تحلیل دقت معادله‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع در مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی در یک منطقه مرطوب

امیراشکان ملکشاهی[۱]، عبداله درزی نفت‌چالی[*۲]، بهروز محسنی[۳]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲
مقاله پژوهشی

چکیده

مدیریت صحیح آب در مزارع کشاورزی، تا حد زیادی به برآورد مناسب تبخیر- تعرق به‌عنوان جزیی اساسی از چرخه هیدرولوژیکی، بستگی دارد. اگرچه روش فایو- پنمن- مانتیث توانایی تخمین تبخیر- تعرق مرجع را با دقت مناسب دارد، ولی به‌دلیل پیچیدگی بیشتر آن، استفاده از روش‌های ساده‌تر در فرایندهای برنامه‌ریزی و مدل‌سازی اولویت دارد. در مطالعه حاضر، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه دشت‌ناز ساری، قابلیت ۱۴ روش برای برآورد مقادیر روزانه، ماهانه و فصلی تبخیر- تعرق مرجع ارزیابی شد. این روش‌ها شامل، سه روش دما محور، چهار روش تابش محور، سه روش تبخیر محور و چهار روش ترکیبی بودند. کارایی هر روش با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطا (PE) و انحراف میانگین مطلق (MAD) ارزیابی شد. بررسی‌ها نشان داد که معادلات تابش محور نسبت به سایر روش‌ها کارایی بهتری در برآورد تبخیر- تعرق مرجع داشتند. معادلات فایو- ۲۴ تابشی (با R^2=0.9 و RMSE=0.31 mm/day)، ایرماک (با R^2=0.97 و RMSE=0.15 mm/day) و بلانی- کریدل (با R^2=0.93 و RMSE=0.38 mm/day) بهترین روش‌ها بودند. دو روش ایرماک و ریتچی بیشترین دقت را در فصول پاییز و زمستان داشتند.. در فصل بهار استفاده از معادله فایو- ۲۴ پن با میانگین خطای ۰/۵ میلی‌متر (در مقایسه با مدل فایو- پنمن- مانتیث) و در فصل تابستان معادله روهور با میانگین خطای ۶/۸ میلی‌متر توصیه می‌شود. براساس نتایج، روش‌های ایرماک، فایو- ۲۴- تابشی، ریتچی، پریستلی- تیلور و بلانی- کریدل به‌ترتیب پنج روش برتر در منطقه مطالعه بودند.

واژه‌های کلیدی: چرخه هیدرولوژیکی، دشت ناز، مدلسازی، معادلات تابش محور، نیاز آبیاری.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۵۲۲۲۶۷۳. mamirashkan@yahoo.com
۲- *دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۹۲۶۲۵۹۸. abdullahdarzi@yahoo.com
۳- مربی گروه منابع‌طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران، دانشجوی دکترا علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی ساری، ۰۹۱۱۳۲۶۳۰۳۲. mohseni.b2019@pnu.ac.ir

مقدمه

تبخیر- تعرق بخش عمده آب مورد مصرف در زراعت و همچنین یک جز کلیدی در چرخه هیدرولوژی است (Wang et al., 2017)، در بسیاری از مطالعات از جمله طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری، شبیه-سازی عملکرد محصول و مدیریت منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است (Tian et al., 2015). اغلب روش‌های موجود به‌منظور محاسبه این مولفه بیلان آب، تبخیر- تعرق مرجع را محاسبه و در ضریب گیاهی ضرب می‌کنند. تبخیر- تعرق مرجع به‌مقدار تبخیر-تعرق از سطح وسیعی از زمین با پوشش گیاهی چمن با ارتفاع یکنواخت ۸-۱۵ سانتی‌متر که فعالانه در حال رشد با آب در دسترس مناسب، گفته می‌شود (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۸). به‌دلیل اهمیت نقش تبخیر- تعرق در مدیریت کشاورزی، محققان تلاش‌های زیادی برای کمی کردن این مولفه مهم کرده‌اند که ماحصل آن، معادله‌های مختلفی است که امروزه در شرایط متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از میان روش‌های مختلف، معادله فایو- پنمن- مانتیث به‌عنوان روش مناسب برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع در مناطق و اقلیم‌های متفاوت گزارش شده است. با این وجود، این معادله نیاز به داده‌های اولیه فراوان (دمای هوا، تابش خورشید، سرعت باد و رطوبت نسبی) دارد. به همین دلیل، استفاده از روش‌های تجربی ساده‌تر مانند روش بلانی-کریدل[۱] و تورنت- وایت[۲] توصیه می‌شود (Tabari et al., 2013). تحقیقات نشان می‌دهد دقت روش‌های تخمین تبخیر- تعرق در مناطق مختلف متفاوت است و استفاده از این معادلات در شرایط اقلیمی مختلف نیاز به واسنجی و ارزیابی دارد (Valipour et al., 2017). طی سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه برآورد تبخیر- تعرق مرجع انجام شد. هریک تعدادی از روش‌ها را در اقلیم خود مورد بررسی قرار دادند که در ادامه به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌شود. شاهدی و زارعی (۱۳۸۹) دقت چهار روش بلانی- کریدل، هارگریوز، پنمن و تورنت- وایت در استان مازندران را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که روش بلانی- کریدل دقیق‌تر از سایر روش‌های مذکور بود. یزدانی و همکاران (۱۳۸۸) با ارزیابی برخی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق در منطقه آمل، دریافتند که به‌ترتیب روش‌های کوئنکا[۳]، اشنایدر[۴]، آلن- پروت[۵] و اورنگ از دقت خوبی برای تعیین این پارامتر برخوردار بودند. نتایج بررسی سلطانی و همکاران (۱۳۹۰) در اقالیم مختلف ایران نشان داد مدل‌های فایو- پنمن- مانتیث، هارگریوز-سامانی[۶] و بلانی- کریدل نسبت به دما حساسیت بالایی داشته و در مناطق مرطوب از دقت مناسبی برخودار می‌باشند. طبری و همکاران (Tabari et al., 2013) با ارزیابی ۳۱ روش تخمین تبخیر- تعرق (هشت روش تبخیری، هفت روش دما محور، چهار روش تابشی، ده روش انتقال جرمی و دو روش تابش محور ارتقاء یافته ایرماک[۷])، نتیجه گرفتند که بهترین روش‌ها به‌ترتیب روش‌های تابش‌محور، معادلات دمایی بلانی- کریدل، هارگریوز-سامانی و معادله تبخیری اشنایدر بودند. در مطالعات مشابه، پاندی و همکاران (Pandey et al., 2016)، با بررسی روش‌های تخمین تبخیر- تعرق در شمال شرق هند به دنبال شناسایی جایگزین مناسب برای فایو- پنمن- مانتیث بودند. از بین ۱۸ روش دمامحور و تابش‌محور چهار روش برتر شامل؛ تورک، ایرماک، بلانی- کریدل و فایو-۲۴ بودند. لیو و همکاران (Liu et al., 2017)، به‌جای تعیین دقت روش‌ها در مقایسه با مدل فایو- پنمن- مانتیث از لایسیمتر استفاده کردند و نشان دادند که از میان روش‌های متعدد مورد

۱. Blaney-Cridde
۲. White-. Torrent
۳. Cuenca
۴. Snyder
۵. Allen pruitt
۶. Hargreaves-samani
۷. Irmak

بررسی، روش‌های ترکیبی بهترین شبیه‌سازی ET_0 روزانه را داشتند و به دنبال آن‌ها روش‌های تابش‌محور و دمامحور بودند. بررسی تغییرات زمانی و مکانی تغییرات تبخیر- تعرق (Valipour et al., 2017)، نشان داد که روش بلانی- کریدل و آبتین به‌ترتیب بهترین روش‌های تخمین تبخیر- تعرق مرجع در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور می‌باشند و مدل اصلاح‌شده هارگریوز- سامانی بهترین عملکرد را در مناطق مدیترانه‌ای و بسیار مرطوب دارد. بررسی پناهی و همکاران (۱۳۹۵) نیز نشان داد که در اقلیم سرد و خشک تبریز، از بین روش‌های تجربی بلانی- کریدل، جنسن- هیز، هارگریوز و تورنت- وایت، روش هارگریوز نزدیک‌ترین تخمین را به روش ترکیبی فایو پنمن مانتیث ارایه داد. بنابراین روش‌های تابش‌محور و دما- محور بهترین شبیه‌سازی را در استان مازندران داشتند. طبق این مطالعات، بهترین روش‌های تابش‌محور، ایرماک و ریتچی و در بین روش‌های دمامحور، بلانی- کریدل و هارگریوز بودند. مطالعات پیشین در زمینه تعیین روش‌های مناسب تخمین تبخیر- تعرق مرجع در استان مازندران محدود به بررسی روش‌ها بر- اساس یک محوریت (تابش‌محور، تبخیرمحور و غیره) بود. بررسی معادلات براساس یک محوریت، مانع از مقایسه جامع و انتخاب بهترین روش‌ها می‌شود. در این مطالعه به تعیین دقت و طبقه‌بندی کلیه روش‌ها به‌صورت روزانه، ماهانه و فصلی پرداخته می‌شود. تعیین دقت روش‌ها به‌صورت روزانه، ماهانه و فصلی امکان انتخاب روش مطلوب با توجه به دوره کشت گیاه مورد نظر و مدیریت مناسب منابع آب را می‌دهد. بنابراین مقادیر تبخیر- تعرق محاسبه شده با استفاده از ۱۴روش مختلف با نتایج روش فایو- پنمن- مانتیث به‌صورت روزانه، ماهانه و فصلی در ایستگاه دشت‌ناز ساری مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد نیاز این تحقیق از ایستگاه سینوپتیک دشت‌ناز ساری با عرض و طول جغرافیایی به‌ترتیب ۳۶/۳۷ درجه شمالی و ۵۳/۱۱ درجه شرقی و ارتفاع ۱۶ متر از سطح دریا تهیه شد (شکل ۱). اقلیم منطقه از نوع نیمه مرطوب با متوسط بارندگی سالانه و سال زراعی به‌ترتیب ۶۵۷/۴ و ۶۵۳/۶ میلی‌متر می- باشد. از نظر موقعیت جغرافیایی، این ایستگاه در منطقه دربردانده یکی از مهم‌ترین شبکه‌های آبیاری و زهکشی کشور، شبکه تجن، قرار دارد که حدود ۴۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی استان مازندران را تحت پوشش دارد. علاوه بر این، شرایط و موقعیت این ایستگاه در این استان به‌گونه‌ای است که می‌توان آن را نماینده شرایط متوسط دشت‌های استان مازندران در نظر گرفت. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق شامل حداقل، متوسط و حداکثر دمای روزانه هوا (درجه سانتی‌گراد)، حداقل، متوسط و حداکثر رطوبت نسبی روزانه (درصد)، ساعات آفتابی روزانه و بارندگی روزانه (میلی‌متر) برای یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵) بود. در جدول ۱ برخی از پارامترهای مذکور به‌منظور ارزیابی کلی وضعیت اقلیمی منطقه ارایه شد.

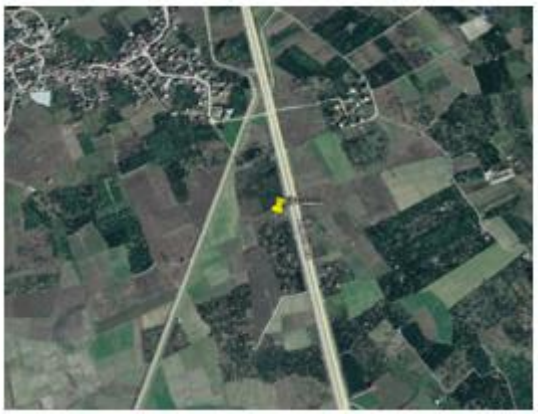
برآورد تبخیر- تعرق مرجع

در این مطالعه از ۱۵ روش هارگریوز، بلانی- کریدل، پریستلی- تیلور، هامون، ایرماک، ریتچی، فایو- ۲۴ تابشی، اشنایدر، کوئنکا، فایو- ۲۴ تشت تبخیر، فایو- ۱۷، پنمن- ۶۳، پنمن- کیمبرلی، روهور و فایو- پنمن- مانتیث برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع استفاده شد که روش آخر به‌عنوان مبنای تعیین دقت سایر روش‌ها بود.

معادله فایو- پنمن- مانتیث

معادله فایو- پنمن- مانتیث با اصلاحات انجام شده روی مدل پنمن مانتیث توسط سازمان فایو در سال ۱۹۹۸ (نشریه ۵۶) به عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر- تعرق معرفی شد (رابطه ۱). این معادله تبخیر- تعرق مرجع را با استفاده از داده‌های دما، تابش، سرعت باد و رطوبت برآورد می‌کند (Tabari et al., 2013).

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R-G)+\gamma(\frac{900}{Ta+273})\times u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34\times u_2)} \quad (1)$$



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول (۱): مقادیر برخی از پارامترهای اقلیمی ثبت‌شده در ایستگاه دشت ناز در دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵)

دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)			رطوبت نسبی (درصد)			متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)
حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	
-۵/۲	۱۷/۷	۴۲/۵	۶	۷۵	۱۰۰	۶۵۳/۶

روش‌های دما محور

روش بلانی- کریدل در سال ۱۹۵۰ توسط بلانی و کریدل به‌صورت معادله (۲) ارایه شد. این روش، بعدها توسط فایـــو مورد ارزیابی و واسنجی قرار گرفت. ایـن معادله بر اساس بیلان حرارتی پایه‌گذاری شده و در آن، تبخیر- تعرق مرجع با درجه حرارت و مدت زمان تابش مرتبط می‌باشد (Liu et al., 2017).

$$ET_0=a+b[P(0.46T_a+8.13)] \quad (2)$$

معادله هارگریوز (Hargreaves & Samani, 1985)، به‌منظور تخمین تبخیر- تعرق مرجع روزانه در شرایطی که داده‌های ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در دسترس نباشد، با استفاده از متوسط دمای هوا و همچنین اختلاف حداکثر و حداقل درجه حرارت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله به‌صورت

رابطه (۳) بیان می‌شود (Antonopoulos et al., 2017).

$$ET_0= 0.408 \times 0.0023 \times (T_a+17.8) \times (T_{max}-T_{min})^{0.424} \times R_a \quad (۳)$$

روش هامون به‌عنوان یکی از ساده‌ترین روش‌های تخمین تبخیر- تعرق مرجع شناخته می‌شود و برای ارزیابی مقادیر روزانه یا ماهانه تبخیر- تعرق قابل استفاده است که به‌صورت معادله (۴) می‌باشد (Alkaeed et al., 2006).

$$ET_0=0.55 \left(\frac{N}{12}\right)^2 \left(\frac{4.95\exp^{0.062t}}{100}\right) 25.4 \quad (۴)$$

روش‌های تابش محور

ایرماک و همکاران (Irmak et al., 2003)، به‌منظور تخمین تبخیر- تعرق مرجع، معادله زیر (معادله ایرماک) را بر مبنای تابش خورشیدی ارایه نمودند (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۷).

$$ET_0=-0.611+0.149 \times R_s+0.079 \times T_a \quad (۵)$$

معادله ریتچی، معادله تابش محوری است که در سال ۱۹۷۲ توسط ریتچی پیشنهاد شد (رابطه ۶) و پس از آن توسط جونز و ریتچی (۱۹۹۰) توسعه یافت (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$ET_0=\alpha_1 \left[3.87 \times 10^{-3}.R_s \left(\begin{matrix}0.6T_{max}+\\0.4T_{min}+29\end{matrix}\right)\right] \quad (۶)$$

پریستلی و تیلور (Priestley & Taylor, 1972)، با ایجاد تغییر در معادله فایو- ۲۴ تابشی روش ترکیبی زیر (معادله پریستلی- تیلور) را به‌منظور تخمین تبخیر- تعرق مرجع ارایه دادند (رابطه ۷). در این معادله، قسمت آئرودینامیک معادله حذف و قسمت مربوط به انرژی در ضریب ۱/۲۶ ضرب شد (شهابی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹).

$$ET_0=1.26 \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \frac{R_n-G}{\lambda} \quad (۷)$$

دورنباس و پروئت (Doorenbos & Pruitt, 1977)، با تصحیح معادله مک کینک، معادله زیر (فایو- ۲۴ تابشی) را ارایه دادند. این معادله بر مبنای اندازه‌گیری تابش خورشید و دما ارایه شد (شهابی‌فر و همکاری، ۱۳۸۹).

$$ET_0=b \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} R_S/\lambda -0.3 \quad (۸)$$

$$b=1.066-0.0013RH+0.045U_d-0.0002RH.U_d -0.315 \times 10^{-4} RH^2-0.0011U_d^2$$

روش‌های تشت محور

اشنایدر (Snyder, 1992)، با اصلاح معادله فرورت (۱۹۸۳) که تابعی از سرعت باد، رطوبت نسبی و فاصله از تشت بود؛ از طریق مقایسه با روش آلن و پروت (۱۹۹۱)، معادله (۹) (معادله اشنایدر) را ارایه نمود (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۸).

$$K_{pan}=0.482+[0.24\ln(F)]-(3.76\times10^{-4}U_2)+(0.0045RH) \quad (۹)$$

معادله کوئنکا نیز با اصلاح معادله فرورت (۱۹۸۳) در سال۱۹۸۹ به صورت معادله (۱۰) ارایه شد (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۸).

$$K_{pan}=0.475-(0.245\times10^{-3}U_2)+\begin{pmatrix}0.516\\ \times10^{-2}RH\end{pmatrix}+(0.118\times10^{-2}F)-(0.16\times10^{-4}RH^2)-(0.101\times10^{-5}F^2)-(0.8\times10^{-8}RH^2U_2)-(0.1\times10^{-7}RH^2F) \quad (۱۰)$$

معادله (۱۱) (معادله فایو- ۲۴ پن) از نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فایو اقتباس شد (یزدانی و همکاران، ۱۳۸۸).

$$K_{pan}=0.108-0.000331U_2+0.0422\ln(Fetch)+0.1434\ln(RH_{mean})-0.000631[\ln(Fetch)]^2\ln(RH_{mean}) \quad (۱۱)$$

روش‌های ترکیبی

معادله پنمن (۱۹۶۳)، یک معادله ترکیبی است که با اعمال جنبه‌های انرژی و آیرودینامیکی، تبخیر- تعرق مرجع را به‌صورت معادله (۱۲) (معادله پنمن- ۶۳) محاسبه می‌نماید (Liu et al., 2017).

$$ET_0=\begin{bmatrix}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G)+\\ 6.43\frac{\gamma}{\gamma+\Delta}\begin{pmatrix}a_w\\ +b_wu_2\end{pmatrix}(e_s-e_a)\end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$a_w=1$

$b_w=0.537$

در هفدهمین شماره مقاله فایو (۱۹۷۹)، به‌منظور مدیریت خشکسالی، با جمع‌آوری اطلاعات تجربی از مناطق مختلف، معادله تجربی (۱۳) (معادله فایو- ۱۷) ارایه شد. این معادله طیف وسیعی از اقلیم‌های گوناگون را پوشش می‌دهد (Liu et al., 2017).

$$ET_0=\begin{bmatrix}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G)+6.43\frac{\gamma}{\gamma+\Delta}\\ (a_w+b_wu_2)(e_s-e_a)\end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

$a_w=1$

$b_w=0.54 \quad If \quad \Delta T<12℃$

$b_w=0.54+\frac{0.35(\Delta T-12)}{4} \quad If \quad \Delta T\geq12℃$

رایت و جنسن (۱۹۷۲)، تبخیر- تعرق روزانه را با استفاده از معادله‌ی پنمن در سطوح گوناگون احتمال تهیه کردند. معادله ایشان (معادله پنمن-کیمبرلی) به‌صورت زیر (رابطه ۱۴) می‌باشد (Wright, 1996).

$$ET_0=\begin{bmatrix}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G)+6.43\frac{\gamma}{\gamma+\Delta}\\ (a_w+b_wu_2)\\ (e_s-e_a)\end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

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

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

روهور (۱۹۳۱) با انجام آزمایش‌هایی در ایستگاه کشاورزی کلرادو، معادله دالتون را توسعه داد و در نهایت به رابطه تجربی (۱۵) (معادله روهور) دست یافت (Xu & Singh, 2002). البته لازم به ذکر است که روش روهور یک روش انتقال جرمی است، ولی به منظور سادگی در ارایه نتایج این روش در بین روش‌های ترکیبی ارایه شد.

$$ET_0=3.3+((0.891\times U_2)\times(e_a e_d)) \quad (۱۵)$$

که در آن‌ها؛ ET_0 تبخیر- تعرق گیاه مرجع بر- حسب میلی‌متر بر روز، P ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به‌صورت روزانه توصیف می‌شود، T_a متوسط درجه حرارت روزانه بر- حسب درجه سانتی گراد، a و b ضرایب اقلیمی، T_a، T_{min} و T_{max} به‌ترتیب متوسط، حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه هوا بر حسب درجه سانتی گراد، Ra تابش برون زمینی برحسب میلی‌متر آب، R_n تابش خالص خورشیدی بر حسب میلی متر آب تبخیرپذیر، R_s مولفه طول موج کوتاه، Δشیب منحنی فشار بخار اشباع دما، R_n تابش خالص، G شار گرمایی، γ ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، λ گرمای تبخیر (مگاژول بر مربع بر روز)، e_s و e_a فشار بخار اشباع برحسب هکتوپاسکال (به جز در معادله روهور که بر حسب میلی‌متر جیوه می‌باشد)، N حداکثر طول روز برحسب ساعت و U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه) می‌باشد.

آماره‌های ارزیابی

برای ارزیابی دقت روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع از ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطا (PE) و انحراف معیار (MAD) استفاده شد (فاتحی و نصیری، ۱۳۹۰). این آماره‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R^2=\frac{(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2} \quad (۱۶)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2} \quad (۱۷)$$

$$PE=\frac{\sum_{i=1}^{n}P_i-\sum_{i=1}^{n}O_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i}*100 \quad (۱۸)$$

$$MAD=\frac{\sum_{i=1}^{n}|(O_i-P_i)|}{n} \quad (۱۹)$$

که در این معادله‌ها؛ O_i و P_i به‌ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده در زمان t، n تعداد مشاهده‌ها، $\bar{O}$ متوسط مقادیر مشاهده‌ای و $\bar{P}$ متوسط مقادیر پیش‌بینی‌شده در طول دوره زمانی است.

نتایج و بحث

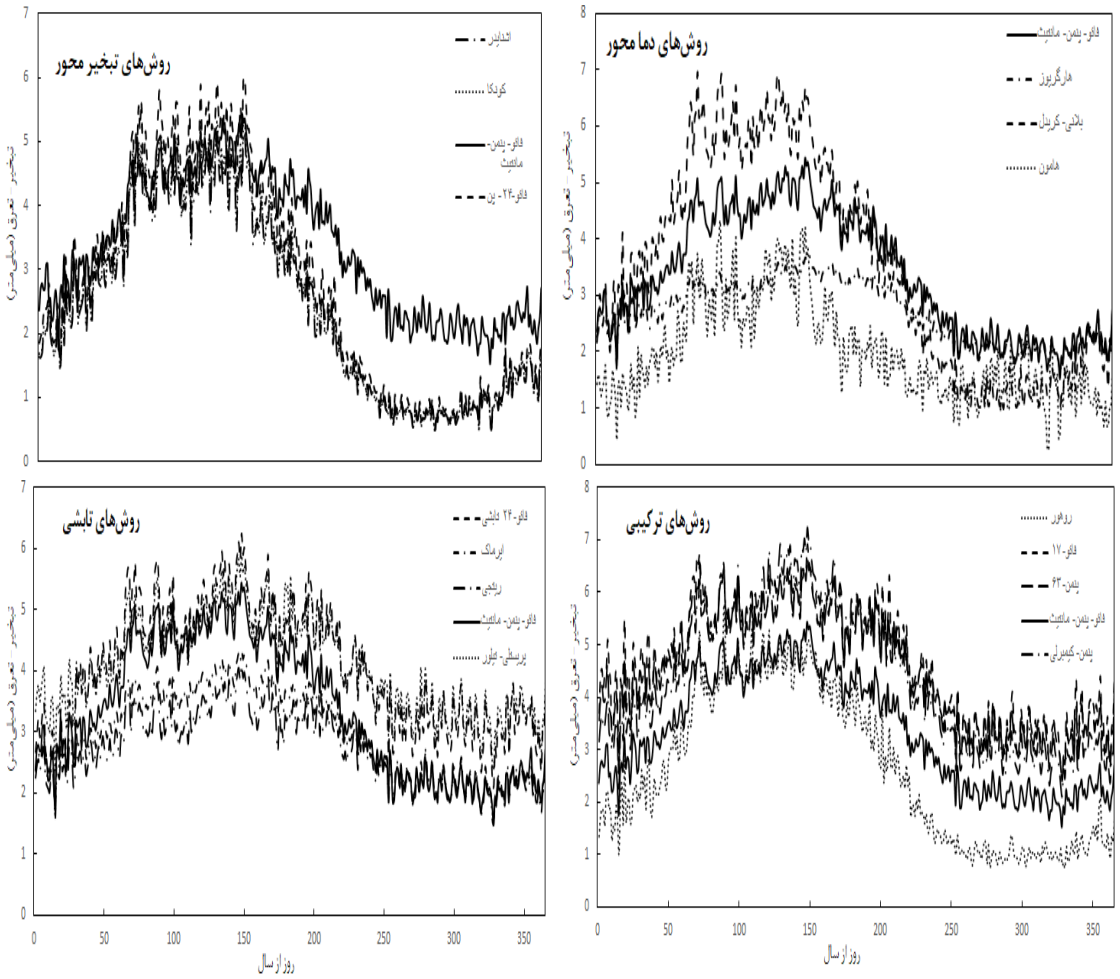
تبخیر- تعرق روزانه

به‌منظور مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق مرجع روزانه روش‌های مختلف، روند تغییرات میانگین پانزده ساله (۱۳۸۰تا ۱۳۹۵) تبخیر- تعرق روزانه هر روش در مقایسه با مقادیر متناظر روش فایو- پنمن- مانتیث در شکل ۲ ارایه شد. از میان روش‌های دمامحور، معادله- های هارگریوز و هامون همواره مقدار تبخیر- تعرق روزانه را کمتر از روش مرجع پیش‌بینی کردند در حالی‌که روش بلانی- کریدل مقدار آن را از ابتدای سال تا روز ۱۹۲ (۶ مهر) بیشتر و پس از آن تقریبا مشابه معادله فایو- پنمن- مانتیث برآورد نمود به‌طوری‌که میانگین تبخیر- تعرق روزانه در روش‌های هارگریوز،

بلانی کریدل، هامون و فایو- پنمن- مانتیث به‌ترتیب ۲/۷، ۳/۵، ۲ و ۳/۳ میلی‌متر بود. بر این اساس، مجموع تبخیر- تعرق سالانه روش‌های مذکور به‌ترتیب ۹۹۱، ۱۳۰۳، ۷۳۶ و ۱۲۲۶ میلی‌متر بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش بلانی کریدل برای منطقه مطالعه می‌باشد. با توجه به این شرایط، می‌توان از این روش به دلیل سادگی و عدم نیاز به داده‌های زیاد در مقایسه با روش فایو- پنمن- مانتیث، برای منطقه مطالعه استفاده کرد. با این وجود نکته قابل تأمل، افزایش خطای این روش در بخش اعظم فصل کشت زراعی غالب در منطقه (از ۱۲ اردیبهشت تا ۸ مرداد) می‌باشد. در بین روش‌های دما محور، روش هامون از کمترین دقت برخوردار بوده و تبخیر- تعرق مرجع را بسیار کمتر از معادله فایو- پنمن- مانتیث محاسبه نمود. میانگین خطای روش هامون در طول سال حدود دو برابر (۱/۳ میلی‌متر بر روز) میانگین خطای دو روش دیگر دمامحور بود. از میان روش‌های تابش محور، معادله‌های پریستلی تیلور و فایو- ۲۴ تابشی تقریباً همیشه تبخیر- تعرق مرجع را بیشتر از روش فایو- پنمن- مانتیث برآورد کردند. دو روش ریتچی و ایرماک در حدود ۲۰۰ روز ابتدای سال، مقدار این پارامتر را عموما کمتر از و پس از آن تقریبا مساوی روش مرجع برآورد کردند. میانگین مقادیر روزانه تبخیر- تعرق مرجع در روش‌های پریستلی تیلور، ایرماک، ریتچی، فایو- ۲۴ تابشی و فایو- پنمن- مانتیث به‌ترتیب ۴، ۳، ۲/۷، ۳/۳ و ۳/۳ میلی‌متر بود که به‌ترتیب نشان‌دهنده اختلاف ۲۱، ۱۱، ۱۸ و ۰ (درصد بسیار کم، ۰/۰۰۹) درصدی چهار روش تابش محور در مقایسه با روش مرجع می‌باشد. مجموع تبخیر- تعرق سالانه حاصله از معادله‌های پریستلی تیلور، ایرماک، ریتچی و فایو- ۲۴ تابشی به‌ترتیب ۱۴۷۲، ۱۰۹۰، ۱۰۰۲ و ۱۲۱۴ میلی‌متر بود که به‌ترتیب ۲۴۶-، ۱۳۶، ۲۲۴ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به روش فایو- پنمن- مانتیث اختلاف داشتند. بر این اساس در روش‌های تابش محور، روش فایو- ۲۴ تابشی با کمترین و روش پریستلی- تیلور با بیشترین خطا، میزان تبخیر- تعرق مرجع سالانه را برای منطقه مطالعه ارایه می‌دهند. مقدار خطا در روش فایو- ۲۴ تابشی به‌طور میانگین ۰/۰۳ میلی‌متر بر روز بود. با این وجود، کمترین دقت این روش مربوط به دوره ۱۵ مهر تا ۱۵ اسفند و بیشترین آن مربوط به دوره اول فروردین تا ۱۲ مهر بود. دقت روش ریتچی کمتر از روش ایرماک بوده و میانگین خطای این روش ۰/۶ میلی‌متر بر روز بود. با وجود اختلاف دقت در دو روش پریستلی- تیلور و فایو- ۲۴ تابشی، این دو روش نتایج نسبتا مشابهی داشتند. روش‌های تبخیرمحور عملکرد مشابهی ارایه کردند به‌طوری‌که تا حدود روز ۱۵۰ از ابتدای سال، برآوردهایی تقریبا مساوی با روش فایو- پنمن- مانتیث داشتند و پس از آن، اختلاف این روش‌ها با روش مرجع روندی نسبتا افزایشی داشت و همواره کمتر برآورد نمودند. هر سه روش اشنایدر، کونکا و فایو- ۲۴ پن از روز ۱۰ مهر تا ۵ اسفند بیشترین خطا و بیشترین دقت را از اولین روز سال تا ۳۱ مرداد داشتند در میان روش‌های تبخیر محور روش فائو- ۲۴ پن کمترین اختلاف مجموع سالانه را با روش فائو- پنمن- مانتیث (با اختلاف ۱۹۹/۴ میلی‌متر) دارد پس از آن به ترتیب روش‌های اشنایدر (با اختلاف ۳۳۸/۲ میلی‌متر) و روش کونکا (با اختلاف ۳۷۴/۲ میلی‌متر) قرار دارند. به‌طور کلی، میانگین سالانه سه روش اشنایدر، کونکا و فایو- ۲۴ پن به‌ترتیب ۲/۴۳، ۲/۳۳ و ۲/۸۱ میلی‌متر بر روز و میانگین روش مرجع برابر با ۳/۳۵ میلی‌متر بر روز بود که مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد روش فائو-۲۴ پن دقیق‌ترین روش و پس از آن دو روش اشنایدر و کونکا با اختلاف اندک دومین و سومین روش‌ها در بین روش‌های تبخیر محور بودند. از میان روش‌ها ترکیبی، معادله فایو- ۱۷ مقدار تبخیر- تعرق مرجع را بیشتر از معادله فایو- پنمن- مانتیث تخمین زد و از دقت کمی برخوردار بود میانگین خطای این روش ۱/۳ میلی‌متر در روز بود. دقت روش فایو- ۱۷ در ۳۶ روز آخر سال کمتر از سایر روزها (میانگین خطا در

این روزها برابر با ۱/۵ میلی‌متر بر روز) بود. روش پنمن- ۶۳ دارای میانگین خطای ۱/۱ میلی‌متر در روز بود. این روش به‌طور کلی از همبستگی مناسبی با روش فایو- پنمن- مانتیث برخوردار بود و در کلیه روزهای سال تخمین مناسبی ارایه داد. میانگین خطای روش روهور ۰/۷ میلی‌متر در روز بود. روش مذکور بیشترین خطا را از روز ۲۴ مهر تا اواخر سال با میانگین ۱/۱ میلی‌متر بر روز داشت. دقت روش پنمن کیمبرلی (با میانگین خطای ۱ میلی‌متر در روز) کمتر از روش روهور بود و در اواخر تابستان مقدار خطا آن به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. مجموع سالانه روش‌های روهور، پنمن- کیمبرلی، پنمن- ۶۳ و فایو- ۱۷ به ترتیب ۹۵۹، ۱۵۹۲، ۱۶۴۹ و ۱۷۰۲ میلی‌متر می‌باشند، مقایسه این مقادیر با مجموع سالانه روش مرجع ۱۲۲۶ میلی‌متر) نشان می‌دهد، کمترین اختلاف با روش مرجع متعلق به روش روهور (با اختلاف ۲۶۶ میلی‌متر) و پس از آن روش‌های پنمن- کیمبرلی (با اختلاف ۳۶۶ میلی‌متر) ، پنمن- ۶۳ (با اختلاف ۴۲۴ میلی‌متر) و فایو- ۱۷ (با اختلاف ۴۷۶ میلی‌متر) می‌باشند. مقایسه میانگین روزانه روش‌های مرجع نشان‌می‌دهد روش روهور با میانگین ۲/۶ میلی‌متر بر روز کمترین اختلاف را با روش مرجع (با میانگین روزانه ۳/۳۵ میلی‌متر بر روز) داشته و پس از آن روش پنمن- کیمبرلی با میانگین ۴/۴ میلی‌متر بر روز، روش پنمن- ۶۳ با میانگین ۴/۵ میلی- متر بر روز و فایو- ۱۷ با میانگین ۴/۷ میلی‌متر بر روز قرار داشتند.

آماره‌های ارزیابی حاصله از مقایسه میزان تبخیر- تعرق روزانه روش‌های مختلف با روش فایو- پنمن- مانتیث در جدول ۲ ارایه شد. مقایسه این آماره‌ها نشان می‌دهد که به ترتیب روش‌های ایرماک، فایو- ۲۴ تابشی، پریستلی- تیلور و هارگریوز کمترین RMSE (کم بودن این آماره به معنی خطای پایین روش می- باشد) را در بین ۱۴ روش داشتند. روش‌های هامون، پنمن- ۶۳ و کونکا به‌ترتیب بیشترین RMSE را داشتند. روش‌های پنمن- ۶۳، پنمن- کیمبرلی، روهور، فایو- ۱۷و هارگریوز بیشترین R^2 (زیاد بودن این آماره به معنی همبستگی بالای این روش با روش مرجع می- باشد) را دارا بودند. مقایسه روش‌های دما محور در جدول ۲ نشان می‌دهد که دقیق‌ترین روش دما محور روش بلانی- کریدل (با R^2=0.93، RMSE=0.38 mm/day، MAD=0.76 mm/day و PE=6.24) بود. طبق مطالعات طبری و همکاران (Tabari et al., 2013)، در بین روش‌های دمامحور در استان گیلان، روش بلانی- کریدل دقیق‌تر از روش هارگریوز و هامون بود. در بین روش‌های تابش‌محور، روش فایو- ۲۴ تابشی (با R^2=0.90، RMSE=0.31 mm/day، MAD=0.71 mm/day و PE=-0.95) بیشترین تطابق را با روش فایو- پنمن- مانتیث داشت. مطالعات لیو و همکاران (Liu et al., 2017)، در یک منطقه نیمه‌خشک در چین نشان داد که روش فایو- ۲۴ تابشی دقیق‌ترین روش بین روش‌های تابش‌محور بود. از بین سه روش با مبنای تشت‌تبخیر، روش فایو- ۲۴ پن (با R^2=0.86، RMSE=0.45 mm/day، MAD=0.8 mm/day و PE=-16.18) دقیق‌ترین برآورد را داشت. تحقیقات نامداریان و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد در شهرستان خرم‌آباد با اقلیم نیمه‌خشک سرد، روش فایو بیشترین دقت را در مقایسه با روش فایو- پنمن- مانتیث داشته و پس از آن روش اشنایدر بود. مقایسه روش‌های ترکیبی نیز حاکی از آن است که استفاده از روش روهور (R^2=0.94، RMSE=0.37 mm/day، MAD=0.76 mm/day و PE=-21.75)، دقیق‌ترین نتایج را حاصل نمود که این نتیجه با نتایج مطالعات ولی‌پور و همکاران (Valipour et al., 2017)، که نشان داد در مناطق مرطوب ایران روش روهور کارایی مناسبی دارد، تطابق دارد.



شکل (۲): تغییرات روزانه ۱۵ روش تخمین تبخیر-تعرق مرجع

جدول (۲): آماره‌های ارزیابی حاصل از مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع با روش فایو- پنمن- مانتیث

نوع روش	روش	آماره ارزیابی			
		PE(%)	(mm/day) MAD	(mm/day) RMSE	R^2
دما محور	بلانی- کریدل	۶/۲۴	۰/۷۶	۰/۳۸	۰/۹۳
	هارگریوز	-۱۹/۱	۰/۶۶	۰/۳۶	۰/۹۴
	هامون	-۳۹/۹۸	۱/۳۶	۱/۰۶	۰/۷۵
تابش محور	ایرماک	-۱۱/۰۳	۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۹۷
	ریتچی	-۱۸/۳۱	۰/۶۲	۰/۳۳	۰/۹۳
	فایو- ۲۴ تابشی	-۰/۹۵	۰/۷۱	۰/۳۱	۰/۹۰
تبخیر محور	پریستلی- تیلور	۲۰/۰۵	۰/۷۴	۰/۳۵	۰/۹۰
	اشنایدر	-۲۷/۵۱	۰/۹۶	۰/۶۱	۰/۸۵
	کونکا	-۳۰/۴۵	۰/۹۱	۲۱/۹۴	۰/۸۵
ترکیبی	فایو- ۲۴ پن	-۱۶/۱۸	۰/۸	۱۷/۲۳	۰/۸۶
	فایو- ۱۷	۳۸/۸۴	۱/۲۹	۳۳/۴۷	۰/۹۴
	پنمن- ۶۳	۳۴/۵۳	۱/۱۵	۲۶/۰۴	۰/۹۸
	روهور	-۲۱/۷۵	۰/۷۶	۰/۳۷	۰/۹۴
	پنمن- کیمبرلی	۲۹/۸۴	۱/۰۱	۰/۵۵	۰/۹۸

تبخیر- تعرق ماهانه

برای تعیین مناسب‌ترین روش معرف تبخیر- تعرق ماهانه، تغییرات میانگین ماهانه تبخیر- تعرق مرجع حاصله از روش‌های مختلف در شکل ۳ ارایه شد. در روش‌های دما محور، دو روش هارگریوز و هامون تخمین نزدیک‌تری به‌یکدیگر داشته و تخمین این دو روش کمتر از روش فایو- پنمن- مانتیث بود. روش بلانی- کریدل در هفت ماه نخست سال، تبخیر- تعرق مرجع را بیشتر از روش فایو- پنمن- مانتیث برآورد کرد. بیشترین اختلاف این روش با روش مرجع (۵۷/۷ میلیمتر بر ماه) در ماه تیر مشاهده شد. طبق مطالعات سالاریان و همکاران (۱۳۹۳)، در اقلیم معتدل خشک اصفهان بیشترین اختلاف بین مدل‌های بلانی- کریدل و هارگریوز در مقایسه با مدل فایو- پنمن- مانتیث در ماه تیر مشاهده شد. مقایسه روش‌های تابش محور نشان

می‌دهد که روش ایرماک در ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند و فروردین دقت خوبی داشته ولی در سایر ماه‌ها دقت این روش کاهش یافت. این موضوع در مورد روش ریتچی نیز صدق می‌کند چرا که با افزایش ساعات آفتابی، میزان خطای این دو روش کاهش یافت. روش فایو- ۲۴ تابشی بیشترین دقت را در ماه‌های فروردین، تیر و مرداد نشان داد و در ماه‌های آبان تا اسفند، دقت آن کاهش یافت. بررسی‌ها نشان داد که با کاهش ساعات آفتابی، دقت روش فایو- ۲۴ تابشی افزایش یافت به‌طوری‌که میانگین خطا در روزهای با ۱۱/۵ تا ۱۲/۵ ساعت آفتابی، ۰/۹ میلی‌متر بر روز بیشتر از خطای این روش در روزهای با ۴/۵ تا ۵/۵ ساعت آفتابی بود. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که روش فایو- ۲۴ تابشی در فصولی با ساعات آفتابی زیاد از دقت کمی برخوردار بود، در حالی که در فصول مرطوب با ساعات آفتابی کمتر دقت مناسبی داشت (Tabari et al., 2013). با توجه به تضاد واکنش روش ایرماک و فایو- ۲۴ تابشی به ساعات آفتابی، می‌توان از این دو روش به‌صورت فصلی یا روزانه با توجه به ساعات آفتابی استفاده نمود. مقدار خطای برآورد تبخیر- تعرق مرجع با روش‌های تبخیرمحور در دو ماه اول سال و از آبان تا بهمن افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد افزایش رطوبت نسبی در این ماه‌ها، سبب کاهش دقت این روش‌ها شد. میانگین رطوبت نسبی در ماه‌های سال (به‌ترتیب از فروردین تا اسفند) برابر با ۷۶/۵، ۷۶/۶، ۶۹/۹، ۷۳/۱، ۷۱/۷، ۷۴/۲، ۷۳/۳، ۷۶/۲، ۷۶/۸،۷۸/۴، ۷۷/۹ و ۷۶/۶ درصد بود. بررسی‌های نشان می‌دهد که برای رطوبت نسبی بین ۷۶ تا ۷۹ درصد، دقت روش‌های تبخیر محور کاهش و برای رطوبت بین ۷۰ تا ۷۵ درصد، این دقت افزایش یافت. بر این اساس، استفاده از این روش‌ها در ماه‌های سرد و مرطوب سبب بروز خطای قابل ملاحظه در برآورد تبخیر- تعرق می‌شود. از بین مدل‌های کونکا، اشنایدر و فایو- ۲۴ پن، روش اشنایدر از کمترین دقت برخوردار بود پس از آن روش‌های کونکا و فایو- ۲۴ پن قرار داشتند. روش‌های ترکیبی، بیشترین ضریب همبستگی را با مدل فایو- پنمن- مانتیث داشتند. به‌طور کلی، تخمین روش‌های ترکیبی بیشتر از مدل فایو- پنمن- مانتیث بود. روش فایو- ۱۷ بیشترین اختلاف برآورد را در ۳ ماه اول سال نشان داد و به‌طور کلی دقت این روش از دقت دو روش پنمن- کیمبرلی و پنمن- ۶۳ کمتر بود. مدل پنمن- کیمبرلی، دقیق‌ترین روش بین سه روش ترکیبی بود. این مدل تنها در ماه‌های تیر و شهریور خطای زیادی داشته و بیشترین تطابق را در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت نشان داد. روش فایو- ۱۷ به‌طور میانگین تبخیر- تعرق مرجع را ۳۹ میلی‌متر بر ماه بیشتر از مدل فایو- پنمن- مانتیث محاسبه کرد. این روش بیشترین دقت را در ماه مرداد و کمترین دقت را در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و اسفند داشت.

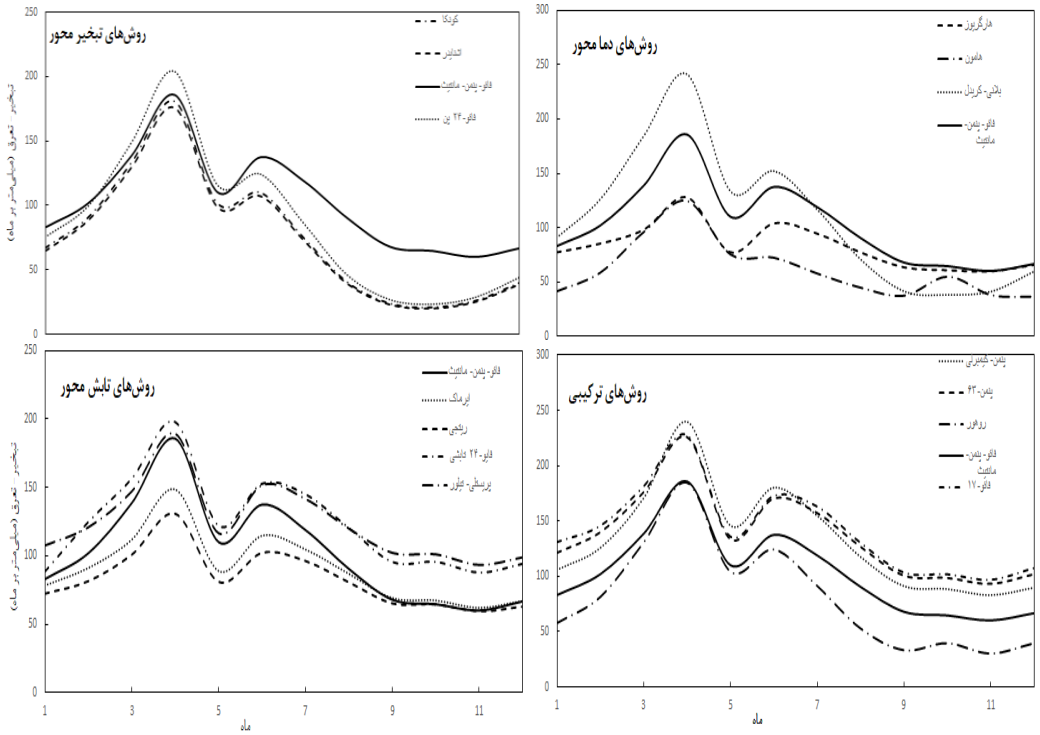
باتوجه به اهمیت تعیین تبخیر- تعرق مرجع در ماه‌های فروردین تا مرداد و مهر تا اردیبهشت به‌دلیل کشت بهاره و پاییزه در مازندران، دقت این روش‌ها در ماه‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به نیاز آبیاری در کشت بهاره، تخمین مناسب تبخیر- تعرق در این کشت مهم‌تر از کشت پاییزه می‌باشد. کشت بهاره در استان مازندران عموماً شامل شلتوک با مساحت بیش از ۲۱۰ هزار هکتار، گندم با ۲۷۲۲۷ هکتار، کلزا با ۱۱۸۰۰ هکتار و شبدر با حدود ۲۵ هزار هکتار سطح زیرکشت می‌باشد (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶).

بهترین روش‌ها (در کشت بهاره، از فروردین تا مرداد) در فروردین ماه به‌ترتیب شامل ایرماک، فایو- ۲۴ تابشی، هارگریوز و فایو- ۲۴ پن، در اردیبهشت ماه به‌ترتیب فایو- ۲۴ پن، ایرماک، کونکا و اشنایدر، در خرداد ماه به‌ترتیب کونکا، روهور، پریستلی- تیلور و اشنایدر، در تیر ماه به‌ترتیب پریستلی- تیلور، کونکا، اشنایدر و فایو- ۲۴ تابشی و در مرداد ماه به ترتیب فایو- ۲۴ پن، روهور، پریستلی- تیلور و کونکا می‌باشند.

مقایسه میانگین خطا در ماه‌های مذکور نشان می‌دهدکه مناسب‌ترین روش‌ها در کشت بهاره به‌ترتیب روش‌های فایو- ۲۴ پن، کونکا، روهور، اشنایدر و پریستلی تیلور می‌باشند. باتوجه به بارش فراوان و کاهش تبخیر- تعرق مرجع در کشت پاییزه، این کشت عموماً به‌صورت دیم انجام می‌شود.

دقیق‌ترین روش‌ها در مهر ماه به‌ترتیب روش‌های ایرماک، ریتچی، هارگریوز و بلانی- کریدل، در آبان ماه ایرماک، ریتچی و هارگریوز، در آذر ماه ریتچی، ایرماک، هارگریوز و هامون، در دی ماه ریتچی، هارگریوز و ایرماک، در بهمن ماه ریتچی، هارگریوز و ایرماک و در اسفند ماه ایرماک، هارگریوز، ریتچی و پریستلی- تیلور می‌باشد.

باید توجه شود که در ماه‌های مهر تا بهمن دقت کلیه روش‌ها کاهش می‌یابد و تنها چند روش، برآورد مناسبی دارند به‌همین دلیل تعداد روش‌های توصیه‌شده در این ماه‌ها کمتر از دیگر ماه‌ها می‌باشد. باتوجه به اینکه محصولات پاییزه معمولاً در ابتدا (مهر ماه) و پایان فصل زراعی (فروردین و اردیبهشت) نیازمند آبیاری تکمیلی می‌باشند، لذا می‌توان تنها از روش‌های مناسب برای این ماه‌ها استفاده کرد. دقیق‌ترین روش‌ها در ماه‌های مذکور به‌ترتیب شامل ایرماک، بلانی- کریدل و هارگریوز می‌باشد.



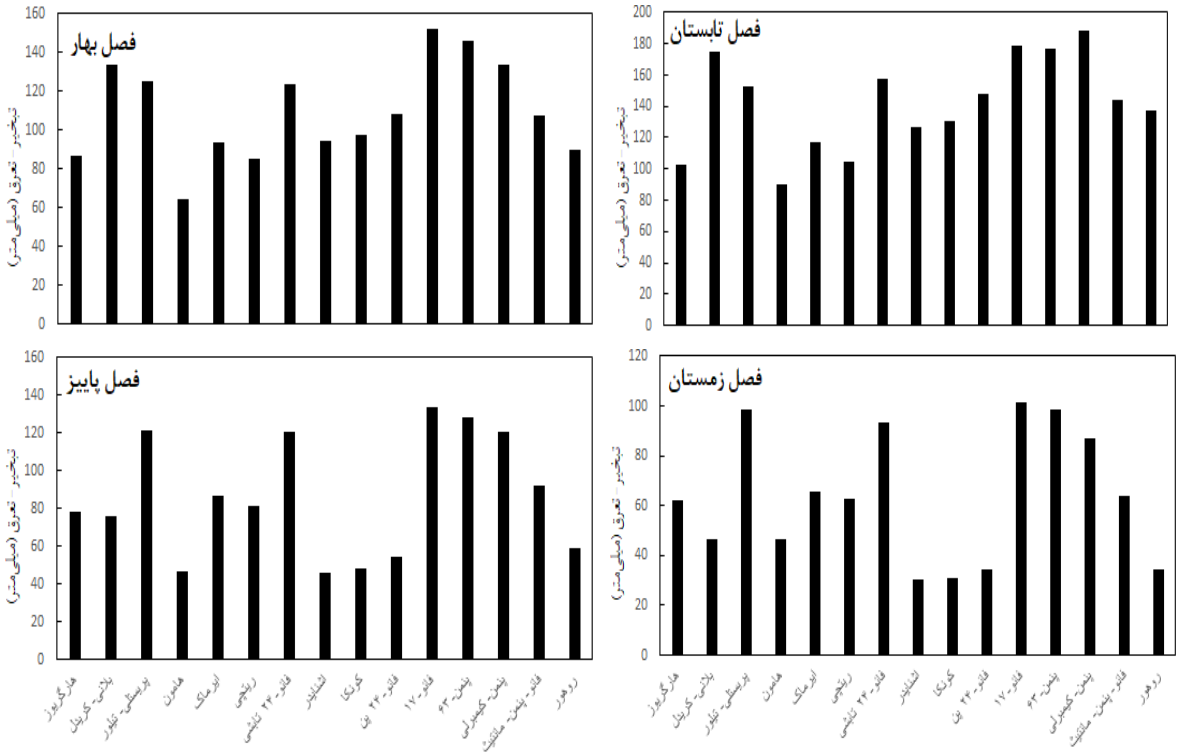
شکل (۳): روند تغییرات میانگین تبخیر- تعرق ماهانه روش‌های مختلف

تبخیر- تعرق فصلی

میانگین فصلی مقادیر تبخیر- تعرق مرجع ۱۵ روش تخمین برای دوره ۱۵ ساله (۱۳۹۶-۱۳۸۰) در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان در شکل ۴ ارایه شد. دقت روش‌های تشت محور در فصل بهار بیشتر از دیگر روش‌ها بود. همان‌گونه که ذکر شد افزایش دقت این روش‌ها در این فصل به دلیل کاهش درصد رطوبت هوا (۷۰-۷۵ درصد) بود. مقایسه مجموع تبخیر- تعرق سالانه نشان می‌دهد که روش فایو- ۲۴ تابشی با مقدار تبخیر- تعرق ۱۷۳۲/۵ میلی‌متر، روش کونکا با تبخیر- تعرق ۱۵۵۶/۹ میلی‌متر و روش اشنایدر با مقدار ۱۵۱۱/۵ میلی‌متر شبیه‌سازی بسیار نزدیکی به روش فایو- پنمن- مانتیث با تبخیر- تعرق ۱۷۲۳/۹ میلی‌متر داشتند. دقیق‌ترین روش‌ها در فصل بهار به‌ترتیب شامل فایو- ۲۴ پن، کونکا، اشنایدر، ایرماک، فایو- ۲۴ تابشی، پریستلی- تیلور، روهور، هارگریوز، ریتچی، بلانی- کریدل، پنمن- کیمبرلی، هامون و فایو- ۱۷ بودند. اختلاف تبخیر- تعرق بهاره این روش‌ها با روش فایو- پنمن- مانتیث به ترتیب ۰/۵ میلی‌متر، ۱۰/۴ میلی‌متر، ۱۳/۳ میلی‌متر، ۱۴/۱ میلی‌متر، ۱۵/۶ میلی متر، ۱۷/۴ میلی‌متر، ۱۷/۸ میلی‌متر، ۲۱ میلی‌متر، ۲۲/۸ میلی‌متر، ۲۵/۸ میلی‌متر، ۲۵/۹ میلی‌متر، ۴۲/۹ میلی‌متر و ۴۴/۳ میلی‌متر بود. همچنین، روش فایو- ۲۴ تابشی با مقدار تبخیر- تعرق ۱۷۳۲/۵ شبیه‌سازی بسیار نزدیکی به روش فایو- پنمن- مانتیث با تبخیر- تعرق داشت.

مقایسه دقت روش‌های مختلف در فصل تابستان حاکی از آن است که دقیق‌ترین روش در این فصل، روش روهور بوده و پس از آن به‌ترتیب روش‌های

پریستلی- تیلور، فایو- ۲۴ تابشی، کونکا، اشنایدر، ایرماک، بلانی- کریدل، پنمن- ۶۳، فایو- ۱۷، ریتچی، هارگریوز، پنمن- کیمبرلی و هامون قرار داشتند. مقدار خطای روش‌های مذکور در مقایسه با روش مرجع به ترتیب ۶/۸، ۸/۴، ۱۳/۴، ۱۳/۵، ۱۷/۳، ۲۶/۸، ۳۰/۹، ۳۲/۴، ۳۴/۵، ۳۹/۵، ۴۱/۳، ۴۴/۳ و ۵۳/۷ میلی‌متر بود. دقیق‌ترین روش‌ها در فصل پاییز به‌ترتیب شامل ایرماک، ریتچی، هارگریوز، بلانی- کریدل، فایو- ۱۷، فایو- ۲۴ تابشی، پنمن- کیمبرلی، پریستلی- تیلور، روهور، پنمن- ۶۳، فایو- ۲۴ پن، کونکا، هامون و اشنایدر با خطای به‌ترتیب ۵/۶، ۱۱/۴، ۱۴/۲، ۱۶/۱، ۲۸/۱، ۲۸/۲، ۲۸/۵، ۲۹/۱، ۳۳/۳، ۳۶/۱، ۳۷/۸، ۴۳/۹، ۴۶ و ۴۶/۴ میلی‌متر بودند. مقایسه روش‌ها در فصل زمستان نشان داد که در این فصل روش‌های تابش محور بیشترین دقت را داشتند. همانطور که پیش‌تر اشاره شد افزایش ساعات آفتابی سبب کاهش دقت روش‌های تابش محور می‌شود و در فصل زمستان ساعات آفتابی به حداقل می‌رسد. بهترین روش‌ها به‌ترتیب دقت شامل ریتچی، ایرماک، هارگریوز، بلانی- کریدل، هامون، پنمن- کیمبرلی، فایو- ۲۴ تابشی، فایو- ۲۴ پن، روهور، کونکا، اشنایدر، پنمن- ۶۳، پریستلی- تیلور و فایو- ۱۷ بودند.



شکل (۴): میانگین فصلی میانگین فصلی مقادیر تبخیر- تعرق حاصله از روش‌های مختلف

نتیجه‌گیری

مقایسه ماهانه روش‌های بلانی- کریدل، هارگریوز، هامون، ایرماک، ریتچی، فایو- ۲۴ تابشی، پریستلی- تیلور، کونکا، اشنایدر، فایو- ۲۴ پن، فایو- ۱۷، پنمن- ۶۳ و پنمن- کیمبرلی با مدل فایو- پنمن- مانتیث در استان مازندران انجام شد. نتایج نشان داد، بهترین روش‌ها در بین روش‌های دمامحور به‌ترتیب روش بلانی-کریدل، هارگریوز و هامون، در بین روش‌های تابش‌محور به‌ترتیب فایو- ۲۴ تابشی، ایرماک، ریتچی، و پریستلی- تیلور، در بین روش‌های تبخیرمحور فایو- ۲۴ پن، اشنایدر و کوئنکا و در بین روش‌های ترکیبی روهور، پنمن- کیمبرلی ، فایو- ۱۷ و پنمن- ۶۳ می‌باشد. چهارده روش مذکور براساس دقت، شامل فایو- ۲۴ تابشی، ایرماک، بلانی- کریدل، هارگریوز، ریتچی، روهور، فایو- ۲۴ پن، پریستلی- تیلور، پنمن- کیمبرلی، اشنایدر، کونکا، فایو- ۱۷، پنمن- ۶۳ و هامون می‌باشند. مقایسه فصلی روش‌ها نشان می‌دهد سه روش فایو- ۲۴ پن، کونکا، اشنایدر بهترین شبیه‌سازی را در فصل بهار، سه روش روهور، پریستلی- تیلور و فایو- ۲۴ تابشی در فصل تابستان، سه روش ایرماک، ریتچی و هارگریوز در فصل پاییز و سه روش ریتچی، ایرماک و هارگریوز در فصل زمستان داشتند. به‌منظور تعیین تبخیر- تعرق مرجع درکشت بهاره استفاده از روش‌های فائو- ۲۴ پن، کونکا، روهور، اشنایدر و پریستلی- تیلور و درکشت پاییزه روش‌های ایرماک، بلانی- کریدل و هارگریوز توصیه می‌شود.

منابع

پناهی، س.، ف. رضوانی‌زاده و س. صمدیان‌فرد . ۱۳۹۵. ارزیابی و مقایسه روش‌های تجربی تخمین تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه تبریز. اولین کنفرانس بین المللی مخاطرات طبیعی و بحران‌های زیست محیطی ایران، راهکارها و چالش‌ها، ۹ ص.

حیدرپور، م.، ف. موسوی و ا. هاشمی. ۱۳۸۶. واسنجی معادله پنمن مانتیث برای برآورد تشعشع خالص در منطقه اصفهان. آب و خاک. علوم و صنایع کشاورزی، ۲۱ (۲): ص ۱۸۰-۱۷۱.

درزی، ع.، م. میرلطفی، ع. شاهنظری، و م. مهدیان. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل DRAINMOD برای پیش بینی عمق سطح ایستابی و دبی زهکش در اراضی شالیزاری مجهز به زهکش زیر زمینی. نشریه آبیاری و زهکشی، ۴ (۹): ص ۵۹۳-۵۸۳.

سالاریان، م.، م. نجفی، ک. داوری، س. اسلامیان و م. حیدری. ۱۳۹۲. مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده هواشناسی در ماه‌های گرم و سرد سال (مطالعه موردی شهرستان اصفهان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۸، ص ۷۳-۶۲.

سبزی‌پرور، ع.، ف. تفضلی، ح. زارع‌ابیانه، ح. بانژاد، م. موسوی بایگی، م، غفوری، ا. محسنی موحد و ز. میرجانی. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک. به منظور استفاده بینه از مدل‌های تابش، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد۲۲، شماره ۲، ص ۳۴۰-۳۲۹.

سلطانی، ا.، م. میرلطفی و ح. دهقانی. ۱۳۹۰. مدل‌های کاهش داده پنمن-مانتیث در شرایط اقلیمی مرطوب. اولین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، ۱۰ ص.

شاهدی، ک. و م. زارعی. ۱۳۸۹. ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در استان مازندران. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، فصل اول شماره ۳. ص ۲۱-۱۱.

شهابی‌فر، م.، م. عصاری، م. کوچک‌زاده و م. میرلطیفی. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی از روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از داده‌های لایسیمتری در شرایط گلخانه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۱(۲۴): ص ۱۹-۱۳.

کریمی، س.، ج. شیری و ا. ناظمی. ۱۳۹۱. تخمین تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) و معادله‌های تجربی، نشریه دانش آب و خاک. ۲ (۲۳).

نامداریان، ک.، ع. ناصری، ز. ایزدپناه و ع. ملکی. ۱۳۹۴. مقایسه روش فائو پنمن مانتیث و تشت تبخیر کلاس A با داده‌های لایسیمتری در برآورد تبخیر و تعرق گیاه نخود در منطقه خرم‌آباد، نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران، ۱ (۶): ص ۹۹-۹۲.

یزدانی، و.، ع. لیاقت، ح. نوری و ح. زارع ابیانه. ۱۳۸۹. تعیین بهترین مدل محاسبه ضریب تشت در منطقه آمل بر پایه‌ی آنالیز حساسیت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۲(۴۲): ص ۱۷-۹.

Alkaeed, O., C. Flores., K. Jinno and A. Tsutsumi. 2006. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University 66(1):1-14

Allen, A. P and J.F. Gillooly. 2006. Assessing latitudinal gradients in speciation rates and biodiversity at the global scale. Ecology letters, 9(8), 947-954.

Antonopoulos, V. Z and A.V. Antonopoulos. 2017. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. Computers and Electronics in Agriculture 132:86-96.

Liu, X., C. Xu., X. Zhong., Y. Li., X. Yuan and J. Cao. 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agricultural Water Management 184:145-155.

Luo, W., G.R. Sands., M. Youssef., J.S. Strock., I. Song and D. Canelon. 2010. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern Corn-belt with DRAINMOD-NII. Agricultural Water Management 97(3):389-98.

Pandey, P.K., P.P. Dabral., and V. Pandey. 2016. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. International Soil and Water Conservation Research, 4(1), 52-63.

Tabari, H., M.E. Grismer and S. Trajkovic. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. Irrigation Science, 31(2), pp.107-117.

Tian, S., M.A. Youssef., G. Sun., G.M. Chescheir., A. Noormets., D. Amatya and G. Mand Miao. 2015. Testing DRAINMOD-FOREST for predicting evapotranspiration in a mid-rotation pine plantation. Forest Ecology and Management, 355, 37-47.

Valipour, M., M.A.G. Sefidkouhi and M. Raeini. 2017. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. Agricultural Water Management 180:50-60.

Wang, Z., P. Xie., C. Lai., X. Chen., X. Wu., Z. Zeng and J. Li. 2017. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961–2013. Journal of Hydrology, 544, 97-108.

Wright, J.L., 1996. Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration.

XU, C.Y.T and V.P. SINGH. 2002. Cross Cpmparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. Water Resources Management 16: 197-219.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال دهم. شماره سی و هشتم، زمستان ۱۳۹۸

Analyzing daily, Monthly and Seasonal Accuracy of Reference Evapotranspiration Equations in a Humid Region

Amir-Ashkan Malakshahi[1], Abdullah Darzi-Naftchali[*2], Behrouz mohseni[3]

Abstract

Proper water management in agricultural fields is largely depends on suitable estimation of evapotranspiration (ET), as a major component of hydrological cycle. The FAO-Penman- montieth method has the ability to provide appropriate estimation of ET, however, due its complexity, using simpler methods is preferred for programming and modeling processes. In this study, using the weather data of the Dasht-e- Naz station in Sari, the capability of 14 methods for estimation daily, monthly and seasonal reference ET was evaluated. These methods included three temperature- based methods, four radiation- based methods, three pan evaporation- based methods and four combined methods. The performance of each method was assessed using statistics including coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), percent error (PE) and Mean Absolute Deviation (MAD). Investigations showed that the radiation- based equations were more appropriate for estimating ET than other methods. The Irmak (with R^2=0.87 and RMSE=5.77 mm d^{-1}) and Ritchi (with R^2=0.93 and RMSE=12.59 mm d^{-1}) methods were the best methods with the highest accuracy in the autumn and winter seasons. In the spring, the use of the FAO-24 Pen (with an average error of 0.5 mm) and Rohwer (with an average error of 6.8 mm) (equations are recommended for spring and summer. Based on the results, the Irmak, FAO-24-Radiation, Ritchie, Priestley-Taylor and Blaney-Cridlle methods were five best methods in the study area.

Key words: Hydrological Cycle, Dasht-e-Naz, Modelling, Radiation based equations, irrigation requirement.

[1]. MS_c student in irrigation and drainage engineering, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
[2]. *Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: abdullahdarzi@yahoo.com.
[3]. Instructor board, Department of Natural Resources, Payam Noor University, Tehran, Iran and Ph.D student in Engineering and science of watershed management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.