

تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق مرجع پنج الگوی رایج با روش مونت-کارلو مطالعه موردی ایستگاه همدید بجنورد

مهدی مکاری^۱ - بیژن قهرمان^{۲*} - سید حسین ثنائی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۸

چکیده

هدف این پژوهش تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق مرجع پنج الگوی پنمن - مانیت فائو-۵۶ (PMF56)، بلانی - کریدل اصلاح شده (MBC)، هارگریوز (H)، هارگریوز-سامانی (HS) و پریستلی-تیلور (PT) است. داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه همدید شهرستان بجنورد شامل ۱۳ سال (۱۳۸۷-۱۳۷۵) آمار روزانه دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی واقعی و سرعت باد، برای حساسیت پنج الگو، استفاده شد. شبیه سازی مونت-کارلو برای تولید داده‌های تصادفی در یک دامنه مشخص انجام شد. ریشه مربع میانگین خطا (RMSE) سالانه و فصلی معیار اندازه گیری برای نشان دادن حساسیت ET_0 به تغییرپذیری همزمان متغیرهای هواشناسی در هر الگو است. نتایج نشان داد که حساسیت ET_0 به تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی، در فصل تابستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. بیشترین حساسیت برای همه الگوها در فصل تابستان و بهار و کمترین مقدار آن در فصل پاییز و زمستان اتفاق افتاد. دو الگوی PMF56 و MBC بیشترین حساسیت سالانه و PT کمترین حساسیت سالانه را از خود نشان دادند. همه الگوها ضریب همبستگی نسبتاً بالایی با الگوی PMF56 داشتند. اما مقادیر RMSE و MAE برای هر الگو متفاوت بود. الگوی MBC کمترین RMSE و MAE و الگوی PT بیشترین مقدار RMSE و MAE را داشت. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت که الگوی HS، الگوی نسبتاً مناسبی برای برآورد ET_0 در این ایستگاه همدید است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق مرجع، تحلیل حساسیت، ضریب حساسیت، شبیه سازی مونت-کارلو

مقدمه

کار می‌روند، تعیین نمود. مطالعات متعددی از تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق با داده‌های یک ایستگاه هواشناسی انجام شده است. یکی از اولین محققینی که تحلیل حساسیت الگوهای مختلف تبخیر و تعرق را بررسی کرد، مک کوین (۲۲) بود. وی در مطالعات خود اثر تغییر متغیرهای اقلیمی و خطاهای ناشی از اندازه گیری این عوامل را بر میزان تبخیر و تعرق مورد پژوهش قرار داد. نتایج مطالعات ساکستون (۲۹) در ارتباط با تحلیل حساسیت الگوی پنمن در اقلیم مرطوب قاره‌ای نشان داد که این الگو بیشترین حساسیت را نسبت به تابش خالص دارد. پیپر (۲۵) گزارش کرد که خطاهای به وجود آمده در اندازه گیری ساعات آفتابی و سرعت باد در اقلیم‌های گرم، اثر نسبی مشابهی بر تبخیر و تعرق محاسبه شده دارد. لی و همکاران (۱۹) حساسیت الگوی پنمن را به مقدار خطای اندازه-گیری متغیرهای اقلیمی، در مرکز واشنگتن مورد پژوهش قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که این الگو بیشترین حساسیت را به دمای کمینه و بیشینه و کمترین حساسیت را به تابش خورشیدی، دمای نقطه شبنم و سرعت باد دارد. هاپت و ونکلوستر (۱۷) حساسیت الگوی

تبخیر و تعرق مرجع یکی از مهمترین متغیرهای هواشناسی کشاورزی برای برنامه ریزی سیستم‌های آبیاری، الگوهای بیلان آب در چرخه هیدرولوژی و محاسبه تبخیر و تعرق واقعی یک منطقه است (۶، ۹، ۱۵، ۳۳ و ۳۲). روش‌های مختلفی برای الگو کردن تبخیر و تعرق مرجع گزارش شده‌اند که عبارتند از: روش بیلان آبی (۱۳)، روش انتقال جرم (۱۴)، روش‌های ترکیبی (۲۴)، روش‌های تابشی (۲۶) و روش‌های دمایی (۶ و ۳۱). تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به تغییر متغیرهای اقلیمی، باعث فهم بهتری از ارتباط بین شرایط اقلیمی و تغییر پذیری تبخیر و تعرق مرجع می‌شود. نتایج این تحلیل این امکان را فراهم می‌کند که بتوان دقت مورد نیاز برای اندازه گیری متغیرهای اقلیمی را که در تعیین تبخیر و تعرق مرجع به

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* نویسنده مسئول: (Email: bijangh@ferdowsi.um.ac.ir)

مرجع در یک اقلیم نیمه خشک است.

منطقه، داده‌ها و روش پژوهش

داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه همدید شهرستان بجنورد شامل ۱۳ سال آمار روزانه دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی واقعی، سرعت باد و تابش رسیده به سطح زمین، در طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۷ است. این ایستگاه در شمال شرقی ایران در طول جغرافیایی ۵۷/۳۲ درجه غربی و عرض جغرافیایی ۳۷/۴۷ درجه شمالی قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۰۹۱ متر است. اقلیم ایستگاه سرد نیمه خشک است.

ضریب حساسیت

ترسیم تغییرات نسبی متغیر وابسته در مقابل تغییرات نسبی متغیر مستقل به صورت منحنی، روشی ساده اما عملی برای نشان دادن تحلیل حساسیت است (۱۲، ۲۳ و ۳۰). به این روش، روش منحنی حساسیت نیز می‌گویند. ضریب حساسیت را می‌توان به صورت ریاضی نیز تعریف کرد (۵، ۸، ۱۷، ۲۲، ۲۷، ۲۸ و ۲۹). برای الگوهای چند متغیره مانند الگوی پنمن-مونتیت که متغیرهای آن دارای ابعاد مختلفی هستند و دامنه تغییر آنها با همدیگر متفاوت است، ضریب حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود (۵):

$$S_{V_i} = \frac{\partial ET_{ref}}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{ET_{ref}} \quad (1)$$

در این رابطه S_{V_i} ضریب حساسیت (بدون بعد)، ET_{ref} تبخیر و تعرق مرجع و V_i متغیر i ام است. ضریب حساسیت به شکل بدون بعد آن اولین بار توسط مک کوین (۲۲) به کار برده شد و امروزه به شکل گسترده‌ای در مطالعات تبخیر و تعرق استفاده می‌شود (۵، ۸، ۱۷، ۲۷ و ۲۸). منفی یا مثبت بودن ضریب حساسیت (S) نشان دهنده کم برآورد یا بیش برآورد تبخیر و تعرق است. ضریب حساسیت می‌تواند به صورت روزانه، ماهانه، سالانه و یا فصلی محاسبه شود.

مواد و روش‌ها

تمام متغیرهای الگوهای پنمن-مونتیت فائو-۵۶، بلانی-کریدل اصلاح شده، هارگریوز، هارگریوز سامانی و پریستلی-تیلور در این پژوهش همزمان با هم تغییر داده شدند. جزئیات این الگوها در جدول ۱ ارائه شده است.

پنمن-مونتیت فائو-۵۶ را در یک اقلیم نسبتاً مرطوب مورد پژوهش قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین حساسیت به تابش خورشیدی و سرعت باد وجود دارد. آنها در پژوهش خود برای هر ایستگاه، سه سال آماری را در نظر گرفتند. گنگ و همکاران (۱۱) تحلیل حساسیت الگوی پنمن مونتیت را در اقلیم نسبتاً مرطوب با تغییر هر متغیر در دامنه $\pm 20\%$ درصد انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که سرعت باد در طول سال کمترین ضرایب حساسیت را دارد. تبخیر و تعرق مرجع به میانگین روزانه دمای هوا در زمستان حساس است و این حساسیت به تدریج افزایش پیدا کرده و در تابستان به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بیشترین و کمترین مقادیر ضریب حساسیت به ترتیب در تابستان و زمستان مشاهده شد. یافته‌های آنها همچنین نشان داد که تبخیر و تعرق مرجع، بیشترین حساسیت را به رطوبت نسبی و کمترین حساسیت را به سرعت باد دارد. بوئیس و همکاران (۷) تحلیل حساسیت الگوی پنمن مونتیت را در اقلیم اقیانوسی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که در طی زمستان سرعت باد، عامل اصلی تغییر در مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده با الگوی پنمن مونتیت است. بعد از آن رطوبت نسبی و دمای هوا موثرترین متغیرهای اقلیمی در تغییر تبخیر و تعرق مرجع هستند. لی کوای و همکاران (۲۰) حساسیت الگوی پنمن مونتیت را در اقلیم نیمه خشک حوضه رودخانه تائو در شمال شرقی چین مورد پژوهش قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ضرایب حساسیت منطقه‌ای برای ساعات آفتابی، سرعت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب 0.19 ، 0.17 ، 0.078 بودند. با توجه به این ضرایب می‌توان نتیجه گرفت که رطوبت نسبی عامل اصلی کنترل تبخیر و تعرق مرجع در بین متغیرهای اقلیمی است و تبخیر و تعرق مرجع بیشترین حساسیت را نسبت به رطوبت نسبی دارد. استیوز و همکاران (۱۰) تحلیل حساسیت الگوی پنمن-مونتیت را در اقلیم مدیترانه‌ای جنوب اسپانیا انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که در طی ماه‌های بهار، الگوی پنمن مونتیت به دما حساس‌تر بود. از آنجا که در پژوهش‌های قبلی انجام شده، تحلیل حساسیت الگوی پنمن-مونتیت، بیشتر از الگوهای دیگر مورد پژوهش قرار گرفته است، لذا این ضرورت احساس می‌شود که تحلیل حساسیت الگوهای دیگر محاسبه تبخیر و تعرق مرجع نیز مورد پژوهش قرار گیرد. از طرفی در پژوهش‌های قبلی، تحلیل حساسیت با تغییر یک متغیر اقلیمی و ثابت نگه داشتن بقیه متغیرها، انجام شده است ولی در پژوهش حاضر، این تحلیل با تغییر همزمان تمام متغیرهای اقلیمی موجود در الگوهای مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع، انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش استفاده از شبیه سازی مونت-کارلو برای بررسی تحلیل حساسیت الگوهای مختلف برآورد تبخیر و تعرق

جدول ۱- الگوهای تبخیر و تعرق مرجع استفاده شده در این پژوهش

معادله	نام الگو
$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_A + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	پنمن- مانتیت فائو- ۵۶
$ET_0 = a + b[P(0.46T + 8.13)]$ $a = 0.0043(RH_{\min}) - \frac{n}{N} - 1.41$ $b = 0.82 - 0.0041(RH_{\min}) + 1.07(\frac{n}{N}) + 0.066(U_{day}) - 0.006(RH_{\min})(\frac{n}{N}) - 0.0006(RH_{\min})(U_{day})$	پلانی- کریستل اصلاح شده
$ET_0 = 0.0023R_a(T_A + 17.8)(\Delta T)^{0.5}$	هارگریوز
$ET_0 = 0.0135(T + 17.8)Rs$	هارگریوز سامانی
$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n$	پریستلی- تیلور

که در این معادله‌ها:

ET_0 تبخیر و تعرق مرجع ($mmday^{-1}$)، R_n تابش خالص در سطح گیاه ($MJm^{-2}day^{-1}$)، G شار گرمایی خاک ($MJm^{-2}day^{-1}$)، T_A متوسط دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری ($^{\circ}C$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (ms^{-1})، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($KPa^{\circ}C^{-1}$) و γ ثابت سایکرومتری ($KPa^{\circ}C^{-1}$) ضریب مربوط به طول روز یا درصد سالانه تابش آفتاب در ماه که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر، تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال، ضرب در ۱۰۰)، T متوسط درجه حرارت روزانه ($^{\circ}C$)، a و b ضرایب اقلیمی، RH_{\min} حداقل رطوبت نسبی هوا (درصد)، n ساعات واقعی آفتاب، N حداکثر ساعات آفتابی ممکن و U_{day} سرعت باد در روز (ms^{-1})، Rs تابش روزانه رسیده به سطح زمین ($MJm^{-2}day^{-1}$)، R_a تابش فرازمینی روزانه ($MJm^{-2}day^{-1}$) و ΔT اختلاف بین دمای ماکزیمم و مینیمم روزانه ($^{\circ}C$) است.

برای این منظور یک شبیه سازی مونت- کارلو برای تولید

داده‌های شبه تصادفی در یک دامنه مشخص، با برنامه نویسی در نرم افزار متلب انجام شد. هر کدام از متغیرهای هواشناسی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه، سرعت باد و ساعت آفتابی واقعی در الگوهای مورد پژوهش، در بازه ± 20 درصد، هزار بار به صورت تصادفی بر مبنای توزیع یکنواخت برآورد شدند. سپس مقدار تبخیر و تعرق مرجع به ازای هر بار، با استفاده از هر الگو محاسبه شد. به عبارت دیگر هزار مقدار شبیه سازی شده برای هر مقدار واقعی از متغیرهای هواشناسی (دما، رطوبت، ساعت آفتابی و سرعت باد) در هر روز از ۱۳ سال آماری ایستگاه بجنورد، تولید و مقدار ET_{ref} برای هر الگو با هر کدام از آنها برآورد شد. کمترین و بیشترین مقدار ET_{ref} شبیه سازی شده در هر روز انتخاب و با ET_{ref} برآوردی با الگو در همان روز مقایسه شد. میانگین روزانه ET_{ref} شبیه سازی شده و محاسبه شده با هر الگو، برای ۳۶۵ روز سال در ۱۳ سال آماری برای مقایسه بهتر بین نتایج به دست آمده حساب شد. در واقع اعداد به دست آمده برای هر روز در ۱۳ سال آماری (مثلاً روز اول فروردین ۱۳ سال) میانگین گیری شدند. برای نشان دادن حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به تغییرپذیری همزمان متغیرهای هواشناسی در هر الگو، مقدار $RMSE$ سالانه و فصلی بین تبخیر تعرق برآوردی با داده‌های واقعی و داده‌های شبیه سازی شده، نیز محاسبه شد. ضریب همبستگی (r)، ریشه مربع میانگین خطا ($RMSE$) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) برای داده‌های تبخیر تعرق محاسبه شده و شبیه سازی شده به روش مونت- کارلو محاسبه شدند.

نتایج و بحث

مقادیر ضرایب حساسیت (SV_i) سالانه و فصلی تبخیر و تعرق محاسبه شده برای متغیرهای مختلف هواشناسی، در الگوهای پنمن-مونتیت فائو-۵۶، بلانی-کریدل، هارگریوز، هارگریوز-سامانی و پریستلی-تیلور در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول مشخص می‌شود که الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶ بیشترین حساسیت را به دمای بیشینه دارد. این نتیجه با نتایج لیو و همکاران (۲۱) همخوانی داشت. آنها در مطالعات خود نشان دادند که حساسیت الگوی پنمن-مونتیت فائو-۵۶ به متوسط دمای هوا نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی بیشتر است. آنها همچنین نشان دادند که این الگو بعد از دمای هوا به رطوبت نسبی حساس‌تر است. در مطالعه‌ای دیگر هو و همکاران (۱۶) نشان دادند که الگوی پنمن-مونتیت فائو-۵۶ بیشترین حساسیت را به تابش با طول موج کوتاه داشت. بعد از آن، این الگو به دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی حساسیت بیشتری از خود نشان داد. نتایج سیزی پرور و همکاران (۲) نیز نشان دادند که حساسیت الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶ به دما نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی بیشتر است. بعد از دمای بیشینه، الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶، بیشترین حساسیت را به ترتیب به دمای کمینه و رطوبت نسبی از خود نشان داد. زیرا در مناطق خشک و نیمه خشک با افزایش دما، رطوبت نسبی به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. از آنجاییکه در الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶، تبخیر و تعرق رابطه مستقیم با رطوبت نسبی دارد، لذا افزایش رطوبت نسبی باعث افزایش تبخیر و تعرق می‌شود (۱۸). بالا بودن ضریب حساسیت دمای بیشینه می‌تواند به این خاطر باشد که این متغیر برای برآورد متغیرهای مهمی نظیر تابش خالص، فشار بخار اشباع و شیب فشار بخار اشباع به کار می‌رود (۱۸). منفی بودن ضرایب حساسیت نشان دهنده این است که تبخیر و تعرق کمتر از مقدار واقعی خود، برآورد می‌شود (۱۰). تبخیر و تعرق مرجع در الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶ کمترین حساسیت را نسبت به سرعت باد داشت (۱۱). این نتیجه با نتایج مطالعات بختیاری و لیاقت (۴) همخوانی نداشت. آنها در مطالعه خود نشان دادند که حساسیت الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶ به سرعت باد نسبت به سایر متغیرهای هواشناسی (دما، رطوبت نسبی و تابش با طول موج کوتاه) در اقلیم گرم و نیمه خشک کرمان، بیشتر است. علت این امر آن است که در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک به دلیل جایگزین شدن هوای خشک با هوای مرطوب اطراف آسمانه گیاه در اثر وزش باد گرم و خشک، تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد. از آنجایی که در ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش، غالب بادها از نوع بادهای سرد و خشک بود، لذا تاثیر آن در افزایش تبخیر و تعرق چندان چشمگیر نبود.

حساسیت الگوی پنمن-مانتیت فائو-۵۶ به دمای بیشینه در

فصل پاییز نسبت به فصول دیگر بیشتر است. همچنین حساسیت این الگو به دمای کمینه و سرعت باد، در تابستان بیشتر از بقیه فصول است. شاید بتوان گفت علت آن، بالا بودن دمای کمینه و سرعت باد در تابستان است. حساسیت الگو به ساعات آفتابی در فصول مختلف شبیه همدیگر بود. حساسیت الگو به رطوبت نسبی در فصل زمستان نسبت به بقیه فصول بیشتر است. دلیل این موضوع نیز ممکن است به خاطر بالا بودن رطوبت نسبی بجز در زمستان باشد (۲).

تحلیل حساسیت الگوی بلانی-کریدل نشان داد که این الگو بیشترین حساسیت را به رطوبت نسبی و دمای بیشینه دارد. مک کنی و روزنبرگ (۲۳) نیز به نتایج مشابهی با نتایج این پژوهش دست یافتند. مطالعات آنها نشان داد که الگوی بلانی-کریدل بیشترین حساسیت را به دما دارد. ضرایب حساسیت ساعات آفتابی و سرعت باد برای این الگو تقریباً مشابه همدیگر بودند. این الگو کمترین حساسیت را نسبت به دمای کمینه داشت. حساسیت الگو به رطوبت نسبی و دمای بیشینه در پاییز و زمستان بیشتر از بهار و تابستان بود. روند ضرایب حساسیت سرعت باد و ساعات آفتابی در فصول مختلف تقریباً مشابه همدیگر بود. اما برای دمای کمینه، بیشترین ضریب حساسیت در زمستان و کمترین آن در پاییز مشاهده شد. تحلیل حساسیت الگوی هارگریوز نشان داد که این الگو به دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر است. حساسیت الگو به دمای بیشینه در تابستان بیشترین مقدار و در زمستان کمترین مقدار خود را داشت. الگوی هارگریوز-سامانی نیز مشابه الگوی هارگریوز به دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر بود. حساسیت الگو به دمای بیشینه در تابستان و بهار بیشتر از پاییز و زمستان بود که این نتیجه مشابه نتیجه به دست آمده در الگوی هارگریوز بود. این نتیجه با نتایج آمباس و بالتاس (۳) همخوانی داشت. آنها در مطالعه خود نشان دادند که الگوی هارگریوز بیشترین حساسیت را به تابش خورشیدی و دمای هوا داشت. نتایج مطالعات سیزی پرور و همکاران (۲) نیز نشان داد که الگوی هارگریوز-سامانی به تغییرات دمای بیشینه حساسیت نسبتاً زیادی دارد و حساسیت الگو در ماه‌های گرم سال نسبت به بقیه ماه‌ها بیشتر است. نتایج تحلیل حساسیت الگوی پریستلی-تیلور نشان داد که این الگو به ترتیب به دمای بیشینه و کمینه بیشترین حساسیت را دارد. این الگو به رطوبت نسبی و ساعات آفتابی کمترین حساسیت را داشت. الگوی پریستلی-تیلور به دمای بیشینه در پاییز بیشترین و در زمستان کمترین حساسیت را داشت. ضریب حساسیت دمای بیشینه در بهار کم بود و به تدریج به سمت تابستان زیاد می‌شد. ضریب حساسیت دمای کمینه در تابستان بیشترین مقدار و در زمستان کمترین مقدار را داشت. تغییرات ضریب حساسیت دمای کمینه مشابه تغییرات خود این متغیر است. یعنی در زمستان کم است و به تدریج به سمت تابستان زیاد می‌شود. ضرایب حساسیت رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در بهار کمترین و در پاییز بیشترین مقدار خود را داشتند.

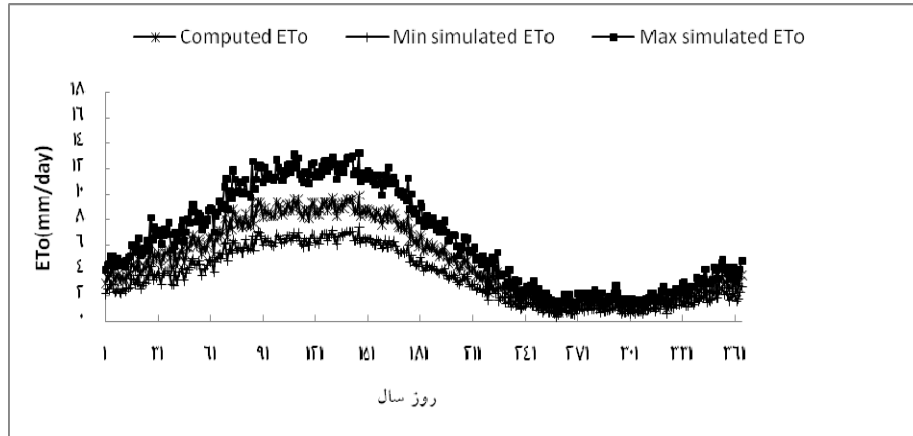
ضرایب حساسیت رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در بهار کم و به سمت پایین زیاد می‌شود.

شکل‌های ۱ تا ۵ حساسیت تبخیر و تعرق مرجع را به تغییر همزمان شش متغیر هواشناسی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه، سرعت باد و ساعت آفتابی واقعی در الگوهای مختلف نشان می‌دهد. در این شکل‌ها تبخیر تعرق محاسبه شده برای مجموعه داده‌های اصلی با استفاده از هر یک از الگوها، در مقابل بیشترین و کمترین مقادیر تبخیر و تعرق مرجع برای داده‌های شبیه‌سازی شده رسم شده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به تغییر متغیرهای هواشناسی در فصل تابستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. زیرا فاصله بین منحنی محاسبه شده با منحنی‌های شبیه‌سازی شده در فصل تابستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. گنگ و همکاران (۱۱) نیز به نتایج مشابه با نتایج این پژوهش دست یافتند. نتایج یافته‌های آنها نشان داد که حساسیت الگو پنمن - مونیتث به تغییر متغیرهای هواشناسی در تابستان بیشتر از زمستان است. برای تمام الگوها بیشترین حساسیت در فصل تابستان و بهار رخ داده است. روند منحنی‌ها در فصل پاییز و زمستان شبیه هم‌دیگر است. در بین الگوهای مورد پژوهش، الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ و بلانی-کریدل بیشترین حساسیت سالانه و الگو پرستلی-تیلور کمترین حساسیت سالانه را دارا می‌باشند. با توجه به شکل‌ها مشخص می‌شود که مقادیر بیشتر تبخیر و تعرق مرجع نسبت به مقادیر کم‌تر آن، حساسیت بیشتری به تغییر متغیرهای هواشناسی دارد. به عبارت دیگر الگوهایی که تبخیر و تعرق مرجع را بیشتر برآورد می‌کنند، حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهند. مثلاً الگو بلانی-کریدل که مقدار تبخیر و تعرق مرجع را نسبت به الگوهای دیگر بیشتر برآورد می‌کند (ماه جولای)، حساسیت بیشتری نسبت به الگوهای دیگر از خود نشان داده است. در جدول ۳ مقادیر $RMSE$ سالانه و فصلی برای هر الگو نشان داده شده است. الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ و بلانی-کریدل بیشترین $RMSE$ سالانه و الگو پرستلی-تیلور کمترین $RMSE$ سالانه را دارا می‌باشد. در تمام الگوها، بیشترین $RMSE$ مربوط به فصل تابستان و کمترین $RMSE$ مربوط به فصل زمستان است. این نشان می‌دهد که حساسیت الگوهای مورد پژوهش به تغییر متغیرهای هواشناسی در فصل تابستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. بنابراین اندازه‌گیری این متغیرها در تابستان بایستی با دقت بیشتری انجام شود. از طرفی الگوهای پنمن - مونیتث فائو-۵۶، بلانی-کریدل و هارگریوز به ترتیب در فصل تابستان بیشترین $RMSE$ را داشتند. یعنی در مناطقی که برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق مرجع از این الگوها استفاده می‌شود، دقت داده‌های هواشناسی ثبت شده از اهمیت بالایی برخوردار است. الگوهای هارگریوز-سامانی و پرستلی-تیلور

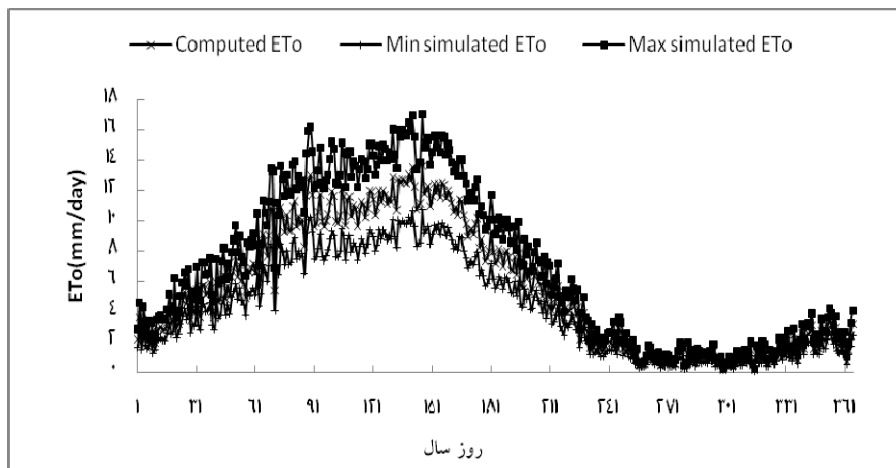
نسبت به خطای اندازه‌گیری متغیرهای هواشناسی حساسیت کمتری داشتند زیرا $RMSE$ سالانه و فصلی محاسبه شده برای این الگوها، نسبت به الگوهای دیگر کمتر بود. با توجه به حساسیت خیلی کم الگو پرستلی-تیلور به تغییر متغیرهای هواشناسی، به نظر می‌رسد که این الگو برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در منطقه مورد پژوهش مناسب باشد اما از آنجاییکه بین مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از این الگو و الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶، $RMSE$ و MAE بالایی وجود دارد (جدول ۴)، بنابراین برآورد تبخیر و تعرق مرجع با این الگو از دقت پایینی برخوردار بوده و استفاده از آن توصیه نمی‌شود. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که الگو هارگریوز-سامانی بعد از الگو پرستلی-تیلور کمترین حساسیت به تغییر متغیرهای هواشناسی را دارا می‌باشد. از طرفی نتایج نشان داده شده در جدول ۴ مشخص می‌کند که همبستگی این الگو با الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ بالا بوده و مقادیر $RMSE$ و MAE در حد قابل قبولی می‌باشند، بنابراین می‌توان گفت که این الگو، الگو نسبتاً مناسبی برای برآورد تبخیر تعرق در منطقه می‌باشد. نتیجه مطالعات زارع ابیانه و همکاران (۱) نیز نشان داد که بهترین الگو برای محاسبه تبخیر و تعرق در شهرستان بجنورد، الگو هارگریوز-سامانی است. آنها در پژوهش خود از داده‌های لایسیمتری برای مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق استفاده کردند. نکته حائز اهمیت دیگر این است که الگو هارگریوز-سامانی نسبت به الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ به داده‌های هواشناسی کمتری نیاز دارد. برای محاسبه تبخیر تعرق با این الگو فقط به داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش خورشیدی نیاز است که این داده‌ها در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس است. در جدول ۴ ضریب همبستگی (r)، ریشه مربع میانگین خطا ($RMSE$) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) برای داده‌های تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده توسط الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ و الگوهای دیگر نشان داده شده است. با توجه به این جدول مشخص می‌شود که همه الگوها ضریب همبستگی نسبتاً بالایی با الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶ دارند. اما مقادیر $RMSE$ و MAE برای هر الگو متفاوت می‌باشد. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که الگو بلانی-کریدل کمترین $RMSE$ و MAE و الگو پرستلی-تیلور بیشترین مقدار $RMSE$ و MAE را دارا می‌باشد. این نشان می‌دهد که بعد از الگو پنمن - مونیتث فائو-۵۶، الگو بلانی-کریدل بیشترین دقت را در برآورد تبخیر تعرق منطقه دارد. الگوهای هارگریوز-سامانی و هارگریوز نیز دقت نسبتاً خوبی در برآورد تبخیر تعرق داشتند. اما دقت الگو پرستلی-تیلور در برآورد تبخیر تعرق پایین بود.

جدول ۲- مقادیر ضریب حساسیت سالانه و فصلی هر الگو نسبت به متغیرهای هواشناسی

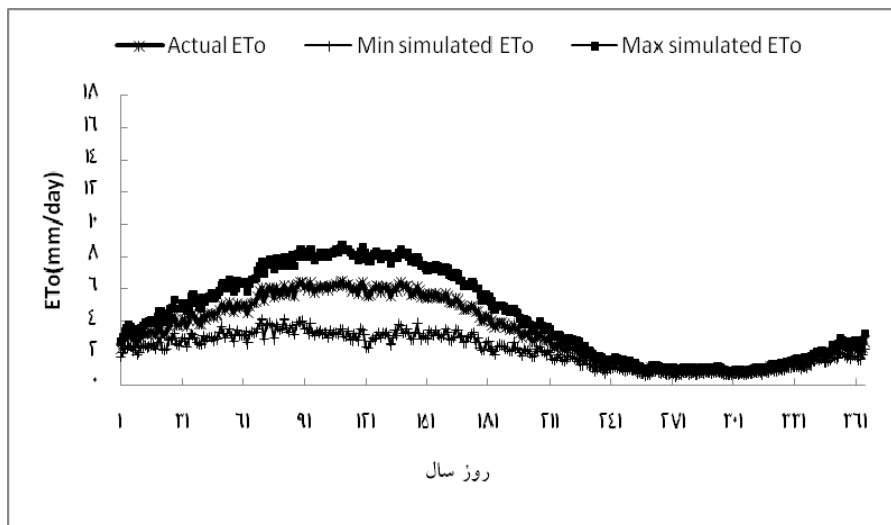
فانو پنمن مونثیت						مقیاس زمانی
$U_2 (ms^{-1})$	n	RH_{max}	RH_{min}	$T_{max} (^{\circ}C)$	$T_{min} (^{\circ}C)$	
۰/۰۴	۰/۰۲	-۰/۴۵	-۰/۴۸	-۲/۰۴	-۰/۳۲	سالانه
۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۴	-۰/۴۴	-۱/۶۷	-۰/۸۵	بهار
۰/۰۹	۰/۰۲	-۰/۲۳	-۰/۲	-۱/۴۵	-۱/۱۵	تابستان
۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۵۱	-۰/۵۵	-۳/۵۳	-۰/۳۶	پاییز
۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۶۶	-۰/۷۵	-۱/۵۲	۱/۱۲	زمستان
بلانی-کریدل						مقیاس زمانی
$U_2 (ms^{-1})$	n	-	RH_{min}	$T_{max} (^{\circ}C)$	$T_{min} (^{\circ}C)$	
۰/۳۱	۰/۳۸	-	-۴/۵۹	۰/۵۴	۰/۰۱	سالانه
۰/۳۲	۰/۳۴	-	-۲	۰/۵۲	۰/۲	بهار
۰/۲۲	۰/۴۱	-	-۰/۶۵	۰/۴۷	۰/۲۵	تابستان
۰/۳۶	۰/۳۷	-	-۸/۴۷	۰/۶۶	۰/۱۱	پاییز
۰/۳۳	۰/۴۱	-	-۷/۴۹	۰/۵۴	-۰/۵۲	زمستان
هار گریوز						مقیاس زمانی
-	-	-	-	$T_{max} (^{\circ}C)$	$T_{min} (^{\circ}C)$	
-	-	-	-	۰/۰۸	-۰/۲۱	سالانه
-	-	-	-	۰/۰۹	-۰/۲۶	بهار
-	-	-	-	۰/۱۱	-۰/۴۲	تابستان
-	-	-	-	۰/۰۷	-۰/۱۸	پاییز
-	-	-	-	۰/۰۴	۰/۰۳	زمستان
هار گریوز سامانی						مقیاس زمانی
-	-	-	-	$T_{max} (^{\circ}C)$	$T_{min} (^{\circ}C)$	
-	-	-	-	۰/۳۱	۰/۰۷	سالانه
-	-	-	-	۰/۳۷	۰/۱۴	بهار
-	-	-	-	۰/۳۶	۰/۱۸	تابستان
-	-	-	-	۰/۲۹	۰/۰۵	پاییز
-	-	-	-	۰/۲۱	-۰/۰۹	زمستان
پریستلی تیلور						مقیاس زمانی
-	n	RH_{max}	RH_{min}	$T_{max} (^{\circ}C)$	$T_{min} (^{\circ}C)$	
-	۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۵	-۱۸/۴۶	-۴/۴۲	سالانه
-	۰/۲۲	۰/۳۲	۰/۲۸	-۱۵/۲۲	-۵/۶۸	بهار
-	۰/۳۲	۰/۵	۰/۴	-۲۱/۶	-۱۰/۵	تابستان
-	۰/۳۴	۰/۷۷	۰/۷۹	-۲۴/۶	-۴/۴۲	پاییز
-	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۵۴	-۱۲/۳۴	۳/۲۴	زمستان



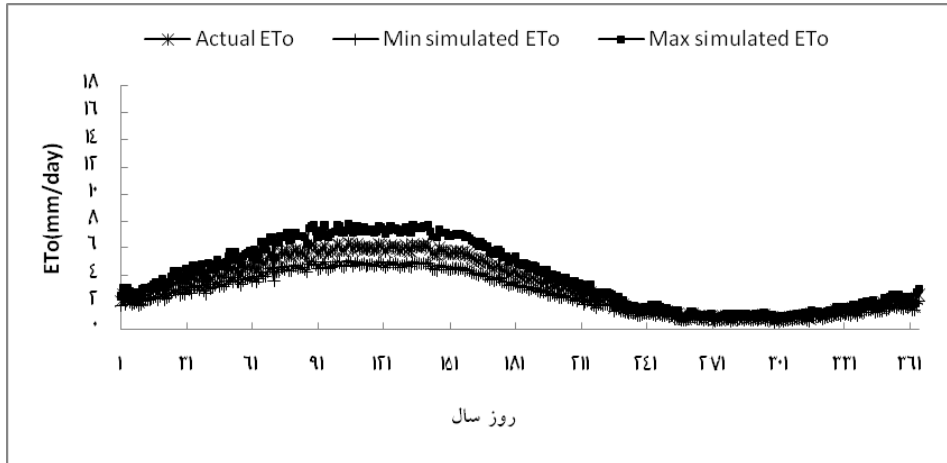
شکل ۱- اثر تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق مرجع در روش پنمن- مانتیث فائو-۵۶ با استفاده از شبیه‌سازی مونت- کارلو (عدد ۱ روز اول فروردین است)



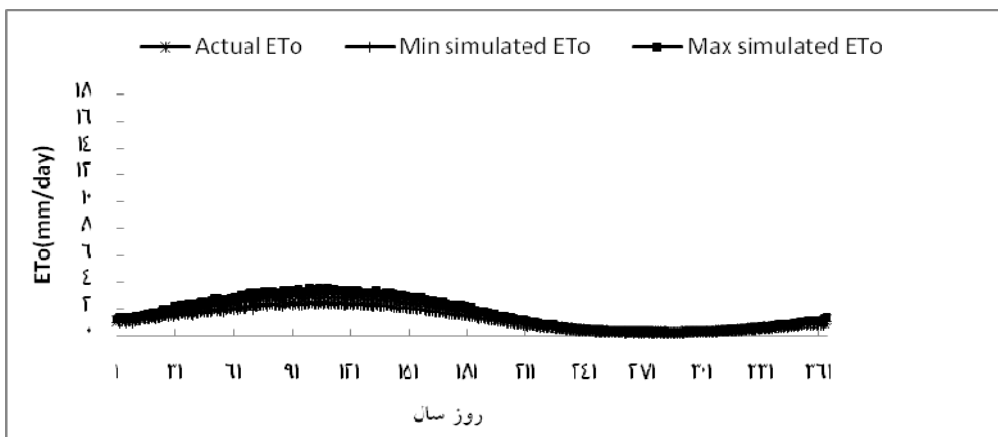
شکل ۲- اثر تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق مرجع در روش بلانی- کرایدل با استفاده از شبیه‌سازی مونت- کارلو (عدد ۱ روز اول فروردین است)



شکل ۳- اثر تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق مرجع در روش هارگریوز با استفاده از شبیه‌سازی مونت- کارلو (عدد ۱ روز اول فروردین است)



شکل ۴- اثر تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق مرجع در روش هارگریوز- سامانی با استفاده از شبیه‌سازی مونت- کارلو (عدد ۱ روز اول فروردین است)



شکل ۵- اثر تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق مرجع در روش پریستلی- تیلور با استفاده از شبیه‌سازی مونت- کارلو (عدد ۱ روز اول فروردین است)

جدول ۳- مقادیر $RMSE(mm.day^{-1})$ سالانه و فصلی هر الگو با تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی

مقیاس زمانی	پنمن- ماتنیت فائو-۵۶	بلانی- کرایدل	هارگریوز	هارگریوز- سامانی	پریستلی- تیلور
سالانه	۱/۷	۱/۶۵	۱/۳۹	۰/۷۷	۰/۲۳
بهار	۱/۸۵	۱/۶۶	۱/۴۷	۰/۸۲	۰/۲۵
تابستان	۲/۵۵	۲/۶۱	۲/۲۳	۱/۲	۰/۳۳
پاییز	۱/۰۶	۰/۹۹	۰/۶۲	۰/۴	۰/۰۸
زمستان	۰/۶۳	۰/۴۳	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۰۴

جدول ۴- ضریب همبستگی (r)، ریشه مربع میانگین خطا ($RMSE$) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) برای داده‌های تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با الگوی پنمن- ماتنیت فائو-۵۶ و الگوهای دیگر

الگو	r	$RMSE(mm.day^{-1})$	$MAE(mm.day^{-1})$
بلانی- کرایدل	۰/۹۷	۱/۸۵	۱/۵۴
هارگریوز- سامانی	۰/۹۸	۱/۵۹	۱/۲۲
هارگریوز	۰/۹۸	۱/۷	۱/۳۶
پریستلی- تیلور	۰/۹۶	۴/۲	۳/۶

نتیجه گیری

حساسیت را داشت.

تغییر همزمان شش متغیر هواشناسی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه، سرعت باد و ساعت آفتابی واقعی در الگوهای مختلف نشان داد که حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به تغییر متغیرهای هواشناسی در فصل تابستان نسبت به فصول دیگر بیشتر است. در بین الگوهای مورد پژوهش، الگوی پنمن - مونتیت فائو-۵۶ و بلانی-کریدل بیشترین حساسیت سالانه و الگوی پریستلی-تیلور کمترین حساسیت سالانه را داشتند. الگوهای هارگریوز-سامانی و پریستلی-تیلور نسبت به خطای اندازه گیری متغیرهای هواشناسی حساسیت کمتری داشتند. با توجه به یافته‌های به دست آمده در این پژوهش می‌توان گفت که الگوی هارگریوز-سامانی، الگوی نسبتاً مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه همدید بجنورد می‌باشد زیرا هم حساسیت کمی به تغییر همزمان متغیرهای هواشناسی دارد و هم مقدار تبخیر و تعرق مرجع را با دقت نسبتاً بالایی برآورد می‌کند.

تحلیل حساسیت الگوهای مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع به متغیرهای اقلیمی به صورت مجزا نشان داد که الگوی پنمن-مونتیت فائو-۵۶ بیشترین حساسیت را به دمای بیشینه و کمترین حساسیت را به سرعت باد و ساعات آفتابی داشت. از طرفی حساسیت الگو به دمای بیشینه در فصل پاییز بیشتر از بقیه فصول بود. الگوی بلانی-کریدل بیشترین حساسیت را به دمای بیشینه و رطوبت نسبی و کمترین حساسیت را به دمای کمینه داشت. حساسیت الگو به رطوبت نسبی و دمای بیشینه در پاییز و زمستان بیشتر از بهار و تابستان بود. تحلیل حساسیت الگوی هارگریوز نشان داد که این الگو به دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر است. حساسیت الگو به دمای بیشینه در تابستان بیشترین مقدار و در زمستان کمترین مقدار خود را داشت. الگوی هارگریوز-سامانی نیز مانند الگوی هارگریوز به دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر بود. نتایج تحلیل حساسیت الگوی پریستلی-تیلور نشان داد که این الگو به ترتیب به دمای بیشینه و کمینه بیشترین حساسیت و به رطوبت نسبی و ساعات آفتابی کمترین

منابع

- ۱- زارع ایبانه ح، بیات ورکشی م، سبزی پرور ع، معروفی ص. و قاسمی ع. ۱۳۸۹. ارزیابی روش های مختلف برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و پهنه بندی آن در ایران. مجله پژوهش های جغرافیایی طبیعی. ۷۴: ۹۵-۱۰۹.
- ۲- سبزی پرور ع، تفضلی ف، زارع ایبانه ح، بانژاد ح، غفوری م، موسوی بایگی م. و مریانچی ز. ۱۳۸۷. ارزیابی حساسیت الگوهای مختلف تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) به سیگنال های تغییر اقلیم در اقلیم سرد نیمه خشک همدان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۴۶: ۵۸۱-۵۹۲.
- 3- Ambas V.Th., and Baltas E. 2012. Sensitivity of analysis of different evapotranspiration methods using a new sensitivity coefficient. *Global NEST*, 14(3): 335-343.
- 4- Bakhtiari B., and Liaghat A.M. 2011. Seasonal sensitivity analysis for climatic variables of ASCE-Penman-Monteith model in a semi-arid climate. *Agriculture Science Technology*, 13: 1135-1145.
- 5- Beven K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Hydrology*, 44: 169-190.
- 6- Blaney H.F., and Criddle W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Technical Paper, 96: 48-51.
- 7- Bois B., Pieri P., Leeuwen C., wold L., Huard F., Gaudillere J., and Saur E. 2007. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4): 619-630.
- 8- Coleman G., and DeCoursey D.G. 1976. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models. *Water Resources Research*, 12 (5): 873-879.
- 9- Dyck S. 1983. Overview on the present status of the concepts of water balance models. *New Approaches in Water Balance Computations. Proceedings of the Hamburg Workshop, IAHS Publication*, 148: 3-19.
- 10- Estevez J., Gavil P., and Berengena J. 2009. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrology, Process*. 23: 3342-3353.
- 11- Gong L., Yu C., Chen D., Halldin S., and Chen Y. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Hydrology*, 329: 620-629.
- 12- Goyal R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69: 1-11.
- 13- Guitjens J.C. 1982. Models of Alfalfa Yield and Evapotranspiration. Irrigation and Drainage Division., *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108(IR3): 212-222.

- 14- Harbeck Jr. G.E. 1962. A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-transfer Theory. US Geological Survey, 101–105.
- 15- Hobbins M.T., Ramirez J.A., and Brown T.C. 2001. The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: an enhanced advection-aridity model. *Water Resources Research*, 37 (5): 1389–1403.
- 16- Hou L.G., Zou S.B., Xiao H.L., and Yang Y.G. 2013. Sensitivity of the reference evapotranspiration to key climatic variables during the growing season in the Ejina oasis northwest China. *SpringerPlus*, 2: 1-6.
- 17- Hupet F., and Vanclooster M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Hydrology*, 243:192–204.
- 18- Irmak S., Payero J., Martin D.L., Irmak A., and Howell T.A. 2006. Sensitivity analysis and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *American Society of Civil Engineers*, 132(6): 564-578.
- 19- Ley T.W., Hill R.W., and Jensen D.T. 1994. Errors in Penman–Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analysis. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 37 (6): 1853–1861.
- 20- Liquiao L., Lijunan L., Li Z., Jiuyi L., and Bin L. 2008. Sensitivity of Penman-Monteith Reference Crop Evapotranspiration in Tao'er River Basin of Northeastern China. *China of Geology Society*, 18(4): 340-347.
- 21- Liu H., Zhang R., and Li Y. 2014. Sensitivity analysis of reference evapotranspiration (ET_o) to climate change in Beijing, China. *Desalination and water Treatment*, 52: 2799-2804.
- 22- McCuen R.H. 1973. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *Hydrology*, 18: 37–53.
- 23- McKenney M.S., and Rosenberg N.J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64: 81–110.
- 24- Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 193: 120–145.
- 25- Piper B. 1989. Sensitivity of Penman estimates of evaporation to errors input data. *Agriculture and Water Management*, 15: 279–300.
- 26- Priestley C.H.B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81–92.
- 27- Qiu G., Yanob T., and Momiic K. 1998. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface. *Hydrology*, 210: 93–105.
- 28- Rana G., and Katerji N. 1998. A measurement based sensitivity analysis of the Penman–Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*, 60: 141–149.
- 29- Saxton K.E. 1975. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agriculture and Meteorology*, 15: 343–353.
- 30- Singh V.P., and Xu C.Y. 1997. Sensitivity of mass transfer-based evaporation equations to errors in daily and monthly input data. *Hydrological Processes*, 11: 1465–1473.
- 31- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55–94.
- 32- Xu C.Y., and Singh V.P. 2005. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. *Hydrology*, 308: 105–121.
- 33- Xu Z.X., and Li J.Y. 2003. A distributed approach for estimating basin evapotranspiration: comparison of the combination equation and the complementary relationship approaches. *Hydrological Process*, 17: 1509–1523.

Sensitivity Analysis of ET_0 for Five Current Models Using Monte-Carlo Simulation Case study: Bojnourd Synoptic Station

M. Makari¹- B. Ghahraman^{2*}- S.H. Sanaeinejad³

Received:09-11-2013

Accepted:29-12-2014

Abstract

The objective of this study is to analyze the sensitivity of ET_0 for five models including FAO-Penman-Monteith, modified Blaney-Criddle, Hargreaves, Hargreaves-Samani and Priestley -Taylor. Daily meteorological data of Bojnourd synoptic station including air temperature, relative humidity, actual duration sunshine and wind velocity were used for sensitivity analysis of five models. In order to produce random data at a specific range, Monte-Carlo simulation was performed. Annual and seasonal $RMSE(mm.day^{-1})$ were calculated to indicate the sensitivity of ET_0 in simultaneous variations of meteorological variables in each model. The results obtained in this study showed that the sensitivity of ET_0 in simultaneous variations of meteorological variables is higher in summer. In all models, the most sensitivity was seen in summer and spring and the least sensitivity was occurred in autumn and winter. Among the studied models, FAO-PM and BC models had the most annual sensitivity and PT model had the least annual sensitivity. All of the models had fairly high correlation coefficient with FAO-PM model but the quantity of $RMSE$ and MAE was different in each model. BC model had the most $RMSE$ and the least $RMSE$ and MAE was seen in MAE and PT. According to the findings in this study, it can be concluded that SH model is fairly suitable for estimation of ET_0 in synoptic station.

Keywords: Reference Evapotranspiration, Sensitivity Analysis, Sensitivity Coefficient, Monte-Carlo Simulation

1,2,3- PhD Student, Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(* - Corresponding Author Email: bijangh@ferdowsi.um.ac.ir)