

ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل و توزیع مکانی سالانه آن در حوضه جنوبی رود ارس

سعید جهانپخش^۱
مجید رضایی بنفشه^۲
مرضیه اسمعیل‌پور^۳
معصومه تدینی^۴

چکیده

برآورد دقیق تبخیر - تعرق پتانسیل برای بسیاری از مطالعات مربوط به کشاورزی و بیلان آب ضروری است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل سالانه در حوضه جنوبی رود ارس انجام شده است. برای این منظور داده‌های ماهانه ۶ ایستگاه سینوپتیک شامل میانگین دما، حداقل دما، حداکثر دما، سرعت باد، ساعات آفتابی، متوسط و حداقل رطوبت نسبی در طی دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۶) استفاده شده است. پس از بازسازی داده‌های مفقوده و بررسی ایستگاه‌ها از نظر مرجع (خوب آبیاری شده) یا غیرمرجع بودن، مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل با استفاده از ۹ فرمول معتبر (فائو- پنمن - ماتیس، بلانی- کریدل، هارگریوز- سامانی، ماکینگ، تورک، روش استاندارد شده ASCE^۵، کیمبرلی - پنمن، پنمن و پرستلی - تیلور) در نرم‌افزار REF-ET محاسبه شد. جهت تعیین بهترین روش برای منطقه مورد مطالعه، مقادیر

1- Email: s.jahan@tabrizu.ac.ir.

2- Email: mrbanafsheh@yahoo.com.

3- Email: s.esmsepilpour@gmail.com.

4- Email: Tadayonister@gmail.com.

5- American Society of Civil Engineers

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تبریز.

۳- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشگاه تبریز.

۴- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان.

تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده از روش‌های محاسباتی فوق، بر استفاده از همبستگی و مجذور میانگین اختلاف مربعات با داده‌های تشتک تبخیر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد بین روش بلانی - کریدل و داده‌های تشتک تبخیر ضریب همبستگی بالایی وجود دارد و این روش به عنوان بهترین روش برای منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس بر اساس روش مذکور و استفاده از روش درون‌یابی، نقشه هم تبخیر - تعرق پتانسیل برای حوضه جنوبی رود ارس ترسیم گردید.

واژگان کلیدی: مدل‌های تبخیر - تعرق، روش بلانی - کریدل، ضریب همبستگی، مجذور میانگین اختلاف مربعات، حوضه جنوبی رود ارس.

مقدمه

فرایند تبخیر- تعرق یکی از اجزاء سیکل هیدرولوژی بوده و تعیین مقادیر صحیح آن برای بسیاری از مطالعات نظیر برآورد آب مورد نیاز گیاهان، توازن هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، ساختمان‌های انتقال و ذخیره آب، شبیه‌سازی میزان محصول و طراحی و مدیریت منابع آب از درجه اول اهمیت برخوردار است (شایان‌نژاد، ۱۳۸۵: ۲).

برآورد صحیح مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل، برنامه‌ریزان را قادر می‌سازد تا با مشخص کردن سقف نیاز آبی، علاوه بر تأمین بخشی از این نیاز از طریق بارش، به فکر تأمین بقیه آب مورد نیاز از سایر منابع آبی نظیر رودخانه‌ها، سدها و چاه‌ها باشند (مجرد و همکاران، ۱۳۸۳: ۹۲).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، اساسی‌ترین عامل محدودکننده تولیدات کشاورزی، مقدار آب موجود برای آبیاری است. در حالی که در این مناطق گستره‌های وسیعی از اراضی برای کشت و کار استعداد تولیدی داشته و خاک عامل محدودکننده به حساب نمی‌آید (گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی، ۱۳۸۲: ۳). در این راستا محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل با استفاده از مناسب‌ترین مدل جهت محاسبه نیاز آبی گیاهان مساله‌ای اساسی است.

در زمینه تبخیر - تعرق تا کنون پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است که به مواردی از آنها اشاره می‌گردد:

الغباری^۱ (۱۹۸۸: ۸۶-۸۱)، تبخیر- تعرق گیاه مرجع منطقه جنوب عربستان سعودی را با استفاده از ۵ مدل مختلف فائو- پنمن، جنسن- هیز، بلانی- کریدل، تشتک تبخیر و فائو- پنمن کالیبره شده، محاسبه کرده و نتایج حاصله را با داده‌های لایسیمتر مقایسه نموده است. تحلیل رگرسیونی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از ۵ مدل و لایسیمتر همبستگی زیادی با هم دارند. همچنین روش فائو- پنمن کالیبره شده می‌تواند در سایر مناطق نیز مورد استفاده قرار گیرد.

گویال^۲ (۲۰۰۴: ۱۱-۱)، با استفاده از آمار ۳۲ ساله، حساسیت پدیده تبخیر - تعرق را به گرم شدن زمین در منطقه خشک راجستان در کشور هند بررسی کرده است. ایشان روش پنمن - مونتیس را برای محاسبه تبخیر- تعرق انتخاب کرده و حساسیت تبخیر - تعرق را از دیدگاه تغییر دما، تشعشع خورشیدی، سرعت باد و فشار بخار آب مورد بررسی قرار داده و نتیجه می‌گیرد که با ۲۰٪ افزایش دما، تبخیر - تعرق ۱۴/۸٪ افزایش می‌یابد ولی پدیده تبخیر - تعرق نسبت به افزایش تشعشع خالص خورشیدی کمتر (۱۱٪) حساس بوده و افزایش فشار بخار آب تأثیر منفی کمتری (۴/۳۱٪) روی تبخیر - تعرق دارد.

نانداگیری و کوور^۳ (۲۰۰۵: ۲۴۸-۲۳۸)، با استفاده از ۷ روش، مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل را در چهار منطقه اقلیمی متفاوت (خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب) هند تعیین کرده و نتایج حاصل را با روش فائو- پنمن- مونتیس مقایسه کرده‌اند. ایشان نتیجه می‌گیرند که در میان روش‌های مورد مطالعه روش FAO56 هارگریوز در دوره‌های زمانی روزانه و ماهانه نتایج نزدیک به روش فائو- پنمن- مونتیس ارائه می‌کند و در همه اقلیم به استثنای اقلیم مرطوب روش تورک (روش تشعشعی) مناسب‌تر است. نتایج حاصل از تحلیل

1- Al-Ghobari

2- Goyal

3- Nandagiri and Kovoov

عاملی نشان می‌دهد که سرعت باد مهم‌ترین عامل در مناطق خشک و ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب است.

آیمن و هوگنبوم^۱ (۲۰۰۶: ۱۸۲-۱۷۵)، با استفاده از روش پریستلی - تیلور مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل را برای مناطق مرطوب جنوب ایالات متحده برآورد کرده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که این روش مقادیر تبخیر - تعرق ماهانه و روزانه را در مرکز و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه طی فصل زمستان کمتر و طی فصل تابستان بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند و نسبت به روش فائو - پنمن - مونتیس دقت کمتری دارد. نامبردگان پیش‌بینی می‌کنند استفاده از روش فائو - پنمن - مونتیس نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند.

ضیاء تباراحمدی (۱۳۷۴: ۵۳-۴۰)، با استفاده از روش‌های تورنت وایت، هارگریوز، بلانی- کریدل و پنمن - مونتیس در دوره آماری ۱۰ ساله نقشه‌های هم تبخیر - تعرق پتانسیل ۱۲ ماهه برای استان مازندران ترسیم کرده است. ایشان نتیجه می‌گیرد تبخیر - تعرق پتانسیل از غرب به شرق و از جنوب به شمال افزایش می‌یابد، که علت آن کوهستانی بودن جنوب و گرمای بیشتر و پوشش گیاهی کمتر در نواحی شرقی است. همچنین کمترین تبخیر - تعرق پتانسیل در ماه دی و بیشترین آن در تیر ماه اتفاق می‌افتد.

علیزاده و همکاران (۱۳۷۹ و ۷۰: ۱۳۸۰-۵۱)، با استفاده از روش‌های هارگریوز - سامانی، تشتک تبخیر و فائو - پنمن - مونتیس مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل را در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان بررسی کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش تشتک تبخیر علی‌رغم اینکه تابع داده‌های متعدد هواشناسی می‌باشد در برآورد تبخیر- تعرق نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌کند. نامبردگان برای برآورد هر چه بهتر مقادیر تبخیر- تعرق یک ضریب واسنجی ارائه نموده‌اند.

جهانبخش و همکاران (۱۳۸۰: ۶۵-۵۱)، مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق را برای ایستگاه هواشناسی تبریز مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. در این پژوهش با استفاده از روش‌های ترکیبی، دمایی، تابشی، همبستگی چندگانه تبخیر- تعرق و رطوبتی، مقادیر تبخیر- تعرق

محاسبه گردیده و سپس با روش تشتک تبخیر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق فوق نشان می‌دهد که روش کریستین‌سن - هارگریوز با درصد خطای ۱۹/۵۹٪ نسبت به سایر روش‌ها تطابق بیشتری با روش تشتک تبخیر دارد.

مجرد و همکاران (۱۳۸۳: ۹۵-۷۷)، با استفاده از داده‌های سی ساله ایستگاه هواشناسی جلگه مازندران، مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل ماهانه و سالانه را با استفاده از پنج روش پنمن اصلاح شده (فائو)، پنمن - مونتیس (فائو)، بلانی - کریدل (فائو)، هارگریوز و مکینگ (فائو) محاسبه کرده‌اند. ایشان از بین پنج روش فوق دو روش پنمن - مونتیس و هارگریوز را انتخاب کرده‌اند و بر مبنای آن نقشه‌های هم تبخیر ماهانه و سالانه ارائه نموده‌اند. نتیجه پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل سالانه در منطقه، در مرکز آن و در حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به طرف شرق و غرب اندکی کاهش می‌یابد.

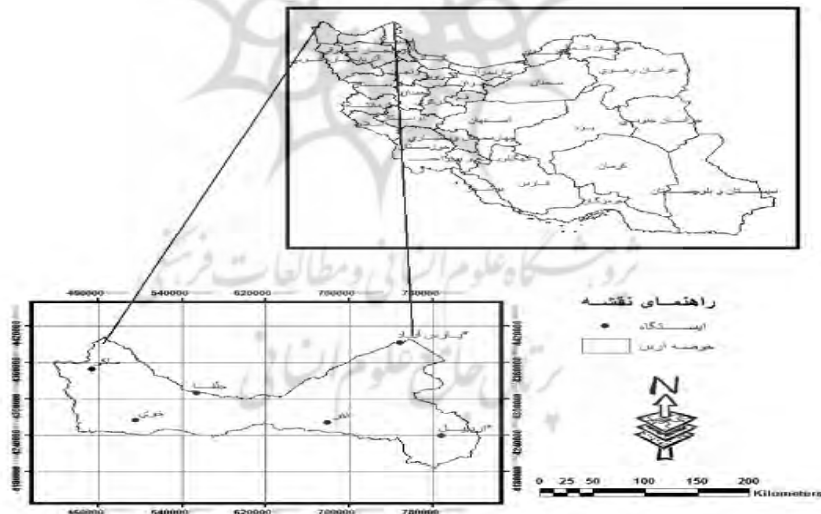
طباطبائی و همکاران (۱۳۸۵: ۹۸-۸۷)، بر اساس سال‌های تر و خشک حجم تبخیر - تعرق پتانسیل را با استفاده از آمار ۱۲ ساله برای استان چهارمحال و بختیاری تعیین کرده‌اند. در پژوهش مذکور ابتدا دو سال خشک و تر تعیین گردیده و سپس برای این سال‌ها با استفاده از روش‌های بلانی - کریدل، فائو - پنمن - مونتیس، هارگریوز - سامانی و روش ASCE مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل محاسبه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش ASCE در استان چهارمحال و بختیاری نیاز به کالیبراسیون دارد.

در حوضه جنوبی رود ارس تحقیقاتی که تا کنون توسط سازمان‌های دولتی در زمینه محاسبه تبخیر - تعرق انجام شده‌اند اغلب بدون انتخاب روش مناسب برای هر ایستگاه صورت گرفته‌اند. از جمله می‌توان به طرح مطالعه جامع توسعه کشاورزی حوضه‌های آبخیز ارس و ارومیه اشاره کرد که با استفاده از روش فائو - پنمن - مونتیس، مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل و نیاز آبی گیاهان را محاسبه کرده‌اند (مرکز مطالعات برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی، ۱۳۷۶: ۸). بنابراین با توجه به اینکه پایه تعیین نیاز آبی گیاهان و مطالعات بیلان آب، تعیین دقیق مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل می‌باشد انجام پژوهشی در این زمینه برای

منطقه مورد مطالعه، که یکی از قطب‌های کشاورزی ایران محسوب می‌شود، ضرورت این مطالعه را نشان می‌دهد.

ویژگی‌های عمومی منطقه

حوضه آبریز رود ارس در ایران بین مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 47'$ تا $39^{\circ} 46'$ عرض شمالی واقع گردیده و مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه منطقه مورد مطالعه بشمار می‌رود (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه در این حوضه قله سبلان با ۴۸۱۱ متر و پست‌ترین آن با ارتفاع ۲۰ متر در محل خروجی رودخانه ارس واقع در مرز ایران و جمهوری آذربایجان قرار دارد. حوضه آبریز رودخانه ارس، در خاک ایران مساحتی بالغ بر ۳۹۴۷۸ کیلومتر مربع را دارا بوده و حدود ۸۱/۵ درصد آن در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ها واقع گردیده است. ۱۸/۵ درصد بقیه را دشت‌هایی تشکیل داده‌اند که در همه قسمت‌های حوضه پراکنده‌اند (کیانی سفیدان جدید، ۱۳۸۴: ۱۷).



شکل شماره (۱) موقعیت حوضه آبریز رود ارس و محل ایستگاه‌های مورد مطالعه

حوضه آبریز رود ارس در ایران ۲۲ درصد وسعت حوضه آبریز دریای خزر را تشکیل می‌دهد. وجود رشته کوه‌های البرز و باریک بودن کناره خزر در شمال ایران، سبب می‌شود که جریان‌های هوای قطبی که از روی دریای خزر عبور می‌کنند، با اخذ رطوبت کافی، بارندگی قابل توجهی را در حوضه ارس، بویژه در قسمت شرقی آن و دیگر مناطق به وجود آورند. شمال آذربایجان تا نواحی نزدیک اهر، از این موهبت بهره‌مند بوده ولی قسمت‌های غربی حوضه ارس از این بارندگی‌ها بی‌نصیب است لذا این مناطق سرزمین‌های نسبتاً خشکی محسوب می‌شوند (موحد دانش، ۱۳۷۳: ۱۵۵).

میانگین سالانه بارندگی در حوضه ارس ۲۶۶/۳ میلی متر است. بررسی بارش‌های سالانه نشان می‌دهد که ایستگاه اهر با ۲۹۲/۲ میلی‌متر بارش سالانه پرباران‌ترین ایستگاه در منطقه مورد مطالعه بوده و جلفا با ۱۹۷/۵ میلی‌متر کم‌باران‌ترین آنهاست. از نظر میانگین دمای سالانه نیز ایستگاه پارس‌آباد با میانگین دمای سالانه ۱۵/۱ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین منطقه و ایستگاه اردبیل با میانگین دمای سالانه ۸/۸ درجه سانتی‌گراد سردترین ایستگاه در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به منظور مطالعه حوضه جنوبی رود ارس ۶ ایستگاه سینوپتیک انتخاب گردید (جدول ۱). این ایستگاه‌ها دارای توزیع مناسبی در سطح حوضه هستند.

جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (° ')	عرض جغرافیایی (° ')	ارتفاع (m)	نوع ایستگاه	دوره آماری
اهر	۴۷° ۴'	۳۸° ۲۶'	۱۳۹۰/۵	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵
اردبیل	۴۸° ۱۷'	۳۸° ۱۵'	۱۳۳۲	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵
جلفا	۴۵° ۴۰'	۳۸° ۴۵'	۷۳۶/۲	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵
خوی	۴۴° ۵۸'	۳۸° ۳۳'	۱۱۰۳	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵
ماکو	۴۴° ۲۶'	۳۹° ۲۰'	۱۴۱۱/۳	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵
پارس‌آباد	۴۷° ۵۵'	۳۹° ۳۹'	۳۱/۹	سینوپتیک	۱۹۸۶-۲۰۰۵

در این مطالعه، از آمار ۲۰ ساله (۱۹۸۶-۲۰۰۵) میانگین ماهانه، حداقل و حداکثر درجه حرارت، میانگین و حداقل رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی پس از بازسازی داده‌های مفقوده و آزمون همگنی استفاده شده است.

اصلاح عامل دما برای شرایط غیرمرجع، اولین اقدام برای تخمین مقادیر قابل اعتماد تبخیر- تعرق پتانسیل است. ایستگاه‌های هواشناسی ایران اغلب در شرایط غیرمرجع واقع شده‌اند. اگرچه اصلاح دما برای چنین محل‌هایی ضروری است ولی به نظر می‌رسد چنین اصلاحاتی در مطالعات تبخیر - تعرق صورت نمی‌گیرند (دین‌پژوه^۱، ۲۰۰۶: ۱۲۴). روش مذکور با رابطه (۱) معرفی می‌شود:

$$MDD = (T_d - T_n) > 2 \quad (1)$$

در رابطه فوق:

$$MDD^2 = \text{انحراف از نقطه شبنم (بر حسب درجه سانتی‌گراد)}$$

$$T_d = \text{دمای نقطه شبنم (بر حسب درجه سانتی‌گراد)}$$

$$T_n = \text{دمای حداقل (بر حسب درجه سانتی‌گراد)}$$

چنانچه حاصل رابطه (۱) بیشتر از ۲ باشد با استفاده از فرمول‌های مربوطه باید داده‌های دمایی اصلاح گردند. لازم به ذکر است که چون $MDD < 2$ منعکس‌کننده شرایط مرجع (خوب آبیاری شده) می‌باشد، لذا در شرایط $MDD < 2$ داده‌های دمایی اصلاح نمی‌شوند (علیزاده و همکاران، ۱۳۷۹: ۵۴).

از دهه ۱۹۴۰ معادلات متعدد جهت تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن و یونجه توسعه یافته و توسط پژوهشگران و برنامه‌ریزان مورد استفاده قرار گرفته است. این امر منجر

1- Dinpashoh

2- Mean Dew Point Departure

به سردرگمی در استفاده از مناسب‌ترین روش برای هر منطقه شده است (ایرمارک^۱ و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۳۸).

در پژوهش حاضر ۹ روش محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل با داده‌های تشتک تبخیر مورد مقایسه قرار گرفتند. این روش‌ها عبارتند از: فائو- پنمن - مانتیس، بلانی - کریدل، هارگریوز - سامانی، ماکینگ، تورک، روش استاندارد شده ASCE، کیمبرلی - پنمن، پنمن و پریستلی - تیلور. به دلیل زیاد شدن حجم مقاله از آوردن این فرمول‌ها خودداری شده است. توضیحات این معادلات در قسمت پیوست مقاله حاضر آمده است.

به منظور آسان‌سازی و مقایسه بین روش‌های مختلف و همچنین توانایی مقایسه آنها با داده‌های لایسیمتر برنامه‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از کامل‌ترین برنامه‌های محاسبه تبخیر - تعرق برنامه REF-ET می‌باشد که در سال ۲۰۰۰ توسط آلن و همکاران در دانشگاه آیداهو نوشته شده است. در این نرم‌افزار از ۱۸ روش تبخیر - تعرق استفاده شده است که از طرف فائو (FAO) مورد تایید قرار گرفته‌اند. این نرم‌افزار تبخیر - تعرق مرجع را می‌تواند به شکل ماهانه، روزانه، ساعتی یا کمتر محاسبه کند و توانایی دریافت انواع فرمت‌ها را دارا می‌باشد (آلن^۲، ۲۰۰۱). در پژوهش حاضر، از این نرم‌افزار جهت محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل استفاده شده و برای انتخاب بهترین روش محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل، آمار تشتک تبخیر با داده‌های ۹ روش فوق با استفاده از دو روش همبستگی پیرسون و مجذور اختلاف مربعات ریشه^۳ (RMSD) مورد مقایسه قرار گرفته است. محاسبه ضریب همبستگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفت و پارامتر آماری مجذور اختلاف مربعات ریشه بین داده‌های تشتک تبخیر و معادلات مختلف تعیین گردید. برای این منظور از رابطه (۲) استفاده شده است:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i)^2}{N}}$$

1- Irmak

2- Allen

3- Root Mean Square Difference

(۲)

در رابطه فوق:

 $RMSD =$ مجذور میانگین اختلاف مربعات $d_i =$ تفاضل بین روش تشتک تبخیر و سایر معادلات $N =$ تعداد ماه‌هایی که تبخیر-تعرق آن محاسبه می‌شود (دروگرس و آلن، ۲۰۰۲: ۳۷).

بحث و نتیجه‌گیری

جهت تخمین قابل اعتماد مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل و بررسی مرجع بودن ایستگاه‌ها از رابطه (۱) استفاده شد. بررسی ایستگاه‌ها با استفاده از فرمول فوق نشان می‌دهد کلیه ایستگاه‌های حوضه جنوبی رود ارس در شرایط مرجع واقع شده‌اند و نیازی به اصلاح عامل دما نیست. در صورتی که از داده‌های یک ایستگاه هواشناسی غیراستاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق استفاده شود، تبخیر-تعرق محاسبه شده به مراتب بیش از تبخیر-تعرق مرجع خواهد بود.

مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل محاسبه شده با روش‌های مختلف به عنوان نمونه برای ایستگاه‌های اهر و اردبیل در جداول ۳ و ۲ آورده شده است. میزان ضریب همبستگی و مجذور اختلاف مربعات ریشه بین معادلات مختلف و تشتک تبخیر نیز در جدول ۴ ارائه شده است. در شرایطی که ضریب همبستگی بین روش‌های محاسباتی و تشتک تبخیر یکسان باشد روشی انتخاب می‌شود که کمترین اختلاف را داشته باشد.

در کلیه ایستگاه‌های مورد مطالعه روش بلانی-کریدل (که توسط دورنبوس و پروت در سال ۱۹۷۷ اصلاح شده است) انطباق بیشتری با تشتک تبخیر نشان می‌دهد. در ایستگاه اردبیل دو روش بلانی-کریدل و کیمبرلی-پنمن از نظر ضریب همبستگی با تشتک تبخیر اختلاف اندکی دارند که به دلیل نامحسوس بودن این اختلاف و جهت رعایت یکدستی در روش برآورد تبخیر-تعرق روش بلانی-کریدل برای کلیه ایستگاه‌ها انتخاب شد. این روش می‌تواند با لحاظ کردن ضرایب گیاهی برای محاسبه نیاز آبی محصولاتی که در حوضه جنوبی رود ارس کشت می‌شود به کار برده شود.

جدول (۲) مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل محاسبه شده با روش‌های مختلف برای ایستگاه اهر

ماه روش	فانو- پنمن - مونتیس	هارگریوز - سامانی	ماکینگ	تورک	کیمبرلی - پنمن	پنمن	پریستلی - تیلور
ژانویه	۳۲/۱	۲۱/۹	۲۳/۷	۰	۲۳/۱	۳۵/۷	۱۵/۳
فوریه	۴۰/۸	۳۱/۸	۳۲/۴	۰	۳۵/۴	۴۷/۱	۲۹/۷
مارس	۵۷/۹	۵۴/۹	۴۹/۵	۳۳/۳	۵۲/۵	۶۶/۳	۴۹/۵
آوریل	۹۴/۲۴	۹۸/۵۸	۷۳/۴۷	۷۴/۰۹	۸۶/۱۸	۱۰۴/۴۷	۸۰/۹۱
می	۱۲۲/۴۵	۱۳۲/۰۶	۱۰۳/۲۳	۱۱۰/۰۵	۱۲۵/۸۶	۱۳۷/۰۲	۱۲۱/۲۱
ژوئن	۱۵۴/۳۸	۱۶۴/۹۲	۱۲۷/۱	۱۳۹/۸۱	۱۶۳/۳۷	۱۶۸/۹۵	۱۴۹/۱۱
ژولای	۱۷۳/۶	۱۶۶/۷۸	۱۳۴/۸۵	۱۵۰/۶۶	۱۹۰/۰۳	۱۸۸/۱۷	۱۵۹/۰۳
اگوست	۱۶۰/۸۹	۱۵۱/۵۹	۱۲۳/۶۹	۱۳۹/۸۱	۱۷۹/۱۸	۱۷۳/۹۱	۱۴۴/۷۷
سپتامبر	۱۱۹/۳۵	۱۱۶/۸۷	۹۲/۰۷	۱۰۴/۷۸	۱۲۸/۰۳	۱۲۹/۵۸	۱۰۴/۴۷
اکتبر	۷۳/۸	۶۹/۹	۵۷/۳	۶۴/۵	۷۲	۸۱/۳	۵۹/۱
نوامبر	۴۸/۹	۳۷/۲	۳۲/۴	۳۱/۲	۴۲/۳	۵۳/۱	۲۹/۴
دسامبر	۳۵/۴	۲۲/۸	۲۳/۴	۹/۶	۲۶/۴	۳۸/۴	۱۶/۸

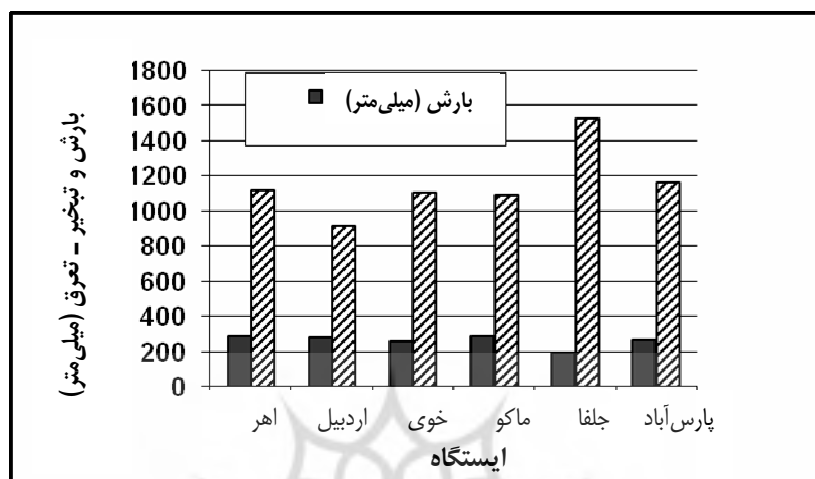
جدول (۳) مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل محاسبه شده با روش‌های مختلف برای ایستگاه اردبیل

ماه روش	فانو- پنمن - مونتیس	هارگریوز - سامانی	ماکینگ	تورک	کیمبرلی - پنمن	پنمن	پریستلی - تیلور
ژانویه	۲۵/۸	۱۸/۹	۱۸/۶	۰	۲۰/۷	۱۵/۹	۱۳/۲
فوریه	۳۴/۸	۲۷/۳	۲۶/۴	۰	۳۱/۲	۲۷	۲۴/۹
مارس	۵۳/۴	۴۹/۵	۴۳/۲	۷/۲	۴۹/۸	۴۶/۸	۴۴/۱
آوریل	۹۳/۳۱	۹۲/۰۷	۶۸/۲	۵۷/۳۵	۸۷/۷۳	۸۴/۶۳	۷۵/۶۴
می	۱۱۵/۶۳	۱۲۰/۲۸	۹۳	۹۰/۲۱	۱۲۲/۱۴	۱۱۰/۹۸	۱۱۱/۲۹
ژوئن	۱۳۸/۲۶	۱۴۳/۵۳	۱۱۳/۷۷	۱۱۸/۱۱	۱۵۴/۳۸	۱۳۳/۶۱	۱۳۸/۲۶
ژولای	۱۴۸/۴۹	۱۴۳/۲۲	۱۱۹/۶۶	۱۲۷/۷۲	۱۷۶/۷	۱۴۳/۵۳	۱۴۶/۰۱
اگوست	۱۳۴/۲۳	۱۲۹/۲۷	۱۰۵/۷۱	۱۱۴/۷	۱۶۲/۱۳	۱۲۶/۱۷	۱۲۸/۰۳
سپتامبر	۱۰۳/۸۵	۱۰۰/۷۵	۷۷/۸۱	۸۳/۳۹	۱۱۹/۶۶	۹۲/۰۷	۹۱/۷۶
اکتبر	۶۹/۹	۶۳	۵۰/۱	۵۰/۱	۷۰/۸	۵۷/۳	۵۳/۱
نوامبر	۴۵/۳	۳۴/۲	۲۸/۸	۱۸	۴۰/۵	۳۳	۲۶/۷
دسامبر	۳۲/۱	۲۱	۱۹/۲	۰	۲۶/۴	۲۰/۴	۱۵/۶

جدول (۴) مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل با تشتک تبخیر در ایستگاه‌های منطقه

مدل	ضریب همبستگی	مجدور میانگین اختلاف مربعات	ضریب همبستگی	مجدور میانگین اختلاف مربعات	ضریب همبستگی	مجدور میانگین اختلاف مربعات
		پارس آباد		اردبیل		اهر
فائو- پنمن - مونتیس	۰/۹۴۷	۱۰۸/۷	۰/۹۷۴	۵۲/۷	۰/۹۸۸	۵۵
بلانی - کریدل	۰/۹۵۵	۹۶/۹	۰/۹۷۹	۳۹/۸	۰/۹۹۰	۳۸/۱
هارگریوز - سامانی	۰/۹۴۹	۱۰۹	۰/۹۶۱	۴۲	۰/۹۷۰	۵۰/۴
ماکینگ	۰/۹۴۴	۱۲۸/۶	۰/۹۶۳	۶۱/۸	۰/۹۷۲	۸۰/۳
تورک	۰/۹۵۵	۱۱۹/۳	۰/۹۶۴	۵۴/۱	۰/۹۸۲	۶۶/۲
روش استاندارد شده ASCE	۰/۹۴۷	۱۰۸/۷	۰/۹۷۴	۵۲/۷	۰/۹۸۸	۵۵
کیمبرلی-پنمن	۰/۹۴۱	۹۹/۹	۰/۹۸۰	۳۸/۳	۰/۹۹۰	۴۵/۴
پنمن	۰/۹۴۲	۱۰۱/۹	۰/۹۶۴	۴۵/۲	۰/۹۸۷	۴۸/۹
پرستلی-تیلور	۰/۹۴۴	۱۱۴/۸	۰/۹۶۸	۴۶/۶	۰/۹۸۰	۶۲/۴
		خوی		جلفا		ماکو
فائو- پنمن - مونتیس	۰/۹۷۴	۵۱/۸	۰/۹۸۹	۱۰۷/۸	۰/۹۸۴	۵۱/۱
بلانی - کریدل	۰/۹۸۵	۳۰/۶	۰/۹۹۱	۹۵/۱	۰/۹۸۹	۳۳/۴
هارگریوز - سامانی	۰/۹۸۰	۳۶	۰/۹۴۴	۱۴۷/۴	۰/۹۷۶	۵۵/۴
ماکینگ	۰/۹۷۶	۵۹/۲	۰/۹۷۴	۱۷۲/۸	۰/۹۷۷	۷۰/۳
تورک	۰/۹۷۷	۴۶/۹	۰/۹۶۷	۱۵۴/۶	۰/۹۵۷	۶۲/۱
روش استاندارد شده ASCE	۰/۹۷۴	۵۱/۸	۰/۹۸۹	۱۰۷/۸	۰/۹۸۴	۵۱/۱
کیمبرلی-پنمن	۰/۹۸۱	۴۵/۴	۰/۹۸۳	۹۰/۹	۰/۹۸۹	۴۳/۸
پنمن	۰/۹۷۶	۴۲/۸	۰/۹۹۰	۱۰۴/۸	۰/۹۸۲	۴۴/۳
پرستلی-تیلور	۰/۹۷۸	۴۶	۰/۹۷۹	۱۵۹/۹	۰/۹۷۶	۵۸/۷

مقادیر تبخیر - تعرق سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه به روش بلانی - کریدل و مقایسه آن با بارش، در نمودار ۱ و نقشه‌های همبارش و هم تبخیر - تعرق آنها در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

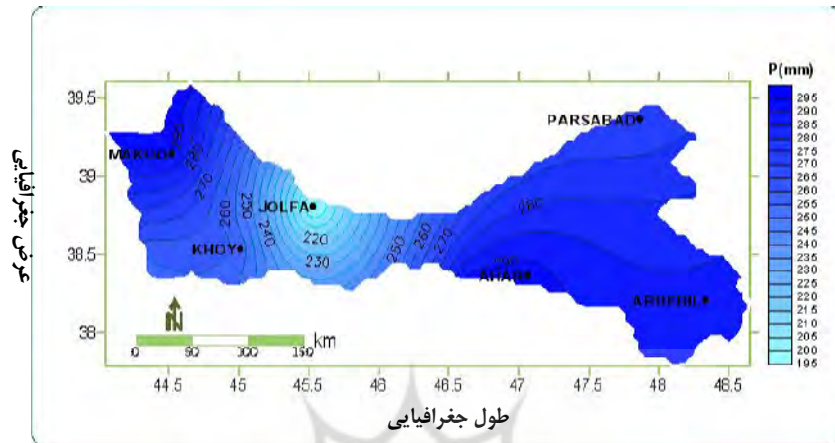


نمودار (۱) مقایسه میزان بارش با تبخیر - تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های مورد مطالعه

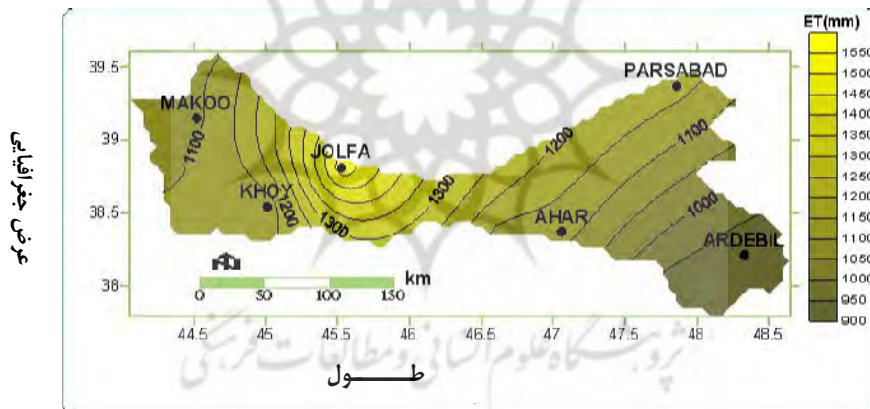
با توجه به نمودار ۱ مشاهده می‌شود که بالاترین میزان تبخیر-تعرق سالانه با ۱۵۳۲/۷ میلی‌متر مربوط به ایستگاه جلفا می‌باشد و پایین‌ترین میزان تبخیر-تعرق در ایستگاه اردبیل برابر با ۹۲۰/۳۸ میلی‌متر است. اردبیل سردترین ایستگاه در بین ایستگاه‌های منطقه نیز می‌باشد. مقایسه مقادیر بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه نشان می‌دهد که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه میزان تبخیر-تعرق پتانسیل ۳ تا ۴ برابر میزان بارش است. در ایستگاه جلفا میزان تبخیر-تعرق پتانسیل ۷ برابر میزان بارش می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر ماهانه و سالانه تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از روش بلانی-کریدل برای ایستگاه‌های مورد مطالعه آورده شده است.

جدول (۵) مقادیر ماهانه و سالانه تبخیر - تعرق پتانسیل با روش بلانی - کریدل

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
اهر	۱۱/۷	۱۹/۵	۴۴/۷	۹۸/۲۸	۱۲۷/۷۲	۱۷۵/۱۵	۲۰۵/۲۲	۱۸۵/۰۷	۱۳۰/۸۲	۷۷/۱	۳۸/۴	۱۷/۴	۱۱۳۲/۱
اردبیل	۳/۳	۱۳/۵	۳۹/۳	۸۴/۳۲	۱۱۵/۰۱	۱۴۷/۲۵	۱۶۲/۱۳	۱۴۱/۶۷	۱۰۲/۳	۶۵/۱	۳۳/۹	۱۲/۶	۹۲۰/۳۸
پارس‌آباد	۱۴/۱	۲۴/۹	۴۶/۵	۸۹/۹	۱۳۹/۸۱	۲۰۰/۲۶	۲۲۱/۹۶	۱۹۳/۷۵	۱۲۶/۴۸	۶۶/۶	۲۹/۱	۱۴/۷	۱۱۶۸/۱
خوی	۰	۱۴/۴	۴۷/۴	۹۴/۵۵	۱۳۲/۰۶	۱۸۲/۲۸	۲۰۵/۸۴	۱۸۷/۵۵	۱۳۷/۶۴	۷۵/۳	۲۷/۶	۲/۷	۱۱۰۷/۳
جلفا	۱/۵	۲۲/۸	۶۱/۲	۱۱۲/۸۴	۱۴۵/۳۹	۲۳۵/۸۹	۳۲۲/۴	۲۸۹/۵۴	۱۸۷/۵۵	۹۴/۵	۳۴/۲	۶/۹	۱۵۳۲/۷
ماکو	۰	۵/۷	۳۹/۹	۸۸/۹۷	۱۲۳/۰۷	۱۷۴/۲۲	۲۱۷/۳۱	۲۰۴/۲۹	۱۴۵/۰۸	۶۹	۲۳/۷	۰	۱۰۹۱/۲



شکل (۲) نقشه همبارش حوزه جنوبی رود ارس



شکل (۳) نقشه هم تبخیر - تعرق پتانسیل در حوزه جنوبی رود ارس با استفاده از روش بلانی - کریدل

نقشه هم تبخیر- تعرق پتانسیل حوزه جنوبی رود ارس با استفاده از مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده با معادله بلانی- کریدل و روش درون‌یابی کریجینگ در نرم‌افزار Surfer ترسیم شده است. بررسی نقشه مذکور نشان می‌دهد که در مجموع در غرب حوزه، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل بیشتر از قسمت‌های شرقی آن است. مقایسه دو نقشه هم

تبخیر و هم بارش منطقه نشان می‌دهد که مناطق دارای بارش کم با مناطقی که دارای بالاترین مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل می‌باشند مطابقت دارند. از جمله این مناطق می‌توان ایستگاه جلفا را نام برد. همانطور که در نقشه هم بارش نشان داده شده است، این ایستگاه دارای کمترین مقدار بارش بوده و در نقشه هم تبخیر - تعرق پتانسیل نیز دارای بالاترین میزان تبخیر- تعرق پتانسیل می‌باشد.

با توجه به اهمیت تبخیر- تعرق پتانسیل به عنوان یکی از اجزاء مهم تشکیل‌دهنده سیکل هیدرولوژی، تعیین مناسب‌ترین فرمول برای حوضه جنوبی رود ارس می‌تواند در ترسیم وضعیت اقلیمی این منطقه (کم بودن میزان بارش در مقایسه با مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل (نمودار ۱) و همچنین انجام طرح‌های آبیاری و کشاورزی موثر واقع شود.

منابع

- ۱- جهانبخش، سعید؛ موحد دانش، علی اصغر و احد مولوی (۱۳۸۰)، «تحلیل مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق برای ایستگاه هواشناسی تبریز»، *مجله دانش کشاورزی*، ۲، جلد ۱، ۶۵-۵۱.
- ۲- شایان‌نژاد، محمد (۱۳۸۵)، «مقایسه دقت روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و پنمن - مونتیس در محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل»، *همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی*، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
- ۳- ضیاء تباراحمدی، میرخالق (۱۳۷۴)، «بررسی و مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در استان مازندران»، *نیوار*، زمستان، ۵۳-۴۰.
- ۴- طباطبائی، سیدحسن؛ گلستانی، سودابه و پیام نجفی (۱۳۸۵)، «تعیین حجم تبخیر و تعرق پتانسیل در استان چهارمحال و بختیاری بر اساس سال‌های ترسالی و خشکسالی»، *پژوهش در علوم کشاورزی*، جلد دوم، شماره دوم، ۹۸-۸۷.
- ۵- علیزاده، امین؛ میرشاهی، بابک؛ هاشمی‌نیا، مجید و حسین ثنایی‌نژاد (۱۳۸۰ و ۱۳۷۹)، «بررسی دقت و عملکرد تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شده به روش‌های هارگریوز- سامانی و تشتک تبخیر در ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان»، *نیوار*، ۴۳ و ۴۲، ۷۰-۵۱.
- ۶- علیزاده، امین (۱۳۸۲)، «*اصول هیدرولوژی کاربردی*»، چاپ شانزدهم، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا.
- ۷- کیانی سفیدان جدید، طاهره (۱۳۸۴)، «*تحلیل سینوپتیکی بارش‌های رگباری در حوضه جنوبی رود ارس*»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- ۸- گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی (۱۳۸۲)، «*مدیریت آب آبیاری در مزرعه*»، تهران، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
- ۹- مجرد، فیروز؛ قمرنیا، هوشنگ و شیدانصیری (۱۳۸۳)، «مطالعه تطبیقی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در جلگه مازندران»، *نیوار*، شماره ۵۵ و ۵۴، ۹۵-۷۷.
- ۱۰- موحد دانش، علی اصغر (۱۳۷۳)، «*هیدرولوژی آب‌های سطحی ایران*»، تهران، انتشارات سمت.
- ۱۱- مرکز مطالعات برنامه‌ریزی و اقتصاد کشاورزی (۱۳۷۶)، «*مطالعات جامع توسعه کشاورزی حوضه‌های آبخیز ارس و ارومیه*»، جلد ۴۷، نیاز آبی.

- 12- AL-Ghobari, Hussein, (2000), "Estimation of Reference Evapotranspiration for Southern Rregion of Saudi Arabia", *Irrigation Science*, No.19, pp. 81-86.
- 13- Allen, Richard. G., (2000), "**Manual REF-ET**", Available Online at www.kimberly.audaho.edu.
- 14- Ayman, A.S., Hoogenboom, G., (2007), "Parison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for Dily Reference Eapotranspiration Etimation in Georgia", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 133, Issue 2, pp.175-182.
- 15- Dehghani Sanij, H., Yamamoto, T. and Rasiah, V., (2004), "Assessment of Evapotranspitation Estimation Models for Use in Semi-arid Environments", *Agriculture Water Management*, No. 64, pp. 91-106.
- 16- Dinpashoh, Yagob, (2006), "Study of Reference Crop Evapotranspiration in I.R of Iran", *Agriculture Water Management*, No. 84, pp.123-129.
- 17- Droogers, Peter and Allen, Richard G., (2002), "Estimating Reference Evapotranspiration under Inaccurate Data Condition", *Irrigation and Drainage Systems*, No. 16, pp. 33-45.
- 18- Goyal, R.k., (2004), "Sensivity of Evapotranspiration to Global Warming: A Case Study of Arid Zone of Rajastan (India)", *Agriculture Water Management*, No. 69, pp. 1-11.
- 19- Irmak, S., Allen, R.G. and Whitty, E.B., (2003), "Daily Grass and Alfalfa-reference Evapotranspiration Estimates and Alfalfa-to-grass Evapotranspiration Ratios in Florida", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 129, Issue 5, pp. 360-370.
- 20- Nandagiri, Lakshman and Kovoov, Gicy M., (2005), "Sensitivity of the Food and Agriculture Organization Penman-Monteith Evapotranspiration Estimates to Alternative Procedures for Estimation of Parameters", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Volume 131, Issue 3, pp. 238-248.

۱- روش پنمن

در سال ۱۹۴۸ پنمن مدل خود را با استفاده از داده‌های استاندارد هواشناسی (ساعات آفتابی، درجه حرارت، رطوبت و سرعت باد) به این صورت ارائه داد (DehghaniSanij & et.al, 2004, p 94):

$$ET_o = \frac{(\Delta / (\Delta + \gamma))(R_n - G) + K_w(\gamma / (\Delta + \gamma))(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)}{\lambda} \quad (1)$$

در رابطه فوق:

K_w = مقدار ثابت (۶/۴۳)، a_w و b_w = ضرایب عملکرد باد، u_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (ms^{-1})، λ = گرمای نهان تبخیر ($MJkg^{-1}$)، R_n = تابش خالص در سطح محصول (MJm^{-2})، G = جریان حرارتی خاک (MJm^{-2})، $(e_s - e_a)$ = کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ = شیب فشار بخار ($kPa^\circ C^{-1}$)، γ = ضریب رطوبتی ($0.054kPa^\circ C^{-1}$).

۲- روش هارگریوز و سامانی (۱۹۸۵)

هارگریوز و سامانی رابطه‌ای تعریف کرده‌اند که به مقادیر روزانه دمای حداقل (T_{min})، دمای حداکثر (T_{max}) و تابش خورشیدی (R_a) برای محاسبه نیاز دارد و می‌تواند مقدار تبخیر- تعرق را به صورت هفتگی، ماهانه، ۲۴ ساعته و ۱۰ روزه محاسبه کند. معادله هارگریوز - سامانی به این صورت است (DehghaniSanij & et.al, 2004, p 96):

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T_{mean} + 17.8)R_a \quad (2)$$

در رابطه فوق:

ET_o = تبخیر-تعرق به میلی‌متر در روز ($mm \ day^{-1}$)، T_{max} = حداکثر دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$)، T_{min} = حداقل دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$)، T_{mean} = میانگین روزانه دمای هوا ($^{\circ}C$)، R_a = تابش خورشیدی ($MJM^{-2} \cdot day^{-1}$)

۳- روش بلانی-کریدل (۱۹۶۲) که توسط دورنبوس و پروت (۱۹۷۷) تغییر یافته است

(DehghaniSanij & et.al, 2004, p 95)

$$ET_o = a + b[p0.46T_{mean} + 8.13] \quad (3)$$

در رابطه فوق:

ET_o = تبخیر-تعرق گیاه مرجع برحسب میلی‌متر در روز، p = ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰)، T_{mean} = متوسط درجه حرارت ماهانه ($^{\circ}C$)، a و b = ضرایب اقلیمی که بستگی به حداقل رطوبت نسبی هوا (RH_{min})، نسبت ساعات واقعی آفتابی (n) به حداکثر ممکن ساعات آفتابی (N) و سرعت باد در روز دارد.

۴- روش ماکینگ (۱۹۵۷) (Allen, 2000: p59):

$$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{2.45} - 0.12 \quad (4)$$

در رابطه فوق:

ET_o = تبخیر-تعرق ($mm \ day^{-1}$)، R_s = تابش خورشیدی ($MJM^{-2} \ d^{-1}$)، Δ و γ = در معادله پنمن توصیف شده‌اند. عدد ثابت ۲/۴۵، گرمای نهان تبخیر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است.

۵- معادله تورک (۱۹۶۱) (منبع پیشین)

$$ET_o = a_T 0.013 \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda} \quad (5)$$

در رابطه فوق:

ET_o = تبخیر- تعرق ($mm \ day^{-1}$)، a_T = اگر میانگین رطوبت نسبی روزانه بیشتر یا مساوی ۵۰٪ باشد برابر با ۱ فرض می‌شود، زمانی که رطوبت نسبی کمتر از ۵۰٪ است از فرمول زیر برای محاسبه a_T استفاده می‌شود:

$$a_T = 1 + (50 - RH_{mean}) / 70 \quad (6)$$

R_s = تابش خورشیدی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، λ = گرمای نهان تبخیر ($MJkg^{-1}$)

۶- معادله پرستلی تیلور (منبع پیشین)

$$ET_o = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (7)$$

در رابطه (۷):

ET_o = تبخیر- تعرق ($mm \ day^{-1}$)، R_n = تابش خالص ($MJm^{-2}d^{-1}$)، G = جریان حرارتی خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$)، λ = گرمای نهان تبخیر ($MJkg^{-1}$)، Δ و γ در معادله پنمن توصیف شده‌اند.

۷- روش پنمن - کیمبرلی (۱۹۸۲)

در این روش همه واحدها، تعریف و شکل معادله همانند معادله اولیه پنمن می‌باشد ولی ضرایب عملکرد باد (a_w و b_w) برای گیاه چمن در طول سال تفاوت می‌کنند و با استفاده از معادلات زیر تعیین می‌شوند (Allen, 2000: p55):

$$a_w = 0.3 + 0.58 \exp\left(\left[-\left(\frac{J - 170}{45}\right)^2\right]\right)$$

$$b_w = 0.32 + 0.54 \exp\left(-\left[\frac{J - 228}{67}\right]^2\right) \quad (۸)$$

(۹)

در روابط فوق J شماره روز سال است.

۸- معادله استاندارد شده^۱ ASCE (Allen, 2000, p52)

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰):

ET_{ref} = تبخیر- تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز برای دوره‌های زمانی روزانه یا میلی‌متر در ساعت برای دوره‌های زمانی ساعتی)، R_n = تابش خالص در سطح محصول (برای دوره‌های زمانی روزانه $MJm^{-2} day^{-1}$ و ساعتی $MJm^{-2} hour^{-1}$)، G = تراکم جریان حرارتی در سطح خاک برای دوره‌های زمانی روزانه $MJm^{-2} day^{-1}$ و $MJm^{-2} hour^{-1}$ ، T = میانگین روزانه یا ساعتی دمای هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری ($^{\circ}C$)، U_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (ms^{-1})، e_s = میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری (kPa)؛ برای محاسبات روزانه مقدار آن میانگین e_s در دماهای حداقل و حداکثر است، e_a = میانگین فشار بخار واقعی در ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متری (kPa)، Δ = شیب منحنی دما- فشار بخار آب ($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$)، γ = ضریب رطوبتی ($kPa \ ^{\circ}C^{-1}$)، C_n = ضریب صورت برای نوع گیاه و دوره زمانی محاسبه، C_d = ضریب مخرج برای نوع گیاه و دوره زمانی محاسبه.

۹- روش فائو-پنمن-مونتیس

آلن و همکاران (۱۹۹۸)، در نشریه ۵۶ فائو روش مذکور را به عنوان یک روش استاندارد جهانی معرفی می‌کند که به شکل زیر ارائه شده است (Allen, 2000: p53):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (11)$$

اجزاء این فرمول در معادلات قبلی توضیح داده شده‌اند.

