

برآورد تبخیر- تعرق مرجع با داده‌های محدود و کامل ایستگاه‌های سینوپتیک ساری،

قراخیل قائم‌شهر و آمل

عاطفه رودباری و علی باقری^۱

دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران. atefehroudbari@yahoo.com

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران. ali523b@yahoo.com

دریافت: مرداد ۱۴۰۱ و پذیرش: اسفند ۱۴۰۱

چکیده

متأسفانه امکانات اندازه‌گیری برخی از پارامترهای آب و هوایی در بعضی از ایستگاه‌های هواشناسی وجود ندارد و آن‌ها را باید برآورد کرد. در چنین مواردی، تشخیص درستی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) با استفاده از داده‌های آب و هوایی برآورد شده بسیار مهم است. بر این اساس، هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد روش پنمن - مانتیت در برآورد ET_0 در استان مازندران است در زمانی که داده‌های خورشیدی (R_s)، فشار بخار (e_a) و رطوبت نسبی (RH) موجود نباشد. داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ساری، آمل و قائم‌شهر به‌منظور مقایسه با ET_0 برآورد شده توسط روش پنمن - مانتیت با مجموعه داده‌های کامل و محدود، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد هنگامی که داده‌های RH و e_a موجود نباشند، برآورد آن‌ها با استفاده از روش پنمن - مانتیت گزینه مناسبی برای به دست آوردن ET_0 در هر سه ایستگاه ساری، قائم‌شهر و آمل با $RMSE$ کمتر از 0.3 میلی‌متر در روز است. اما، در حالت فقدان داده R_s ، مقدار $RMSE$ برای سه ایستگاه مزبور بیش از یک بود و در نتیجه برآورد ET_0 با استفاده از روش پنمن - مانتیت مناسب نیست. نتایج نشان داد که تابش خورشیدی مؤثرترین پارامتر برای برآورد تبخیر- تعرق بوده و تأثیر داده‌های فشار بخار و رطوبت نسبی بر دقت برآورد ET_0 تقریباً به یک‌میزان است.

واژه‌های کلیدی: روش پنمن - مانتیت، داده‌های تابش خورشیدی، مازندران

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران.

مقدمه

استفاده نکردن بهینه از آب آبیاری، محدودیت منابع و نیازهای فزاینده بشر به آب و غذا، سبب شده است تا مهندسان آبیاری با شیوه‌های مدیریتی، به صرفه-جویی در مصرف آب و افزایش بازده آبیاری اقدام کنند. تعیین بخش‌های بیلان آبی در حوضه‌های خشکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب با توجه به شرایط کمبود آب است. یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی فرآیند تبخیر- تعرق است که در دامنه‌ی متفاوتی از مقیاس‌های زمانی و مکانی تغییر می‌کند و برای برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سامانه‌های آبیاری ضروری است (یاوری و همکاران، ۱۳۹۲). تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر - تعرق مصرف می‌شود، از عوامل تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی آبیاری برای رسیدن به محصول بیشتر است. در بیشتر روش‌هایی که برای تعیین میزان تبخیر - تعرق معرفی شده است، مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) تخمین زده و با استفاده از آن، نیاز آبی گیاه هدف محاسبه می‌شود (رودباری و باقری، ۱۳۹۵). تعیین نیاز آبی گیاهان در بهره‌برداری بهینه از منابع آب، طراحی شبکه آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری ضروری است (پناهی و همکاران، ۱۳۸۵). تخمین درست ET_0 به دلیل اینکه در تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) یا نیاز آبی خالص گیاه استفاده می‌شود، بسیار بااهمیت است. تخمین بیش‌ازاندازه آب موردنیاز ضمن هدر دادن آب آبیاری، باعث ماندابی شدن اراضی، شستشوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع زیرزمینی می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۰۵). ضمن آنکه تخمین کمتر نیز باعث تنش رطوبتی به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه دارد (کوچک زاده و همکاران، ۱۳۸۳).

دقیق‌ترین روش برآورد مقدار تبخیر-تعرق مرجع استفاده از لایسیمتر وزنی است اما از آنجاکه احداث این نوع لایسیمتر هزینه بسیار زیادی را به همراه دارد بیشتر از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین ET_0 استفاده

می‌شود. تحقیقات انجام‌گرفته در نقاط مختلف جهان نشان‌دهنده این نکته است که صحت مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده با رابطه پنمن-مانتیت فائو در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتر از دیگر روابط برآورد شده تبخیر-تعرق مرجع بهتر است و در شرایطی که داده-های لایسیمتری در دسترس نباشند به‌عنوان یک رابطه استاندارد توصیه شده است. برای استفاده از این رابطه لازم است از داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌های استاندارد هواشناسی استفاده شود. این روش نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با درجه اعتماد بالایی در دامنه وسیعی از مناطق و شرایط آب و هوایی، برآورد صحیحی از تبخیر- تعرق گیاه مرجع ارائه می‌کند (فولادمند، ۱۳۸۹). روش‌های مختلفی برای تخمین ET_0 وجود دارد، اما عملکرد آن‌ها در محیط‌های مختلف متفاوت است، زیرا همه آن‌ها دارای پیشینه تجربی هستند. روش پنمن-مانتیت فائو نسبت به معادله‌های تجربی این برتری را دارد که هر دو مکانیسم انرژی و انتقال جرم در پدیده تبخیر در نظر گرفته شده است. از این رو ارائه یک روش برای حل این معادله بدون حذف مکانیسم‌های فوق که داده‌های کمتری برای اندازه‌گیری لازم داشته باشد، راهکار مناسبی برای توسعه‌ی ایستگاه‌های هواشناسی با هزینه کم برای مناطق کشاورزی کشور است (رحیمی خوب، ۱۳۸۵). پس از آلن و همکاران (۱۹۹۸)، روش پنمن - مانیت فائو به‌عنوان تنها روش برای تعیین ET_0 توصیه می‌شود، حتی با توجه به اینکه در شرایط آب و هوایی خاص می‌تواند منجر به خطاهایی تا ۳۰٪ شود (ویدموزر، ۲۰۰۹).

سبزواری و سعیدی نیا (۱۴۰۰) در تحقیقی به ارزیابی مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه بروجرد پرداختند و نتیجه گرفتند که برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی قابل قبولی در تخمین تبخیر - تعرق مرجع در شرایط آب و هوایی بروجرد دارد و می‌تواند به‌عنوان یک مدل مناسب ارائه شود. دهقان و مکاری (۱۳۹۷) به ارزیابی و اصلاح

معادله پنمن-مانتیت فائو با داده‌های محدود برآورد نزدیک‌تری به همین روش ولی با داده‌های کامل دارد. کمترین متغیرهای لازم برای اقلیم مرطوب، حداقل و حداکثر دما و سرعت باد منطقه بودند. سنتلهاس و همکاران (۲۰۱۰) در جنوب اونتاریو کانادا برای ارزیابی عملکرد روش پنمن-مانتیت فائو در برآورد ET_0 با داده‌های کامل و محدود عملکرد قابل قبول روش پنمن-مانتیت فائو را در برآورد ET_0 زمانی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی موجود نباشد نشان داد. مقادیر زیاد $RMSE$ نشان از عدم عملکرد قابل قبول روش پنمن-مانتیت فائو در برآورد ET_0 در شرایط فقدان داده‌های تابش خورشیدی بود. وانگ و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه خود در مالاوی آفریقا به این نتیجه رسیدند که در منطقه نیمه‌خشک زمانی که فقط داده‌های دما در دسترس باشند روش پنمن-مانتیت فائو به‌منظور برآورد متغیرهای آب و هوایی که در مدل پنمن-مانتیت فائو مورد نیاز است، مناسب است. باین‌حال در مناطق دارای سرعت باد زیاد، زمانی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی موجود نباشد در استفاده از این روش می‌بایست احتیاط نمود. فولادمند (۲۰۱۲) بر اساس تحقیقی که در استان فارس انجام داد نتیجه گرفت که استفاده از داده‌های ساعات آفتابی ماهانه برآورد شده از داده‌های درجه حرارت، در مناطقی که ساعات آفتابی موجود نیستند، مشابهت زیادی در برآورد ET_0 ماهانه با معادله پنمن-مانتیت فائو دارد.

تعداد کمی از ایستگاه‌های هواشناسی در ایران مجموعه داده‌های آب و هوایی کامل را اندازه‌گیری می‌کنند. آلن و همکاران (۱۹۹۸) روش‌هایی را برای تخمین متغیرهای آب و هوایی از دست رفته، مانند تشعشع خالص، کمبود فشار بخار و سرعت باد پیشنهاد کردند. چنین رویه‌هایی نیاز به ارزیابی در کشورها و اقلیم‌های مختلف برای آزمایش امکان‌سنجی آن‌ها دارند. هدف از تحقیق حاضر تعیین ET_0 برآورد شده با استفاده از داده‌های محدود در مقابل ET_0 محاسبه‌شده با مجموعه داده‌های کامل در شرایط محیطی برخی از مناطق استان

مدل‌های والیانز برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده پرداختند و نتیجه گرفتند که در شرایط کمبود داده سرعت باد و رطوبت نسبی مدل والیانز اصلاح‌شده نسبت به دیگر روش‌ها بالاترین صحت را داشت، به طوری که مقدار R^2 ، $RMSE$ و MAE به ترتیب ۰/۸۵، ۱/۵۹ و ۱/۲۶ روز به دست آوردند. همچنین نتایج نشان داد در شرایطی که در ایستگاه هواشناسی تنها داده دما موجود باشد، روش هارگریوز اصلاح‌شده بالاترین صحت را داشت. بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به برآورد تبخیر-تعرق مرجع در شرایط داده‌های محدود و کامل در ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و ارومیه پرداختند و نتیجه گرفتند زمانی که داده‌های فشار بخار واقعی یا رطوبت نسبی در دسترس نباشد، روش پنمن-مانتیت فائو می‌تواند برای برآورد ET_0 روزانه در شمال غرب ایران، با درستی قابل قبولی استفاده شود ولی در دسترس نبودن داده‌های تابش خورشیدی باعث افزایش در پراکندگی برآوردهای ET_0 می‌شود. شیخ‌الاسلامی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشهد تأثیر نسبی پارامترهای دما (حداکثر، متوسط و حداقل)، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین را بر برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تحلیل عاملی پرداختند و نشان دادند که دمای حداقل، دمای متوسط، دمای حداکثر و رطوبت نسبی برای برآورد تبخیر-تعرق به ترتیب از اهمیت بیشتری نسبت به دیگر متغیرها (ساعات آفتابی و سرعت باد) برخوردار بودند. بویس و همکاران (۲۰۰۵) یک تحلیل حساسیت از مدل تبخیر-تعرق پتانسیل پنمن مانیتیت انجام دادند و نتیجه گرفتند که سرعت باد و تغییرات دمایی تابش خورشیدی تأثیر به‌سزایی در محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل دارد. تراجکوویک و همکاران (۲۰۰۹) در شش ایستگاه هواشناسی در کشور صربستان در شمال شرق اروپا به برآورد تبخیر-تعرق مرجع ماهانه با داده‌های محدود آب و هوایی پرداختند. نتایج نشان داد که در بیشتر موارد

مازندران است. همچنین با استفاده از رابطه‌ی پنمن-مانتیت فائو، مؤثرترین متغیر هواشناسی بر تبخیر-تعرق مرجع برآورد شده، تعیین شدند.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

استان مازندران در شمال ایران با حدود ۲۳۳۲۲ کیلومترمربع مساحت بین مختصات جغرافیای ۳۳ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و دو دقیقه عرض شمالی و ۲۱ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۲۲ درجه و ۱۲ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. میزان بارندگی در منطقه مطالعه شده از غرب به شرق کاهش یافته و منابع اصلی رطوبت، دریای مازندران و توده‌های هوای مرطوب مدیترانه و اقیانوس اطلس است (رحیمی پول و همکاران، ۱۴۰۰). میانگین بارندگی سالانه استان حدود ۶۵۶ میلی-متر، میانگین دمای سالانه هوای استان ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد با بیشینه دمای ۲۲/۴ درجه سانتی‌گراد و کمینه دمای ۱۲/۹ درجه سانتی‌گراد است. میانگین رطوبت نسبی سالانه استان ۷۵ درصد، میانگین سرعت باد روزانه استان

۲/۶ متر بر ثانیه و تبخیر سالانه در استان ۱۱۸۷ میلی‌متر است. استان مازندران را بر اساس خصوصیات دما و بارش و توپوگرافی منطقه می‌توان به دو نوع آب‌وهوای معتدل خزری و آب‌وهوای کوهستانی تقسیم کرد. آب‌وهوای کوهستانی خود بر دو نوع معتدل کوهستانی و سرد کوهستانی است (رودباری و باقری، ۱۳۹۵).

داده‌های موردنیاز این تحقیق برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع از ایستگاه‌های سینوپتیک قراخیل قائم‌شهر، ساری و آمل در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ تهیه شدند. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا، دمای نقطه شبنم، فشار بخار، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد بودند. ارتفاع اندازه‌گیری متغیرهای یادشده ۲ متر بالای سطح زمین بوده و داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری بود که برای تبدیل سرعت باد به ارتفاع ۲ متری از معادله لگاریتمی پروفیل سرعت باد استفاده شده است. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده‌شده در جدول (۱) نشان داده شدند.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شده در تحقیق

نوع ایستگاه	نام ایستگاه	سال تأسیس	ارتفاع از سطح آزاد دریا (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
سینوپتیک اصلی	قراخیل قائم‌شهر	۱۳۶۳	۱۴/۷	۳۶/۴۳	۵۲/۸۲
سینوپتیک اصلی	آمل	۱۳۷۹	۲۹	۳۶/۴۷	۵۲/۴۷
سینوپتیک اصلی	ساری	۱۳۷۸	۲۲/۰۷	۳۶/۵۵	۵۳

در این تحقیق برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع از رابطه‌ی پنمن-مانتیت فائو (۵۶) به شرح زیر استفاده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

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

در رابطه بالا ET_0 تبخیر - تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، T متوسط دمای هوای روزانه در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع دو متری از

سطح زمین ($m s^{-1}$)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa/^{\circ}C$)، γ ضریب رطوبتی ($KPa/^{\circ}C$)، و G جریان گرما در داخل خاک ($MJ m^{-2} day^{-1}$) می‌باشند.

در این مطالعه، رطوبت نسبی، فشار بخار واقعی

و تابش خورشیدی به‌عنوان متغیرهای غیر موجود، برای استفاده از روش پنمن-مانتیت فائو مطرح شدند (جدول ۲):

جدول ۲- ترکیب داده‌ها در مدل برآورد داده‌های غیر موجود پنمن-مانتیت فائو

نام روش	نماد روش
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار واقعی	ET ₀ -ea
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های تابش خورشیدی	ET ₀ -Rs
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های رطوبت نسبی و تابش خورشیدی	ET ₀ -Rs,-RH
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار و رطوبت نسبی	ET ₀ -ea,-RH
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار و تابش خورشیدی	ET ₀ -ea,-Rs
تبخیر-تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی	ET ₀ -ea,-Rs,-RH

تابش خورشیدی

K_{TS} ضریبی است که از $0.16 (C^{-1})$ در نواحی ساحلی تا $0.19 (C^{-1})$ در نواحی داخلی و دور از ساحل متغیر است. متغیرهای یادشده در همان دوره یکسان تعیین شدند. تابش طول‌موج کوتاه نسبی معیاری برای توصیف ابرناکی اتمسفر است. با افزایش ابرناکی هوا، این نسبت کوچک‌تر خواهد شد.

در صورت امکان نداشتن اندازه‌گیری مستقیم تابش خورشیدی، می‌توان مقدار تابش رسیده به زمین را از رابطه ۴ برآورد نمود. برای محاسبه تابش خالص خورشیدی از روابط ۲ تا ۷ استفاده می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$R_a = 37.6dr(\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (2)$$

$$R_{nl} = \frac{\delta}{2}(T_{max}^4 + T_{min}^4) \times (0.34 - 0.14\sqrt{e_a})(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (3)$$

$$R_s = K_{rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (4)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2Z * 10^{-5}) R_a \quad (5)$$

$$R_{ns} = (0.77) R_s \quad (6)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

فشار بخار

هنگامی که داده‌های فشار بخار واقعی هوا (e_a) مستقیم اندازه‌گیری نشده باشد، مقدار آن از رابطه آن با رطوبت نسبی به شرح زیر به دست می‌آید (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

$$e_s = \frac{1}{2} \times \left[\left(0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{max}}{T_{max} + 237.3}\right) \right) + \left(0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right) \right) \right] \quad (8)$$

$$e_a = \left(\frac{RH}{100}\right) e_s \quad (9)$$

در این رابطه، T_{min} و T_{max} به ترتیب، کمینه و بیشینه دمای روزانه (درجه سلسیوس)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و RH رطوبت نسبی است.

محاسبه فشار بخار واقعی از دمای نقطه شبنم

از آنجایی که دمای نقطه شبنم دمایی است که هوا باید در آن خنک شود تا هوا از بخار آب اشباع شود، فشار بخار واقعی (e_a)، فشار بخار اشباع در نقطه شبنم است. فشار بخار واقعی (e_a) را می‌توان با استفاده از دمای نقطه شبنم T_{dew} و از رابطه زیر محاسبه نمود (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

در رابطه‌های بالا، R_a تابش برون زمینی (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، dr فاصله زمین تا خورشید، δ زاویه انحراف خورشید از خط استوا (رادیان)، ϕ عرض جغرافیایی ایستگاه (رادیان)، ω_s زاویه ساعتی غروب خورشید (رادیان)، R_{nl} تابش طول‌موج بلند خالص در سطح پوشش گیاهی (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، T_{min} کمینه دمای روزانه (کلوین) و T_{max} بیشینه دمای روزانه (کلوین)، R_{ns} تابش طول‌موج کوتاه خالص (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_s تابش خورشیدی رسیده به زمین (مگا ژول بر مترمربع بر روز) R_{so} تابش خورشیدی در آسمان صاف (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_n تابش خالص خورشیدی (مگاژول بر مترمربع بر روز)، Z ارتفاع محل از سطح دریا (متر) و

همبستگی معنی‌دار بین مقادیر تبخیر - تعرق روزانه برآورد شده با داده‌های کامل و محدود، از آزمون فرض صفر و روابط زیر استفاده شد:

$$\begin{aligned} H_0: r &= 0 \\ H_1: r &\neq 0 \\ t_0 &= \frac{r\sqrt{n-2}}{1-r^2} \end{aligned} \quad (15)$$

در روابط بالا H_0 فرض صفر، H_1 ادعا، t_0 آماره آزمون، R^2 و r به ترتیب ضریب تبیین و ضریب همبستگی خطی و n تعداد زوج داده‌های بررسی شده است.

نتایج و بحث

شاخص‌های آماری درستی برآوردهای ET_0 روزانه با داده‌های محدود، در مقایسه با مقادیر ET_0 برآورد شده با داده‌های کامل (ET_{0-Full}) در جدول (۳) ارائه شده است.

$$e_a = \left[0.611 \exp \frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (10)$$

ارزیابی صحت تخمین ET_0 با کاربرد داده‌های کامل و محدود با استفاده از شاخص‌های ارزیابی صحت برآورد ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای اریب (MBE)، بیشینه خطا (ME) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام شد. شاخص‌های یادشده از روابط زیر محاسبه شدند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - p_i) \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - p_i| \quad (13)$$

$$ME = MAX(p_i - o_i)_{i=1}^n \quad (14)$$

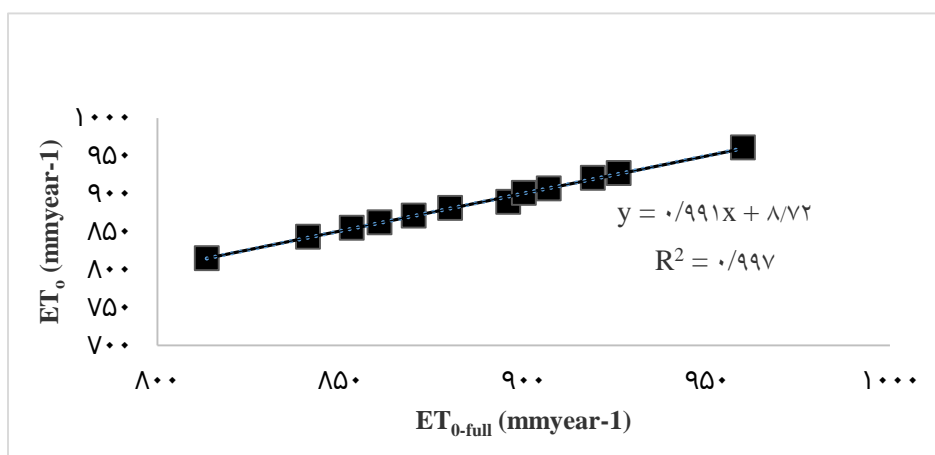
در روابط بالا: n تعداد مشاهدات، P_i مقادیر برآورد شده و O_i مقادیر اندازه‌گیری شده است. برای بررسی

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین صحت برآورد ET_0 روزانه با داده‌های محدود در مقایسه با داده‌های کامل

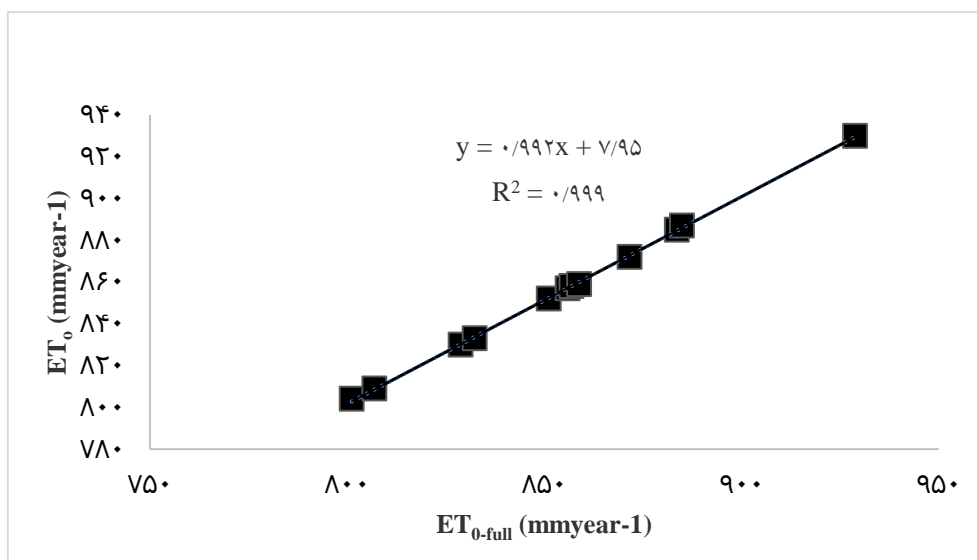
ایستگاه	آماره	ET_{0-ea}	$ET_{0-ea-RH}$	ET_{0-Rs}	$ET_{0-ea-Rs}$	$ET_{0-Rs-RH}$	$ET_{0-ea-Rs-RH}$
ساری	RMSE	۰/۷۶۷	۰/۲۲۹	۱/۰۹۳	۰/۷۵۲	۰/۷۰۹	۰/۷۵۱
	MBE	۰/۰۲۱	-۰/۰۰۱	-۰/۴۳۰	-۰/۰۲۰	-۰/۰۳۰	-۰/۰۲۰
	MAE	۰/۴۱۴	۰/۰۷۳	-۰/۶۷۵	-۰/۳۹۱	-۰/۳۵۳	-۰/۳۹۱
	ME	۲/۸۵	۲/۵۶۹	۹/۰۰۱	۵/۶۱۰	۵/۷۲۳	۶/۴۱۱
قائم‌شهر	RMSE	۰/۷۷۹	۰/۲۲۸	۱/۱۰۰	۰/۷۵۶	۰/۷۱۳	۰/۷۵۵
	MBE	۰/۰۱۸	-۰/۰۰۴	-۰/۴۱۳	-۰/۰۱۷	-۰/۰۲۷	-۰/۰۱۷
	MAE	۰/۴۱۵	۰/۰۷۰	-۰/۶۶۹	-۰/۳۹۱	-۰/۳۵۳	-۰/۳۹۱
	ME	۲/۸۸۴	۲/۵۹۱	۹/۰۸۷	۵/۶۶۲	۵/۷۷۷	۶/۴۷۱
آمل	RMSE	۰/۷۸۴	۰/۲۳۶	۱/۱۰۳	۰/۷۶۱	۰/۷۱۸	۰/۷۶۰
	MBE	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۴	-۰/۴۳۷	-۰/۰۲۶	-۰/۰۳۶	-۰/۰۲۶
	MAE	۰/۴۲۲	۰/۰۷۹	-۰/۶۸۳	-۰/۳۹۸	-۰/۳۶۰	-۰/۳۹۸
	ME	۲/۸۷۷	۲/۵۸۶	۹/۰۴۶	۵/۶۴۰	۵/۷۵۳	۶/۴۴۵

در شرایط فقدان مقادیر فشار بخار واقعی با استفاده از داده‌های رطوبت نسبی بسیار مشابه با برآورد ET_0 در شرایط موجود بودن داده‌های فشار بخار واقعی بودند. شکل‌های ۱ تا ۳ مقدار شیب، عرض از مبدأ و ضریب تبیین بین مقادیر ET_0 برآورد شده با داده‌های کامل و محدود در شرایط فقدان داده‌های فشاربخار و رطوبت نسبی را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

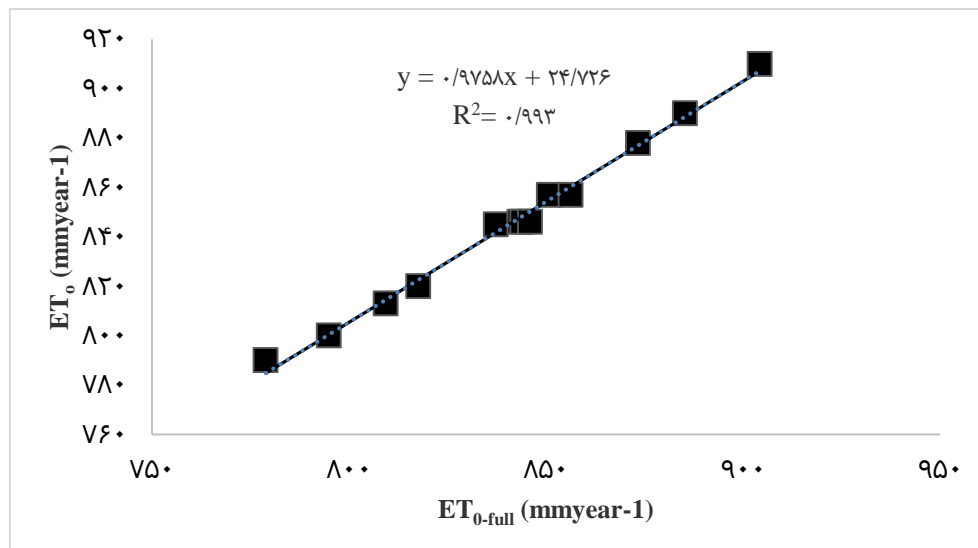
شاخص‌های آماری صحت‌سنجی نشان داد که در هر سه ایستگاه هنگامی که داده تابش خورشیدی در دسترس نباشد باعث افزایش پراکندگی برآوردهای ET_0 شده و بیشترین عدم قطعیت مشاهده شد. ولی هنگامی که داده‌های رطوبت نسبی و فشار بخار واقعی در دسترس نبودند روش پنمن-مانتیش فائو توانست برآورد ET_0 روزانه در سه ایستگاه یادشده را با صحت قابل قبولی انجام دهد. R_s تعیین شده از رابطه (۴) در برآورد ET_0 به‌خوبی R_s اندازه‌گیری شده عمل نمی‌کند. برآورد ET_0



شکل ۱- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{0-full} و $ET_{0-ea-RH}$ در ایستگاه ساری



شکل ۲- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{0-full} و $ET_{0-ea-RH}$ در ایستگاه قراخیل قائم‌شهر

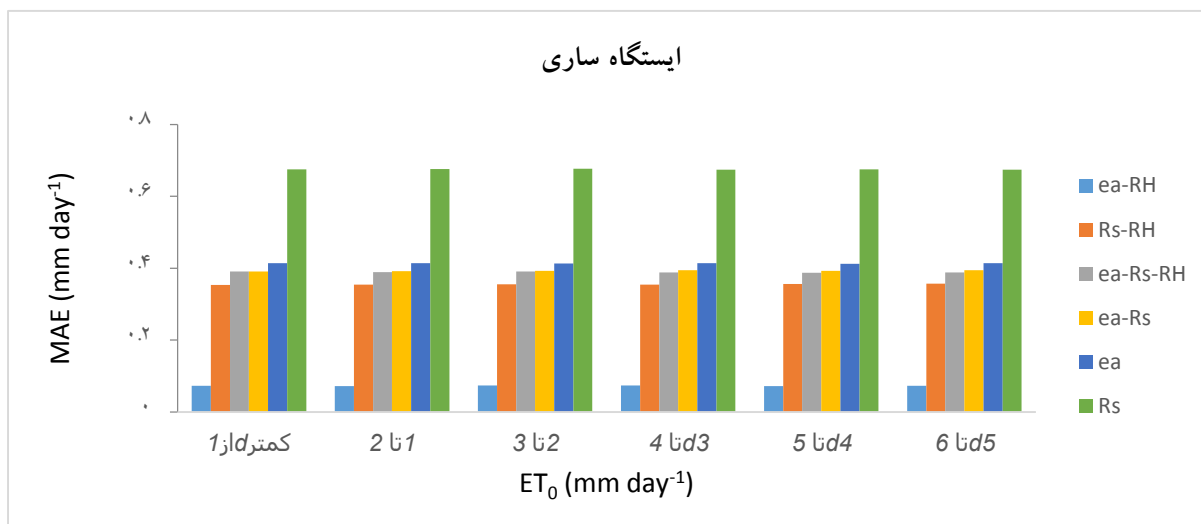


شکل ۳- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{0-ful} و $ET_{0-ea-RH}$ در ایستگاه آمل

برآوردی جزئی $ET_{0-ea-RH}$ نسبت به ET_{0-ful} است که این مقدار قابل‌اغماض بوده و در شرایط فقدان داده‌های رطوبت نسبی و فشار بخار، استفاده از رابطه ۸ و سپس محاسبه ET_0 از رابطه - مانیت فائو نتایج کاملاً قابل قبولی را ارائه می‌دهد که با نتایج بهممنش و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت داشت.

شکل ۴ مقادیر MAE برای متوسط طولانی‌مدت روزانه ET_0 برآورد شده با داده‌های محدود و کامل را در ایستگاه ساری به تفکیک مقادیر تبخیر-تعرق کمتر از یک میلی‌متر در روز تا بیش از شش میلی‌متر در روز، نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۱ تا ۳ مقدار ضریب تبیین (R^2) برای ساری، قائم‌شهر و آمل به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۳ به‌دست‌آمده و همبستگی بسیار خوبی را بین دو حالت برآورد ET_{0-ful} و $ET_{0-ea-RH}$ نشان می‌دهد. مقدار شیب ۰/۹۹۱، ۰/۹۹۲ و ۰/۹۷۵ به یک نزدیک و عرض از مبدأ ۸/۷۲، ۷/۹۵ و ۲۴/۷۲۶ به‌ویژه برای ایستگاه‌های ساری و قراخیل قائم‌شهر به صفر نزدیک بودند که بیانگر این است که مقادیر برآوردهای ET_{0-ful} و $ET_{0-ea-RH}$ بسیار نزدیک به هم بودند که نشان‌دهنده‌ی برقراری یک تابع یک به یک پوشا است. همچنین مقدار MBE به ترتیب برای ایستگاه ساری ۰/۰۰۱-، قائم‌شهر ۰/۰۰۴- و آمل ۰/۰۰۴- بودند که نشان‌دهنده‌ی کم



شکل ۴- مقادیر MAE برای میانگین طولانی مدت تبخیر-تعرق مرجع روزانه برآورد شده از روش پنمن-مانتیت فانو با داده‌های محدود در مقایسه با ET_{0-full} در ایستگاه ساری

به‌خوبی Rs اندازه‌گیری شده عمل نمی‌کند. در میان عوامل مؤثر بر تبخیر تابش خورشیدی از بقیه کلیدی‌تر است، تابش خورشیدی یک متغیر فراجوی است هنگامی- که این متغیر در ترکیب داده‌های اندازه‌گیری نباشد و بر پایه رابطه (۴) با کمک متغیر دما برآورد شود از عدم قطعیت زیادی برخوردار خواهد بود، زیرا دما یک متغیر درون جوی است که به نوبه خود تحت تأثیر عوامل متعدد زمینی (مانند طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع) و جوی (مانند رطوبت نسبی و باد) قرار دارد. در جدول ۴ نتایج آزمون t برآوردهای ET_0 با داده‌های محدود، در مقایسه با مقادیر ET_0 برآورد شده با داده‌های کامل، در سطح احتمال ۹۵ درصد ارائه شده است؛ که نشان می‌دهد در سطح احتمال ۹۵ درصد بین تمام مقادیر برآورد شده با داده‌های کامل و محدود اختلاف معنی‌دار وجود ندارد و دارای همبستگی هستند.

آماره MAE که بیانگر حداکثر خطای ممکن در برآورد است نشان داد که از گروه‌بندی ET_0 در بازه‌های مختلف کمتر از یک تا بیش از شش میلی‌متر در روز نقش نمی‌پذیرد و مقدار آن ثابت است (شکل ۴) و در هر ترکیب داده‌های محدود هنگامی که فشار بخار واقعی وجود نداشته باشد و از رطوبت نسبی برآورد شود، کمترین MAE بدست آمد. این یافته برای دو ایستگاه قراخیل قائمشهر و آمل نیز مشابه بود.

در ترکیب‌های مختلف وقتی اختلاف تبخیر-تعرق مرجع محاسباتی با داده کامل و داده محدود بیشتر- شود خطا هم افزایش می‌یابد، بیشترین مقدار MAE زمانی است که داده تابش خورشیدی موجود نبوده و کمترین خطا زمانی است که داده‌های فشار بخار و رطوبت نسبی موجود نبود (جدول ۳). هنگامی که داده‌های R_s در دسترس نباشد، برآورد این متغیر طبق آنچه قبلاً توضیح داده شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸)، در برآورد، ET_0

جدول ۴- نتایج آزمون t برای ET_0 برآورد شده با داده‌های محدود در مقایسه با ET_{0-full} در ایستگاه‌های ساری، قائمشهر و آمل

$ET_{0-ea-Rs-RH}$	$ET_{0-Rs-RH}$	$ET_{0-ea-Rs}$	ET_{0-Rs}	$ET_{0-ea-RH}$	ET_{0-ea}	نام ایستگاه
۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۶۱	۱/۱۵	۰/۲۴	۰/۴۲	ساری
۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۸۱	۱/۰۸	۰/۳۳	۰/۴۶	قراخیل قائمشهر
۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۸۰	۱/۰۹	۰/۳۱	۰/۴۵	آمل

نتیجه‌گیری

دمای کمینه و بیشینه استفاده می‌شود زیرا این متغیرهای دمایی خود تحت تأثیر عوامل متعدد زمینی و درون جوی هستند و از این‌رو استفاده از آن‌ها در برآورد تابش خورشیدی و سپس ET_0 با عدم قطعیت زیادی همراه است. کمترین خطا زمانی است که داده رطوبت نسبی و فشار بخار واقعی موجود نبوده و برای برآورد فشار بخار واقعی از دمای نقطه شبنم استفاده می‌شود. زمانی که داده تابش خورشیدی و فشار بخار واقعی وجود ندارد میزان صحت برآورد تبخیر - تعرق تقریباً یکسان با زمانی است که داده‌های تابش و رطوبت موجود نباشد. از طرفی صحت این برآوردها در هر سه ایستگاه تقریباً یکسان بوده و در برخی موارد ایستگاه ساری برتر بود؛ بنابراین، زمانی که رطوبت نسبی اندازه‌گیری نشده باشد، استفاده از دمای نقطه شبنم در معادله پنمن - مانتیث فائو می‌تواند پیشنهاد خوبی برای برآورد e_a باشد. پیشنهاد می‌شود صحت روش برآورد تابش خورشیدی از داده‌های بیشینه و کمینه درجه حرارت هوا که همیشه اندازه‌گیری می‌شوند مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به اهمیت تبخیر - تعرق گیاه مرجع و نیز لزوم استفاده از روش‌های نوین در برآورد آن در این پژوهش به ارزیابی روش پنمن - مانتیث فائو جهت برآورد ET_0 با داده‌های کامل و محدود در استان مازندران، ایستگاه‌های ساری، قائم‌شهر و آمل پرداخته شد. نتایج نشان داد که زمانی که داده تابش خورشیدی در دسترس نباشد پراکندگی برآوردهای ET_0 بیشتر است. زمانی که داده‌های رطوبت نسبی و فشار بخار واقعی در دسترس نباشد روش پنمن - مانتیث فائو می‌تواند برای برآورد ET_0 روزانه در مازندران با صحت قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد. برآورد ET_0 در شرایط فقدان مقادیر فشار بخار واقعی هنگامی که با استفاده از داده‌های رطوبت نسبی محاسبه شدند، بسیار مشابه با برآورد ET_0 در شرایط موجود بودن داده‌های فشار بخار واقعی بود.

تابش خورشیدی در مقایسه با سایر داده‌ها تأثیر قابل توجهی در برآورد ET_0 دارد و بیشترین خطای برآورد شده زمانی است که داده تابش خورشیدی موجود نبوده و برای محاسبه در معادله پنمن - مانتیث فائو از داده‌های

فهرست منابع

۱. بهمنش، ج. مرتضوی، ن. محمدنژاد، ب. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر- تعرق مرجع تحت شرایط داده‌های محدود و کامل (مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و ارومیه)، نشریه دانش آب‌و‌خاک، جلد ۲۵، شماره ۳، صفحه‌های ۱۳ تا ۲۶.
۲. پناهی، م. عقدایی، م. رضایی، م. ۱۳۸۵. تعیین تبخیر و تعرق استاندارد گیاه چغندر قند در کبوترآباد اصفهان، نشریه علمی پژوهشی چغندر قند، جلد ۲۲، شماره ۱، صفحه‌های ۲۵ تا ۳۷.
۳. دهقان، ه. مکاری، م. ۱۳۹۴. ارزیابی و اصلاح مدل‌های والیانتر برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال نهم، شماره ۳۶، صفحه‌های ۸۶ تا ۹۸.
۴. رحیمی پول، م. اکبری نودهی، د. اسدی، ر. باقری، ع. شیردل شهگیری، ف. ۱۴۰۰. تأثیر آبیاری قطره‌ای و غرقابی بر عملکرد و بهره‌وری آب در دو روش کشت برنج در مازندران، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۵، شماره ۴، صفحه‌های ۳۹۱ تا ۴۰۴.

۵. رحیمی خوب، ع، ۱۳۸۵. بررسی استفاده از کمینه داده‌های هواشناسی در معادله پنمن مانتیث (مطالعه موردی استان خوزستان). اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران، دانشکده مهندسی علوم و مهندسی آب، اهواز، ایران.
۶. رودباری، ع، باقری، ع، ۱۳۹۵. برآورد تبخیر - تعرق مرجع تحت شرایط داده‌های محدود و کامل در شرایط اقلیمی استان مازندران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر.
۷. سبزواری، ی. سعیدی نیا، م، ۱۴۰۰. ارزیابی مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه بروجرد)، نشریه علوم آب‌و خاک، جلد ۲۵، شماره ۲، صفحه‌های ۲۳۷ تا ۲۵۳.
۸. شیخ‌الاسلامی، ن. قهرمان، ب. مساعدی، ا. داوری، ک. مهاجرپور، م، ۱۳۹۳. پیش‌بینی تبخیر و تعرق گیاه مرجع ET₀ با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی PCA و توسعه مدل رگرسیونی خطی چندگانه MLR-PCA (مطالعه موردی: ایستگاه مشهد)، نشریه آب‌و خاک، جلد ۲۸، صفحه‌های ۴۲۰ تا ۴۲۹.
۹. کوچک زاده، م. نیک‌بخت، ج، ۱۳۸۳. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر - تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران با روش استاندارد فائو - پنمن. مجله علوم کشاورزی، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه‌های ۴۳ تا ۵۷.
۱۰. فولادمند، ح، ۱۳۸۹. پیش‌بینی ماهانه تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس، مجله دانش آب‌و خاک، جلد ۱، شماره ۴، صفحه‌های ۱۵۷ تا ۱۶۹.
۱۱. یاوری، م. امیدوار، ج. داوری، ک. فرید حسینی، ع، ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق واقعی سالانه در مقیاس بزرگ به کمک تبخیر و تعرق برآوردی از روش سبال در دشت نیشابور، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال پنجم، شماره هفدهم.
12. Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 300 p.
13. Bois B, Pieri P, Van Leeuwen C and Gaudillere JP, 2005. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith evapotranspiration formula and comparison of empirical methods used in viticulture soil water balance. Pp 187-193. Proceedings of the XIV International GESCO Viticulture Congress. Geisenheim, Germany.
14. Fooladmand HR, 2012. Comparing reference evapotranspiration using actual and estimated sunshine hours in south of Iran. African Journal of Agricultural Research 7(7): 1164-1169.
15. Liu Y, Pereira LS, 2001. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data (in Chinese). Journal of Hydrologic Engineering 3: 11-17.
16. Sentelhas PC, Gillespie TJ and Santos EA, 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. Agricultural Water Management 97: 635-644.
17. Trajkovic S and Kolakovic S, 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations under Humid Conditions. Water Resource Management, 23: 3057-3067.
18. Wang YM, Namaona W, Gladen AL, Traore S and Deng LT, 2011. Comparative study on estimating reference evapotranspiration under limited climate data condition in Malawi. African Journal of Physics Sciences 6(9): 2239-2248.
19. Widmoser P, 2009. A discussion on and alternative to the Penman-Monteith equation. Agricultural water management. 96(4): 711-721.

Estimation of Reference Evapotranspiration Using Full and Limited Data of Sari, Qarakheil and Amol Synoptic Stations

A. Roudbari and A. Bagheri¹

Graduate of Irrigation and Drainage, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.
atefroudbari@yahoo.com

Assistant Prof., Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University,
Qaemshahr, Iran. ali523b@yahoo.com

Received: August 2022 and Accepted: February 2023

Abstract

Unfortunately, at some meteorological stations, there are no facilities for measurement of some weather parameters, so, they should be estimated. Therefore, determining the correctness of the reference evapotranspiration (ET_o) method by using the estimated data is very important. Based on this, the objective of the present study was to evaluate the performance of the Penman-Monteith method for estimating ET_o in Mazandaran Province, Iran, when solar radiation (R_s), vapor pressure (e_a) and relative humidity (RH) data are not available. Data of Sari, Qarakheil, and Amol synoptic stations were used to compare the estimated ET_o by the Penman-Monteith method for the complete and limited data sets. The results showed that when RH and e_a data were missing, the Penman-Monteith method was still a very good option for estimating ET_o in Sari, Ghaemshahr and Amol station, with RMSE values smaller than 0.3 mm day^{-1} . However, when R_s was missing, the Penman-Monteith method was not good enough for estimating ET_o , and RMSE increased to more than 1 mm day^{-1} . The results also showed that solar radiation was the most effective parameter on ET_o estimation and both vapor pressure and relative humidity had the same effect on ET_o estimation.

Keywords: Penman-Monteith method, solar radiation data, Mazandaran

¹ - Corresponding author: Department of Water Science and Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.