌های زمانی هر ۳ تا ۵ روز یک بار، تعداد داده‌های برداشت‌شده از لایسی‌متر افزایش می‌یابد. تعدد داده‌ها در ارزیابی مدل‌ها کمک شایانی را خواهد کرد. همچنین داده‌های تشت تبخیر نوع کلاس A (که براساس استانداردها در زمینی که با چمن پوشیده شده است و لایسی‌متر را نیز در بر دارد، قرار گرفت) از ابتدای بهار تا پایان آبان‌ماه ۱۳۸۰ در بازه زمانی روزانه تهیه شدند. داده‌های هواشناسی مورد نیاز نیز از ایستگاه هواشناسی فرودگاه قزوین که در فاصله ۱۵ کیلومتری شرق لایسی‌متر قرار دارد، تهیه شد. شرایط اقلیمی محدوده مطالعه‌شده به‌روش اقلیم‌نمای دومارتن، نیمه‌خشک گزارش می‌شود.

لایسی‌متر احداث شده است. لایسی‌متر مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن را اندازه‌گیری می‌کند. از آنجاکه چمن گیاهی متراکم و در زمانی کوتاه سطح عمده‌ای از زمین را پوشش می‌دهد و امکان نگهداری و کوتاه‌نگهداشتن ارتفاع آن ساده‌تر از یونجه است، بنابراین، در این تحقیق به‌عنوان گیاه مرجع انتخاب شد. از سوی دیگر با توجه به اینکه یونجه طی یک فصل زراعی چندین بار برداشت می‌شود، بنابراین، میزان تبخیر و تعرق آن به‌طور ناگهانی از حداکثر به حداقل کاهش می‌یابد که این امر به‌ویژه در زمان بیشترین تبخیر و تعرق پتانسیل سبب از دست دادن بخش بالارزشی از داده‌های لایسی‌متری خواهد شد. ارتفاع چمن در زمان تحقیق در بازه ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر نگهداری می‌شد. داده‌برداری‌های لایسی‌متری از تاریخ پنجم فروردین‌ماه ۱۳۸۰ (۲۵ مارس ۲۰۰۱) آغاز و به‌صورت روزانه و هفتگی تا تاریخ ۲۶ اسفندماه همان سال (۱۷ مارس ۲۰۰۲) ادامه یافت. از آنجاکه طول



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان قزوین و محدوده مطالعه‌شده

لایسی‌متر استفاده شد. معادلات روش‌ها در جدول ۵ آمده است. در مرحله سوم از میان روش‌های تبخیر و تعرق، تعدادی از روش‌ها تبخیر از سطح آب را تخمین می‌زدند که پس از اعمال ضریب تشت تبخیر با روش برتر واسنجی‌شده در مرحله قبل که پارامترهای آن از ایستگاه هواشناسی به‌صورت روزانه اخذ شده به تبخیر و تعرق پتانسیل تبدیل شدند. این روش‌ها نیز در جدول‌های ۱ تا ۴ با علامت ستاره (*) مشخص شده‌اند.

به‌طور کلی، روش اجرای پژوهش به سه مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول ۲۱ روش تجربی و هفت روش ترکیبی با داده‌های لایسی‌متر ارزیابی شدند که روش‌های تجربی مد نظر را می‌توان به سه گروه دمایی، تشعشعی و رطوبتی تقسیم کرد. روش‌های استفاده‌شده به همراه معادلات آنها در جدول‌های ۱ تا ۴ ارائه شده‌اند. در مرحله دوم مقادیر تبخیر از تشت با استفاده از ضریب تشت به تبخیر و تعرق پتانسیل تبدیل شدند؛ که در این زمینه از چهار روش محاسبه ضریب تشت برای واسنجی با داده‌های

جدول ۱. معادلات تشعشی استفاده شده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل

شماره	روش	معادلات برآورد ET_o
۱	ماکینک (۱۹۵۷)	$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{2.45} - 0.12$
۲	ماکینک اصلاح شده (۱۹۷۷)	$ET_o = a + b \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \frac{R_s}{\lambda}$
۳	تورک (۱۹۶۱)	$ET_o = a_T \times 0.013 \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) \times \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda}$ $a_T = 1 \text{ for } RH_{mean} \geq 50\%, a_T = 1 + (50 - RH_{mean}) / 70 \text{ for } RH_{mean} \leq 50\%$
۴	پرستلی تیلور* (۱۹۷۲)	$ET_o = 1.26 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_n - G}{\lambda}$
۵	جنسن هیز (۱۹۶۳)	$ET_o = C_T (T - T_x) \times R_s$
۶	جنسن هیز اصلاح شده	$ET_o = C_T (T - T_x) \times K_T \times R_a \times TD^{0.5}$
۷	تابش (دورنبوس و پروت) (۱۹۸۴)	$ET_o = C (W \times R_s) \text{ , } W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$
۸	کامارگو (۱۹۷۱)	$ET_o = 0.01 \times R_a \times T_m \times ND \text{ , } Ta < 23.5^\circ C$
۹	استفنز استوارت* (۱۹۷۲)	$ET_o = \left\{ (0.0082 \times T_{mean}) - 0.19 \times \left(\frac{R_s}{1500} \right) \right\} \times 2.54$
۱۰	بایر و رابرتسن (۱۹۶۵)	$ET_o = 0.157 T_{max} + 0.158 (T_{max} - T_{min}) + 0.109 R_a - 5.39$
۱۱	بایر و رابرتسن (۱۹۷۱)	$ET_o = -0.0039 T_{max} + 0.1844 (T_{max} - T_{min}) + 0.1136 R_a + 2.811 (e_s - e_a) - 4.04$

جدول ۲. معادلات دمایی استفاده شده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل

شماره	روش	معادلات برآورد ET_o
۱۲	هارگریوز (۱۹۷۵)	$ET_o = 17.4 d (1 - 0.01h) t \times k$
۱۳	هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)	$ET_o = 0.0023 \times R_a \times TD^{0.5} (T + 17.8)$
۱۴	بلانی کریدل (۱۹۵۰)	$ET_o = 25.4 K \frac{(1.8t + 32)}{100} \times p$
۱۵	بلانی کریدل اصلاح شده فائو	$ET_o = a + b \{ p (0.46T + 8.13) \}$
۱۶	بلانی کریدل اصلاح شده SCS	$ET_o = \sum_{i=1}^n k_i k_i f_i = K \sum_{i=1}^n k_i F$
۱۷	تورنت وایت (۱۹۴۸)	$ET_p = 16 \left(\frac{10 T_{mean}}{I} \right)^a \text{ , } I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_{mean}}{5} \right)^{1.514}$
۱۸	لیناکر (۱۹۷۷)	$ET_o = \frac{500(T_m + 0.006h)}{(100 - A)} + 15(T_a - T_d)$ $(80 - T_a)$
۱۹	خاروفا (۱۹۸۵)	$ET_o = 0.34 P \times T_a^{1.3}$

جدول ۳. معادلات رطوبتی استفاده شده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل

شماره	روش	معادلات برآورد ET_0
۲۰	ایوانف* (۱۹۵۴)	$ET_0 = 0.0018(25 + T)^2 (100 - RH)$
۲۱	پاپاداکیس* (۱۹۶۶)	$ET_0 = 0.5625(e_{max} - e_z)$

جدول ۴. معادلات ترکیبی استفاده شده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل

شماره	روش	معادلات برآورد ET_0
۲۲	فانو پنمن مانتیث (۱۹۹۸)	$ET_0 = \frac{0.408 \Delta \left((R_n - G) + \gamma \left\{ \frac{890}{(T + 273)} \right\} U_2 (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$
۲۳	پنمن* (۱۹۴۸)	$ET_0 = \frac{\Delta (R_n - G) + \gamma E_a}{(\Delta + \gamma)}$
۲۴	پنمن مانتیث (۱۹۶۳)	$ET_0 = \frac{\Delta (R_n - G) + \frac{86.4 \rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_{av}}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_{av}} \right)}$
۲۵	پنمن مانتیث استاندارد شده ASCE (۱۹۹۹)	$ET_{os} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d U_2)}$
۲۶	پنمن کیمبرلی (۱۹۸۲)	$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43 W_f (e_s - e_a)$
۲۷	پنمن رایث (۱۹۸۲)	$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left(\frac{15.36}{0.1L} \right) W_f (e_s - e_a)$
۲۸	فانو پنمن مانتیث با تابش ایرماک* (۲۰۰۳)	$ET_0 = \frac{0.408 \Delta \left((R_n - G) + \gamma \left\{ \frac{890}{(T + 273)} \right\} U_2 (e_s - e_a) \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$

$$R_n = (-0.09 T_{max}) + (0.203 T_{min}) - (0.101 RH_{mean}) + (0.687 R_s) + 3.97$$

** مقدار تابش خالص (به جای روش رایج فانو ۵۶) از روش ایرماک و همکارانش محاسبه می شود.

جدول ۵. معادلات ضریب تشت تبخیر استفاده شده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل

روش	معادلات ضریب تشت تبخیر
کونیکا (۱۹۸۹)	$K_p = 0.475 - (2.4 \times 10^{-4} \times U) + (5.16 \times 10^{-3} \times RH) + (1.18 \times 10^{-3} \times F) - (1.6 \times 10^{-5} \times RH) - (1.01 \times 10^{-6} \times F^2) - (8 \times 10^{-9} \times RH^2 \times U) - (1 \times 10^{-8} \times RH^2 \times F)$
آلن پروت (۱۹۹۱)	$K_p = 0.108 - (3.31 \times 10^{-4} \times U) + (0.0422 \times \ln(F)) + (0.1434 \times \ln(RH)) - (6.31 \times 10^{-4} \times [\ln(F)]^2 \times \ln(RH))$
اشنایدر (۱۹۹۲)	$K_p = 0.482 - (3.76 \times 10^{-4} \times U) + (0.024 \times \ln(F)) + (0.0045 \times RH)$
اورنگ (۱۹۹۸)	$K_p = 0.51206 - (3.21 \times 10^{-4} \times U) + (0.031886 \times \ln(F)) + (0.00288945 \times RH) - (1.07 \times 10^{-4} \times RH \times \ln(F))$

ارزیابی دقت تخمین هریک از روش‌ها، مقادیر حاصل از فرمول‌های تجربی و ترکیبی با داده‌های لایسی‌متری توسط پنج آماره خطاسنجی که در زیر به آنها اشاره شده است، مقایسه شدند.

در معادلات جدول‌های ۱ تا ۴ مقادیر تابش خورشیدی از رابطه آنگستروم پرسکات با ضرایب تجربی a و b به ترتیب $۰/۲۵$ و $۰/۵$ محاسبه می‌شوند [۲۱].

معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطاسنجی) بعد از محاسبه تبخیر و تعرق با روش‌های یادشده به‌منظور

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{method} - ET_L)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (29)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |ET_{method} - ET_L|}{n} \quad (30)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{method} - ET_L)}{n} \quad (31)$$

$$r = \frac{\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{method} - \overline{ET_{method}})}{\sqrt{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2 \sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})^2}} \quad (32)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{(n-2)} \left[\sum (ET_{method} - \overline{ET_{method}})^2 - \frac{\left[\sum (ET_L - \overline{ET_L})(ET_{method} - \overline{ET_{method}}) \right]^2}{\sum (ET_L - \overline{ET_L})^2} \right]} \quad (33)$$

و $\overline{ET_{method}}$ میانگین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده با روش مد نظر (mm/day) و n تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تمامی معادلات تجربی و ترکیبی و نتایج روش‌های ضریب تشت تبخیر با مقادیر به‌دست‌آمده از لایسی‌متر مقایسه شد و در قالب شاخص‌های آماری در جدول ۶ ارائه شده است.

که در آنها $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا (mm/day)، MAE میانگین خطای مطلق (mm/day)، MBE خطای اریب میانگین (mm/day)، r ضریب همبستگی (-)، SE : خطای استاندارد ET_L (mm/day)، تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده با لایسی‌متر ET_{method} (mm/day) تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده با روش مد نظر (mm/day) و $\overline{ET_L}$ میانگین تبخیر و تعرق اندازه‌گیری‌شده با لایسی‌متر (mm/day)

جدول ۶. مقایسه روش‌های مختلف تجربی و ترکیبی و ضرایب تشت تبخیر با داده‌های لایسی‌متر توسط شاخص‌های آماری

روش	SE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	RMSE (mm/day)
هارگریوز (۱۹۷۵)	۱/۳۴	۰/۸۲	-۰/۸۰	۰/۰۰۶	۱/۷۵
هارگریوز سامانی (۱۹۸۵)	۱/۱۸	۰/۸۷	-۰/۷۱	۰/۰۰۸	۱/۳۷
بلانی کریدل (۱۹۵۰)	۱/۳۲	۰/۸۳	-۰/۳۱	۰/۰۳	۱/۴۵
بلانی کریدل اصلاح‌شده فائو	۱/۳۵	۰/۸۲	-۳/۸۰	۰/۰۲	۴/۴۱
بلانی کریدل اصلاح‌شده SCS	۱/۴۱	۰/۸۰	-۱/۰۴	۰/۰۱	۱/۷۳
تورنت وایت (۱۹۴۸)	۱/۶۹	۰/۷۰	-۱/۷۱	۰/۰۱	۲/۵۶
لیناکر (۱۹۷۷)	۱/۲۲	۰/۸۶	۲/۵۱	۰/۰۷	۲/۹۱
خاروفا (۱۹۸۵)	۱/۴۱	۰/۸۰	-۰/۳۰	۰/۰۱	۱/۶۳
ماکینک (۱۹۵۷)	۱/۲۹	۰/۸۴	-۰/۹۹	۰/۰۰۲	۱/۶۵
ماکینک اصلاح‌شده (۱۹۷۷)	۱/۴۶	۰/۷۹	۳/۷۹	۰/۰۵	۴/۳۸
تورک (۱۹۶۱)	۲/۳۳	۰/۱۷	-۰/۱۱	۰/۱۳	۶

ادامه جدول ۶. مقایسه روش‌های مختلف تجربی و ترکیبی و ضرایب تشت تبخیر با داده‌های لایسی متر توسط شاخص‌های آماری

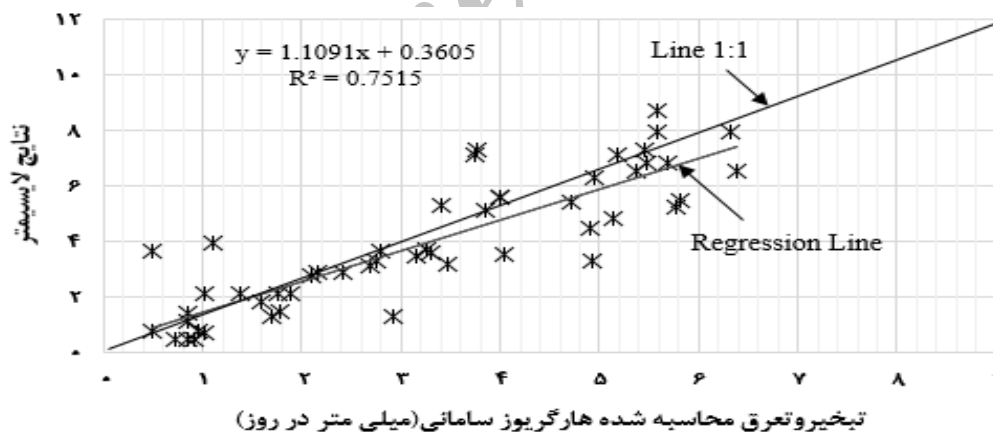
روش	SE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	RMSE (mm/day)
پرستلی تیلور (۱۹۷۲)	۱/۲۵	۰/۸۵	-۳/۸۲	۰/۰۲	۴/۴۴
جنسن هیز (۱۹۶۳)	۱/۲۹	۰/۸۴	۹/۴۲	۰/۰۹	۱۱/۴۴
جنسن هیز اصلاح شده	۱/۲۹	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۰۰۶	۱/۶۱
تابش (دورنبوس و پروت، ۱۹۸۴)	۱/۳۷	۰/۸۱	۸/۷۵	۰/۰۸	۱۰/۱۸
کامارگو (۱۹۷۱)	۲/۳۳	-۰/۱۵	-۲/۸۶	۰/۰۰۵	۳/۸۱
استفنز استوارت (۱۹۷۲)	۱/۶۱	۰/۷۳	-۳/۹۰	۰/۰۲	۴/۵۴
بایر و رابرتسن (۱۹۶۵)	۱/۲۸	۰/۸۴	-۰/۰۹	۰/۰۰۳	۱/۶۶
بایر و رابرتسن (۱۹۷۱)	۱/۳۴	۰/۸۲	۲/۱۶	۰/۰۱	۳/۳۴
ایوانف (۱۹۵۴)	۱/۵۷	۰/۷۵	۰/۳۵	۰/۰۴	۱/۷۰
پاپاداکیس (۱۹۶۶)	۱/۴۸	۰/۷۸	-۳/۹۲	۰/۰۲	۴/۵۵
فائو پنمن مانتیث	۱/۳۷	۰/۸۱	-۰/۷۷	۰/۰۰۷	۱/۵۵
پنمن (۱۹۴۸)	۱/۳۳	۰/۸۳	۴/۱۶	۰/۰۶۰	۴/۸۳
پنمن مانتیث (۱۹۶۳)	۱/۴۱	۰/۸۰	-۱/۵۴	۰/۰۰۳	۲/۰۸
پنمن رایت	۱/۳۵	۰/۸۲	-۲/۱۰	۰/۰۰۰۲	۲/۴۹
پنمن کیمبرلی (۱۹۸۲)	۱/۵۱	۰/۷۷	-۱/۰۶	۰/۰۰۸	۱/۸۴
فائو پنمن مانتیث با تابش ایرماک	۱/۴۳	۰/۸۰	-۰/۰۹	۰/۰۰۵	۱/۵۴
پنمن مانتیث استاندارد شده برای گیاهان کوتاه	۱/۳۷	۰/۸۱	-۰/۷۶	۰/۰۰۷	۱/۵۵
پنمن مانتیث استاندارد شده برای گیاهان بلند	۱/۵۲	۰/۷۶	-۰/۰۴۸	۰/۰۰۹	۱/۶۶
کونیکا (۱۹۸۹)	۱/۶۶	۰/۵۸	۱/۰۶	۰/۱۱	۲/۴۳
آلن و پروت (۱۹۹۱)	۱/۶۶	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۰۹	۲/۰۰
اشنایدر (۱۹۹۲)	۱/۶۸	۰/۵۷	-۰/۳۴	۰/۱۰	۲/۰۲
اورنگ (۱۹۹۸)	۱/۶۶	۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۰۹	۱/۹۷

لیناگر منفی بوده که بیانگر برآورد کم تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده به وسیله این روش‌ها در مقایسه با داده‌های لایسی متر است. به‌طور کلی، در گروه دمایی روش هارگریوز سامانی برآورد مناسبی از داده‌های لایسی متری دارد. در گروه تشعشعی روش پرستلی تیلور با ۰/۸۵ و روش کامارگو با ۰/۱۵ - به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ضریب همبستگی را دارند. به‌طور کلی، در گروه تشعشعی روش ماکینک با کمترین مقدار میانگین خطای مطلق (۰/۰۰۲) و تقریباً کمترین مقدار خطای استاندارد (۱/۲۹) و ضریب همبستگی نسبتاً بالا (۰/۸۴) و روش بایر و رابرتسن (۱۹۶۵) با خطای میانگین مطلق (۰/۰۰۳) و ضریب همبستگی نسبتاً بالا (۰/۸۴) و تقریباً کمترین مقدار خطای استاندارد (۱/۲۸) و روش جنسن هیز اصلاح شده با کمترین مقدار جذر خطای میانگین مربعات (۱/۶۱) نسبت به داده‌های لایسی متر برآورد بهتری از روش مرجع را به دست می‌آورند. در گروه رطوبتی روش ایوانف با ضریب همبستگی

مقایسه آماری تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با استفاده از معادلات تجربی و روش لایسی متر (جدول ۶) نشان داد که در گروه دمایی روش هارگریوز سامانی با مقدار ۰/۳۴ میلی‌متر بر روز کمترین مقدار RMSE (جذر خطای میانگین مربعات) و روش بلانی کریدل اصلاح شده فائو با ۴/۴۱ میلی‌متر بر روز بیشترین مقدار RMSE دارد. از آنجا که کوچک‌ترین مقدار این پارامتر بهترین مدل را معرفی می‌کند، روش هارگریوز سامانی از نظر این شاخص بهتر از سایر روش‌ها عمل کرده است و برآورد مناسب‌تری از تبخیر و تعرق پتانسیل داشته است. روش هارگریوز سامانی در این گروه بیشترین ضریب همبستگی به مقدار ۰/۸۷ و کمترین خطای استاندارد با مقدار ۱/۱۸ دارد و مقدار MBE این روش نیز ۰/۷۱ - بوده که نشان‌دهنده برآورد کم این روش نسبت به داده‌های لایسی متر است. در این گروه روش تورنتوایت با مقدار $r = 0/70$ کمترین ضریب همبستگی را دارد. مقادیر MBE همه روش‌ها در گروه دمایی به جز روش

روش فائو پنمن مانیتث و پنمن مانیتث استاندارد شده ASCE با کمترین مقدار RMSE (۱/۵۵) مقادیر نزدیک‌تری به داده‌های لایسی‌متری را برآورد کردند.

در نهایت، روش هارگریوز سامانی با بیشترین مقدار ضریب همبستگی (۰/۸۷) و کمترین مقدار جذر خطای میانگین مربعات (۱/۳۷) و کمترین مقدار میانگین خطای مطلق (۰/۰۰۸) و کمترین مقدار خطای استاندارد (۱/۱۸)، برآورد بسیار مناسبی از تبخیر و تعرق بر مبنای داده‌های لایسی‌متری را تولید می‌کند [۲۱]. روش هارگریوز سامانی نه تنها نتایج قابل قبولی را تولید کرده است بلکه کمترین وابستگی به داده‌های هواشناسی زمینی را دارد و همین امر استفاده از این روش برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل را تقویت می‌کند. نتایج کوچک‌زاده و نیک‌بخت (۱۳۸۳) نشان داد که در اقلیم‌های نیمه‌خشک ایران روش هارگریوز سامانی بهترین همبستگی و کمترین اختلاف با مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه برآورد شده از طریق روش فائو پنمن مانیتث را دارد [۱۴]. شکل ۲ پراکنش داده‌های تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط روش هارگریوز سامانی را با داده‌های لایسی‌متری نشان می‌دهد.



شکل ۲. پراکنش تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط روش هارگریوز سامانی با داده‌های لایسی‌متر

نیز با کمترین مقدار RMSE و MAE و MBE برآورد مناسبی نسبت به داده‌های لایسی‌متر داشته و برای مقایسه تبخیر و تعرق روزانه تشت تبخیر بهتر از سایر روش‌های عمل کرده است.

در مرحله دوم روش‌هایی که مقدار تبخیر از سطح آزاد آب را تخمین می‌زدند با نتایج محاسبه شده از تشت تبخیر به روش ضریب تشت برتر شناخته شده از محاسبات مرحله

پایین (۰/۷۴) اما RMSE کمتر (۲/۱۵) نسبت به روش پایاداکیس در جایگاه بهتری برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل قرار می‌گیرد. در همین زمینه نتایج مطالعه‌ای که به ارزیابی روش‌های تشعشی و رطوبتی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در استان گلستان پرداخته بودند، نشان داد که روش‌های ماکینک، تورک، جنسن هیز و تابش به ترتیب ET_0 روزانه مناسبی را در استان گلستان برآورد کردند و روش‌های رطوبتی هم در صورت اصلاح نتایج خوبی خواهند داشت [۲۰]. با توجه به اینکه منطقه مطالعه شده (دشت قزوین) اقلیمی نیمه‌خشک دارد نتایج حاصل از روش‌های رطوبتی نتایج مناسبی را ارائه نکرده‌اند و همین امر در مطالعه تحقیقات دیگر محققان نیز تأکید شده است که روش‌های رطوبتی در مناطق مرطوب عملکرد بهتری دارند. مقایسه آماری تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده با استفاده از معادلات مختلف ترکیبی با داده‌های لایسی‌متر نشان داد که RMSE از ۱/۵۴ تا ۶/۲۷ میلی‌متر در روز متغیر است. بیشترین مقدار آن مربوط به روش پنمن ۱۹۴۸ و کمترین مقدار آن مختص به روش فائو پنمن مانیتث با تابش ایرماک است. به طور کلی، از میان روش‌های ترکیبی دو

در ادامه مقایسه آماری داده‌های حاصل از تشت تبخیر کلاس A با محاسبه ضریب تشت به روش کونیکا (۱۹۸۹) بیانگر بیشترین مقدار RMSE و MBE و MAE است و با بیش برآورد نسبت به داده‌های لایسی‌متر و زیاد بودن جذر خطای میانگین مربعات در مقیاس روزانه ارتباط ضعیفی با روش مرجع دارد. گرچه مقدار ضریب همبستگی نیز در کلیه روش‌ها تقریباً مقدار ثابت ۰/۵۸ است، روش اورنگ

دارند. شکل ۳ روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده روش‌های تبخیر از سطح آب را با تشت تبخیر محاسبه شده به روش ضریب تشت اورنگ نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

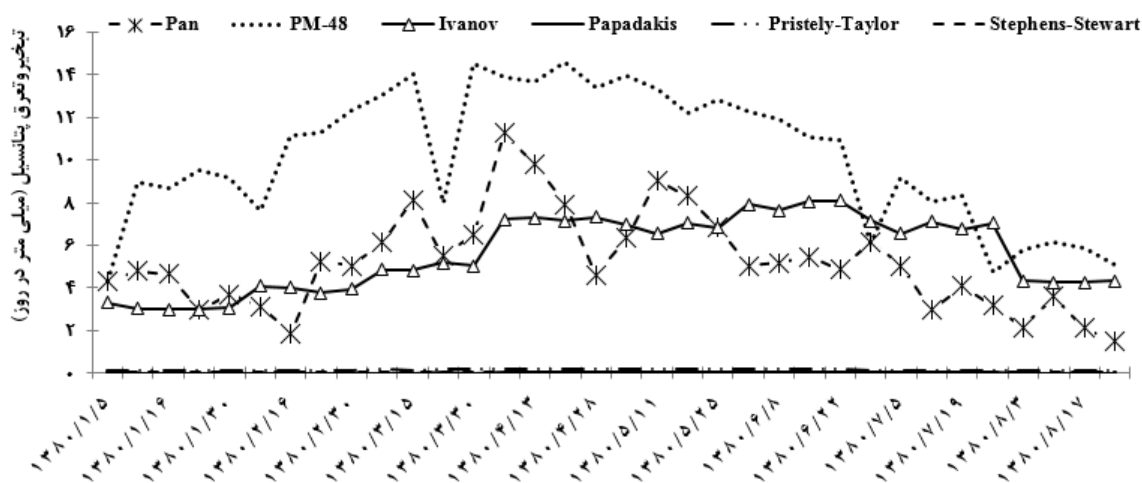
دشت قزوین به دلیل موقعیت جغرافیایی، حاصل خیزی خاک و بارش‌های مناسب از جمله قطب‌های کشاورزی کشور محسوب می‌شود که تخمین صحیح تبخیر و تعرق گیاهان زراعی و باغی در آن در میزان مصرف آب کشاورزی تأثیر زیادی دارد. با توجه به بحران کم‌آبی که امروزه در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و از جمله منطقه نیمه‌خشک قزوین با آن مواجه است، تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان، عاملی مؤثر در استفاده بهینه از منابع آب است. نتایج به‌دست‌آمده در میان روش‌های دمایی روش هارگریوز سامانی، در گروه روش‌های

قبل توسط شاخص‌های آماری بررسی شدند. نتایج این بررسی‌ها در جدول ۷ آمده است.

با توجه به نتایج جدول ۷ روش پنمن (۱۹۴۸) بیشترین ضریب همبستگی ۰/۷۰ و کمترین خطای استاندارد و میانگین خطای مطلق به ترتیب به مقدار $1/65$ و $8/63 \times 10^{-6}$ میلی‌متر بر روز را دارد. گرچه مقدار جذر خطای میانگین مربعات در این روش نسبتاً بالاست، برآورد خوبی با نتایج تشت تبخیر دارد. روش استفنز استوارت با بیشترین مقدار RMSE و SE و MAE و کمترین مقدار ضریب همبستگی، ضعیف‌ترین نتایج برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب با نتایج حاصل از تشت تبخیر را تولید کرده است. در مجموع، می‌توان گفت که در مقایسه با داده‌های تشت تبخیر، روش پنمن ۱۹۴۸ با رتبه نخست و روش ایوانف با رتبه دوم و روش پرستلی تیلور و پاپاداکیس به ترتیب در جایگاه‌های سوم و چهارم برآورد مناسب تبخیر از سطح آزاد آب را

جدول ۷. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطح آزاد آب با نتایج محاسبه شده تشت تبخیر به روش ضریب تشت اورنگ

روش	SE (mm/day)	r (-)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	RMSE (mm/day)
پنمن ۱۹۴۸	۱/۶۵	۰/۷۰	۳/۵۶	$8/63 \times 10^{-6}$	۵/۴۴
پرستلی تیلور (۱۹۷۲)	۱/۶۹	۰/۶۹	-۵/۰۶	۰/۱۲	۵/۵۴
استفنز استوارت (۱۹۷۲)	۲/۱۷	۰/۳۸	-۵/۱۸	۰/۱۳	۵/۶۶
ایوانف (۱۹۵۴)	۲/۰۹	۰/۴۵	۰/۴۰	۰/۰۳	۲/۱۸
پاپاداکیس (۱۹۶۶)	۱/۹۵	۰/۵۵	-۵/۲۰	۰/۱۳	۵/۶۶



شکل ۳. روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده روش‌های تبخیر از سطح آب با نتایج محاسبه شده تشت تبخیر به روش ضریب تشت اورنگ

- Eng. Practices no.70. American Society of Civil Engine; 1990.
- [7].Doorenbos J, Pruitt WO. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, 24; 1977.
- [8].Snyder RL. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. Journal of Irrig. and Drainage. Eng. 1992; 118(6): 977-980.
- [9].Cuenca RH. Irrigation system design: An engineering approach, N J. Prentice-Hall, Englewood cliffs; 1989.
- [10]. Allen RG, Pruitt WO. FAO-24 reference evapotranspiration factors. Journal of Irrigation and Drainage Eng. 1991; 117: 758-773.
- [11]. Orange M. Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished rep., Calif. Dep. Of water resources; 1998.
- [12]. Salih AMA, Sendil U. Evapotranspiration under extremely arid environment. Journal of Irrig. And Drain. Eng. 1984; 110(3): 289-303.
- [13]. Irmrak S, Irmak A, Allen RG, Jone JW. Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrig. and Drain. Eng. 2003; 129(5): 336-347.
- [14]. 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]
- [15]. 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]
- [16]. Yazdankhah S, Mirlatfi SM. Proportional importance of weather parameters for estimating reference evapotranspiration in different climates. Journal of Iranian irrigation and drainage. 2010; 3: 319-329. [Persian]
- [17]. Mosaedi A, Ghabai Sogh M. Evaluation of reference evapotranspiration estimating methods with no data situation in some Iran climatic. Journal of Water and soil conservation researches. 2012; 3: 27-50. [Persian]
- [18]. Vanzyl WH, De Jager JM, Maree CJ. The relationship between daylight evaporation from short vegetation and the USWB Class A pan. Agricultural and Forest Meteorology. 1989; 46: 107-118.
- رطوبتی روش ایوانف، در گروه تشعشعی روش‌های ماکینک، جنسن هیز اصلاح شده، بایر رابرتسن ۱۹۶۵ و در روش‌های ترکیبی معادلات فائو پنمن مانیتث و پنمن مانیتث استاندارد شده ASCE برای گیاهان کوتاه بهترین نتایج را تولید کرده‌اند. روش هارگریوز سامانی از گروه دمایی با بیشترین ضریب همبستگی (۰/۸۷) و کمترین خطای استاندارد (۱/۱۸ میلی‌متر بر روز) و کمترین جذر خطای میانگین مربعات (۰/۳۴) با فرو برآورد (۰/۷۱) $MBE = -0.71$ میلی‌متر بر روز) نسبت به داده‌های لایسی متر به‌عنوان بهترین روش تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه مطالعه شده توصیه می‌شود. همچنین روش اورنگ (۱۹۹۸) در مقیاس زمانی روزانه برآورد مناسبی از داده‌های لایسی متر داشت. از میان روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطح آزاد آب با نتایج محاسبه شده تشت تبخیر به روش ضریب تشت اورنگ، روش پنمن ۱۹۴۸ بیشترین ضریب همبستگی ۰/۷۰ و کمترین خطای استاندارد و میانگین خطای مطلق به ترتیب به مقدار ۱/۶۵ و 1.06×10^{-6} میلی‌متر بر روز دارد و به‌عنوان روشی مناسب برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب توصیه می‌شود.

منابع

- [1].Liu S, Bai J, Jia Z, Jia L, Zhou H, Lu L. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010; 14: 573-584.
- [2].Alizadeh A. Principle of applied hydrology. 20nd ed. Mashhad: Imam Reza University; 2006. [Persian]
- [3].Sharifian H, Ghahreman B, Evaluating of measured evapotranspiration with evaporate pan and standard potential evapotranspiration, Journal of Agricultural science and Natural resources. 2006; 13(5): 2-9. [Persian]
- [4].Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Roy. Soc.London Proc. Series A. 193; 1948.
- [5].Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration. Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome, Italy (FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. 300 p); 1998.
- [6].Jensen ME, Burman RD, Allen RG. Evapotranspiration and irrigation water requirements. NY. ASCE Manuals and Reports on

- [19]. Angstrom A., Solar and terrestrial radiation, Quarterly. 1924. Journal of Meteorology. Society; 50.
- [20]. Sharifian H, Ghahreman B, Alizadeh A, Mirlatifi S. Evaluation of Radiation and humidity methods for estimating reference evapotranspiration and effect of arid on them in Golestan province. Journal of Water and soil science. 2005; 19(2): 280-290. [Persian]
- [21]. Hargreaves GH, Samni ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers; 1985.

Archive of SID