نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۱۵-۳۰۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 307-315

مقاله پژوهشی

تحلیل حساسیت روش‌های برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع به تغییرات فاکتورهای هواشناسی در شرایط گلخانه

حدیثه رحیمی‌خوب[1*]، تیمور سهرابی[2]، مجتبی دلشاد[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل در برآورد نیاز آبی گیاهان گلخانه‌ای، تخمین دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. پارامترهای متعددی بر میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع اثر می‌گذارند که شناخت مهم‌ترین آن‌ها، منجر به کاهش خطای شبیه‌سازی و افزایش دقت پیش‌بینی خواهد شد. به دلیل وجود اختلاف بین فرضیات و ساختار ریاضی روش‌های غیرمستقیم، رفتار تبخیر- تعرق گیاه مرجع در پاسخ به تغییر فاکتورهای هواشناسی متفاوت است. بنابراین، تحلیل حساسیت و هم‌چنین تعیین درجه تأثیرپذیری تبخیر- تعرق گیاه مرجع نسبت به تغییر پارامترهای هواشناسی در هر روش، ضروری است. در این پژوهش، حساسیت روش‌های پنمن- مانتیت، ایرماک، کپیس و والیانتزس به تغییر پارامترهای هواشناسی شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش طول موج کوتاه در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تحلیل شد. ضرایب حساسیت با تغییر پارامترهای هواشناسی در بازه [۲۰، ۲۰-] درصد با فواصل ۵ درصد محاسبه شدند. نتایج نشان داد، در تمامی روش‌ها متغیر تشعشع اثرگذارترین پارامتر در تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط گلخانه بود. به‌طوری که میزان ضریب حساسیت به‌دست آمده برای این متغیر در روش‌های پنمن- مانتیت، ایرماک، کپیس و والیانتزس به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۷۱، ۰/۶۸ و ۰/۶۳ بود. در مقابل کم‌اهمیت‌ترین پارامتر هواشناسی در روش‌های پنمن- مانتیت، کپیس و والیانتزس متغیر رطوبت حداقل و در روش ایرماک دمای حداقل بود. هم‌چنین نتایج نشان داد، بین روش‌های مورد بررسی، روش پنمن- مانتیت حساس‌ترین روش نسبت به تغییر پارامترهای هواشناسی است. درنتیجه، در صورت کاربرد روش پنمن- مانتیت برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع داخل گلخانه، دقت کافی و اطمینان از عملکرد صحیح وسایل اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی، ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق گیاه مرجع، تحلیل حساسیت، گلخانه، نیاز آبی گیاهان گلخانه‌ای

مقدمه

تبخیر- تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است که تخمین دقیق آن اهمیت زیادی در محاسبات بیلان آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی، برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب دارد. به‌طور کلی تبخیر- تعرق مرجع از طریق دو روش مستقیم یا غیرمستقیم (محاسباتی) تعیین می‌گردد. در روش مستقیم، تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از لایسیمترهای وزنی یا حجمی بر اساس روابط بیلان آب محاسبه می‌شود. از آن‌جایی که اندازه‌گیری تبخیر- تعرق به روش مستقیم نیازمند دقت زیاد بوده و علاوه بر این، نصب و نگهداری لایسیمترها هزینه‌بر هستند، استفاده از روش‌های غیرمستقیم در مطالعات علوم آب متداول است (Liu et al., 2017).

تخمین تبخیر- تعرق گیاه به روش غیرمستقیم از طریق کاربرد روابط تجربی، آئرودینامیکی، توازن انرژی و ترکیبی انجام می‌گیرد. روابط ارائه شده معمولاً بر پایه تعاریف فیزیکی و تئوری استوار هستند یا تحت عنوان روش‌های تجربی، معادلات ساده‌تری داشته و نیاز به داده‌های ورودی کمتری دارند (Yoder et al., 2005). روابط متعددی برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از

۱- دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.rahimikhoob@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.7.9

فاکتورهای هواشناسی ارائه شده‌اند که در چهار گروه روش‌های مبتنی بر تابش، مبتنی بر دما، ترکیبی و تشت‌تبخیر، طبقه‌بندی می‌شوند (Liu et al., 2017; Peng et al., 2017). تفاوت بین روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع به دلیل اختلاف در فرضیات و پارامترهای هواشناسی به کار رفته در ساخت مدل‌ها است (McKenney and Rosenberg, 1993). یکی از پرکاربردترین روش‌هایی که برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع در شرایط کشت مزرعه مطرح می‌شود، استفاده از روش ترکیبی فائو- پنمن- مانتیت[1] است (Lopez-Urrea et al., 2006; Luo et al., 2012). به دلیل دقت و تطابق بالای این روش در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری، از آن به عنوان یک روش استاندارد برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در کشت فضای باز استفاده می‌شود (Allen et al., 1998). ولی در کشت‌های گلخانه‌ای با توجه به تفاوت شرایط اقلیمی حاکم بر گلخانه‌ها (میزان تابش، دما، رطوبت‌نسبی و سرعت هوا در داخل گلخانه‌ها)، واسنجی تمامی روش‌های برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع از جمله روش پنمن- مانتیت ضروری است (Rahimikhoob et al., 2020). در این راستا، پژوهشی در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج به منظور واسنجی و صحت‌سنجی روش‌های مختلف تخمین تبخیر- تعرق مرجع انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، روش ترکیبی پنمن- مانتیت با مقاومت آیرودینامیک ۵۳ ثانیه بر متر بهترین و دقیق‌ترین روش در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق مرجع در گلخانه مورد مطالعه است. روش-های ایرماک[2]، کپایس[3] و والیانتزس[4] نیز به ترتیب بعد از روش پنمن- مانتیت بهترین عملکرد در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در گلخانه را داشتند (Rahimikhoob et al., 2020). لازم به ذکر است که این پژوهش در گلخانه‌ای تحقیقاتی، مجهز به سیستم پد و فن و حرارت مرکزی (آب گرم) انجام شد. به عبارت دیگر، پارامترهای هواشناسی تا حد زیادی قابل کنترل بودند. باتوجه به این‌که ممکن است در گلخانه-ها ادوات لازم برای اندازه‌گیری و کنترل تمام فاکتورهای هواشناسی در دسترس نباشد، تحلیل حساسیت روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی اثرگذارترین و در مقابل کم اهمیت‌ترین فاکتور ضروری است. تحلیل حساسیت برای تعیین و پیش‌بینی تغییر متغیر وابسته (تبخیر- تعرق) در پاسخ به تغییر متغیر مستقل (پارامترهای هواشناسی) انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از این آنالیز، میزان دقت مورد نیاز برای اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی را فراهم می‌کند (Irmak et al., 2006).

مطالعات متعددی در زمینه تحلیل حساسیت تبخیر- تعرق مرجع به تغییر فاکتورهای هواشناسی انجام شده است. به عنوان مثال، Jerszurki *et al.* (2019) ، به تحلیل حساسیت روش فائو- پنمن- مانتیت برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع در سه نوع اقلیم متفاوت (گرمسیری، نیمه‌گرمسیری و نیمه‌خشک) در کشور برزیل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، ضرایب حساسیت به‌دست آمده برای روش فائو- پنمن- مانتیت در هر اقلیم متفاوت بود. با این حال، در تمامی اقلیم‌های مورد مطالعه، شدت حساسیت مدل به‌ترتیب نسبت به تغییرات پارامترهای کمبود فشار بخار اشباع، سرعت باد و تشعشع بود. در تحقیق دیگری، حساسیت روش‌های فائو- پنمن- مانتیت، بلانی- کریدل و هارگریوز- سامانی نسبت به تغییرات فاکتورهای هواشناسی در کشور ایران ارزیابی شدند (Biazar et al., 2019). داده‌های هواشناسی مورد نیاز، از ایستگاه‌های هواشناسی رشت، منجیل، آستارا، لاهیجان و انزلی تهیه شدند. پارامترهای هواشناسی در بازه [۲۰، ۲۰-] درصد با فواصل ۵ درصد تغییر داده شدند. نتایج این پژوهش نشان داد، حساس‌ترین پارامتر در تخمین تبخیر- تعرق مرجع، متغیر دمای حداکثر است. در نتیجه نیاز است این متغیر در ایستگاه‌های ذکر شده با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود. در پژوهشی دیگر، حساسیت روش فائو- پنمن- مانتیت در تخمین تبخیر- تعرق مرجع در طول سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۶ با استفاده از داده‌های هواشناسی ۹۹ ایستگاه در کشور چین بررسی شد. نتیجه محاسبات این مطالعه نشان داد، ضریب حساسیت پارامترهای هواشناسی در فصول مختلف سال متفاوت است. با این حال، حساس‌ترین پارامتر در برآورد تبخیر- تعرق مرجع به روش فائو- پنمن- مانتیت در این منطقه، متغیر رطوبت نسبی بود. پارامترهای ساعت آفتابی، دمای حداکثر، دمای حداقل و سرعت باد به ترتیب حساسیت، از عوامل مؤثر در محاسبه تبخیر- تعرق مرجع بودند (Jiang et al., 2019). مقایسه نتایج به دست آمده از منابع مختلف نشان می‌دهد حساسیت روش‌های برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع وابسته به اقلیم منطقه مورد مطالعه است. با توجه به این‌که گلخانه‌ها از لحاظ شرایط اقلیمی حاکم بر آنها متفاوت از شرایط کشت در فضای باز هستند، تعیین میزان اهمیت و حساسیت هر یک از فاکتورهای هواشناسی بر دقت برآورد تبخیر- تعرق مرجع ضروری به نظر می-رسد. تا کنون پژوهشی در مورد بررسی و تحلیل حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع درون گلخانه انجام نشده است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف تحلیل حساسیت روش‌های پنمن- مانتیت، ایرماک، کپیس و والیانتزس به تغییر پارامترهای هواشناسی درون گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی

1- FAO-Penman-Monteith
2- Irmak
3- Copais
4- Valiantzas

دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. ابعاد سالن گلخانه مورد مطالعه ۲۰×۸ متر، از نوع چند دهانه‌ای با دیواره‌های شیشه‌ای و پوشش سقف از جنس پلی‌کربنات بود. برای تعدیل درجه حرارت محیط، گلخانه مجهز به سیستم پد و فن خودکار و حرارت مرکزی (آب گرم) است. پارامترهای هواشناسی، شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش طول موج کوتاه رسیده به داخل گلخانه به صورت روزانه برداشت گردید. سنجش متغیر دما و رطوبت با استفاده از سنسور دیجیتال مدل HTC-1 و متغیر تابش توسط دستگاه تابش سنج مدل TES-1333R انجام شد. میانگین دما و رطوبت نسبی در طول دوره داده برداری (در ماه‌های خرداد تا اواسط مرداد به مدت ۷۳ روز) به ترتیب برابر با ۳۳/۴ درجه سانتی‌گراد و ۳۱/۳ درصد بود. تابش طول موج کوتاه توسط دستگاه تابش سنج به صورت تجمعی در ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. میانگین میزان تابش طول موج کوتاه ثبت شده داخل گلخانه برابر با ۲۰/۹ مگاژول بر متر مربع در روز بود.

- محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع توسط میکرولایسیمتر (روش مستقیم)

در این تحقیق برای تعیین میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع از سه عدد میکرولایسیمتر زهکش‌دار استفاده شد. میکرولایسیمترها از جنس پلاستیک فشرده با قطر و ارتفاع ۲۱ سانتی‌متر تهیه گردید. در کف میکرولایسیمترها، شن درشت به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر برای تسهیل زهکشی ریخته شد. سپس میکرولایسیمترها با خاک مناسب زراعی پر و به منظور یکسان‌سازی توزین شدند. برای تعیین تغییرات روزانه تبخیر- تعرق گیاه مرجع از میکرولایسیمتر چمن استفاده شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به محاسبه تبخیر- تعرق شامل متغیرهای رابطه بیلان آب، پس از آنکه ارتفاع چمن به ۱۲ سانتی‌متر رسید، آغاز گردید. در طول دوره، ارتفاع چمن همواره بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شد. برای جلوگیری از ایجاد تنش آبی، آبیاری به صورت روزانه انجام می‌گرفت. میزان آب زهکش‌شده از هر میکرولایسیمتر نیز در هر ۲۴ ساعت جمع آوری و اندازه‌گیری شد. تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (ΔS)، از طریق توزین روزانه میکرولایسیمترها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۱± گرم به دست آمد. سپس از رابطه بیلان آب خاک، تبخیر- تعرق گیاه چمن تخمین زده شد (Zeleke and Wade, 2012):

$$ET_o = I + P + U - R - D - \Delta S \quad (۱)$$

در رابطه فوق، ET_o تبخیر- تعرق مرجع، I عمق آبیاری، P میزان بارندگی، U جریان کاپیلاری[1] از اعماق به سمت ریشه، R رواناب سطحی، D نفوذ عمقی و ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک هستند. در این رابطه تمام مقادیر بر حسب حجم آب در واحد سطح کشت بیان می‌شوند. در محیط کشت کنترل شده گلخانه، پارامترهای P، U و R برابر با صفر درنظر گرفته شده‌اند.

- روش‌های غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع

روش پنمن (Penman, 1948) یکی از متداول‌ترین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع است که اساس فیزیکی دارد. روش پنمن- مانتیت (PM) (رابطه ۲) نیز همانند روش پنمن مبنای فیزیکی داشته با این تفاوت که عامل مقاومت پوشش گیاه[2] نیز در تخمین تبخیر- تعرق مرجع لحاظ می‌شود. این روش بر مبنای بیلان انرژی بین تابش خالص[3] و شار گرمای محسوس[4] توسعه داده شده است (Monteith and Unsworth, 1990).

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta R_n + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (۲)$$

در رابطه فوق، ET_o تبخیر تعرق گیاه مرجع ($mm\ day^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، R_n شدت تابش خالص ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی(kPa)، $e_s - e_a$ کبود فشار اشباع (kPa)، λ گرمای نهان تبخیر ($MJ\ kg^{-1}$)، C_p گرمای مخصوص هوا در فشار ثابت ($J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$)، ρ_a چگالی هوا ($kg\ m^{-3}$)، r_a مقاومت آیرودینامیک ($s\ m^{-1}$) و r_s مقاومت روزنه‌ای ($s\ m^{-1}$) هستند.

روش ایرماک (IM) (رابطه ۳) یکی از روش‌های مبتنی بر تابش در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. این روش در اصل یک رابطه رگرسیون خطی دو متغیره بین متغیرهای دمای میانگین و تشعشع می‌باشد (Irmak et al., 2003).

$$ET_o = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T \quad (۳)$$

در رابطه فوق، ET_o تبخیر تعرق گیاه مرجع ($mm\ day^{-1}$)، R_s شدت تابش طول موج کوتاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) و T میانگین دمای روزانه ($^{\circ}C$) است.

روش کپیس (CP) (رابطه ۴) یک روش مبتنی بر تابش است که در آن تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از متغیرهای دما، رطوبت نسبی و تشعشع توسط روابط رگرسیون چندجمله‌ای محاسبه می‌شود (Alexandris et al., 2006).

1- Upward capillary rise
2- Canopy resistance
3- Net radiation
4- Sensible heat flux

$$ET_o = m_1 + m_2C_2 + m_3C_1 + m_4C_1C_2$$
$$C_1 = a_1 + a_2RH + a_3R_s + a_4R_sRH$$
$$C_2 = b_1 + b_2T + b_3R_s + b_4R_sT \quad (۴)$$

در رابطه فوق، ET_o تبخیر تعرق گیاه مرجع (R_s ،($mm\ day^{-1}$) شدت تابش طول موج کوتاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) و T میانگین دمای روزانه (^oC)، RH رطوبت نسبی (٪)، m_1، m_2، m_3، m_4، a_1، a_2، a_3، a_4، b_1، b_2، b_3، b_4 ضرایب تجربی معادلات هستند.

روش والیانتزس (VL) (رابطه ۵)، بر اساس ساده‌سازی‌های انجام گرفته روی معادله پنمن توسعه داده شده‌است. در این تحقیق باتوجه به نوع پارامترهای هواشناسی در دسترس، از رابطه‌ای استفاده شد که تبخیر- تعرق گیاه مرجع از طریق متغیرهای دما، رطوبت نسبی و تشعشع برآورد خواهد شد (Valiantzas , 2013).

$$ET_o = 0.0393R_s\sqrt{T+9.5} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.078(T+20) \quad (۵)$$

در رابطه فوق، ET_o تبخیر تعرق گیاه مرجع (R_s ،($mm\ day^{-1}$) شدت تابش طول موج کوتاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، T میانگین دمای روزانه (^oC)، RH رطوبت نسبی (٪) و φ عرض جغرافیایی (rad) است.

روابط (۲) تا (۵) در پژوهش پیشین با استفاده از آنالیز رگرسیون مورد واسنجی قرار گرفت و ضرایب معادلات برای شرایط گلخانه به دست آمدند. توضیحات بیشتر در پژوهش رحیمی خوب ارائه شده است (Rahimikhoob et al., 2020).

- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یک مدل یا یک سیستم، میزان تأثیرگذاری متغیرهای مستقل و هم‌چنین تأثیرپذیری متغیر وابسته تحت سناریو مشخص را نشان می‌دهد. اگر متغیر وابسته یا همان خروجی مدل[1] به صورت O و متغیرها یا پارامترهای مستقل به صورت P تعریف شوند، مقدار متغیر O تابعی از P خواهد بود (رابطه ۶).

$$O = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (۶)$$

ضریب حساسیت یا میزان تأثیرپذیری متغیر O ناشی از تغییر در هریک از P_i ها، به زبان ریاضی با استفاده از بسط سری تیلور مطابق رابطه زیر بیان می‌شود (McCuen, 2003). پارامتر O_0 معرف مقدار واقعی متغیر وابسته است.

$$f(P_i+\Delta P_i, P_{j[j\neq i]}) = O_0 + \frac{\partial O_0}{\partial P_i}\Delta P_i + \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 O_0}{\partial P_i^2}\Delta P_i^2 + \dots \quad (۷)$$

اگر از عبارت‌های غیرخطی رابطه فوق به دلیل مقدار عددی کم صرف نظر شود، رابطه (۷) به شکل رابطه (۸) ساده خواهد شد.

$$f(P_i+\Delta P_i, P_{j[j\neq i]}) - O_0 = \left(\frac{\partial O_0}{\partial P_i}\right)\Delta P_i \quad (۸)$$

بدین ترتیب، رابطه کلی ضریب حساسیت به صورت رابطه زیر به دست می‌آید.

$$SI_{P_i} = \frac{f(P_i+\Delta P_i, P_{j[j\neq i]}) - O_0}{\Delta P_i} = \left(\frac{\partial O_0}{\partial P_i}\right) \quad (۹)$$

یکی از محدودیت‌های کاربرد رابطه (۹) برای محاسبه ضریب حساسیت وابستگی آن به ابعاد هر یک از متغیرهای وابسته (P_i) است. به عبارت دیگر، اگر P_i ها واحدهای متفاوتی داشته باشند، مقادیر ضرایب حساسیت (SI_{P_i}) قابل مقایسه نخواهد بود. به همین دلیل، با تقسیم نمودن صورت کسر رابطه (۹) به O_0 و مخرج آن به P_i ضریب حساسیت نسبی و بدون بعد طبق رابطه زیر، به دست می‌آید (McCuen, 2003).

$$SI_{P_i} = \left(\frac{\Delta O_0}{\Delta P_i}\right)\left(\frac{P_i}{O_0}\right) \quad (۱۰)$$

در این پژوهش، میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای هواشناسی شامل دمای حداکثر (T_{max})، دمای حداقل (T_{min})، رطوبت حداقل (RH_{min})، رطوبت حداکثر (RH_{max}) و تشعشع (R_s) به عنوان متغیر مستقل، انتخاب و در بازه [۲۰، ۲۰-] درصد با فواصل ۵ درصد تغییر داده شدند. سپس با استفاده از رابطه (۱۰)، ضرایب حساسیت برای هر یک از فاکتورها محاسبه شدند.

به منظور ارزیابی و مقایسه کیفی میزان حساسیت هر یک از پارامترها، مقادیر ضریب حساسیت در چهار گروه طبقه‌بندی شدند (جدول ۱) (Lenhart et al., 2002).

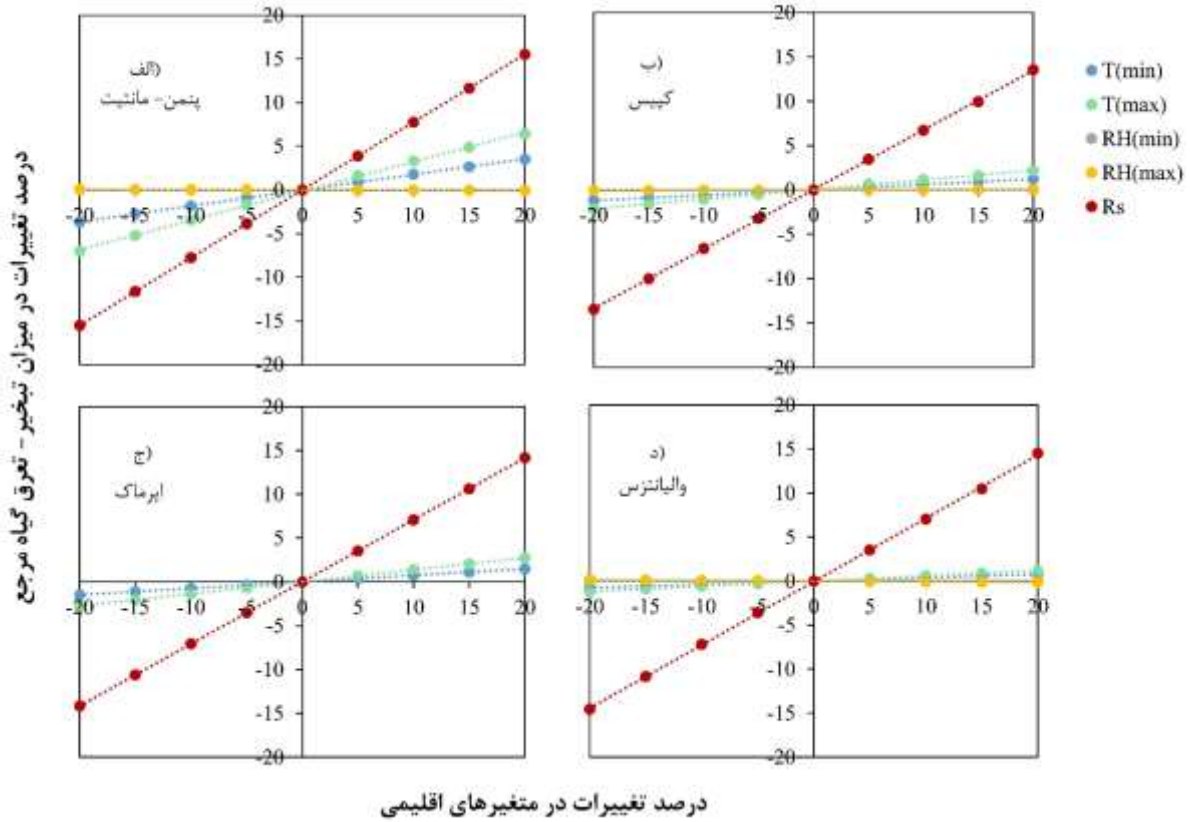
جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر ضریب حساسیت

گروه	دامنه تغییرات ضریب حساسیت	شرح
۱	$0 \le \lvert S_P \rvert < 0.05$	کم
۲	$0.05 \le \lvert S_P \rvert < 0.2$	متوسط
۳	$0.2 \le \lvert S_P \rvert < 1$	زیاد
۴	$\lvert S_P \rvert \ge 1$	بسیار زیاد

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت متغیر تبخیر- تعرق گیاه مرجع برای شناخت حساس‌ترین پارامتر هواشناسی مؤثر بر هر یک از روش‌های غیرمستقیم (پنمن- مانتیت، ایرماک، کیپس و والیانتزس) انجام شد. پارامترهای هواشناسی یک به یک در بازه مورد نظر با ثابت نگه داشتن مابقی پارامترها (One-at-a-Time) تغییر داده شدند. نمودار درصد تغییرات تبخیر- تعرق گیاه مرجع نسبت به درصد تغییرات پارامترهای هواشناسی برای هر یک از روش‌های غیرمستقیم منتخب، در شکل (۱) نشان داده شده است.

1- Model output



شکل ۱- میزان تغییرات تبخیر- تعرق گیاه مرجع نسبت به تغییرات فاکتورهای هواشناسی در روش‌های: الف) پنمن- مانتیث، ب) کپیس، ج) ایرماک و د) والیانتزس

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه درصد تغییرات تبخیر- تعرق گیاه مرجع نسبت به تغییرات پارامترهای هواشناسی خطی است. نتیجه مشابه در تحقیقات علمی دیگران نیز اشاره شده است (Debnath et al., 2015; Biazar et al., 2019). شیب خط ترسیم شده برای هر یک از فاکتورهای هواشناسی تعیین کننده حد تأثیر آن متغیر در برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع است. با توجه به شکل (۱)، متغیر تشعشع خورشیدی (R_s) اثرگذارترین پارامتر در تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در شرایط گلخانه بوده است. به طوری‌که تغییر۲۰± درصدی R_s منجر به تغییر تبخیر- تعرق گیاه مرجع به میزان ۱۵/۵۳±، ۱۴/۱۷±، ۱۳/۵۴±، ۱۴/۵۰± درصد به ترتیب برای روش‌های پنمن- مانتیث، ایرماک، کپیس و والیانتزس شده است. در مقابل کم اهمیت‌ترین پارامتر هواشناسی در روش‌های پنمن- مانتیث، کپیس و والیانتزس متغیر RH_{min} و در روش ایرماک T_{min} بود.

ضرایب حساسیت فاکتورهای هواشناسی در هر روش تحت سناریو ۲۰+ درصد با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه و نتایج در جدول (۲) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام روش‌ها بیشترین ضریب حساسیت به‌دست آمده مربوط به پارامتر R_s است. در پژوهشی دیگر در منطقه‌ای با اقلیم گرم و مرطوب، حساسیت زیاد تبخیر- تعرق گیاه مرجع محاسبه شده به روش پنمن- مانتیث نسبت به پارامتر R_s گزارش شده است (Irmak et al., 2006). هم‌چنین نتایج آنالیز حساسیت روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (شامل روش‌های ترکیبی، مبتنی بر تابش، مبتنی بر دما و تشت تبخیر) به تغییر پارامترهای هواشناسی در کشور هند نشان داد، R_s حساس‌ترین پارامتر در تخمین تبخیر- تعرق است (Poddar et al., 2018).

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، در اختیار داشتن دستگاه تابش-سنج یکی از عوامل مهم در برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع در کشت گلخانه‌ای است. اگرچه در تحقیقات مختلف به تخمین تابش داخل گلخانه با استفاده از داده‌های تابش خارج و ضریب انتقال تابش[1]

1- Transmissivity

سقف گلخانـه اشـاره شـده اسـت (Sánchez et al., 2015). ولـی از آنجایی که به مرور زمان در اثر آلودگی و تجمـع گـرد و غبـار، درجـه شفافیت سقف و قابلیت انتقال نور خورشید تغییر مـی‌کنـد، نمـی‌تـوان تخمین دقیقی از تابش رسیده به داخل گلخانه داشت.

نتایج این پژوهش نشان داد، پارامتر دمای حداکثر پس از تشعشع، در اولویت دوم حساسیت برای تمام روش‌های مورد بررسی قـرار دارد. به تأثیر و اهمیت هر دو متغیر تشعشع خورشیدی و دما برای تخمـین دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع، در تحقیقات دیگری نیـز اشـاره شـده اسـت (Goyal et al., 2004; Darshana and Pandey, 2013; Poddar et al., 2018).

جدول ۲- ضرایب حساسیت روش‌های برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع به تغییر هر یک از پارامترهای هواشناسی

روش	متغیر هواشناسی				
	دمای حداقل (T_{min})	دمای حداکثر (T_{max})	رطوبت حداقل (RH_{min})	رطوبت حداکثر (RH_{max})	تشعشع (R_s)
پنمن- مانتیت (PM)	۰/۱۸	۰/۳۲	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۳	۰/۷۸
ایرماک (IM)	۰/۰۸	۰/۱۴	-	-	۰/۷۱
کپیس (CP)	۰/۰۶	۰/۱۱	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۳	۰/۶۸
والیانتزس (VL)	۰/۰۴	۰/۰۶	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۹	۰/۶۳

با توجه به جدول (۲)، ضرایب بـه دسـت آمـده بـرای متغیرهـای RH_{min} و RH_{max} نشان دهنده حساسیت منفـی تبخیـر- تعـرق گیـاه مرجع نسبت به تغییر این دو پارامتر است. علت ایـن پدیـده از لحـاظ فیزیکی و تئوری قابل توجیه است. کاهش رطوبـت نسـبی منجـر بـه کاهش فشار بخار محیط اطراف گیاه شده، در نتیجـه میـزان تبخیـر- تعـرق گیـاه افـزایش خواهـد یافـت (Allen et al., 1998). ارتبـاط معکوس و منفی بودن ضریب حساسیت تبخیـر- تعـرق گیـاه مرجـع نسبت به تغییر رطوبت نسبی در تحقیقات متعـددی نشـان داده شـده اسـت (Liang et al., 2008; Hou et al., 2013; Gao et al., 2016). با توجه به ضریب حساسیت بسیار کـم پارامترهـای RH_{min} و RH_{max}، می‌توان از آن‌ها در صورت عدم دسترسی بـه ادوات انـدازه-گیری رطوبت صرف‌نظر و تبخیر- تعرق گیاه مرجـع را بـا اسـتفاده از روش ایرماک با دقت مناسبی برآورد نمود.

به‌طور کلی مطابق با جدول (۱) و (۲)، حساسیت روش‌های مـورد مطالعه در این پژوهش، نسبت به تغییر پارامترهـای تشعشـع و دمـای حداکثر در محدوده حساسیت زیاد، نسبت به تغییر پارامتر دمای حداقل در محدوده حساسیت متوسط و نسبت به تغییـر پارامترهـای رطوبـت حداقل و حداکثر در محدوده حساسیت کم قرار دارد.

با مقایسه ضرایب به دست آمـده در هـر روش، روش والیـانتزس کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر فاکتورهای هواشناسی نشان داده است. اگر احتمال وجود خطا در اندازه‌گیری فاکتورهای هواشناسـی در گلخانه وجود داشته باشد، محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش، والیانتزس نسبت به روش‌های دیگـر، ارجحیـت دارد. نتـایج پژوهش پیشین در مورد انتخاب دقیق‌ترین روش برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در گلخانه نشان داد، روش پنمن- مانتیت با خطای بسـیار کمی نسبت به اندازه‌گیری‌هـای لایسـیمتری بهتـرین روش شـناخته می‌شود (Rahimikhoob et al., 2020). نتایج پـژوهش حاضـر نیـز نشان داد، حساس‌ترین روش نسبت به تغییر پارامترهـای هواشناسـی، روش پنمن- مانتیت است. بدین ترتیب می‌توان نتیجـه گرفـت، اگـر هدف تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع با دقت بسـیار زیـاد و خطـای برآورد کم باشد (روش پنمن- مانتیـت)، اطمینـان از عملکـرد وسـایل اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و واسـنجی آن‌هـا پـیش از کـاربرد روش پنمن- مانتیت برای برآورد تبخیر- تعرق گیـاه مرجـع ضـروری است.

به‌طور کلی اهمیت فاکتورهای هواشناسی در برآورد دقیق تبخیر- تعرق گیاه مرجع تنها بـا محاسـبه ضـریب حساسـیت (SI) مشـخص نخواهد شد. بلکه مـی‌بایسـت عـلاوه بـر ضـریب حساسـیت، میـزان تغییرات به وجود آمـده در متغیـر وابسـته ناشـی از تغییـر هـر فـاکتور هواشناسی نیز برآورد گردد. در گلخانه مورد مطالعه، R_s حساس‌تـرین پارامتر هواشناسی در برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجـع بـه دسـت آمـد ولی تحت سناریو افزایش R_s به میزان ۲۰ درصد، کـم‌تـرین تغییـرات (۱۳/۵۴ درصد) در روش کپیس مشاهده شد. علت آن، نرخ مشارکت[1] کمتر متغیر R_s در معادله تخمین تبخیـر- تعـرق گیـاه مرجـع در ایـن روش است. به طور کلی، میزان تأثیرپذیری تبخیر- تعرق گیاه مرجـع از تغییر فاکتورهای هواشناسی بستگی به روش اتخاذ شده دارد. علاوه بر این، مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات دیگر نشان مـی‌دهـد، حد تأثیرپذیری مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجـع در اقلـیم-های مختلف، متفاوت است. بـه عنـوان مثـال، Guo et al. (2017) نشان دادنـد کـاربرد روش پـنمن- مانتیـت در اقلـیم گـرم و خشـک حساسیت کمی به تغییر رطوبت نسبی دارد. هم‌چنین، حساسیت روش پریستلی- تیلور به تغییر پارامتر دما و تشعشع خورشیدی به ترتیـب در مناطق سردتر و مناطق گرم و خشک، بیشتر است. بـه‌عـلاوه، میـزان

1- Contribution rate

حساسیت روش‌های غیرمستقیم به تغییر پارامترهای هواشناسی، تحت تأثیر فصول سال نیز است. نتایج پژوهشی با هدف تحلیل حساسیت روش پنمن- مانتیت برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع در کشور هند نشان داد، در ماه‌های سرد، تغییر پارامتر R_s تأثیر بیشتری در مقایسه با ماه‌های گرم بر میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع دارد (Debnath et al., 2015). با توجه به اینکه پژوهش حاضر در ماه‌های گرم سال که میزان تابش خورشیدی نسبتاً زیاد است، انجام گرفت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی حساسیت مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع به تغییرات پارامتر R_s در فصول سرد سال نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، حساسیت روش‌های غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع (پنمن- مانتیت، ایرماک، کپیس و والیانتزس) به تغییر فاکتورهای هواشناسی در کشت گلخانه‌ای بررسی شد. فاکتورهای هواشناسی شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش طول موج کوتاه رسیده به داخل گلخانه در محدوده [۲۰، ۲۰-] درصد با فواصل ۵ درصد تغییر داده شدند و تغییرات تبخیر- تعرق گیاه در هر روش محاسبه شد. نتایج نشان داد، حساس‌ترین روش نسبت به تغییر فاکتورهای هواشناسی در گلخانه، روش پنمن- مانتیت بود. هم‌چنین، ضرایب حساسیت محاسبه شده برای هر یک از متغیرها نشان داد، تغییر پارامتر تشعشع (R_s) تأثیر قابل توجهی بر دقت تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در گلخانه دارد. با توجه به اینکه تمامی روش‌های مورد بررسی در این پژوهش حساسیت زیادی به متغیر تشعشع خورشیدی (R_s) نشان دادند، می‌توان نتیجه گرفت، برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع در اقلیم گلخانه، مدل پنمن- مانتیت و مدل‌های مبتنی بر تابش (ایرماک، کپیس و والیانتزس) نسبت به مدل‌هایی که R_s را در نظر نمی‌گیرند (مانند روش هارگریوز- سامانی)، مناسب‌تر هستند.

روش والیانتزس نسبت به روش‌های مورد بررسی در این تحقیق، کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر پارامترهای هواشناسی نشان داد. در مقابل حساسیت زیاد روش پنمن- مانتیت به تغییر پارامترهای هواشناسی لزوم واسنجی این معادله پیش از کاربرد آن برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع را یادآور می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش‌های غیرمستقیم در گلخانه نشان داد، در اختیار داشتن دستگاه تابش‌سنج و اطمینان از دقت آن، برای اندازه‌گیری R_s درون گلخانه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی (شماره ۹۶۰۱۳۰۷۳) با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا گردیده است و نویسندگان از مساعدت‌های آنان تقدیر می‌نمایند.

منابع

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.

Alexandris, S., Kerkides, P. and Liakatas, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the ‘‘Copais’’ approach. Agricultural water management. 82: 371–386.

Biazar, S., Dinpashoh, Y. and Singh, V. 2019. Sensitivity analysis of the reference crop evapotranspiration in a humid region. Environmental Science and Pollution Research. 26(31): 32517-32544. doi: 10.1007/s11356-019-06419-w

Darshana, P.A. and Pandey, R.P. 2013 Analysing trends in reference evapotranspiration and weather variables in the Tons River Basin in Central India. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 27: 1407–1421.

Debnath, S., Adamala, S. and Raghuwanshi, N. 2015. Sensitivity Analysis of FAO-56 Penman-Monteith Method for Different Agro-ecological Regions of India. Environmental processes. 2(4): 689-704. doi: 10.1007/s40710-015-0107-1

Gao, Z., He, J., Dong, K., Bian, X. and Li, X. 2015. Sensitivity study of reference crop evapotranspiration during growing season in the West Liao River basin, China. Theoretical and Applied Climatology. 124(3-4): 865-881. doi: 10.1007/s00704-015-1453-7

Goyal, R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural water management. 69(1): 1–11.

Guo, D., Westra, S. and Maier, H. 2017. Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different Australian climatic zones. Hydrology and Earth System Sciences. 21(4): 2107-2126. doi: 10.5194/hess-21-2107-2017

Hou, L., Zou, S., Xiao, H. and Yang, Y. 2013. Sensitivity of the reference evapotranspiration to key climatic variables during the growing season in the Ejina oasis northwest China. Springerplus. 2(S1). doi: 10.1186/2193-1801-2-s1-s4

Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G. and Jones, J.W. 2003 Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 129: 336–347.

of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. Agricultural and Forest Meteorology. 64:81–110

Monteith, J.L. and Unsworth, M.H. 1990. Principles of Environmental Physics (Second ed.). Edward Arnold.

Peng, L., Li, Y., Feng, H. 2017. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China. Scientific Reports. 7(1):1–19.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare and grass. Proceedings of the *Royal Society* of *London*. Series. A. 193: 120–145.

Poddar, A., Gupta, P., Kumar, N., Shankar, V. and Ojha, C. 2018. Evaluation of reference evapotranspiration methods and sensitivity analysis of climatic parameters for sub-humid sub-tropical locations in western Himalayas (India). ISH Journal of Hydraulic Engineering. 1-11. doi: 10.1080/09715010.2018.1551731

Rahimikhoob, H., Sohrabi, T. and Delshad, M. 2020. Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. Irrigation Science. 38: 389–400 https://doi.org/10.1007/s00271-020-00680-5

Sánchez, J. A., Reca, J. and Martínez, J. 2015. Water productivity in a Mediterranean semi-arid greenhouse district. Water Resources Management. 29 (14): 5395–5411.

Valiantzas, J.D. 2013. Simple ET0 forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. I: theoretical development. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 139(1): 1–8.

Yoder, R.E., Odhiambo, L.O. and Wright, W.C. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast US. Applied Engineering in Agriculture. 21: 197–202.

Zeleke, K. and Wade, L. 2012. Evapotranspiration Estimation using Soil Water Balance, Weather and Crop Data. In A. Irmak (Ed.), Evapotranspiration. Remote Sensing and Modeling (1 ed). 41-58.

Irmak, S., Payero, J.O., Martin, D.L., Irmak, A. and Howell, T.A. 2006. Sensitivity Analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman–Monteith equation.

Jerszurki, D., de Souza, J. and Silva, L. 2019. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. Climate Dynamics. 53(1-2): 943-956. doi: 10.1007/s00382-019-04619-1

Jiang, S., Liang, C., Cui, N., Zhao, L., Du, T. and Hu, X. et al. 2019. Impacts of climatic variables on reference evapotranspiration during growing season in Southwest China. Agricultural water management. 216: 365-378. doi: 10.1016/j.agwat.2019.02.014

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 27(9-10): 645-654.

Liang, L., Li, L., Zhang, L., Li, J. and Li, B. 2008. Sensitivity of penman-monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China. Chinese Geographical Science. 18(4): 340-347. doi: 10.1007/s11769-008-0340-x

Liu, X.Y., Xu, C.Y., Zhong, X.L., Li, Y.Z., Yuan, X.H., Cao, J.F. 2017. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. Agricultural water management. 184: 145–155.

Lopez-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C. and Moratalla, A. 2006 Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agricultural water management. 85(1–2):15–26.

Luo Y., Jiang Y., Peng S., Khan S., Cai X., Wang W. and Jiao X. 2011. Urban weather data to estimate reference evapotranspiration for rural irrigation management. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 138(9): 837–842.

McCuen, R. H. 2003. Modeling Hydrologic Change, Statistical Methods. Lewis Publishers. Maryland. USA.

McKenney, M.S. and Rosenberg, N.J. 1993. Sensitivity

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 15, Jan.-Jul. 2021, p. 307-315

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۵، خرداد - تیر ۱۴۰۰، ص. ۳۱۵-۳۰۷

Sensitivity Analysis of Reference Crop Evapotranspiration Estimation Methods to Meteorological Factors in Greenhouse Conditions

H. Rahimikhoob[1*], T. Sohrabi[2], M. Delshad[3]

Recived: Oct.28, 2020 Accepted: Jan.13, 2021

Abstract

One of the most important factors in calculation of greenhouse crop water requirement is the accurate estimation of reference crop evapotranspiration. Numerous parameters affect the evapotranspiration rate of the reference crop; with the knowledge of the most important factor the simulation error will be reduced. Because of the differences among mathematical structure and underlying assumption of indirect reference crop evapotranspiration estimation methods, behavior of the response variable to changes in climatic parameters may become inconsistent. Therefore, it is mandatory to analyze the sensitivity as well as determining the influence of meteorological factors on reference crop evapotranspiration. In this study, the sensitivity of *Penman-Monteith*, *Irmak*, *Copais* and *Valiantzas* methods to changes in meteorological factors including maximum and minimum daily temperature, maximum and minimum relative humidity and short-wave radiation was analyzed in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources of the University of Tehran, located in Karaj, Iran. Sensitivity coefficients were calculated by changing meteorological factors in the range of [20, -20] percent with 5% intervals. Results showed that in all methods, the internal radiation was the most influential variable in determining the reference crop evapotranspiration under greenhouse conditions. The obtained sensitivity coefficient for this variable in *Penman-Monteith*, *Irmak*, *Copais* and *Valiantzas* methods was equal to 0.78, 0.71, 0.68 and 0.63, respectively. In contrast, the least important climatic variable was the minimum humidity in *Penman-Monteith*, *Copais* and *Valiantzas* methods and the minimum temperature in *Irmak* method. The results also showed that *Penman-Monteith* is the most sensitive method to changes in meteorological factors. As a result, in case of using of *Penman-Monteith* method for reference crop evapotranspiration estimation in greenhouse conditions, ensuring the correct operation of measuring instruments and their accuracy is essential.

Keywords: Greenhouse, Greenhouse crop water requirement, Reference crop evapotranspiration, Sensitivity analysis

1- Ph.D, Irrigation and Reclamation Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Associate Professor, Horticultural Sciences Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*-Corresponding Author Email: h.rahimikhoob@ut.ac.ir)