

برآورد تبخیر- تعرق مرجع تحت شرایط داده‌های محدود و کامل (مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و ارومیه)

جواد بهمنش^{۱*}، نوشین مرتضوی^۲، بایرامعلی محمد نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۰۹

^۱ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

^۲ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: j.behmanesh@urmia.ac.ir

چکیده

یکی از پیش‌نیازهای اساسی بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، تخمین دقیق میزان آب مصرفی گیاه است. برآورد دقیق مقدار آبی که صرف تبخیر- تعرق گیاهی می‌شود، یکی از عوامل مهم برنامه‌ریزی جهت توسعه کشاورزی و افزایش محصول است. روش پنمن- مانتیث فائو (FPM) به‌عنوان استاندارد جهانی به‌منظور برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) و نیز برای ارزیابی دیگر روش‌های تخمین ET_0 پیشنهاد گردیده که نیازمند داده‌های تابش خورشیدی، سرعت باد، دما و رطوبت هوا است. متأسفانه امکانات اندازه‌گیری برخی از پارامترهای آب و هوایی در بعضی از ایستگاه‌های هواشناسی وجود ندارد. بنابراین، تشخیص درستی روش‌های تخمین ET_0 با استفاده از داده‌های آب و هوایی برآورد شده بسیار مهم است. بر این اساس، هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد روش FPM در برآورد ET_0 زمانی که داده‌های تابش خورشیدی (R_s)، فشار بخار (e_d) و رطوبت نسبی (RH) موجود نباشند، تحت شرایط اقلیمی شمال غرب ایران است. داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز، به‌منظور مقایسه با ET_0 برآورد شده توسط روش FPM با مجموعه داده‌های کامل و با داده‌های محدود، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد هنگامی که داده‌های RH و e_d موجود نباشند، برآورد آن‌ها با استفاده از روش FPM گزینه بسیار خوبی برای به‌دست آوردن ET_0 در ارومیه و تبریز، با $RMSE$ کوچک‌تر از 0.4 میلی‌متر در روز است. وقتی که داده‌های R_s موجود نباشد، برآورد آن با استفاده از روش FPM برای به‌دست آوردن ET_0 با $RMSE$ بیش از 0.7 میلی‌متر در روز، به‌اندازه کافی نتایج خوبی را ارائه نمی‌دهد. همچنین نتایج نشان داد مؤثرترین پارامتر برای برآورد تبخیر- تعرق تابش خورشیدی بوده و تأثیر داده‌های فشار بخار و رطوبت نسبی، بر دقت برآورد ET_0 ، تقریباً به یک میزان است.

واژه‌های کلیدی: ارومیه، پنمن- مانتیث فائو، تبریز، تبخیر- تعرق، داده‌های کامل، داده‌های محدود

Estimation of Reference Evapotranspiration Using Full and Limited Data (Case Study: Tabriz and Urmia Synoptic Stations)

J Behmanesh^{*1}, N Mortazavi², B Mohammadnezhad³

Received: 6 January 2014 Accepted: 31 August 2014

¹- Assoc.Prof. Water Engin. Dept., Urmia University

²- Former M.Sc. Student, Dept. of Water Engin., Urmia University

³- Assist. Prof., Dept. of Civil Engin., Qom University of Technology

* Corresponding Author, Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir

Abstract

One of the essential prerequisites for improving water consumption management in a farm is the accurate estimation of the crop water consumptive use. Accurate estimation of the consumed water by the crop evapotranspiration is one of the important factors in planning for agriculture development and increasing agricultural production. The FAO Penman– Monteith (*FPM*) method has been proposed as a universal standard method to estimate the reference crop evapotranspiration (ET_o) and to evaluate the other procedures of ET_o estimation, which needs solar radiation, wind speed, air temperature and relative humidity data. Unfortunately, there are no facilities for measurement of some weather parameters at some weather stations. Therefore, identifying the correctness of the ET_o estimation methods by using the estimated climatic data is very important. Based on this, the objective of the present study was to evaluate the performance of the *FPM* method for estimating ET_o when solar radiation (R_s), vapor pressure (e_a) and relative humidity (RH) data were not available under climatological conditions of the northwest of Iran. Data of Urmia and Tabriz stations were used to compare the estimated ET_o by the *FPM* method for the complete and limited data sets. The results showed that when RH and e_a data were missing, the *FPM* method was still a very good option for estimating ET_o in Urmia and Tabriz stations, with *RMSE* value smaller than 0.4 mm day^{-1} . When R_s was missing, the *FPM* method was not good enough for estimating ET_o , and *RMSE* increased to 0.7 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: Completed data, Evapotranspiration, FAO Penman Monteith, Limited data, Tabriz, Urmia

عده دارند. زیرا بدون آگاهی از مقدار صحیح آن، آبی که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، یا کمتر از آب مورد نیاز گیاه بوده و باعث کاهش مقدار محصول می‌گردد و یا بیشتر از مقدار مورد نیاز گیاه بوده و باعث اتلاف آب و ایجاد مسئله زهکشی می‌شود (رحیم زادگان

مقدمه

در مطالعات بیلان آبی، برنامه‌ریزی آبیاری، طراحی و تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب، مقادیر تبخیر- تعرق^۱ (ET) نقش اصلی را بر

¹-Evapotranspiration

آب‌وهوایی برآورد صحیحی از تبخیر- تعرق گیاه مرجع ارائه می‌کند (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

معادله FPM نسبت به معادله‌های تجربی این برتری را دارد که هر دو مکانیسم انرژی و آیرودینامیک در پدیده تبخیر در نظر گرفته شده است، لذا ارائه یک روش برای حل این معادله بدون حذف مکانیسم‌های فوق که داده‌های کمتری برای اندازه‌گیری لازم داشته باشد، راهکار مناسب برای توسعه ایستگاه‌های هواشناسی با هزینه کم برای مناطق کشاورزی کشور است (رحیمی خوب ۱۳۸۵).

در تحقیق صالح و سندیل (۱۹۸۴) در عربستان مشخص شده است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دو پارامتر دما و تابش خورشیدی نقش اساسی را بر تبخیر- تعرق ایفا می‌کنند و سایر عوامل در درجه دوم اهمیت قرار دارند. انتصاری و همکاران (۱۳۷۵) تبخیر- تعرق پتانسیل را در چند منطقه از ایران با روش پنمن مانیتیت محاسبه و با دیگر روش‌های توصیه‌شده سازمان خواروبار جهانی (تشت تبخیر، پنمن، پنمن اصلاح‌شده، تشعشع و بلانی کریدل) مورد مقایسه قرار دادند و قابلیت اتکا به روش پنمن مانیتیت را تحلیل نمودند. یک تحلیل حساسیت از مدل تبخیر- تعرق پتانسیل پنمن مانیتیت توسط بویس و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد که نشان داد سرعت باد و تغییرات دمایی تابش خورشیدی تأثیر به‌سزایی در محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل دارد. دمای هوا به‌آسانی و با دقت زیاد در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود و معرف میزان انرژی برای تبخیر آب است و مستقیماً به‌وسیله اندازه‌گیری به‌دست می‌آید. سرعت باد باعث انتقال بخار آب از سطح تبخیر می‌شود و یکی از عوامل اصلی در پدیده تبخیر است و این پارامتر نیز مثل دمای هوا فقط با

(۱۳۷۵). تبخیر- تعرق اصطلاحی است که برای توصیف مجموع تعرق گیاهی و تبخیر از سطح زمین مورد استفاده واقع می‌شود. تبخیر- تعرق بخش مهمی از چرخه آب در طبیعت هست. از آنجا که به‌دست آوردن تبخیر- تعرق برای هر نوع زراعت و یا پوشش گیاهی امری بسیار مشکل است، در عمل ابتدا پارامتری به نام تبخیر- تعرق مرجع^۲ (ET_0) محاسبه شده و سپس به کمک آن تبخیر- تعرق گیاه موردنظر برآورد می‌شود (آلن و همکاران ۱۹۸۹). بر اساس استاندارد فائو، تبخیر- تعرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن) در یک دوره زمانی مشخص مصرف نماید به‌طوری‌که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند (شریفان و همکاران ۱۳۸۴).

روش‌های زیادی مبتنی بر داده‌های هواشناسی برای شرایط مختلف جغرافیایی و آب و هوایی برای محاسبه ET_0 تدوین شده است. این روش‌ها از معادله‌های پیچیده مثل روش پنمن- مانیتیت فائو (آلن و همکاران ۱۹۹۸)، که به داده‌های هواشناسی زیادی نیاز دارند تا معادله‌های تجربی ساده‌تر مثل روش‌های بلانی کریدل (بلانی و کریدل ۱۹۵۰)، هارگریوز و سامانی (هارگریوز و سامانی ۱۹۸۲) و غیره که به داده‌های کمتری نیاز دارند، گسترده است. به‌عنوان جایگزینی برای لایسمتر، معادله‌های ترکیبی مانند پنمن- مانیتیت فائو (FPM) جهت تخمین تبخیر- تعرق توصیه می‌شود. برای استفاده از این معادله لازم است از داده‌های ثبت‌شده ایستگاه‌های استاندارد هواشناسی استفاده شود (آلن و همکاران ۱۹۹۸، رحیمی خوب ۱۳۸۵). این روش نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با درجه اعتماد بالایی در دامنه وسیعی از مناطق و شرایط

²Reference Evapotranspiration

دسترس باشند روش *FAO*، به‌منظور برآورد سایر متغیرهای آب و هوایی که در مدل *FPM* مورد نیاز است، مناسب می‌باشد. با این حال در مناطق دارای سرعت باد بالا، زمانی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی، موجود نباشند، در استفاده از این روش می‌باید دقت نمود. نتایج تحقیق سنتلهاس و همکاران (۲۰۱۰)، در جنوب اونتاریو، کانادا، به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پنمن-مانتیث فائو *FPM* در برآورد ET_0 با داده‌های کامل و محدود، عملکرد خوب روش *FPM* را در برآورد ET_0 ، زمانی که داده‌های سرعت باد و رطوبت نسبی موجود نباشد، نشان داد. مقادیر بالای *RMSE*، حاکی از عدم عملکرد قابل قبول روش *FPM* در برآورد ET_0 در شرایط فقدان داده‌های تابش خورشیدی بود. در تحقیق فولادمنند (۲۰۱۲) در استان فارس، ایران، مشخص شد که استفاده از داده‌های ساعات آفتابی ماهانه برآورد شده از داده‌های درجه حرارت، در مناطقی که ساعات آفتابی موجود نیستند، مطابقت بالایی در برآورد ET_0 ماهانه با معادله پنمن-مانتیث فائو دارد.

هدف از تحقیق حاضر بررسی ET_0 برآورد شده با استفاده از داده‌های محدود در مقابل ET_0 محاسبه شده با سری داده‌های کامل تحت شرایط محیطی شمال غرب ایران است. همچنین با استفاده از فرمول پنمن-مانتیث فائو، مؤثرترین متغیر هواشناسی بر تبخیر-تعرق برآورد شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد نیاز این تحقیق از دو ایستگاه هواشناسی سینوپتیک ارومیه و تبریز اخذ گردید. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا، دمای نقطه شبنم، فشاربخار، تابش خورشیدی، رطوبت

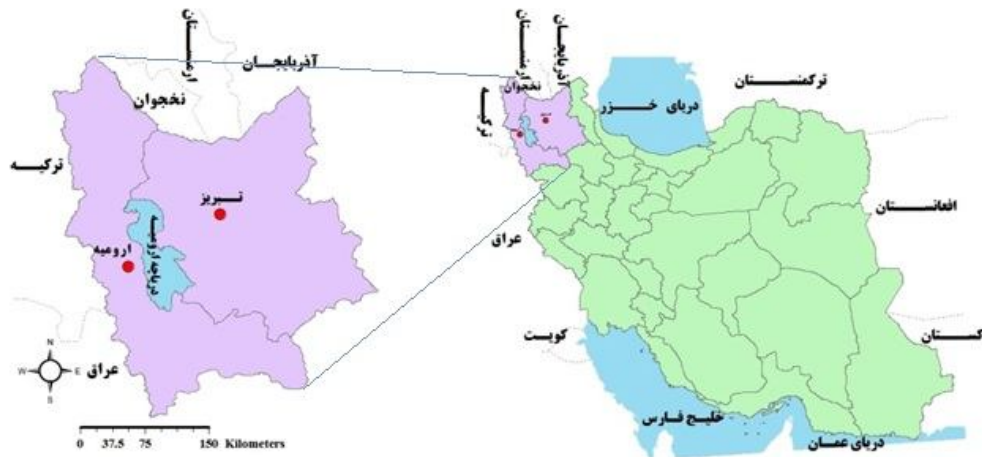
اندازه‌گیری مستقیم تعیین می‌گردد. ولی دو داده دیگر موردنیاز معادله پنمن مانتیث (رطوبت هوا و تابش خورشید) را می‌توان با استفاده از دمای بیشینه و کمینه روزانه از روابط تجربی که توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) و هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) ارائه شده‌اند، برآورد نمود. روش برآورد داده‌های محدود آلن و همکاران (۱۹۹۸)، برای برآورد ET_0 از داده‌های آب و هوایی غیر موجود، در سراسر جهان برای محاسبه ET_0 دقیق از داده‌های آب و هوایی محدود به‌کار گرفته شده است. ازجمله مطالعاتی که با استفاده از روش برآورد داده‌های غیر موجود فائو در شمال چین، توسط لیو و پریرا (۲۰۰۱) و پریرا و همکاران (۲۰۰۳) انجام شد، سازگاری خوبی را با مقادیر ET_0 (حاصل از داده‌های کامل مشاهده شده) نشان داد. دروگرز و آلن (۲۰۰۲)، روش‌های دمایی بر مبنای معادله هارگریوز را با معادله *FPM*، زمانی که داده‌ها موجود نمی‌باشند و یا دقت کافی ندارند، مورد مقایسه قرار دادند. ایشان در مطالعه خود معادله هارگریوز اصلاح شده را ارائه دادند که عملکرد بسیار خوبی در مقایسه با روش *FPM* نشان داد. نتایج کاملاً مشابهی در کالیفرنیا با استفاده از داده‌های متوسط پنج روزه حاصل شد و روش *FPM* و هارگریوز بهترین سازگاری را نشان داد (تمسگن و همکاران ۲۰۰۵). استوک و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعه خود برای پنج منطقه در هلند، اسپانیا، فیلیپین، ایالات متحده آمریکا، و سوریه، پوپوا و همکاران (۲۰۰۶)، در جنوب بلغارستان، همچنین جبلون و سهلی (۲۰۰۸)، در تونس به نتایج مشابه با روش برآورد داده‌های غیر موجود فائو برای محاسبه ET_0 رسیدند. وانگ و همکاران (۲۰۱۱)، در مطالعه خود در مالاوی (افریقا) به این نتیجه رسیدند که در منطقه نیمه-خشک مالاوی زمانی که فقط داده‌های دما در

نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد می‌باشد. دوره آماری ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۸ جهت مطالعه انتخاب شد. ارتفاعات اندازه‌گیری پارامترهای فوق ۲ متر بالای سطح زمین بوده و داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری

موجود می‌باشد که برای تبدیل سرعت باد به ارتفاع ۲ متری از معادله لگاریتمی پروفیل سرعت باد استفاده شده است. جدول ۱ مشخصات جغرافیایی و شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در تحقیق.

نام ایستگاه	طول جغرافیایی ($^{\circ}E$)	عرض جغرافیایی ($^{\circ}N$)	ارتفاع از سطح آزاد دریا (m)
ارومیه	$45^{\circ} 5'$	$37^{\circ} 32'$	۱۳۱۵/۹
تبریز	$46^{\circ} 17'$	$38^{\circ} 5'$	۱۳۶۴



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در این تحقیق.

سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($m s^{-1}$)
 $e_s - e_d$ ، کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲
 متری (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار $^{\circ}C KPa$
 γ ، ضریب رطوبتی ($^{\circ}C KPa$) و G جریان
 گرما به داخل خاک ($MJ m^{-2} day^{-1}$) می‌باشند.

در این تحقیق، رطوبت نسبی، فشار بخار
 واقعی و تابش خورشیدی به‌عنوان متغیرهای غیر
 موجود، برای استفاده از روش پنمن-مانتیت فائو
 مطرح شده‌اند (جدول ۲).

در این تحقیق برای برآورد تبخیر- تعرق
 مرجع از معادله پنمن-مانتیت فائو به‌شرح زیر
 استفاده گردید (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

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

در رابطه فوق ET_o تبخیر- تعرق مرجع
 R_n تابش خالص در سطح پوشش
 گیاهی ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، T متوسط دمای هوای
 روزانه در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2

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	$ET_o - ed$
تبخیر- تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های تابش خورشیدی	$ET_o - R_s$
تبخیر- تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های رطوبت نسبی و تابش	$ET_o - R_s, -RH$
تبخیر- تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار و رطوبت نسبی	$ET_o - ed, -RH$
تبخیر- تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار و تابش خورشیدی	$ET_o - ed, -R_s$
تبخیر- تعرق برآورد شده در شرایط فقدان داده‌های فشار بخار، رطوبت نسبی و تابش	$ET_o - ed, -R_s, -RH$

تابش خورشیدی

(مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_{so} تابش خورشیدی در آسمان صاف (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_n تابش خالص خورشیدی (مگاژول بر متر مربع بر روز)، Z ارتفاع محل از سطح دریا (متر) و K_{rs} ضریبی است که از 0.16 ($^{\circ}C^{-1}$) در نواحی ساحلی، تا 0.19 ($^{\circ}C^{-1}$) در نواحی داخلی و دور از ساحل متغیر می‌باشد. عوامل مذکور در همان دوره یکسان تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که تابش طول موج کوتاه نسبی معیاری برای توصیف ابرناکی اتمسفر است. با افزایش ابرناکی هوا، این نسبت کوچک‌تر خواهد شد.

فشار بخار: هنگامی که داده‌های فشار بخار واقعی هوا مستقیماً اندازه‌گیری نشده باشد، مقادیر فشار بخار واقعی (e_d) را می‌توان از رابطه آن با رطوبت نسبی به شرح زیر به دست آورد (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

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

$$e_d = \left(\frac{RH}{100} \right) e_s \quad [9]$$

در رابطه ۸، T_{max} و T_{min} به ترتیب، کمینه و بیشینه دمای روزانه (درجه سلسیوس)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و RH رطوبت نسبی می‌باشد.

رطوبت نسبی

زمانی که داده‌های رطوبت نسبی هوا در اختیار نباشد، فشار بخار واقعی (e_d) را می‌توان با استفاده از دمای نقطه شبنم T_{dew} و از رابطه زیر محاسبه نمود (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

در صورت عدم امکان 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).

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

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

$$R_s = K_{rs} (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad [4]$$

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

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

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [7]$$

در روابط فوق، R_a تابش برون زمینی (مگاژول

بر مترمربع بر روز)، dr فاصله نسبی 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 طول موج بلند خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر مترمربع بر روز)، e_d فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، $T_{min,k}$ کمینه دمای روزانه (کلوین) و $T_{max,k}$ بیشینه دمای روزانه (کلوین)، R_{ns} تابش طول موج کوتاه خالص (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_s تابش خورشیدی رسیده به زمین

برای بررسی وجود همبستگی معنی‌دار بین مقادیر تبخیر- تعرق روزانه برآوردشده با داده‌های کامل و محدود، از آزمون فرض صفر و روابط زیر استفاده شد.

$$\begin{aligned} H_0 : r &= 0 \\ H_1 : r &\neq 0 \\ t_o &= \frac{r\sqrt{n-2}}{1-r^2} \end{aligned} \quad [۱۵]$$

در روابط فوق، H_0 فرض صفر، H_1 ادعا، t_o آماره آزمون، r^2 و r به ترتیب ضریب تبیین و ضریب همبستگی خطی و n تعداد زوج داده‌های مورد بررسی است. این آزمون معنی‌داری r را مورد بررسی قرار می‌دهد که قابل تعمیم به r^2 خواهد بود.

نتایج و بحث

پارامترهای آماری مربوط به برآوردهای ET_o روزانه با داده‌های محدود، در مقایسه با مقادیر ET_o برآورد شده با داده‌های کامل (ET_o-Full)، در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

$$e_d = \left[0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \right] \quad [۱۰]$$

نتایج تخمین تبخیر- تعرق مرجع با کاربرد داده‌های کامل و محدود، مورد مقایسه قرار گرفتند. ارزیابی ET_o برآورد شده از یک سری داده‌های موجود با استفاده از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای اریب (MBE)، بیشینه خطا (ME) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام شد. در این تحقیق جهت مقایسه، آماره ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب تبیین (R^2) از اولویت برخوردار بودند. پارامترهای فوق از معادله‌های زیر محاسبه شدند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad [۱۱]$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad [۱۲]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad [۱۳]$$

$$ME = MAX (P_i - O_i)_{i=1}^n \quad [۱۴]$$

در روابط فوق: n ، تعداد مشاهدات، P_i ، مقادیر برآورد شده و O_i ، مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

جدول ۳- پارامترهای آماری ET_o روزانه برآورد شده با داده‌های محدود در مقایسه با ET_o-Full در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز.

$ET_o-ed,-Rs,-RH$	$ET_o-Rs,-RH$	$ET_o-ed,-Rs$	ET_o-Rs	$ET_o-ed,-RH$	ET_o-ed	آماره	ایستگاه
-۰/۸۳۱	-۰/۸۲۶	-۰/۸۳۲	۱/۰۷۲	۰/۱۸۴	-۰/۳۰۵	$RMSE$	ارومیه
-۰/۱۳۷	-۰/۱۲۴	۰/۰۶۱	۰/۲۸۵	-۰/۰۰۷	۰/۱۸۹	MBE	
-۰/۴۸۹	-۰/۴۸۷	۰/۵۵۳	۰/۶۹۳	۰/۰۳۳	۰/۲۰۸	MAE	
۳/۲۱۱	۳/۲۱۱	۳/۲۴۱	۵/۰۱۱	۱/۴۳۷	۱/۸۶۴	ME	
۰/۸۱۷	۰/۷۷۱	۰/۸۱۸	۱/۱۹۱	۰/۲۴۵	۰/۸۴۳	$RMSE$	تبریز
-۰/۰۱۶	-۰/۰۲۷	۰/۰۱۶	۰/۴۶۵	-۰/۰۰۸	۰/۰۱۷	MBE	
-۰/۴۲۲	-۰/۳۸۱	۰/۴۲۲	۰/۷۳۳	۰/۰۷۴	-۰/۴۴۸	MAE	
۷/۰۱۶	۶/۲۶۳	۶/۱۳۹	۹/۸۵۳	۲/۸۰۸	۳/۱۲۶	ME	

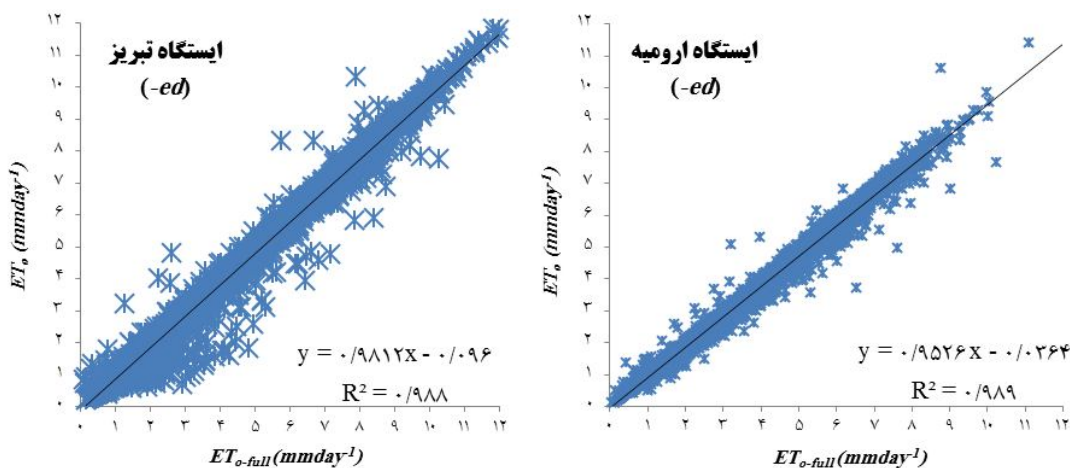
کامل و محدود را در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند.

شکل‌های ۲ تا ۷ مقدار شیب، عرض از مبدأ و ضریب تبیین بین مقادیر ET_o برآورد شده با داده‌های

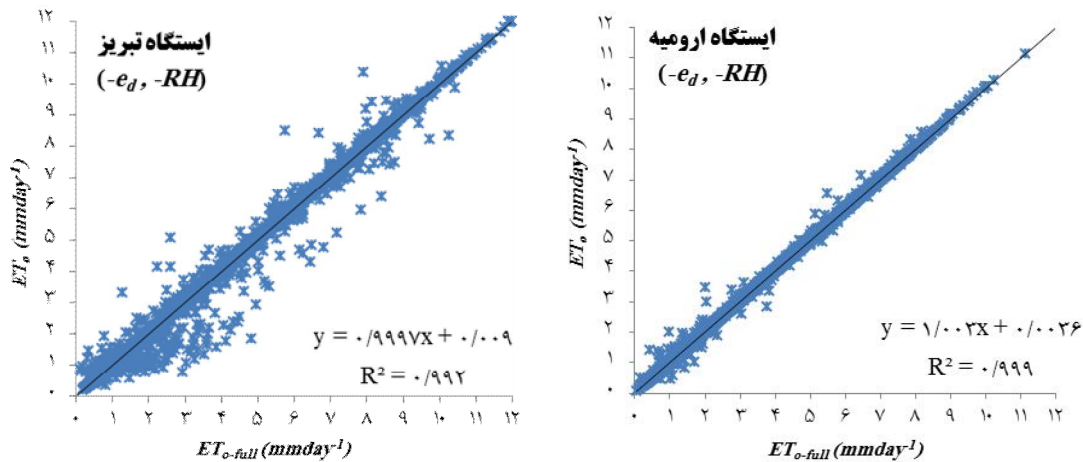
مقادیر فشار بخار واقعی را می‌توان با استفاده از رابطه ۶ برآورد نمود. با توجه به مقادیر R^2 که در هر دو ایستگاه ارومیه و تبریز ۰/۹۹ می‌باشد، همبستگی بسیار بالایی بین ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH}$ نشان می‌دهد. مقادیر شیب، $RMSE$ و MBE به ترتیب برای ایستگاه ارومیه ۰/۰۰۳، ۰/۱۸۴ و ۰/۰۰۷- ($mmday^{-1}$) و برای ایستگاه تبریز ۰/۰۹۹، ۰/۲۴۵ و ۰/۰۰۸- ($mmday^{-1}$)، و عرض از مبدأ در هر دو ایستگاه نزدیک به صفر بوده و کم برآوردی جزئی $ET_{o-ed,-RH}$ نسبت به ET_{o-Full} ملاحظه می‌شود که این مقدار قابل اغماض بوده و در شرایط فقدان داده‌های رطوبت نسبی و فشار بخار، استفاده از رابطه ۶ و سپس محاسبه ET_o از رابطه پنمن-مانتیث فائو نتایج کاملاً قابل قبولی را ارائه می‌دهد. این نتایج مشابه نتایج تحقیق جبلون و سهلی در تونس (۲۰۰۸) می‌باشد.

با توجه به شکل ۲ مقدار ضریب تبیین (R^2) برای ارومیه و تبریز به ترتیب ۰/۹۸۹ و ۰/۹۸۸ به دست آمده و همبستگی بسیار خوبی را بین دو حالت برآورد ET_{o-ed} و ET_{o-Full} نشان می‌دهد. مقدار شیب ۰/۹۵ و ۰/۹۸ و عرض از مبدأ ۰/۰۴ و ۰/۰۹ به ترتیب برای ارومیه و تبریز بیانگر این است که مقادیر برآوردهای ET_{o-ed} و ET_{o-Full} بسیار نزدیک به هم بوده، همچنین مقدار $RMSE$ در ایستگاه تبریز نسبت به ارومیه به میزان ۰/۵۳۸ (میلی‌متر در روز) افزایش یافته و نشان‌دهنده افزایش مقدار بیش‌برآوردی ET_{o-ed} نسبت به ET_{o-Full} ، در ایستگاه تبریز نسبت به ارومیه می‌باشد.

شکل ۳ مقایسه بین مقادیر ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH}$ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این شرایط



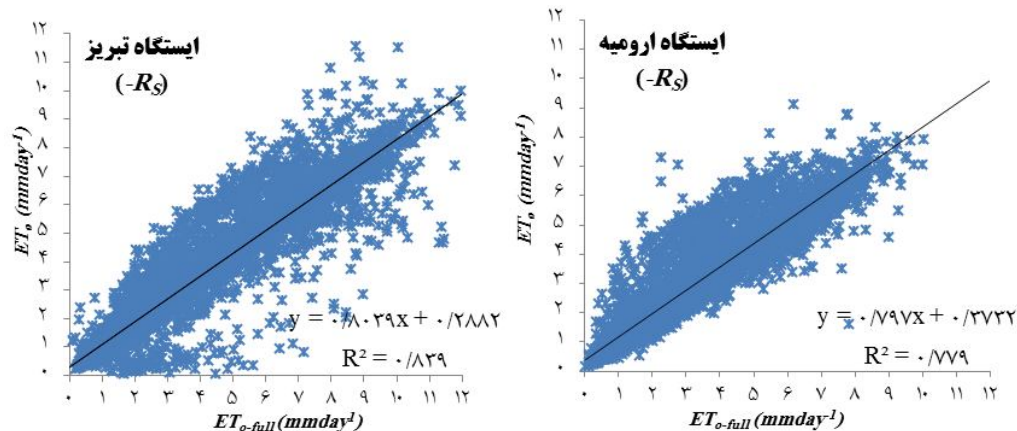
شکل ۲- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{o-ed} و ET_{o-Full} .



شکل ۳ - شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH}$

نسبت به ET_{o-Full} را می‌توان دریافت. این مقادیر نسبتاً بالای $RMSE$ و MAE برای تبریز (جدول ۳)، نشان می‌دهد R_s برآورد شده از رابطه ۴، در برآورد ET_o به‌خوبی اندازه‌گیری شده عمل نمی‌کند. با توجه به نتایج آزمون t در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. نتایج حاصل مشابه نتایجی است که توسط سنتلهاس و همکاران در کانادا (۲۰۱۰) گزارش شده است.

شکل ۴ نتایج مقایسه مقادیر ET_{o-Rs} و ET_{o-Full} را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر R^2 به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸۴ برای ارومیه و تبریز، همبستگی نسبی بین مقادیر ET_{o-Rs} و ET_{o-Full} وجود دارد. اما با توجه به شیب و عرض از مبدأ به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۳۷ در ارومیه و ۰/۸ و ۰/۲۹ در تبریز، همچنین مقادیر $RMSE$ و MBE به ترتیب ۱/۰۷۲ و ۱/۱۹۱ در ایستگاه ارومیه و ۰/۴۶۵ و ۰/۲۸۵ ($mmday^{-1}$) در ایستگاه ارومیه و ET_{o-Rs} در تبریز، بیش‌برآوردی

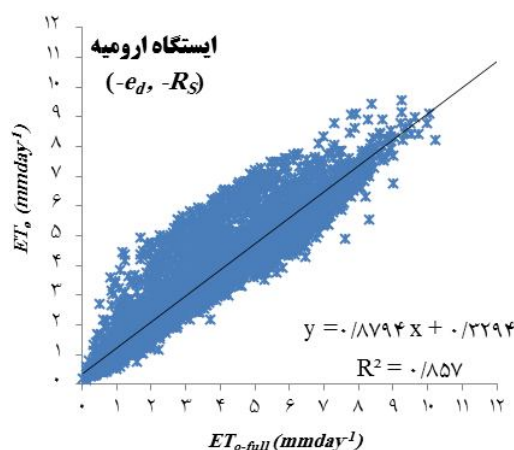
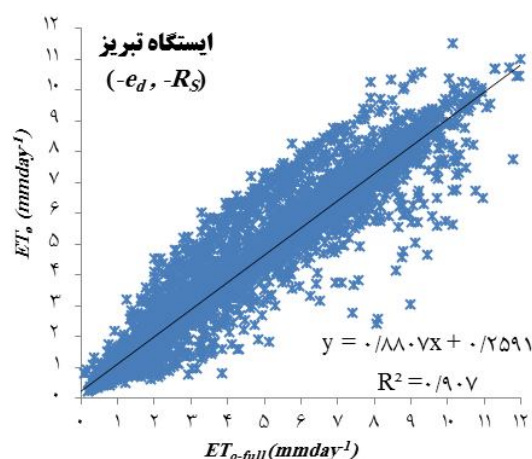


شکل ۴ - شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{o-Full} و ET_{o-Rs}

ارومیه نشان می‌دهد، در مقایسه با ET_{o-Full} در تبریز نسبت به ارومیه همبستگی بیشتری دارد.

شکل ۵ مقایسه برآورد ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-Rs}$ می‌باشد. مقادیر R^2 برابر با ۰/۹۱ در تبریز و ۰/۸۶ در

از داده‌های محدود و کامل مشاهده نمی‌شود. این نتایج با مطالعات صالح و سندیل (۱۹۸۴) و بویس و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت داشته و در مقایسه نتایج شکل ۲، ۳ و ۴ با شکل ۵ می‌توان به اهمیت نقش تابش در برآورد ET_o پی برد.

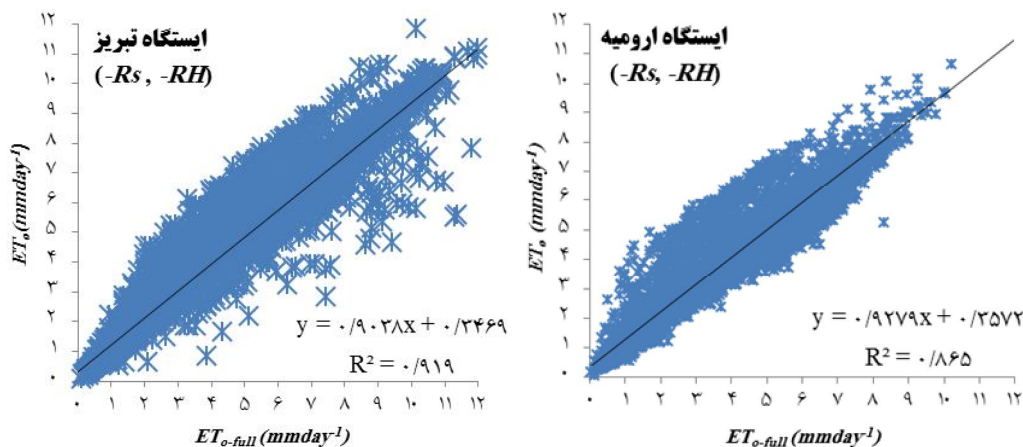


شکل ۵- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_o -Full و ET_o -ed,-Rs.

ارومیه 0.826 و -0.124 ($mm\ day^{-1}$) و برای تبریز 0.771 و 0.27 ($mm\ day^{-1}$) می‌باشد، بیش‌برآوردی مقادیر $ET_{o-RH,-R_s}$ در تبریز و کم‌برآوردی $ET_{o-RH,-R_s}$ را در ارومیه، در مقایسه با ET_{o-Full} نشان می‌دهد. این نتایج مطابق با نتایجی است که وانگ و همکاران در مالوی (۲۰۱۱) ارائه نموده‌اند.

این شرایط مقادیر $RMSE$ و MBE به‌ترتیب در ایستگاه ارومیه 0.832 و 0.61 ($mm\ day^{-1}$) و در ایستگاه تبریز 0.818 و 0.16 ($mm\ day^{-1}$) بوده و در هر دو ایستگاه بیش‌برآوردی نسبت به ET_{o-Full} وجود دارد. اما مقدار این بیش‌برآوردی در تبریز بسیار جزئی است. با توجه به آزمون t اختلاف معنی‌داری بین مقادیر برآورد شده

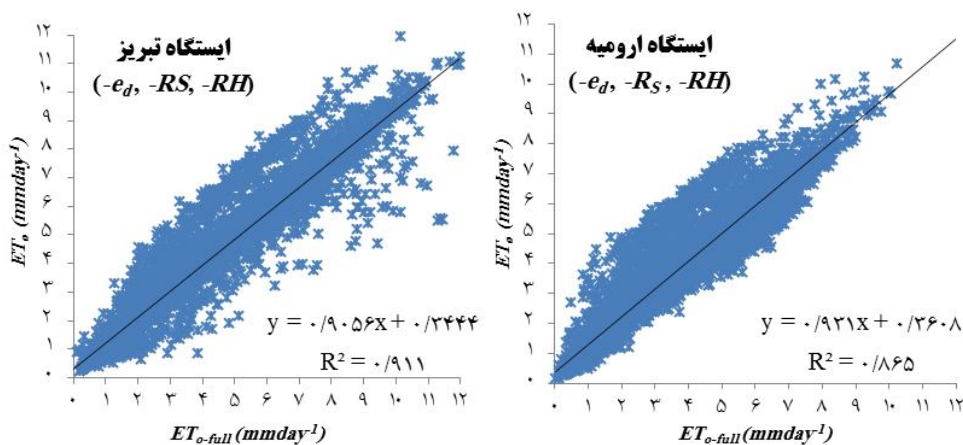
شکل ۶ مقادیر ET_{o-Full} را در مقایسه با برآورد ET_o در شرایطی که داده‌های رطوبت نسبی و تابش خورشیدی اندازه‌گیری نشده باشد، نشان می‌دهد. مقادیر R^2 برای ارومیه 0.86 و تبریز 0.92 می‌باشد. با توجه به شیب و عرض از مبدأ به‌ترتیب 0.93 و 0.36 خط رگرسیون برای ارومیه و 0.9 و 0.35 برای تبریز، همچنین مقایسه مقادیر $RMSE$ و MBE که به‌ترتیب برای



شکل ۶- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH,-RS}$

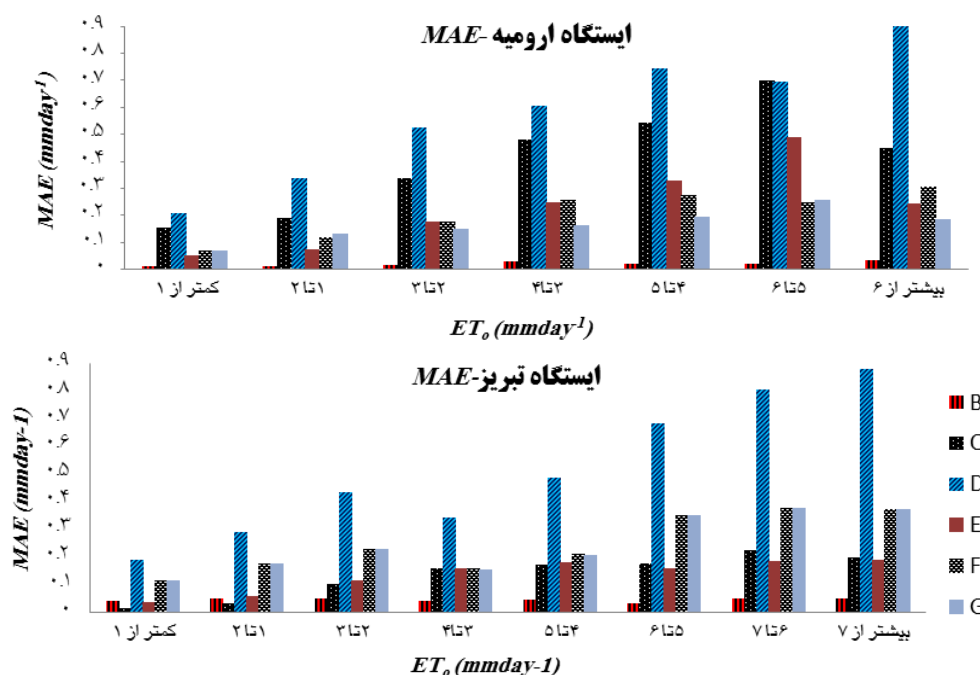
با توجه به مقادیر جدول ۳ بیشینه خطای برآورد ET_o در برابر ET_{o-Full} در هر دو ایستگاه زمانی اتفاق می‌افتد که داده‌های تابش موجود نباشد. دومین مرتبه بیشینه خطای برآورد ET_o در شرایطی است که علاوه بر نبود داده‌های تابش، فشار بخار واقعی نیز اندازه‌گیری نشده باشد. خطای برآوردها در ایستگاه تبریز بسیار بیشتر از میزان این خطاها در ارومیه می‌باشد. در مقایسه کلی بین دو ایستگاه، مقادیر $RMSE$ در ارومیه کمتر از تبریز می‌باشد که نشان می‌دهد دقت برآوردهای ET_o با داده‌های محدود، در ایستگاه ارومیه بیش از ایستگاه تبریز است.

در شکل ۷ مقادیر ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH,-RS}$ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مقادیر $R^2=0.86$ در ارومیه و $R^2=0.91$ در تبریز نشان می‌دهد برآورد $ET_{o-ed,-RH,-RS}$ در تبریز نسبت به ارومیه همبستگی بیشتری با برآوردهای ET_{o-Full} دارد. مقادیر $RMSE$ و MBE به ترتیب در ارومیه 0.137 و 0.131 ($mmday^{-1}$) و در تبریز 0.117 و 0.116 ($mmday^{-1}$) بوده و کم‌برآوردی $ET_{o-ed,-RH,-RS}$ نسبت به ET_{o-Full} در ارومیه وجود دارد. در نهایت اختلاف بین مقادیر ET_o برآورد شده با داده‌های محدود و کامل معنی‌دار نمی‌باشد.



شکل ۷- شیب و ضریب تبیین (R^2) برای رابطه بین ET_{o-Full} و $ET_{o-ed,-RH,-R_s}$.

شکل ۸ مقادیر MAE برای متوسط طولانی مدت روزانه ET_o برآورد شده با داده‌های محدود و کامل را در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به تفکیک مقادیر تبخیر-تعرق کمتر از ۱ میلی‌متر در روز تا بیش از ۶ میلی‌متر در روز، نشان می‌دهد.



شکل ۸- مقادیر MAE برای متوسط طولانی مدت تبخیر تعرق روزانه برآورد شده از روش پنمن مانیتیت فائو با داده‌های محدود در مقایسه با ET_{o-Full} در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

توجه: علائم موجود در شکل بدین شرح است: (B: $-e_d-RH$, C: $-R_s-RH$, D: $-R_s$, E: $-e_d-R_s-RH$, F: $-e_d$, G: $-e_d-R_s$).

روزانه ET_o تقریباً مانند تأثیر فقدان داده‌های RH و e_d می‌باشد.

در جدول ۴ نتایج آزمون t برآوردهای ET_o با داده‌های محدود، در مقایسه با مقادیر ET_o برآورد شده با داده‌های کامل، در سطح احتمال ۹۵ درصد ارائه شده است. ضریب همبستگی در تمامی برآوردهای تبخیر-تعرق با داده‌های محدود بزرگ‌تر از مقدار بحرانی بوده و می‌توان پذیرفت در سطح احتمال ۹۵ درصد بین تمام مقادیر برآورد شده با داده‌های کامل و محدود

ملاحظه می‌شود که تفاوت‌های عمده در برآورد ET_o با داده‌های کامل و محدود مربوط به مقادیر بالاتر تبخیر-تعرق مخصوصاً در گرم‌ترین دوره سال ($ET_o > 4 \text{ mmday}^{-1}$) می‌باشد. در طولانی مدت روزانه تأثیر فقدان داده‌های R_s در خطای برآورد ET_o در مقایسه با داده‌های کامل، در ایستگاه تبریز بیشتر از ارومیه می‌باشد. از طرفی فقدان داده‌های RH در برآورد ET_o در ارومیه بسیار مؤثر بوده است، درحالی‌که در تبریز، تأثیر فقدان داده‌های RH در خطای برآورد متوسط طولانی مدت

نسبت به مقادیر بالاتر ET_o (که مربوط به ماه‌های گرم سال بوده و تابش خورشیدی بیشتر است)، نشان می‌دهد.

همبستگی وجود دارد. هنگامی که داده‌های R_s در دسترس نباشد، روش برآورد این متغیر طبق آنچه قبلاً توضیح داده شد (آلن و همکاران ۱۹۹۸)، برای برآورد مقادیر ET_o پایین‌تر سازگاری خوبی را با ET_{o-Full}

جدول ۴- نتایج آزمون t برای ET_o برآورد شده با داده‌های محدود در مقایسه با ET_{o-Full} در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز.

ET_o -ed,-Rs,-RH	ET_o -Rs,-RH	ET_o -ed,-Rs	ET_o -Rs	ET_o -ed,-RH	ET_o -ed	
۰/۹۸	۰/۷۸	۰/۸۴	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/۴۳	آماره t در ارومیه
۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۵۷	۱/۳۶	۰/۲۸	۰/۴۵	آماره t در تبریز

تحلیل رابطه بین R_s مشاهده شده و برآورد شده، بهتر درک کرد. بالاترین خطای مشاهده شده در برآورد ET_o زمانی است که تابش خورشیدی موجود نبوده و در محاسبه پارامتر فوق برای استفاده در معادله پنمن-مانتیت فائو از داده‌های دمای کمینه و بیشینه بهره گرفته شود. کوچک‌ترین خطای مشاهده شده در هر یک از دو ایستگاه مورد مطالعه مربوط به شرایطی است که داده‌های رطوبت نسبی و فشار بخار واقعی در ایستگاه اندازه‌گیری نشده و برای برآورد فشار بخار واقعی از دمای نقطه شبنم استفاده می‌گردد. استنتاج آماری موجود در این تحقیق مؤید این مطلب است که وقتی داده‌های تابش و فشار بخار واقعی اندازه‌گیری نشده باشد و یا زمانی که داده‌های تابش و رطوبت، موجود نباشد میزان دقت برآورد تبخیر- تعرق تقریباً یکسان است. از طرفی دقت این برآوردها در ایستگاه تبریز نسبت به ارومیه بیشتر است. بنابراین، زمانی که رطوبت نسبی اندازه‌گیری نشده باشد، استفاده از دمای نقطه شبنم در معادله FPM می‌تواند پیشنهاد خوبی برای برآورد e_d باشد. همچنین زمانی که داده‌های تابش خورشیدی موجود نباشد، روش برآورد R_s از دمای کمینه و بیشینه روزانه، در برآوردهای ET_o دقت قابل قبولی را در مناطق مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر به ارزیابی روش FPM جهت برآورد ET_o با داده‌های کامل در مقایسه با داده‌های محدود در شمال غرب ایران، ایستگاه‌های ارومیه و تبریز، پرداخته شد. نتایج نشان داد زمانی که داده‌های فشار بخار واقعی یا رطوبت نسبی در دسترس نباشد، روش FPM می‌تواند به منظور برآورد ET_o روزانه در شمال غرب ایران، با دقت قابل قبولی مورد استفاده قرار گیرد. در دسترس نبودن داده‌های تابش خورشیدی باعث افزایش در پراکندگی برآوردهای ET_o می‌شود. خطاهای ناشی از چنین بیش‌برآوردهایی، توسط $RMSE$ ارائه شده، همیشه بالاتر از ۰/۷ میلی‌متر در روز است. برآورد ET_o ، زمانی که مقادیر فشار بخار واقعی با استفاده از داده‌های رطوبت نسبی محاسبه می‌شوند، بسیار مشابه با برآورد ET_o ، در شرایط موجود بودن داده‌های فشار بخار واقعی هست. علاوه بر آن، داده‌های تابش خورشیدی در مقایسه با داده‌های فشار بخار واقعی، تأثیر قابل توجهی در برآورد ET_o دارد. عملکرد روش FPM برای برآورد ET_o زمانی که تابش خورشیدی (R_s) موجود نباشد را می‌توان با تجزیه و

گیرد. همچنین دقت روش برآورد تابش خورشیدی از داده‌های بیشینه و کمینه درجه حرارت هوا که همیشه اندازه‌گیری می‌شوند مورد ارزیابی قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود این تحقیق در سایر ایستگاه‌های هواشناسی کشور، در شرایطی که تنها داده‌های درجه حرارت در دسترس باشد (که در مزارع بسیار معمول است)، به منظور ارزیابی برآورد ET_0 ، مورد بررسی قرار

منابع مورد استفاده

- انتصاری م، نوروزی م، سلامت ع، احسانی و و توکلی ع، ۱۳۷۵. مقایسه روش پنمن-مانتیث با سایر روش‌های توصیه‌شده جهت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در چند منطقه مختلف ایران. صفحه‌های ۲۲۱ تا ۲۳۷، مجموعه مقالات هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران.
- رحیم زادگان ر، ۱۳۷۵. طراحی سیستم‌های آبیاری بارانی. چاپ دوم، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۲۸۰ صفحه.
- 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 اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
- شریفان ح، قهرمان ب، علیزاده ا و میرلطیفی م، ۱۳۸۴. ارزیابی روش‌های مختلف تشعشعی و رطوبتی جهت برآورد تبخیر-تعرق مرجع و اثرات خشکی هوا بر آن در استان گلستان. مجله علوم خاک و آب، جلد ۲، شماره ۱۹، صفحه‌های ۲۷۰ تا ۲۸۰.
- Allen RG, Jensen ME, Wright JL and Burman RD, 1989. Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81: 650-662.
- 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.
- Blaney HF and Criddle WD, 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA Soil Conserv Serv SCS-TP96*, 44 p.
- Bois B, Pieri P, Van Leeuwen C and Gaudillere JP, 2005. Sensitivity analysis of the Penman-Montheith 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.
- Droogers P and Allen GG, 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation Drainage Systems* 16: 33-45.
- 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.
- Hargreaves GH and Samani ZA, 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 108(3): 223-230.
- Jabloun M and Sahli A, 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: applications to Tunisia. *Agricultural Water Management* 95: 707-715.
- Liu Y, Pereira LS 2001. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data (in Chinese). *Journal of Hydrologic Engineering* 3: 11-17.
- Pereira LS, Cai LG and Hann MJ 2003. Farm water and soil management for improved water use in the North China plain. *Irrigation and Drainage* 52: 299-317.
- Popova Z, Kercheva M and Pereira LS, 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data: Application to south Bulgaria. *Irrigation and Drainage* 55: 201-215.
- Salih AMA and Sendil U, 1984. Evapotranspiration under extremely arid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 110(3): 289-303.

- 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.
- Stockle CO, Jim K and Gianni B, 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation Science* 23: 39-46.
- Temesgen B, Eching S, Davidoff B and Frame K 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 131(1): 73–84.
- 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.