نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۰، ص. ۱۵۱۹-۱۵۰۳

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 6, Jan-Feb 2012, p. 1503-1519

بررسی تاثیر داده‌های هواشناسی غیرموجود و روش‌های تخمین آن‌ها در دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع و رتبه‌بندی معادلات در شرایط اقلیمی مختلف (مطالعه موردی استان‌های خراسان)

میثم مجیدی[۱] - امین علیزاده[۲*]

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۱
تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۱۹

چکیده

روابط متعددی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) بر اساس دما، تابش، تبخیر از تشت و ترکیب عوامل مختلف ارائه شده است. اغلب این روابط نیازمند واسنجی دقیق محلی بوده و اعتبار کاربرد آنها در مناطق مختلف با محدودیت مواجه است. معادله پنمن-مانتیت در تخمین روزانه و ماهانه تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) در تمام اقلیم‌ها، به عنوان بهترین معادله شناخته شده است. ضعف اصلی معادله پنمن – مانتیت، نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد است که برای بسیاری از مناطق همواره در دسترس نیست. روش‌هایی برای تخمین پارامترهای معادله پنمن- مانتیت در شرایطی که داده‌ها غیرموجود باشد، ارائه شده است. مشکل کمبود و یا عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز با استفاده از سایر مدل‌ها، که داده‌های کمتری نیاز دارند نیز قابل حل است. به این منظور در این تحقیق از سایر معادلات ارائه شده برای ET_o نیز استفاده شد و با برآوردهای معادله پنمن-مانتیت در شرایط کمبود داده برای دو اقلیم نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک مقایسه گردید. این معادلات شامل ترنت‌ویت، هارگریوز و بلانی‌کریدل (بر پایه دما) و معادلات تارک، جنسن- هیز (بر پایه تابش) و پنمن- مانتیت می‌باشد. در این مطالعه ضمن ارزیابی شرایط کمبود داده و ارائه روش‌های مختلف جایگزینی آنها، روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع از لحاظ دقت برآورد در شرایط اقلیمی نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک به‌صورت جداگانه رتبه‌بندی گردید. ارزیابی‌ها نشان داد که معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌خشک نسبت به اقلیم نیمه‌مرطوب حساسیت بیشتری به داده‌های غیرموجود دارد. چنانچه دمای نقطه شبنم با دمای حداقل واسنجی شده باشد و سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه مشخص باشد، دقت معادله پنمن- مانتیت در شرایط کمبود داده، به‌شدت افزایش می‌یابد. در این مطالعه همچنین معادلات واسنجی دمای نقطه شبنم و دمای حداقل برای ۱۵ ایستگاه منتخب طی دوره آماری بلند مدت (از بدو تاسیس ایستگاه) ارائه گردید. نتایج نشان داد حداقل داده‌های ضروری مورد نیاز برای استفاده موفق مدل پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌مرطوب، دمای هوا و برای اقلیم نیمه‌خشک، دمای هوا و سرعت باد می‌باشد. البته بایستی رابطه واسنجی دمای نقطه شبنم و دمای حداقل به‌ویژه در اقلیم نیمه‌خشک وجود داشته باشد. در غیر اینصورت، استفاده از معادلات هارگریوز سامانی برای اقلیم نیمه‌مرطوب و هارگریوز اصلاح شده توسط دروگرز و آلن برای اقلیم نیمه‌خشک توصیه می‌گردد که در این مطالعه عملکرد مطلوبی به‌همراه داشت. استفاده از روش‌های بلانی‌کریدل، تارک و ترنت‌ویت در هر دو اقلیم مورد مطالعه نتایج نسبتاً نامطلوبی داشته و به لحاظ دقت برآورد، در رتبه‌های پایین‌تر قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: داده غیرموجود، رتبه‌بندی معادلات ET_o، سرعت باد، واسنجی دمای نقطه شبنم

مقدمه

از مهم‌ترین چالش‌های اکثر کشورهای جهان و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، مساله کمبود آب است. این معضل را می‌توان به عواملی از قبیل تغییر اقلیم، رشد جمعیت و افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف و از همه مهم‌تر مشکلات زیست محیطی ناشی از گسترش بیابان‌ها و عدم مدیریت صحیح و دراز مدت منابع آب در گذشته و نیز در حال حاضر و بهره‌برداری بیش از حد از این منابع مرتبط دانست (۲۸). وابستگی به بارش باران برای تولید محصول در آینده تبدیل به یک محدودیت عمده برای تولید محصولات غذایی پایدار در کشورهای در حال توسعه خواهد شد (۵). این در حالی است که حدود ۷۰ درصد منابع آب شیرین قابل استحصال جهان، در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (۱۲). این امر در ایران نیز مستثنی نبوده و

۱و۲- دانشجوی دکتری و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: alizadeh@um.ac.ir)

لزوم نگرش عمیق و در عین حال فوری به این مساله را ایجاب می‌نماید. در چنین شرایطی، بهینه‌سازی بهره‌وری آب در کشاورزی و نگهداشت تولید در یک سطح کمی و کیفی مطلوب و مدیریت صحیح آب آبیاری امری بسیار مهم و ضروری می‌باشد. یک عامل کلیدی و بسیار کارا برای دستیابی به این هدف، برآورد نیاز آبی واقعی گیاهان و البته برنامه‌ریزی‌های صحیح آبیاری بر این اساس می‌باشد. در واقع اصلاح روش‌های تعیین تبخیر- تعرق گیاه، یک ابزار قوی برای برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و در نهایت بهره‌برداری بهینه از منابع آب است. برآوردهای قابل اطمینان تبخیر- تعرق برای مدیریت آبیاری به‌موقع، تخصیص منابع آب، برآورد فراهمی آب در بلند مدت، مصرف و تقاضا، طراحی و مدیریت زیرساخت‌های منابع آب و ارزیابی چرخه آب، عاملی حیاتی است.

روابط متعددی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) بر اساس دما، تابش، تبخیر از تشت و ترکیب عوامل مختلف ارائه شده است. اغلب این روابط نیازمند واسنجی دقیق محلی بوده و اعتبار کاربرد آنها در مناطق مختلف با محدودیت مواجه است (۳۳). انجمن مهندسان عمران امریکا (ASCE)، خصوصیات ۲۰ روش مختلف تخمین تبخیر- تعرق را با استفاده از داده‌های لایسیمتری در ۱۱ ایستگاه در سطح دنیا و در اقلیم‌های مختلف، به‌دقت مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند (۱۹) که طی این بررسی‌ها معادله پنمن-مانتیت در تخمین روزانه و ماهانه تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) در تمام اقلیم‌ها، به‌عنوان بهترین معادله شناخته شد. در مطالعات مختلفی برتری این معادله نسبت به سایر معادلات تایید شده است (۱۳، ۲۴، ۲۹ و ۳۸). معادله پنمن-مانتیت دارای دو مزیت عمده نسبت به سایر مدل‌های تخمین ET_o است. اول اینکه به‌دلیل اساس فیزیکی مدل، در سطح دنیا و بدون نیاز به واسنجی محلی قابل استفاده است؛ دوم اینکه صحت این معادله با مستندات زیاد و قابل قبولی با استفاده از انواع لایسیمتر، مقایسه و ثبت شده است (۳۳). سازمان خوار و بار جهانی (FAO) معادله پنمن- مانتیث را به‌عنوان معادله استاندارد برآورد تبخیر- تعرق مرجع معرفی کرده است. ضعف اصلی معادله پنمن— مانتیت، نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد است که برای بسیاری از مناطق همواره در دسترس نیست (۳۳). این مساله به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که داده‌های هواشناسی قابل اعتماد از رطوبت، سرعت باد و تابش به‌ندرت وجود دارد، بیشتر صدق می‌کند (۳۳). برای رفع این مشکل آلن و همکاران (۶)، روش‌هایی برای تخمین پارامترهای معادله پنمن- مانتیت در شرایطی که داده‌ها غیرموجود باشد، ارائه کردند. مشکل کمبود و یا عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز با استفاده از سایر مدل‌ها، که داده‌های کمتری نیاز دارند نیز قابل حل است. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده است که وجود حداقل داده‌های دما و سرعت باد برای برآورد مطمئن تبخیر- تعرق مرجع به‌روش پنمن- مانتیت ضروری است (۲ و ۳۳). در ایران تاکنون مطالعه جامع و کاملی از معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع و تاثیر کمبود داده‌ها و روش‌های جایگزینی آنها در صحت و رتبه‌بندی این معادلات در شرایط اقلیمی مختلف گزارش نشده است. در تایید این مهم می‌توان به عدم مطالعه درباره تاثیر داده‌های غیرموجود سرعت باد و دمای نقطه شبنم و تخمین صحیحی از آنها، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک در معادلات مختلف اشاره نمود.

بنابراین هدف اصلی این مطالعه، رتبه‌بندی مناسب‌ترین مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط اقلیمی مختلف براساس بررسی دقیق تاثیر کمبود هر یک و یا مجموعه‌ای از داده‌ها و ارائه روش‌های مناسب جایگزینی آنها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های هواشناسی

در این مطالعه، ۱۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی انتخاب شد. داده‌های هواشناسی روزانه مربوط به این ایستگاه‌ها از بدو تاسیس، از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. مناطق مورد مطالعه در این پژوهش، مشخصات و میانگین داده‌های هواشناسی مربوط به آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

تخمین داده‌های هواشناسی در شرایط کمبود داده

در شرایط کمبود داده می‌توان از روش‌های مختلفی که برای برآورد ET_o ارائه شده است، استفاده کرد و یا از روش‌های موجود برای تخمین داده‌های مورد نیاز بهره جست. در این تحقیق ضمن انجام این عمل، با جایگزینی مقادیر تخمینی حاصله با مقادیر اندازه‌گیری شده و موجود، تبخیر- تعرق مرجع برآورد شده تا صحت این روش‌ها و نیز مقادیر به‌دست آمده بر اساس معادله کامل پنمن- مانتیت مورد ارزیابی قرار گیرد. همانطور که بحث شد در این مطالعه برای این که بتوان از معادله پنمن- مانتیت نیز در شرایط کمبود داده استفاده کرد، از روش‌های مختلف تخمین داده‌های هواشناسی غیرموجود که عموماً توسط آلن و همکاران (۶) ارائه شده است، استفاده گردید. بر این اساس چندین حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در آن‌ها یک یا چند داده هواشناسی عمداً حذف گردیده و تخمین زده شد. برای ارزیابی معادلات حاصله به این طریق و نیز سایر معادلات تبخیر- تعرق مرجع، معادله کامل پنمن- مانتیت با داده‌های کامل، مبنای مقایسات قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق

ایستگاه	اقلیم*	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی شمالی	متوسط دمای سالیانه (°C)	متوسط رطوبت نسبی سالیانه (٪)	متوسط بارش سالیانه (mm)	متوسط سرعت باد (m/s)	متوسط دمای نقطه شبنم (°C)
مشهد	نیمه مرطوب	۹۹۲/۲	۳۶° ۱۶ '	۱۴/۲	۵۵/۱	۲۵۵/۰۴	۱/۵۸	۳/۰۸
قوچان	نیمه مرطوب	۱۲۸۷	۳۷° ۱ '	۱۲/۸۵	۵۵/۵۱	۳۱۱/۰۸	۱/۲۲	۲/۳۸
چناران	نیمه مرطوب	۱۱۷۶	۳۶° ۳۲'	۱۳/۴۶	۴۸/۲	۲۰۸/۱۲	۲/۲۵	۲/۰۴
بجنورد	نیمه مرطوب	۱۱۱۲	۳۷° ۲۸'	۱۳/۳۳	۵۸/۹۱	۲۷۰	۱/۷۱	۳/۶۸
نیشابور	نیمه مرطوب	۱۲۱۳	۳۶° ۱۶'	۱۴/۴۲	۴۸/۸۶	۲۳۶/۶۳	۰/۸۴	۱/۵۶
تربت حیدریه	نیمه مرطوب	۱۴۵۰/۸	۳۵ ° ۱۶ '	۱۴/۳	۴۶/۹۶	۲۷۴/۴	۱/۴۶	۱/۵۴
گناباد	نیمه خشک	۱۰۵۶	۳۴° ۲۱ '	۱۷/۳۲	۳۷/۷	۱۴۳/۹	۱/۴	۱/۴
سبزوار	نیمه خشک	۹۷۲	۳۶° ۱۳ '	۱۷/۴۷	۴۱/۰۸	۱۸۹/۵۶	۲/۴۳	۱/۶۳
سرخس	نیمه خشک	۲۳۵	۳۶° ۳۳ '	۱۷/۹	۴۷/۶۸	۱۸۷/۳۸	۱/۶	۴/۷۸
کاشمر	نیمه خشک	۱۱۰۹/۷	۳۵° ۱۲ '	۱۷/۷۸	۳۹	۲۰۴/۱۱	۱/۰۸	۲/۲۴
بیرجند	نیمه خشک	۱۴۹۱	۳۵° ۵۲ '	۱۶/۵	۳۶/۶۴	۱۷۰/۴۱	۱/۹۶	-۰/۷۷
فردوس	نیمه خشک	۱۲۹۳	۳۴° ۱ '	۱۷/۲۳	۳۶/۲۴	۱۴۶/۷۸	۱/۸۲	۰/۷۷
قاین	نیمه خشک	۱۴۳۲	۳۳° ۴۳'	۱۴/۳۷	۳۷/۸۴	۱۷۵	۱/۸۸	-۰/۴۵
تربت جام	نیمه خشک	۹۵۰/۴	۳۵° ۱۵ '	۱۵/۶۸	۴۵/۳۸	۱۷۴/۶۶	۲/۹۴	۱/۹۶
نهبندان	خشک	۱۲۱۱	۳۱° ۳۲ '	۱۹/۸۳	۲۹/۹۸	۱۳۰/۹۶	۲/۲۳	۰/۰۳۳

*: براساس روش طبقه‌بندی کریمی (۱)

تابش خورشیدی: در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی، تابش در مقایسه با دما، به‌ندرت اندازه‌گیری می‌شود (۳۳). از طرفی حسگرهای مورد استفاده در پیرانومترها و تابش‌سنج‌های خالص ایستگاه‌های هواشناسی بسیار ظریف و حساس بوده و نسبت به سایر حسگرها، زودتر تخریب شده و بسیار گران نیز هستند (۲۳). از این رو اغلب تابش خورشیدی به‌کمک معادله آنگستروم تخمین زده می‌شود:

$$R_s = (a + b\frac{n}{N})R_a \qquad (۱)$$

که در آن n: ساعات آفتابی واقعی (hr/day)؛ N: حداکثر ساعات روشنایی روز (hr/day) و R_a: تابش برون زمینی ($MJ/m^2/day$) می‌باشد. در معادله فوق ضرایب a و b در شرایطی که واسنجی نشده باشد، به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵ پیشنهاد شده است (۴ و ۷). در شرایطی که داده‌های مربوط به ساعات روشنایی موجود نباشد، می‌توان از تفاوت دمای حداکثر و حداقل جهت تخمین تابش خورشیدی استفاده کرد (۱۵):

$$R_s(T) = 0.16 \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \times R_a \qquad (۲)$$

که در آن $R_s(T)$: تابش خورشیدی تخمینی از دمای هوا می‌باشد.

داده‌های کمبود فشار بخار: برای برآورد کمبود فشار بخار، مقادیر فشار بخار اشباع و واقعی باید تعیین شود. اغلب برآورد صحیح فشار بخار واقعی مشکل است. اندازه‌گیری‌های رطوبت نسبی با

حسگرهای الکترونیکی اغلب تحت تاثیر پسماند، غیرخطی بودن و خطاهای واسنجی قرار می‌گیرد (۶). چنانچه داده‌های رطوبت در دسترس نباشد، با فرض برابری دمای نقطه شبنم و دمای حداقل روزانه، فشار بخار واقعی تخمین زده می‌شود (۱۹ و ۲۱). لذا با جایگزینی دمای حداقل به جای دمای نقطه شبنم، فشار بخار واقعی (kPa)، از رابطه ۳ تعیین می‌شود:

$$VP(T_{\min}) = 0.611 \times \exp\left[\frac{17.27 \times T_{\min}}{T_{\min} + 237.2}\right] \qquad (۳)$$

این رابطه اغلب در شرایط اقلیم مرطوب صادق بوده و در مناطق خشک دقت مناسبی ندارد (۳)، لذا در این تحقیق ابتدا دمای حداقل و دمای نقطه شبنم واسنجی گردید. با این عمل دقت هر دو حالت فوق قابل بررسی است. این واسنجی‌ها در هر ایستگاه، در ایستگاه‌های با اقلیم مشابه (نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب) و نیز در کل منطقه مورد مطالعه (کل ایستگاه‌ها) جداگانه انجام پذیرفت. سپس بر اساس رابطه واسنجی به‌دست آمده، این بار مقادیر دمای نقطه شبنم از روی دمای حداقل تخمین زده شده و در رابطه فوق به‌جای دمای حداقل قرار گرفت.

سرعت باد: یکی از حداقل پارامترهایی است که به آسانی تخمین زده شده و برای برآورد ET_o اغلب در دسترس می‌باشد (۳۳). در این مطالعه برای تخمین سرعت باد در شرایط کمبود داده، سه دیدگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. روش اول جایگزینی سرعت باد پیش فرض و معمول جهانی ۲ متر بر ثانیه به‌جای داده‌های سرعت باد هر ایستگاه بود. در روش دوم سرعت باد متوسط بلند مدت هر ایستگاه برآورد شده (جدول ۱) و جایگزین سرعت باد روزانه گردید. در روش سوم از سرعت باد متوسط بلند مدت کل منطقه مورد مطالعه (استان های خراسان) استفاده گردید.

دمای هوا: برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع، دمای هوا یک عامل کلیدی و بسیار مهم قلمداد می‌شود. حتی در بسیاری از روش‌های تخمین سایر داده‌های هواشناسی، از دمای هوا (حداقل و حداکثر) استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های دمای هوا اغلب ساده و نسبت به سایر داده‌ها با خطای کمتری مواجه است (۳۳). از این رو این پارامتر در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده و در دسترس می‌باشد. هیچ روشی برای برآورد دمای هوا در شرایطی که این داده غیرموجود باشد، ارائه نشده است.

معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع (ET_o)

در این مطالعه از مدل‌های مختلفی جهت برآورد ET_o، استفاده گردید که عبارتند از: معادلات ارائه شده بر پایه دما (ترنت‌ویت، هارگریوز و بلانی کریدل)، معادلات بر پایه تابش (تارک، جنسن- هیز) و معادله پنمن- مانتیت.

معادله ترنت‌ویت: ترنت‌ویت (۳۰)، با برقراری رابطه همبستگی بین میانگین دمای ماهانه و تبخیر- تعرق، معادله خود را به صورت ذیل ارائه نمود:

$$ET_o = \frac{16N}{360}\left(\frac{10T}{\sum_{k=1}^{12}(0.2T_k)^{1.514}}\right)^{0.016\sum_{k=1}^{12}(0.2T_k)^{1.514}+0.5} \qquad (۴)$$

که در این معادله N: حداکثر ساعات تابش آفتابی ممکن (hr)؛ T: میانگین ماهانه دما (°C)؛ T_k: میانگین دما (°C) در ماه مورد نظر (K=1,2,…,12) می‌باشد.

معادله هارگریوز: آلن و همکاران (۶)، پیشنهاد کردند در شرایطی که تمام داده‌های معتبر مورد نیاز حل معادله پنمن- مانتیت موجود نباشد، از معادله هارگریوز (۱۵) استفاده شود. این معادله در اقلیم‌های مرطوب، تبخیر- تعرق را بیش برآورد (۱۹) و در اقلیم گرم و خشک، کم‌برآورد می‌نماید (۳۷). این معادله به‌دلیل کم بودن داده‌های ورودی مورد نیاز و سادگی معادله، قابل توجه است ولی در مطالعات متعددی لزوم واسنجی آن نسبت به شرایط محلی توصیه و انجام گرفته است (۸، ۱۱، ۱۳، ۲۵، ۳۴ و ۳۹).

معادلات هارگریوز استفاده شده در این تحقیق عبارتند از معادله هارگریوز-سامانی که به‌صورت رابطه ذیل بیان شده است (۱۶):

$$ET_{o,har} = 0.0023 \times 0.408 \times R_a \times (T_{avg} + 17.8) \times TD^{0.5} \qquad (۵)$$

شکل دیگر معادله هارگریوز مورد استفاده در این مقاله، توسط تراچکویچ (۳۳) اصلاح و ارائه گردیده است:

$$ET_{o,har,Tra} = 0.0023 \times 0.408 \times R_a \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.424}\left(\frac{T_{\max}+T_{\min}}{2} + 17.8\right) \qquad (۶)$$

دروگرز و آلن (۱۱)، مقادیر ماهانه ET_o حاصله به روش پنمن- مانتیت را با مقادیر حاصل از روش هارگریوز برای ۵۶۰۰۰ ایستگاه در سطح دنیا مقایسه نمودند و نشان دادند که رابطه ۵ در مناطق خیلی خشک و خیلی مرطوب، مقادیر ET_o را به‌ترتیب کم‌برآورد و بیش‌برآورد می‌نماید. آنها برای کاهش این خطا، پارامتر بارندگی ماهانه را در رابطه افزوده و معادله اصلاح شده ذیل را پیشنهاد نمودند:

$$ET_{o,har,D;A} = 0.0013 \times 0.408 \times R_a \times (T_{avg} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \qquad (۷)$$

انتخاب این پارامتر برای اصلاح معادله مذکور با این استدلال انجام شد که بارش ماهانه می‌تواند تا حدی جایگزینی برای اثر نسبی رطوبت باشد. در معادلات ۵ تا ۷، T_{min}، T_{max} و T_{avg}: به‌ترتیب مقدار حداقل، حداکثر و میانگین دمای روزانه (°C)؛ TD: تفاوت بین حداقل و حداکثر دمای روزانه (°C)؛ R_a: تابش برون زمینی ($MJ/m^2/day$)؛ P: مقدار بارش (mm/month) و ET_o: مقدار تبخیر-تعرق مرجع (mm/day) می‌باشد.

معادله بلانی کریدل: بلانی و کریدل (۹) نیز بر اساس دما و ساعات روشنایی روز در نواحی خشک غرب امریکا رابطه‌ای جهت برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل ارائه نمودند. شکل ساده این معادله به صورت رابطه ۵ می‌باشد. استفاده از این صورت معادله در این تحقیق،

صرفاً به دلیل پارامترهای ورودی اندک آن است.

$$ET_o = p(0.46T_{avg} + 8.13) \quad (۸)$$

که در آن p: ضریب روشنایی یا درصد ساعات روشنایی در هر یک از روزهای ماه مورد نظر نسبت به تعداد کل ساعات روشنایی در سال در محل مورد نظر می‌باشد.

معادله تارک: این معادله جهت برآورد تبخیر- تعرق مرجع (۳۵)، از جمله معادلاتی است که بعد از مدل پنمن- مانتیت در اقلیم مرطوب نتایج بسیار مطلوبی ارائه می‌نماید (۱۹)، به همین دلیل اغلب از آن در برآورد ET_o در اقلیم‌های مرطوب استفاده می‌شود (۲۰، ۲۲ و ۲۶). هر چند مطالعه حاضر در اقلیم نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب انجام می‌شود اما جهت مقایسه و بررسی امکان اصلاحات مورد نیاز در آینده، از معادله تارک نیز استفاده شده است. شکلی از معادله تارک مورد استفاده در این تحقیق عبارت است از:

$$ET_o = 0.013 \times (23.88 \times R_s + 50) \times T_{avg} \times (T_{avg} + 15)^{-1} \quad (۹)$$

که در این معادله R_s: تابش خورشیدی ($MJ/m^2/day$) می‌باشد. معادله تارک به‌صورت ارائه شده توسط رابطه ۹، به‌دلیل کم‌برآورد نمودن تبخیر- تعرق مرجع در شرایط بادخیز و برعکس، نسبت به سرعت باد اصلاح گردید (۳۲)، که به‌صورت ذیل ارائه شد:

$$ET_o = C_u \times 0.013 \times (23.88 \times R_s + 50) \times T_{avg} \times (T_{avg} + 15)^{-1} \quad (۱۰)$$

که در آن C_u: عامل تصحیح سرعت باد بوده و از رابطه ذیل به‌دست می‌آید:

$$C_u = -0.0211 \times U_2^2 + 0.1109 \times U_2 + 0.9004 \quad (۱۱)$$

که در آن، U_2: میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین می‌باشد.

معادله جنسن- هیز: معادله تجربی جنسن-هیز به‌صورت ذیل ارائه شده است (۱۸):

$$ET_o = C_T \times (T_{avg} - T_x) \times 0.408 R_s \quad (۱۲)$$

که در آن C_T از رابطه ذیل تعیین می‌شود:

$$C_T = \frac{1}{45 - (\frac{h}{137}) + (\frac{365}{(e_{s,\max} - e_{s,\min})})} \quad (۱۳)$$

و T_x، از رابطه ذیل به‌دست می‌آید.

$$T_x = -2.5 - 0.14 \times (e_{s,\max} - e_{s,\min}) - \frac{h}{500} \quad (۱۴)$$

$$e_{s,\max} = \exp(\frac{19.08 T_{\max} + 429.41}{T_{\max} + 237.3}) \quad (۱۵)$$

$$e_{s,\min} = \exp(\frac{19.08 T_{\min} + 429.41}{T_{\min} + 237.3}) \quad (۱۶)$$

که در این معادلات $e_{s,max}$ و $e_{s,\ min}$: به‌ترتیب فشار بخار اشباع در حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا در گرم‌ترین ماه سال (mbar)، و h: ارتفاع از سطح دریا (m) می‌باشد. معادله فوق نیز به جهت مشکل تخمین تابش خورشیدی به‌صورت ذیل اصلاح گردید:

$$ET_o = C_T \times (T_{avg} - T_x) \times K_T \times 0.408 R_a \times TD^{0.5} \quad (۱۷)$$

که در آن K_T برابر است با:

$$K_T = 0.075 \left(\frac{S}{TD}\right)^{0.5} \quad (۱۸)$$

که در این معادله، S: درصد ساعات تابش آفتابی است و بقیه پارامترها قبلاً معرفی شده است.

معادله پنمن- مانتیت: این مدل به عنوان یک روش استاندارد برای برآورد تبخیر- تعرق در مناطق اقلیمی مختلف در سطح دنیا شناخته شده است (۱۳، ۲۴، ۲۹ و ۳۸). اغلب توصیه می‌شود هنگامی که داده‌های لایسیمتری جهت مقایسه برآوردهای تبخیر- تعرق موجود نیست، از مدل پنمن-مانتیت با داده‌های کامل به عنوان معیاری جهت ارزیابی سایر معادلات (۱۳، ۱۷، ۲۶، ۳۳ و ۳۶) استفاده شود. لذا در این تحقیق نیز معادله مذکور جهت مقایسات و ارزیابی‌ها به‌کار برده شد. این معادله به‌صورت ذیل ارائه شده است (۷):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left[\frac{900}{(T_{avg} + 273)}\right] U_2 \times VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (۱۹)$$

که در آن، Δ: شیب منحنی فشار بخار ($kPa/°C$)؛ R_n: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJ/m^2day)؛ G: شار گرما به داخل خاک (MJ/m^2day)؛ γ: ضریب رطوبتی ($kPa/°C$) و VPD: کمبود فشار بخار (kPa) می‌باشد.

کاربرد معادلات در شرایط داده غیرموجود

برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده، بایستی از روش‌های مختلف جهت تخمین داده‌های غیرموجود استفاده کرد. بر این اساس سناریوهای مختلفی مطرح می‌گردد. در این سناریوها یک یا چند داده معلوم حذف شده و از روش‌های تخمینی ارائه شده در بخش‌های قبل جهت برآورد مجدد آنها استفاده می‌شود. سپس بعد از جایگزین کردن داده‌های تخمینی حاصله با داده‌های اصلی در معادلات برآورد ET_o، نتایج بر اساس معادله پنمن- مانتیت با داده های کامل، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. داده‌های غیرموجود شامل تابش، نقطه شبنم (فشار بخار) و سرعت باد است. برای تخمین داده‌ی غیرموجود تابش از رابطه ۲ استفاده می‌گردد. چهار حالت برای جایگزینی داده‌ی نقطه شبنم در نظر گرفته شد که عبارتند از: استفاده از دمای حداقل به جای دمای نقطه شبنم، واسنجی دمای نقطه شبنم با دمای حداقل برای هر ایستگاه، واسنجی برای هر اقلیم و واسنجی برای کل منطقه. برای جایگزینی سرعت باد نیز سه دیدگاه مطرح شد که عبارتند از: سرعت باد متوسط بلند مدت هر ایستگاه، متوسط بلند مدت برای کل منطقه و متوسط ۲ متر بر ثانیه (معمول جهانی). در نهایت با اعمال سناریوهای فوق، ۵۷ حالت مختلف معادلات تولید شده و مورد بررسی قرار گرفت. این سناریوها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- سناریوهای مختلف معادلات مورد استفاده برای برآورد ET_o در شرایط داده غیرموجود

سناریو	داده غیر موجود	روش تخمین
PM1	R_s	رابطه (۲)
PM2	VP	رابطه(۳)
PM3	U	U_s
PM4	U	U_L
PM5	U	U=۲
PM6	R_s VP	رابطه(۲) رابطه(۳)
PM7	R_s U	رابطه(۲) U_s
PM8	R_s U	رابطه(۲) U_L
PM9	R_s U	رابطه(۲) U=۲
PM10	VP U	رابطه(۳) U_s
PM11	VP U	رابطه(۳) U_L
PM12	VP U	رابطه(۳) U=۲
PM13	R_s VP U	رابطه(۲) رابطه(۳) U_s
PM14	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_L
PM15	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U=۲

بدون واسنجی دمای نقطه شبنم و دمای حداقل

سناریو	داده غیر موجود	روش تخمین
PM16	VP	رابطه(۳)
PM17	R_s VP	رابطه(۲) رابطه(۳)
PM18	VP U	رابطه(۳) U_s
PM19	VP U	رابطه(۳) U_L
PM20	VP U	رابطه(۳) U=۲
PM21	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_s
PM22	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_L
PM23	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U=۲

دمای نقطه شبنم و حداقل واسنجی شده برای هر ایستگاه

سناریو	داده غیر موجود	روش تخمین
PM24	VP	رابطه(۳)
PM25	R_s VP	رابطه(۲) رابطه(۳)
PM26	VP U	رابطه(۳) U_s
PM27	VP U	رابطه(۳) U_L
PM28	VP U	رابطه(۳) U=۲
PM29	R_s VP U	رابطه(۲) رابطه(۳) U_s
PM30	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_L

دمای نقطه شبنم و حداقل واسنجی شده برای کل ایستگاه‌ها (استانی)

سناریو	داده غیر موجود	روش تخمین
PM31	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U=۲
PM32	VP	رابطه(۳)
PM33	R_s VP	رابطه(۲) رابطه (۳)
PM34	VP U	رابطه(۳) U_s
PM35	VP U	رابطه(۳) U_L
PM36	VP U	رابطه(۳) U=2
PM37	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_s
PM38	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U_L
PM39	R_s VP U	رابطه (۲) رابطه(۳) U=۲

دمای نقطه شبنم و حداقل واسنجی شده برای ایستگاه‌های هم اقلیم

سناریو	داده غیر موجود	روش تخمین
HARG1	-	رابطه (۵)
HARG2	-	رابطه (۶)
HARG3	-	رابطه (۷)
TURC1	-	رابطه (۹)
TURC2	R_s	رابطه (۲) رابطه (۹)
TURC3	-	رابطه(۱۰)

ادامه استانی

سناریو	داده غیر موجود	توضیح
TURC4	R_s	رابطه (۲) رابطه(۱۰)
TURC5	U	U_s رابطه(۱۰)
TURC6	U R_s	U_s رابطه(۲) رابطه(۱۰)
TURC7	U	U_L رابطه(۱۰)
TURC8	U R_s	U_L رابطه(۲) رابطه(۱۰)
TURC9	U	U=۲ رابطه(۱۰)
TURC10	U R_s	U=۲ رابطه(۲) رابطه(۱۰)
THORNT	-	رابطه (۴)
BLANY C	-	رابطه (۸)
J H 1	-	رابطه(۱۲)
J H 2	R_s	رابطه(۱۲)
J H 3	-	رابطه(۱۷)

PM؛ مربوط به معادله پنمن- مانتیت، HARG؛ معادله هارگریوز، TURC؛ معادله تارک، THORNT؛ معادله ترنت ویت، BLANY C؛ معادله بلانی کریدل و JH؛ معادله جنسن-هیز می‌باشد.

سناریوهای PM1 تا PM15، بدون واسنجی دمای نقطه شبنم و حداقل می‌باشد

سناریوهای PM16 تا PM23، بعد از واسنجی دمای نقطه شبنم و حداقل هر ایستگاه می‌باشد.

سناریوهای PM24 تا PM31، بعد از واسنجی دمای نقطه شبنم و حداقل برای کل استان (همه ایستگاه‌ها) می‌باشد.

سناریوهای PM32 تا PM39، بعد از واسنجی دمای نقطه شبنم و حداقل، برای ایستگاه‌های با اقلیم مشابه می‌باشد.

U، R_s و VP؛ به ترتیب نشانگر سرعت باد، تابش خورشیدی و فشار بخار واقعی می‌باشد.

در این جدول، U_s؛ سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه در ارتفاع ۲ متری و U_L؛ سرعت باد کل ایستگاه‌ها (استان) در ارتفاع ۲ متری می‌باشد

معیارهای ارزیابی

برای مقایسه و ارزیابی برآوردهای تبخیر- تعرق مرجع به روش های مختلفی که قبلاً تشریح گردید، از پارامترهای ارزیابی متعددی استفاده شد. این پارامترها عبارتند از: حداکثر اختلاف مطلق (MXE)،

میانگین اختلاف مطلق (MAE)، میانگین مجذور مربعات اختلاف (RMSD)، میانگین مجذور مربعات اختلاف اصلاح شده (ARMSD)، میانگین مجذور مربعات اختلاف وزن‌دار (WRMSD)، خطای نسبی (RE)، خطای استاندارد تخمین (SEE) و شیب خط رگرسیونی (b). مقادیر MXE و MAE با روابط ذیل تعیین می‌شود:

$$MXE = \max(\left|ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,i}\right|)_{i=1}^{M} \quad (۲۰)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{M}(\left|ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,i}\right|)}{M} \quad (۲۱)$$

معمولاً در شرایطی که دو سری مقادیر برآورد شده (تخمینی) مورد مقایسه قرار می‌گیرد از معیار میانگین مجذور مربعات اختلاف (RMSD)، استفاده می‌شود (۳۰). میانگین مجذور مربعات اختلاف (RMSD) با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^{M}(ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,i})^2}{M}\right]^{0.5} \quad (۲۲)$$

در روابط فوق $ET_{PM,Full}$: مقادیر تبخیر- تعرق مرجع برآورد شده به روش پنمن-مانتیت با داده‌های کامل ($mm\ day^{-1}$)؛ ET_{eq}: مقادیر تبخیر-تعرق مرجع متناظر برآورد شده با سایر معادلات ($mm\ day^{-1}$) و M: تعداد کل مشاهدات می‌باشد. پارامتر دیگر مورد استفاده، خطای نسبی (RE) است که با رابطه ذیل تعیین می‌شود (۳۳):

$$RE = \frac{RMSD}{\overline{ET}_{PM,FULL}} \quad (۲۳)$$

که در آن $\overline{ET}_{PM,FULL}$: میانگین مقادیر تبخیر- تعرق مرجع حاصل از معادله کامل پنمن- مانتیت می‌باشد. بین مقادیر برآورد شده ET_o به روش پنمن-مانتیت با داده‌های کامل و سایر معادلات، با رابطه ذیل رگرسیون خطی ایجاد گردید:

$$ET_{PM,FULL} = b \times ET_{eq} \quad (۲۴)$$

که در آن b: ضریب رگرسیون یا همان شیب خط می‌باشد. استفاده از رگسیون از مبدا به این دلیل است که میزان تناسب بین مقادیر تخمینی از معادله استاندارد و سایر معادلات مقایسه‌ای ارزیابی شود، زیرا به لحاظ تئوری در مبدا مختصات این مقادیر باید رفتار مشابهی داشته باشند (۳۱). از ضریب رگرسیون حاصله (b)، برای ارزیابی مقادیر بازسازی شده بر اساس این ضریب و میانگین مجذور مربعات اختلاف (ARMSD) اصلاح شده استفاده می‌شود:

$$ARMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^{M}(ET_{PM,FULL,i} - b \times ET_{eq,i})^2}{M}\right]^{0.5} \quad (۲۵)$$

که در آن، ARMSD: میانگین مجذور مربعات اختلاف اصلاح شده ($mm\ day^{-1}$) می‌باشد. این معیار بیانگر قابلیت برآورد صحیح ET_o توسط هر کدام از معادلات است هنگامیکه گرایش (چولگی) ثابت مقادیر، حذف شود. در واقع ترکیب این دو معیار (ARMSD و RMSD) برای ارزیابی مقادیر، اولاً دقت برآوردهای معادلات را مشخص نموده و دیگر اینکه امکان تصحیح معادلات با یک رگرسیون خطی ساده را بررسی و ارزیابی می‌کند (۳۱). مقادیر RMSD، برای تمامی ماه‌های سال و ماه پیک محاسبه گردید. سپس میانگین مجذور مربعات اختلاف وزن‌دار (WRMSD) با رابطه ذیل تعیین شد (۱۸):

$$WRMSD = 0.7 \times (0.67RMSD + 0.33ARMSD) + 0.3 \times (0.67RMSD_P + 0.33ARMSD_P) \quad (۲۶)$$

که در این رابطه، WRMSD: میانگین مجذور مربعات اختلاف وزن دار ($mm\ day^{-1}$)؛ $RMSD_P$: میانگین مجذور مربعات اختلاف برای ماه پیک ($mm\ day^{-1}$) و $ARMSD_p$: میانگین مجذور مربعات اختلاف اصلاح شده برای ماه پیک ($mm\ day^{-1}$) می‌باشد. مقادیر WRMSD می‌تواند توانایی معادلات برای برآوردهای صحیح تبخیر- تعرق مرجع در تمام ماه‌های سال (۴۷درصد وزن کل)، توانایی برآورد دقیق در ماه پیک (۲۰درصد وزن کل) و قابلیت اصلاح مقادیر برآورد شده با یک رگرسیون خطی (۳۳درصد وزن کل) را مشخص نماید (۳۱). بدین طریق رتبه‌بندی نهایی معادلات مختلف در برآوردهای دقیق تبخیر- تعرق مرجع بر اساس این معیار انجام می‌گیرد. خطای استاندارد برآورد (SEE) نیز بیان کننده این مهم است که مقادیر ET_o حاصل از معادلات، در طول سال با چه دقتی نسبت به مقادیر استاندارد، تولید شده است (۳۴). این معیار با رابطه ذیل مشخص می‌شود:

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{M}(ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,i})^2}{M-1}\right]^{0.5} \quad (۲۷)$$

که در آن SEE: خطای استاندار برآورد ($mm\ day^{-1}$) می‌باشد. البته این معیار اغلب برای مقایسه مقادیر تخمینی با واقعی مناسب‌تر است (۳۱). در نهایت مشخصه راندمان مدل (Model Efficiency) معرفی می‌گردد که یک معیار ارزیابی جهت سنجش عملکرد و کارایی مدل یا معادله مورد استفاده در برآورد تبخیر- تعرق مرجع می‌باشد (۲۷):

$$Efficiency = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{M}(ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,i})^2}{\sum_{i=1}^{M}(ET_{PM,FULL,i} - ET_{eq,m})^2} \quad (۲۸)$$

که در این رابطه، $ET_{eq,\,m}$: مقدار میانگین تبخیر- تعرق مرجع محاسبه شده با معادله مقایسه‌ای مورد نظر می‌باشد. چنانچه راندمان مدل بیش از ۹۰درصد باشد، نشان دهنده این است که مدل یا معادله

مذکور عملکرد مناسب و رضایت بخشی دارد. مقادیر راندمان بین ۸۰ تا ۹۰درصد نشان دهنده عملکرد نسبتاً خوب مدل و مقادیر کمتر از ۸۰ درصد بیانگر عدم رضایت بخشی مدل می‌باشد (۱۰).

نتایج و بحث

واسنجی دمای نقطه شبنم و دمای حداقل: این واسنجی بین مقادیر دمای حداقل و دمای نقطه شبنم ثبت شده در هر ایستگاه که از زمان بدو تاسیس این ایستگاه‌ها جمع‌آوری گردیده است، انجام شد. در این واسنجی، مناسب‌ترین برازش منحنی و معادله آن بر اساس معیارهای ارزیابی انتخاب شده است. نتایج واسنجی مربوط به دمای حداقل و نقطه شبنم برای هر ایستگاه، ایستگاه‌های با اقلیم مشابه و برای کل منطقه در جدول ۳ ارائه شده است.

رتبه‌بندی معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع

در این مطالعه ۵۷ معادله در شرایط مختلف به لحاظ موجود یا غیرموجود بودن داده‌های مورد نیاز، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به حجم بالای محاسبات و خروجی‌ها، در این قسمت سعی می‌شود ضمن تحلیل نتایج، به بررسی چگونگی عملکرد معادلات مختلف به تفکیک شرایط اقلیمی پرداخته شود. نتایج نشان داد که در هر دو اقلیم نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک مورد مطالعه، معادله پنمن–مانتیت در شرایطی که فقط داده‌های تابش یا ساعات آفتابی (PM1) غیرموجود است، برآوردهای بسیار نزدیکی به مقادیر واقعی برآورد تبخیر- تعرق حاصله از معادله پنمن- مانتیت با داده‌های کامل (PM_{FULL}) دارد. به طوری‌که مقدار میانگین مجذور مربعات اختلاف وزن‌دار (WRMSD) آن در اقلیم نیمه‌مرطوب، ۰/۱۴ و در اقلیم نیمه‌خشک، ۰/۱۲ میلی‌متر در روز بوده و راندمان مدل در دو حالت فوق به‌ترتیب ۹۹/۵ درصد و ۹۹/۷ درصد حاصل شده است. این مدل در هر ایستگاه و به‌طور متوسط در تمام مناطق مورد مطالعه در حد معادله اصلی پنمن مانتیت عمل می‌کند. نکته قابل توجه در این مورد، کارایی بسیار مطلوب معادله ۲ در برآورد تابش خورشیدی (R_s)، در مناطق مورد مطالعه می‌باشد که توانسته است کمبود این داده را با دقت بسیار بالایی جبران نماید. ضمن اینکه توانایی بالای معادله پنمن–مانتیت حتی در شرایط کمبود داده، قابل توجه است که دلیل این امر را می‌توان اساس فیزیکی این معادله دانست (۱۲، ۱۸، ۲۵، ۳۲ و ۳۵). برای تعیین ترتیب اولویت‌های استفاده از معادلات در شرایط کمبود داده، از پارامتر میانگین مجذور مربعات اختلاف وزن‌دار (WRMSD)، استفاده شد (۱۴، ۱۹ و ۳۳). این رتبه‌بندی برای شرایط اقلیمی مختلف به طور مجزا انجام گردید.

اقلیم نیمه‌مرطوب: در نمودار شکل ۱، رتبه‌بندی معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده، به‌ترتیب از اولویت ۱ تا ۵۷ برای اقلیم نیمه‌مرطوب ارائه شده است. به طور کلی نتایج مقایسه این رتبه‌بندی در دو اقلیم مذکور نشان می‌دهد که معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌مرطوب حساسیت کمتری به داده‌های غیر موجود دارد. همان‌طور که در این رتبه‌بندی قابل مشاهده است، در اقلیم نیمه‌مرطوب معادله پنمن- مانتیت حتی با غیرموجود بودن هر سه داده مذکور باز هم به لحاظ دقت برآورد نسبت به سایر معادلات برتری دارد. این در حالی است که در اقلیم نیمه‌خشک این معادله در شرایطی که فقط تابش و دمای نقطه شبنم واسنجی شده غیرموجود باشد، دقت مناسبی دارد (شکل ۲). بعد از سناریوهای مذکور معادله هارگریوز سامانی با رابطه ۵ (HARG1) قرار دارد. در این رتبه‌بندی، معادلات بلانی کریدل، تارک و ترنت- ویت با ضعیف‌ترین نتایج، در آخرین اولویت قرار گرفته است و هرگز قابل توصیه نمی‌باشد.

اقلیم نیمه‌خشک: نتایج رتبه‌بندی برای اقلیم نیمه‌خشک در شکل ۲ ارائه شده است. در واقع در شرایط عدم وجود واسنجی دماهای حداقل و نقطه شبنم، تنها سناریوی PM1 (بدون داده تابش) اعتبار مناسبی دارد و بلافاصله پس از آن معادلات هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن (HARG3) قرار می‌گیرد. این نتیجه بیان می‌کند که در اقلیم نیمه‌خشک حساسیت معادله پنمن- مانتیت به داده‌های غیرموجود بسیار زیاد است، به‌طوری‌که وقتی فقط داده تابش و دمای نقطه شبنم از رابطه واسنجی و یا ترکیبی از این دو عامل غیرموجود باشد، معتبر است. از آنجا که در مناطق نیمه‌خشک ایران روابط واسنجی بین دمای حداقل و نقطه شبنم موجود نیست، در شرایط کمبود داده، تخمین فشار بخار با دمای حداقل، دقت برآورد معادله پنمن- مانتیت را کاهش داده و در این شرایط استفاده از معادله‌هارگریوز نتایج مناسب‌تری ارائه می‌کند. نکته قابل توجه این است که در اقلیم نیمه‌خشک، سرعت باد روزانه نیز باید در دسترس باشد در غیر اینصورت نمی‌توان از معادله پنمن- مانتیت استفاده نمود. در این رتبه‌بندی نیز معادلات بلانی کریدل، تارک و ترنت- ویت با ضعیف‌ترین نتایج، در آخرین اولویت قرار گرفته است و هرگز قابل توصیه نمی‌باشد.

وضعیت کم یا بیش‌برآورد نمودن معادلات مختلف در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص گردیده است. طبق نتایج در اقلیم نیمه‌مرطوب اکثر سناریوهای معادله پنمن- مانتیت مقدار اندکی حدود ۵ درصد کم‌برآورد و ۱۵ درصد بیش برآورد دارند. همانطور که مشهود است سناریوهای معادلات تارک و ترنت ویت در این شرایط به‌شدت تبخیر- تعرق مرجع را کم‌برآورد می‌نماید. معادلات هارگریوز سامانی ۵ درصد تبخیر- تعرق را بیش برآورد می‌نمایند.

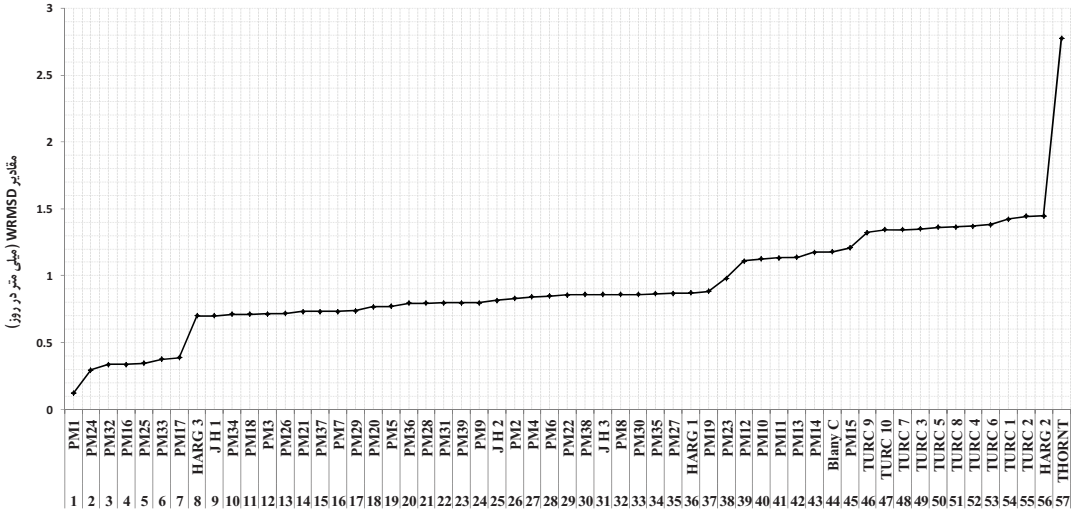
جدول ۳- نتایج واسنجی بین دمای نقطه شبنم و دمای حداقل

ایستگاه	اقلیم	معادله واسنجی*	ضریب تعیین	خطای استاندارد
مشهد	نیمه مرطوب	$T'_d = -15.63213 \times (0.966986 - e^{(0.043926 \times T_{\min})})$	۰/۹۷۱	۰/۹۸۱
قوچان	نیمه مرطوب	$T'_d = \frac{(0.669343 \times T_{\min} - 1.07688)}{(1 + 0.011145 \times T_{\min} + 0.000509 \times T_{\min}^2)}$	۰/۹۷۵	۰/۹۴۲
چناران	نیمه مرطوب	$T'_d = \frac{(0.74344 \times T_{\min} - 1.68437)}{1 + 0.01105 \times T_{\min} + 0.00142 \times T_{\min}^2)}$	۰/۹۷۵	۰/۸۷۵
بجنورد	نیمه مرطوب	$T'_d = \frac{(0.836769 \times T_{\min} - 1.09511)}{(1 + 0.0086638 \times T_{\min} + 0.00038 \times T_{\min}^2)}$	۰/۹۹	۰/۷۵۳
نیشابور	نیمه مرطوب	$T'_d = -1.16367 + 0.5788 \times T_{\min} - 0.02098 \times T_{\min}^2 + 0.00057 \times T_{\min}^3$	۰/۹۱۸	۱/۲۷۵
تربت‌حیدریه	نیمه مرطوب	$T'_d = -1.78206 + 0.560582 \times T_{\min} - 0.006562 \times T_{\min}^2$	۰/۹۷۱	۰/۹۴۴
گناباد	نیمه خشک	$T'_d = -2.11895 + 0.363633 \times T_{\min} - 0.1312 \times T_{\min}^2 + 0.000594 \times T_{\min}^3$	۰/۹۵۳	۰/۹۰۵
سبزوار	نیمه خشک	$T'_d = -2.6515 + 0.49454 \times T_{\min} - 0.00952 \times T_{\min}^2 + 0.00023 \times T_{\min}^3$	۰/۹۷۲	۰/۸۲۵
سرخس	نیمه خشک	$T'_d = -0.90573 + 0.8236 \times T_{\min} - 0.0374 \times T_{\min}^2 + 0.000993 \times T_{\min}^3$	۰/۹۴۲	۱/۲۳
کاشمر	نیمه خشک	$T'_d = -3.00173 + 0.54158 \times T_{\min} - 0.0132 T_{\min}^2 + 0.00038 \times T_{\min}^3$	۰/۹۶۱	۰/۹۸۱
بیرجند	نیمه خشک	$T'_d = -3.718 + 0.360147 \times T_{\min} - 0.00553 \times T_{\min}^2 + 0.000304 \times T_{\min}^3$	۰/۹۵۲	۰/۸۸۴
فردوس	نیمه خشک	$T'_d = -18.393086 \times (1.147525 - e^{(0.016448174 \times T_{nib})})$	۰/۷۷۹	۰/۹۶۴
قاین	نیمه خشک	$T'_d = -3.44302 + 0.435606 \times T_{\min} - 0.002234 \times T_{\min}^2$	۰/۹۶۴	۰/۹۲۴
تربت‌جام	نیمه خشک	$T'_d = -1.72416 + 0.73095 \times T_{\min} - 0.04048 \times T_{\min}^2 + 0.00122 \times T_{\min}^3$	۰/۹۴	۱/۲۴۵
نهبندان	خشک	$T'_d = -3.00568 + 0.237382 \times T_{\min}$	۰/۸۶۵	۱/۱۹۷
کل استان	-	$T'_d = -2.1674 + 0.5043 \times T_{\min} - 0.01694 \times T_{\min}^2 + 0.000485 \times T_{\min}^3$	۰/۹۷	۰/۸۶۶
اقلیم ۱ **	نیمه مرطوب	$T'_d = -1.1459 + 0.6982 \times T_{\min} - 0.016727 \times T_{\min}^2 + 0.00029 \times T_{\min}^3$	۰/۹۷۸	۰/۸۴۴
اقلیم ۲ ***	نیمه خشک	$T'_d = -2.4981 + 0.51495 \times T_{\min} - 0.01705 \times T_{\min}^2 + 0.00057 \times T_{\min}^3$	۰/۹۶۳	۰/۸۸۵

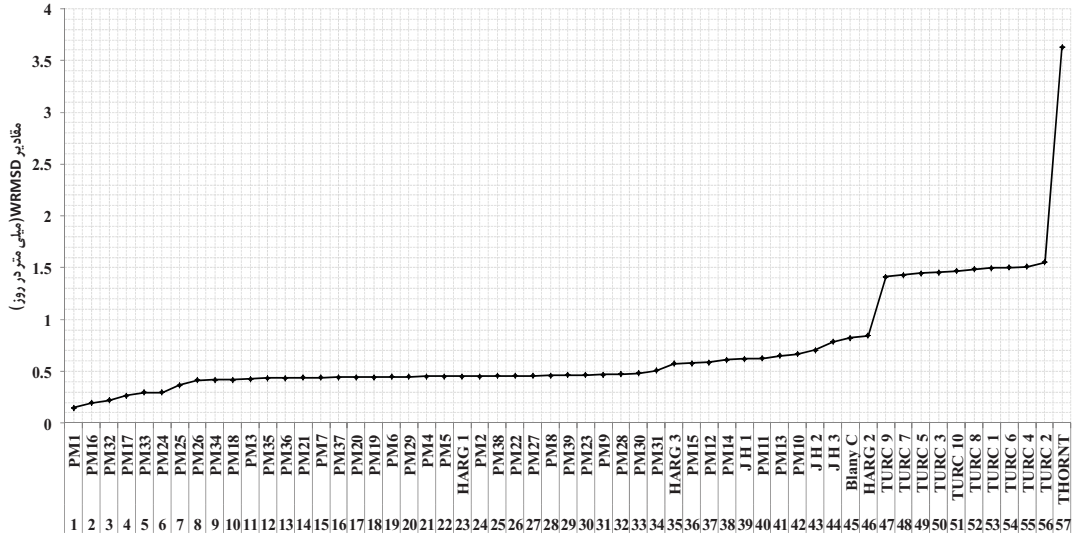
*: در این معادلات، T'd؛ دمای نقطه شبنم به عنوان تابعی از دمای حداقل (Tmin) می‌باشد.

**: در این گروه ایستگاه‌های با اقلیم نیمه‌مرطوب شامل: مشهد، قوچان، چناران، تربت‌حیدریه، بجنورد و نیشابور قرار دارد.

***: در این گروه ایستگاه‌های با اقلیم نیمه‌خشک شامل: گناباد، سبزوار، سرخس، بیرجند، فردوس، قاین، کاشمر و تربت‌جام قرار دارد.



شکل ۱- تعیین اولویت انتخاب معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع بر اساس مقادیر WRMSD در اقلیم نیمه‌مرطوب

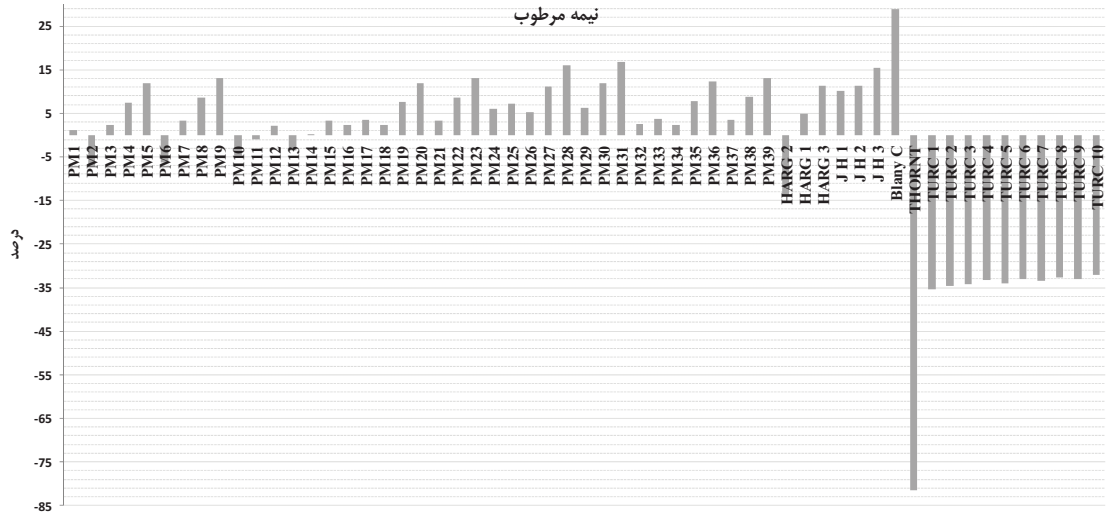


شکل ۲- تعیین اولویت انتخاب معادلات برآورد تبخیر- تعرق مرجع بر اساس مقادیر WRMSD در اقلیم نیمه‌خشک

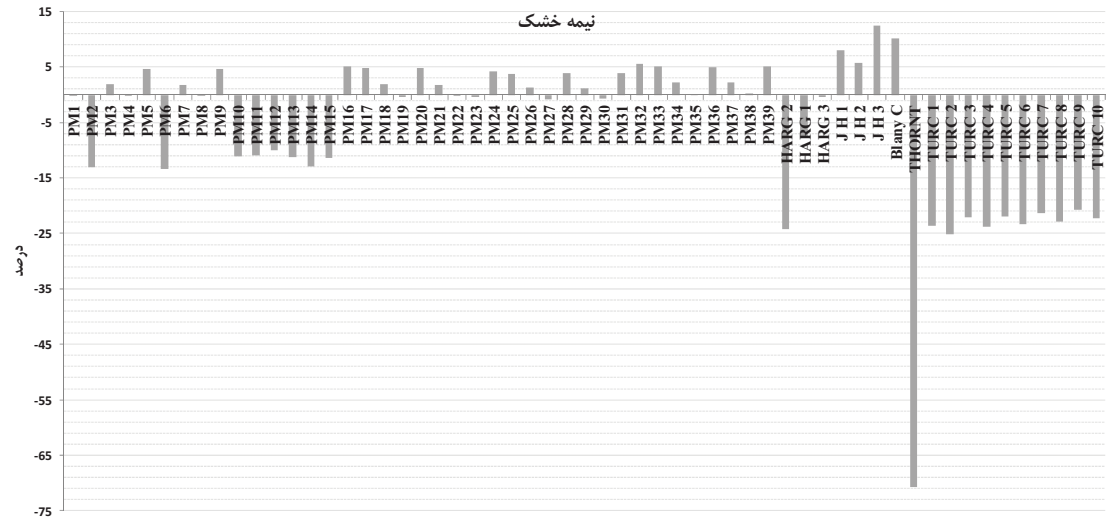
اما در اقلیم نیمه‌خشک اغلب سناریوهای معادله پنمن- مانتیت ۱۵درصد کم‌برآورد و ۵ درصد بیش‌برآورد دارند. در این شرایط معادلات پنمن- مانتیت که در آن داده غیرموجود، فشار بخار بدون واسنجی دمای نقطه شبنم است، تبخیر- تعرق مرجع را کم‌برآورد می‌نمایند. معادله هارگریوز اصلاح شده توسط دروگرز و آلن در اقلیم نیمه‌خشک تبخیر- تعرق مرجع را به مقدار بسیار اندکی کم‌برآورد می‌نماید (۰/۳ درصد). اما معادله هارگریوز سامانی حدود ۷/۳۳ درصد کم‌برآورد دارد. همانطور که مشاهده می‌گردد سناریوهای معادلات تارک و ترنت ویت در این شرایط نیز تبخیر- تعرق مرجع را به‌شدت کم‌برآورد می‌نماید.

در ادامه به تفضیل درباره نقش غیرموجود بودن و روش تخمین هر یک از داده‌های تابش، فشار بخار و سرعت باد در دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع بحث می‌گردد.

تاثیر غیرموجود بودن داده تابش: نتایج تا حد زیادی بیانگر این موضوع است که با افزایش تعداد داده غیرموجود، دقت معادله پنمن- مانتیت کاهش می‌یابد. از طرفی تاثیر غیرموجود بودن داده تابش بر روی برآورد این معادله بسیار ناچیز است. طبق بررسی انجام شده، در هر دو اقلیم مذکور، چنانچه تنها داده غیرموجود تابش باشد (ساعت آفتابی)، معادله PM1، که در آن R_s با رابطه ۲ بر اساس دمای حداقل و حداکثر تعیین می‌شود، نتایج بسیار دقیقی ارائه می‌نماید.



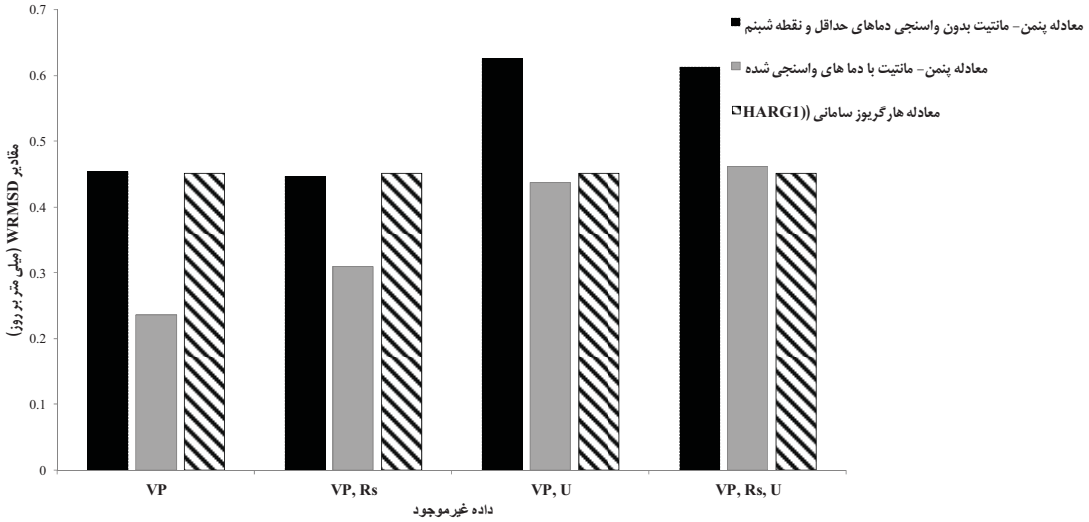
شکل ۳- وضعیت کم یا بیش‌برآورد نمودن تبخیر- تعرق مرجع توسط معادلات مختلف در شرایط داده غیرموجود در اقلیم نیمه‌مرطوب



شکل ٤- وضعیت کم یا بیش‌برآورد نمودن تبخیر- تعرق مرجع توسط معادلات مختلف در شرایط داده غیرموجود در اقلیم نیمه‌خشک

تاثیر غیرموجود بودن داده فشار بخار: در شرایطی که داده‌های مربوط به نقطه شبنم موجود نباشد، برای تخمین فشار بخار واقعی، از دمای حداقل و رابطه ۳ استفاده می‌شود. نتایج نشان داد که در اقلیم نیمه‌مرطوب، معادله پنمن- مانتیت با تخمین فشار بخار به کمک دمای نقطه شبنم واسنجی شده با دمای حداقل به‌ترتیب برای هر ایستگاه (PM16)، هر اقلیم (PM32) و کل منطقه (PM24)، نتایج دقیقی ارائه می‌دهد. داده غیرموجود فشار بخار به لحاظ واسنجی یا عدم واسنجی دماهای حداقل و نقطه شبنم، تاثیر بسیاری بر دقت برآوردهای معادله پنمن- مانتیت دارد، تا حدی که عدم واسنجی دماهای مذکور سبب شده است در شرایطی که فقط داده فشار بخار غیرموجود است (PM2)، معادله هارگریوز- سامانی (رابطه ۵) ارجحیت یابد. این امر در نمودار شکل ۵ به‌خوبی نمایان است. همانطور که مشهود است، استفاده از دمای حداقل به‌جای دمای نقطه شبنم در معادله پنمن- مانتیت، باعث کاهش شدیدی در دقت برآوردهای این معادله می‌گردد. این روند با افزایش تعداد داده‌های غیرموجود، شدت نیز می‌یابد به‌طوری‌که استفاده از معادله هارگریوز سامانی ارجحیت می‌یابد. در این شرایط، بهترین برآوردهای تبخیر- تعرق مرجع زمانی حاصل می‌شود که دست‌کم یکی از داده‌های تابش و یا سرعت باد موجود باشد و واسنجی دمای نقطه شبنم در هر ایستگاه، منطقه و یا اقلیم مشابه انجام شده باشد.

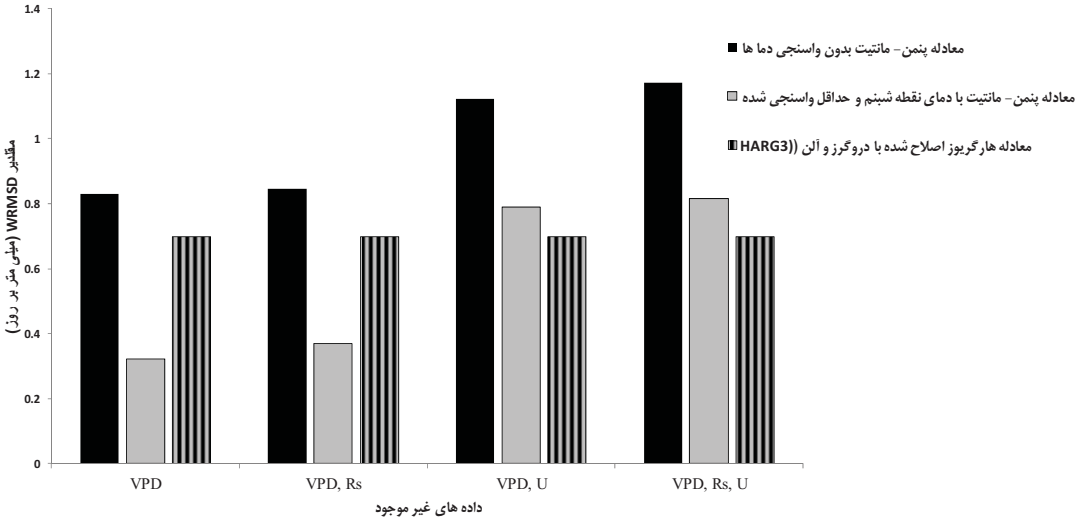
تاثیر غیرموجود بودن داده فشار بخار در اقلیم نیمه‌خشک در شکل ۶ ارائه شده است. در این شرایط استفاده از رابطه واسنجی برای هر ایستگاه (PM16) و سپس اقلیم (PM32)، برای تخمین دمای نقطه شبنم از دمای حداقل، نتایج دقیقی ارائه می‌دهد.



شکل ۵- تاثیر واسنجی یا عدم واسنجی دماهای حداقل و نقطه شبنم بر دقت برآوردهای معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌مرطوب

همانطور که در شکل ۶ مشخص است، تاثیر واسنجی یا عدم واسنجی این دماها در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک بسیار شدیدتر از اقلیم نیمه‌مرطوب است. به‌طوری‌که عدم وجود هر گونه واسنجی بین دماهای مذکور در هر مقیاسی، سبب شده است دقت معادله پنمن- مانتیت به‌شدت کاهش یافته و استفاده از معادله هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن با رابطه ۷ (HARG3)، نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌نماید. همانطور که قبلاً نیز بحث شد، معادله پنمن- مانتیت فقط در شرایط کمبود داده فشار بخار و استفاده از روابط واسنجی دمای نقطه شبنم برای تخمین آن (در صورت وجود) به‌تنهایی و یا همراه با داده تابش، در اقلیم نیمه‌خشک دقت مطلوبی دارد، در غیر اینصورت و با اضافه شدن داده غیرموجود سرعت باد، دیگر این معادله قابل استفاده نخواهد بود (شکل ۶). در واقع استفاده از دمای حداقل به‌جای دمای نقطه شبنم جهت برآورد تبخیر- تعرق مرجع با رابطه پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌خشک با خطای زیادی همراه بوده و استفاده از رابطه هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن (HARG3) توصیه می‌گردد.

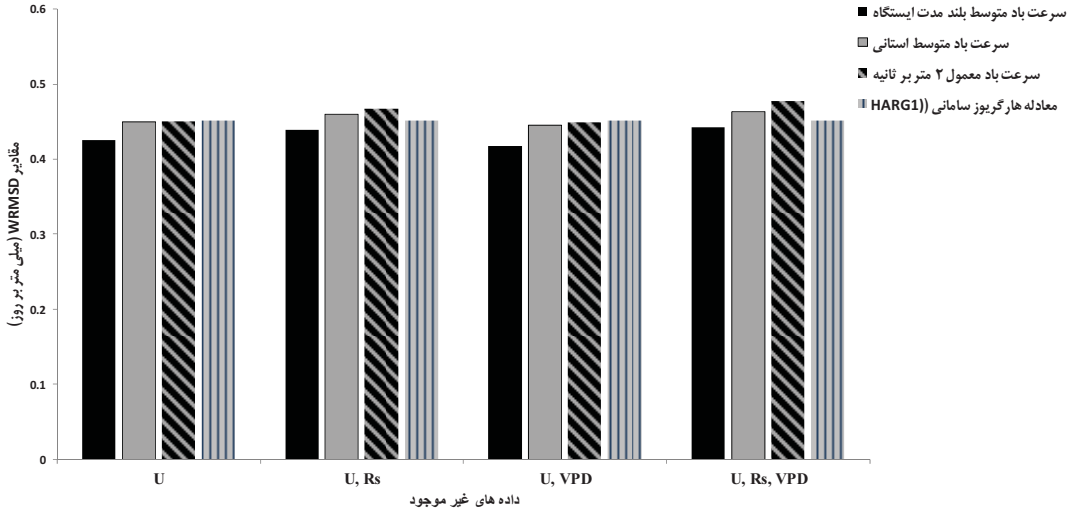
تاثیر غیرموجود بودن داده سرعت باد: در غیاب سرعت باد اندازه‌گیری شده، سه جایگزین در این مطالعه پیشنهاد شد. در این شرایط استفاده از سرعت باد متوسط بلند مدت هر ایستگاه (U_s)، کل منطقه شامل تمامی ایستگاه‌ها (U_L) و سرعت معمول ۲ متر بر ثانیه به‌جای سرعت باد روزانه بررسی گردید. طی ارزیابی انجام شده در اقلیم نیمه‌مرطوب، مناسب‌ترین مدل برآورد تبخیر- تعرق مرجع در شرایط عدم وجود سرعت باد، استفاده از سرعت باد متوسط بلند مدت هر ایستگاه در معادله پنمن- مانتیت است (PM3) (شکل ۱).



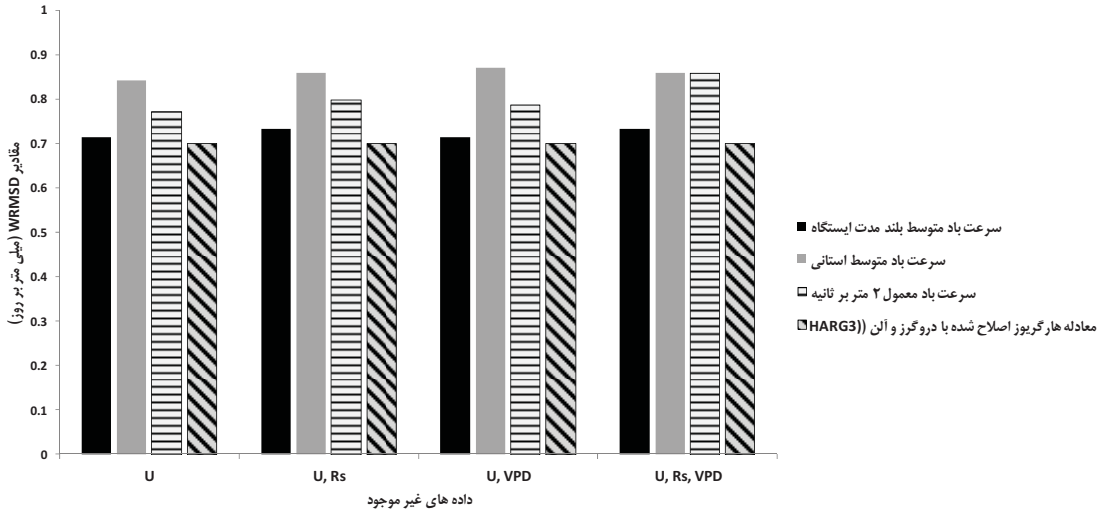
شکل ٦- تاثیر واسنجی یا عدم واسنجی دماهای حداقل و نقطه شبنم بر دقت برآوردهای معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌خشک

سرعت باد نیز تاثیر زیادی بر دقت برآورد معادله پنمن- مانتیت دارد، اما مشخص است که مقادیر جایگزین این داده، به‌ویژه استفاده از متوسط سرعت باد بلند مدت هر ایستگاه، به‌خوبی توانسته است کمبود آن را در این شرایط اقلیمی جبران نماید. این موضوع در شکل ۷ مشخص است. استفاده از سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه به‌جای داده سرعت باد روزانه، نتایج بسیار مطلوبی به‌همراه دارد. اما استفاده از سرعت باد منطقه‌ای و سرعت باد معمول ۲ متر بر ثانیه، همواره مناسب نیست به‌ویژه اگر داده غیرموجود تابش و یا هر سه داده باشد. این وضعیت در اقلیم نیمه‌خشک متفاوت است. در اقلیم نیمه‌خشک، چنانچه داده سرعت باد در دسترس نباشد، نتایج معادله هارگریوز اصلاح شده با آلن و دروگرز (HARG3)، دقت بهتری نسبت به معادله پنمن- مانتیت دارد (شکل ۸). در واقع در این اقلیم استفاده از سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه، متوسط استانی و معمول ۲ متر بر ثانیه نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای کمبود این داده باشد.

ارزیابی معادلات در شرایط کمبود داده‌های تابش، فشار بخار و سرعت باد: هنگامی که هیچکدام از این سه داده در دسترس نباشد، برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در اقلیم نیمه‌مرطوب بهترین روش، استفاده از معادله پنمن- مانتیت است که در آن مقادیر تابش خورشیدی از رابطه ۲، فشار بخار واقعی از دمای نقطه شبنم واسنجی شده برای هر ایستگاه، اقلیم و یا کل استان و از سرعت باد متوسط ایستگاه استفاده شود (PM21، PM37، PM29).



شکل۷- تاثیر غیر موجود بودن داده سرعت باد و روش‌های جایگزین آن بر دقت برآوردهای معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌مرطوب



شکل۸- تاثیر غیرموجود بودن داده سرعت باد و روش‌های جایگزین آن بر دقت برآوردهای معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌خشک

در واقع به‌شرط وجود رابطه واسنجی بین دمای نقطه شبنم و دمای حداقل در هر مقیاسی (ایستگاه، اقلیمی و کل منطقه)، معادله پنمن- مانتیت در اقلیم نیمه‌مرطوب می‌تواند دقت بسیار مطلوبی حتی در شرایطی که هر سه داده تابش، سرعت باد و فشار بخار غیرموجود باشد، تولید نماید. در صورت عدم وجود هیچ رابطه واسنجی بین دمای نقطه شبنم و دمای حداقل، معادله هارگریوز سامانی (HARG 1) دقت بهتری داشته و توصیه می‌گردد. اما در اقلیم نیمه‌خشک امکان استفاده از معادله پنمن- مانتیت در شرایطی که هر سه داده تابش، سرعت باد و فشار بخار غیرموجود باشند، وجود ندارد. در این اقلیم حداکثر داده غیرموجود می‌تواند دو عامل تابش و فشار بخار به‌شرط وجود رابطه واسنجی دمای نقطه شبنم باشد. در غیر اینصورت نمی‌توان از معادله پنمن- مانتیت استفاده نمود. البته قابل توجه است که استفاده از معادله هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن (HARG3) در این شرایط دقت بسیار مطلوبی دارد و مقادیر WRMSD در آن ۰/۶۹ میلی‌متر در روز و راندمان مدل ۹۲/۶۹ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

روابط متعددی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) بر اساس دما، تابش، تبخیر از تشت و ترکیب عوامل مختلف ارائه شده است. اغلب این روابط نیازمند واسنجی دقیق محلی بوده و اعتبار کاربرد آنها در مناطق مختلف با محدودیت مواجه است. معادله پنمن-مانتیت در تخمین روزانه و ماهانه تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) در تمام اقلیم‌ها، به‌عنوان بهترین معادله شناخته شده است. همچنین در مطالعات مختلفی برتری این معادله تایید شده است. ضعف اصلی معادله پنمن – مانتیت، نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد است که برای بسیاری از مناطق همواره در دسترس نیست. روش‌هایی برای تخمین پارامترهای معادله پنمن- مانتیت در شرایطی که داده‌ها غیرموجود باشد، ارائه شده است. مشکل کمبود و یا عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز با استفاده از سایر مدل‌ها، که داده‌های کمتری نیاز دارند نیز قابل حل است. به این منظور در این تحقیق از سایر معادلات ارائه شده برای ET_o نیز استفاده شد و با برآورد های معادله پنمن-مانتیت در شرایط کمبود داده مقایسه گردید. در این مطالعه از معادلات ارائه شده جهت برآورد ET_o، شامل ترنت ویت، هارگریوز و بلانی کریدل (بر پایه دما) و معادلات تارک، جنسن- هیز (بر پایه تابش) و پنمن- مانتیت استفاده گردید. جهت ارزیابی نتایج نیز از معیارهای متعددی استفاده شد. در نهایت معادلات مختلف برای اقلیم نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک جداگانه رتبه‌بندی گردید. در تحقیق حاضر تمامی سناریوهای ممکن جهت تخمین و جایگزینی داده‌های هواشناسی غیرموجود به‌ویژه برای داده دمای نقطه شبنم و سرعت باد، به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- ✓ جهت برآورد تبخیر- تعرق، در دسترس بودن داده‌های مربوط به درجه حرارت روزانه ضروری است و هیچ روشی جهت جبران کمبود این داده وجود ندارد. در حالی‌که عدم دسترسی به داده‌های تابش، فشار بخار و سرعت باد به روش‌های مختلف و آنچه در این مقاله تشریح گردید، قابل جبران است. به طور کلی در شرایطی که تنها یک داده غیرموجود باشد، دقت برآوردها با تخمین‌های ممکن برای داده مورد نظر با معادله پنمن- مانتیت نسبتاً مطلوب است، اما چنانچه تعداد داده‌های غیرموجود به‌تدریج افزایش یابد، به‌طور بدیهی میزان خطای برآوردها نیز افزوده می‌گردد.
- ✓ بررسی‌ها در این مطالعه نشان داد که عدم وجود داده‌های تابش در برآورد تبخیر- تعرق مرجع به‌روش پنمن- مانتیت و تخمین تابش به‌کمک دمای حداقل و حداکثر، تفاوت معنی‌داری نسبت به نتایج معادله در شرایط داده‌های کامل در هر دو اقلیم مورد مطالعه ندارد.
- ✓ چنانچه داده‌های دمای نقطه شبنم مربوط به محاسبه فشار بخار واقعی موجود نباشد، معمولاً از دمای حداقل به جای دمای نقطه شبنم استفاده می‌شود. اما نتایج این مطالعه نشان داد که این عمل باعث ایجاد خطای زیادی در برآورد تبخیر- تعرق می‌گردد. به‌طوری‌که در شرایط عدم دسترسی به دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری شده و یا حاصل از واسنجی، سایر معادلات برآورد ET_o به‌ویژه معادله هارگریوز سامانی در اقلیم نیمه‌مرطوب و معادله هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن در اقلیم نیمه‌خشک، نسبت به معادله پنمن- مانتیت برتری می‌یابد. لذا در شرایطی که داده‌های فشار بخار غیرموجود باشد، دسترسی به روابط واسنجی بین دمای نقطه شبنم و دمای حداقل جهت استفاده از معادله پنمن- مانتیت ضروری است. بنابراین در این تحقیق معادلات واسنجی برای این منظور و در سه حالت برای هر ایستگاه، اقلیم (ایستگاه‌ها با اقلیم یکسان) و کل ایستگاه‌های استان‌های مورد مطالعه انجام پذیرفت و طی آن برآوردهای بسیار مطلوب برای تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کمبود داده نقطه شبنم، با فشار بخار حاصل از دمای نقطه شبنم واسنجی شده به‌ویژه برای هر ایستگاه، حاصل گردید.
- ✓ مساله بعدی در این تحقیق، بررسی عدم حضور داده سرعت باد روزانه و امکان جایگزینی آن بود. برای جایگزینی سرعت باد روزانه نیز سه گزینه بررسی شد که عبارتند از: سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه، سرعت باد متوسط بلند مدت استان و سرعت باد ۲ متر بر ثانیه (معمول جهانی). بر اساس ارزیابی‌های انجام

شده در اقلیم نیمه‌مرطوب، استفاده از سرعت باد متوسط هر ایستگاه، نتایج بسیار مطلوبی حاصل نمود و استفاده از سرعت باد ۲ متر بر ثانیه و سرعت باد متوسط استانی در رتبه‌های بعدی قرار گرفت. در اقلیم نیمه‌خشک هرچند استفاده از سرعت باد متوسط بلند مدت ایستگاه نتایج بهتری از سایر گزینه‌ها حاصل می‌نماید اما نتایج معادله هارگریوز اصلاح شده با آلن و دروگرز دقت مناسب‌تری از معادله پنمن- مانتیت در این شرایط دارد. بنابراین در اقلیم نیمه‌خشک در شرایط عدم دسترسی به داده سرعت باد نمی‌توان از معادله پنمن- مانتیت استفاده نمود.

- ✓ در شرایطی که کمبود داده‌ها به‌صورت ترکیبی و یا تمام این پارامترها باشد (تابش، فشار بخار و سرعت باد)، در اقلیم نیمه‌مرطوب باز هم استفاده از معادله پنمن- مانتیت با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها همراه بود. البته با این شرط که دمای نقطه شبنم با دمای حداقل واسنجی شده باشد. در غیر اینصورت مدل هارگریوز سامانی که در دسته مدل‌های مطلوب قرار دارد، توصیه می‌شود. اما در اقلیم نیمه‌خشک فقط در شرایطی که دو داده تابش و فشار بخار آن هم به شرط وجود رابطه واسنجی برای دمای نقطه شبنم، غیرموجود باشند، معادله پنمن- مانتیت قابل استفاده است در غیر این صورت معادله هارگریوز اصلاح شده با دروگرز و آلن دقت مطلوب‌تری دارد. البته واسنجی و اصلاح مدل هارگریوز برای منطقه مورد مطالعه در تحقیقات بعدی می‌تواند کارایی این مدل را افزایش دهد.
- ✓ سایر مدل‌های استفاده شده در این تحقیق از قبیل معادلات بلانی کریدل، تارک و ترنت- ویت عموماً دقت‌های کمتری داشتند به‌طوری‌که روش بلانی کریدل اغلب منجر به ۱۶٪ بیش‌برآورد، معادلات تارک تبخیر- تعرق مرجع را حدود ۳۰٪ کم‌برآورد و روش ترنت- ویت که در اینجا به‌عنوان ضعیف‌ترین معادله شناخته شد، تبخیر- تعرق مرجع را حدود ۸۰٪ کم‌برآورد نمود. البته معادلات تارک مورد استفاده در این تحقیق رفتارهای مشابه و همسویی در شرایط مختلف نشان دادند و بر این اساس می‌توان امکان اصلاح این معادله در شرایط اقلیمی موجود را محتمل دانست.
- ✓ در نهایت نتایج این مطالعه به‌خوبی مشخص می‌نماید که در چه شرایطی به لحاظ محدودیت داده‌های هواشناسی و با راهکارهای ارائه شده در این مقاله، معادلات مختلف جهت حصول برآوردهای صحیح، قابل استفاده خواهد بود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد دانشکده کشاورزی (موافقتنامه شماره ۱۷۴۲۱) انجام شده است که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

۱- احمدیان ج.، شیبانی د.، عراقی ح.، شیرمحمدی ر. و مجرد م. ۱۳۸۲. طبقه‌بندی اقلیمی کشاورزی در جهت مدیریت منابع آب در توسعه پایدار کشور. یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۲- رحیمی خوب ع. ۱۳۸۵. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن- مانتیت مطالعه موردی خوزستان. همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- علیزاده ا. ۱۳۸۷. رابطه آب و خاک و گیاه. چاپ هفتم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

۴- علیزاده ا. و خلیلی ن. ۱۳۸۸. تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی منطقه مشهد). مجله آب و خاک. جلد ۲۴ شماره ۳. صفحه ۵۸۲-۵۷۴.

5- Adeboye O.B., Osunbitan J.A., Adekalu K.O., and Okunade D.A. 2009. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data, application to Nigeria. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number 1291. Volume XI.

6- Allen R.G. 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering , 122 (2): 97-106.

7- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop Evapotranpiration: Guildlines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organisation, Land and Water. Rome, Italy.

8- Amatya D.M., Skaggs R.W., and Gregory J.D. 1995. Comparison of methods for estimating REF ET. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 121(6): 427–435.

9- Blaney H.F., and Criddle W.D. 1950. Determining water requirements in irrigated area from climatologically irrigation data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Tech. Paper No. 96.

10- Chauhan S., and Shrivastava R.K. 2009. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. Water Resource Management. 23: 825–837.

11- Droogers P., and Allen R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions.

Irrigation and Drainage System. 16 (1): 33-45.
12- Fischer G., Tubiello H., Veithuizen V., and Wiberg D. 2006. Climate change impacts on irrigation water requirements: global and regional effects of mitigation. Technological Forecasting and Social Change. 74: 1990-2080.
13- Gavilan P., Berengena J., and Allen R.G. 2007. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impact on Penman- Monteith reference ET estimates in semiarid regions. Agricultural Water Management. 89 (3): 275–286.
14- George B.A., Reddy B.R.S., Raghuwanshi N.S., and Wallender W.W. 2002. Decision support system for estimating reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 128(1): 1–10.
15- Hargreaves L.G., Hargreaves G.H., and Riley J.P. 1985. Irrigation water requirements for Senegal river basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 111(3): 265–275.
16- Hargreaves G.H., and Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature, Transaction of the ASAE 28 (1): 96-99.
17- 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. 129(5): 360–370.
18- Jensen M.E., and Haise H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 93(IR3): 15–41.
19- Jensen M.E., Burman R.D., and Allen R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, New York.
20- Kashyap P.S., and Panda R.K. 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop coefficients for potato crop in a sub-humid region. Agricultural Water Management. 50(1): 9–25.
21- Kimball J.S., Running S.W., and Nemani R. 1997. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. Agricultural and Forest Meteorology. 85(1-2): 87–98.
22- Landeras G., Ortiz-Barredo A., and López J.J. 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country _Northern Spain_. Agricultural Water Management. 95(5): 553–565.
23- Llasat M.C., and Snyder R.L. 1998. Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. Agricultural and Forest Meteorology. 91(3-4): 209–221.
24- Lopez-Urrea R., De Santa Olalla F.M., Fabeiro C., and Moratalla A. 2006. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. Agricultural Water Management. 86(3): 277–282.
25- Martinez-Cob A., and Tejero-Juste M. 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions. Agricultural Water Management. 64: 251-264.
26- Nandagiri L., and Kovoor G.M. 2006. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 132(3): 238–249.
27- Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: 1. A discussion on principles. Journal of Hydrology. 10: 45–51.
28- Pereira A.R., and Pruitt W.O. 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. Agricultural Water Management. 66(3): 251–257.
29- Pereira L.S. 2005. Water and Agriculture:Facing Water Scarcity and Environmental Challenges. Agricultural Engineering International:the CIGR Ejournal . 7: 1-26.
30- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review. 38: 55–94.
31- Trachkovich S., and Kolakovich S. 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. Water Resource Management. 23: 3057–3067.
32- Trachkovich S., and Kolakovich S. 2009. Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration at humid European locations. Hydrology Research. Vol 40. 1: 45-52.
33- Trachkovich S., and Kolakovich S. 2009. Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 135. No. 4.
34- Trajkovic S. 2007. Hargreaves versus Penman–Monteith under humid conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.133(1): 38–42.
35- Turc L. 1961. Estimation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiee et mise a jour. Annales Agronomy. 12(1): 13–49.
36- Utset A., Farre I., Martinez-Cob A., and Cavero J. 2004. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference— Evapotranspiration inputs for modeling maize water use under Mediterranean conditions. Agricultural Water Management. 66(3): 205–219.
37- Vanderlinden K., Giraldez J.V., and Van Meirvenne M. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in southern Spain Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 130(3): 184–191.
38- Ventura F., Spano D., Duce P., and Snyder R.L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. Nuovo Cimento Della Societa Italiana Di Fisica A-Nuclei Particles and Fields. 18(4): 163–170.
39- Xu C-Y., and Singh V.P. 2002. Cross comparasion of empirical equations for calculating potential evapotransiration with data from Switzerland. Water Researches Management. 16: 197–219.

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 6, Jan-Feb 2012, p. 1503-1519

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۶، بهمن - اسفند ۱۳۹۰، ص. ۱۵۱۹-۱۵۰۳

Analysis of the Effect of Missing Weather Data and Alternative Methods to Estimate the Refrence Evapotranspiration and Ranking ETo Equations for Different Climatic Conditions (Case Study: Khorasan Razavi Provinces)

M. Majidi[1]- A. Alizadeh[2]*
Received:12-9-2011
Accepted:11-10-2011

Abstract

Numerous equations, classified as temperature, radiation, pan evaporation-based and combination-type, have been developed for estimating reference evapotranspiration (ETo). Relationships were often subject to rigorous local calibrations and proved to have limited global validity. The Penman-Monteith equation ranked as the best equation for estimating daily and monthly ETo in all the climates. The main shortcoming of Penman-Monteith equation is that it requires numerous weather data that may not always be available for any location. In this paper some procedures have been recommended for estimating the parameters of Penman-Monteith equation where some weather data are missing. The absence of weather data also can be overcome by using ETo equations with fewer weather data requirements. Therefore, other ETo equations have been included in this study and have been compared with Penman-Monteith ETo estimates using limited weather data. These equations were Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle (based on temperature), Turc, Jensen - Haise (based on radiation) and Penman –Monteith. Meanwhile in this study have been provided alternative methods to estimate missing data, also ETo equations have been evaluated for limited data and in terms of accuracy was ranked in semi humid and semi arid climates Individually. The result of assessments indicated the Penman–Monteith equation for missing data in semi arid climate is more sensitive than semi humid climate. If the dew point and minimum temperatures have been calibrated and there was long-term average wind speed for each station, accuracy of Penman – Monteith equation highly increases in limited data condition. Also in this study the calibration equations of minimum and dew point temperatures for 15 selected stations were presented during long-term statistics (from beginning). Therefore the minimum data requirements necessary to successfully use the Penman –Monteith equation under semi humid condition are the air temperature and for semi arid condition are the air temperature and wind speed data. However, the calibration between minimum and dew point temperature must be exist, especially in the Arid Climate. Otherwise, using of the Hargreaves-Samani equation for semi humid conditions and Hargreaves equation modified by Droogers and Allen, recommended that have good performance in this study. The application of Blaney Criddle, Turc and Thornthwaite equations were result relatively undesirable and in term of accuracy were in lower rankings In both Climates.

Keywords: Calibration, Dew point temperature, Missing weather data, Ranking ETo equations, Wind speed

1,2- PhD Student and Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: alizadeh@um.ac.ir)