نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۹، خرداد - تیر ۱۴۰۴، ص. ۲۱۵-۲۰۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 19, Jun.-Jul. 2025, p. 203-215

مقاله علمی-پژوهشی

برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در گلخانه با استفاده از روش‌های آماری و ریاضی

کبری جانقربان[۱]، جمالعلی الفتی[۲]، محمدرضا خالدیان[۳*]، حسن حسن‌آبادی[۴]، یوسف حمیداوغلی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

چکیده

صرفه‌جویی در مصرف و افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف کننده آب الزامی است. برای نیل به این هدف، محاسبه صحیح نیاز آبی بر اساس تبخیر-تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی ضروری است. هدف از انجام مطالعه حاضر معرفی روش مناسب برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط گلخانه است. برای دستیابی به این هدف، در داخل گلخانه گیاه چمن در میکرولایسیمتر کشت شد و مقدار آب مصرفی آن اندازه‌گیری شد. هم‌زمان داده‌های هواشناسی داخل گلخانه شامل دمای کمینه و بیشینه و همچنین رطوبت نسبی اندازه‌گیری شدند. تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های پنمن-مانتیث فائو با کمک نرم‌افزار کراپ‌وات بر اساس دمای داخل گلخانه و همچنین بر اساس روش نشریه فائو ۲۱۷، روش هارگریوز، روش هارگریوز-سامانی، روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده، روش هارگریوز اصلاح شده بر اساس داده‌های لایسیمتری به کمک روش رگرسیون و روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده که مجددا بر اساس داده‌های لایسیمتری به کمک روش رگرسیون اصلاح شده تخمین زده شد. نتایج حاصل با نتایج لایسیمتری بر اساس شاخص‌های R^2، RMSE و NRMSE مقایسه شدند. یافته‌های مطالعه نشان داد که روش‌های استفاده شده دارای NRMSE بالای ۳۰ درصد بوده و مناسب تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع نیستند. در ادامه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با دو مدل توسعه‌یافته بر اساس رگرسیون گام‌به‌گام به‌عنوان روش‌های آماری و روش سطح پاسخ به‌عنوان روش ریاضی با داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در داخل گلخانه تخمین زده شد. در رتبه اول، روش سطح پاسخ و بعد از آن روش‌های توسعه‌یافته آماری نتایج مناسب‌تری بر اساس شاخص‌های خطا در مقایسه با سایر روش‌ها داشتند. در روش سطح پاسخ مقادیر شاخص‌های R^2، RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۱۳ میلی‌متر در روز و ۱۶/۴ درصد بودند. مقادیر شاخص‌های R^2، RMSE و NRMSE برای دو روش رگرسیون گام‌به‌گام به ترتیب حداقل ۰/۸۴، ۰/۱۵ میلی‌متر در روز و ۱۸ درصد بودند. از روش‌های توسعه داده شده در پژوهش حاضر در تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق گیاه مرجع با تعداد داده ورودی کم و زودیافت می‌توان در مدیریت صحیح آبیاری گلخانه استفاده کرد و ضمن جلوگیری از هدررفت آب، بهره‌وری آب و سایر نهاده‌های تولید را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: چمن، رگرسیون، روش سطح پاسخ، نیاز آبی گیاه

مقدمه

کشور ما به‌دلیل قرار گرفتن در یک اقلیم خشک با محدودیت منابع آب روبروست. سهم بالایی از منابع آب کشور در بخش کشاورزی با شیوه‌های سنتی آبیاری هدر می‌رود (امیدی و همکاران، ۱۳۹۶). استفاده از اصول علمی در آبیاری موجب کاهش هدررفت آب خواهد شد. یکی از مسائل مهم در آبیاری، محاسبه درست مقدار آب آبیاری است که منوط به تعیین نیاز آبی گیاهان است. تخمین درست تبخیر-تعرق گیاه مرجع در بسیاری مسائل مانند بیلان آب، طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های آبیاری، شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد گیاه، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب الزامی است (نادریان‌فر و همکاران، ۱۳۹۹؛ جوزی و همکاران، ۱۴۰۲). برای تعیین درست تبخیر-تعرق واقعی گیاهان مختلف از حاصل‌ضرب ضریب گیاهی در تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود. تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع از طریق کاشت چمن و اندازه‌گیری تبخیر-تعرق آن یا با استفاده از فرمول‌های تجربی انجام می‌شود. تعیین مقدار تبخیر-تعرق

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوزه دریای کاسپین، رشت، ایران
۴- عضو هیات علمی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۵- دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: khaledian@guilan.ac.ir

گیاهان در هر منطقه برای مدیریت صحیح و برنامه‌ریزی زمان و مقدار آبیاری ضروریست (پوریزدان‌خواه و همکاران، ۱۳۹۷). نیاز آبی گیاه شامل مجموعه‌ای بسیار پیچیده از فرآیندهایی است که خود تحت تأثیر عواملی هستند که این عوامل وابسته به موقعیت مکانی است (Maina et al., 2014). از جمله عوامل هواشناسی تأثیرگذار بر تبخیر–تعرق می‌توان به دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشید اشاره کرد. تاکنون روش‌های زیادی برای محاسبه تبخیر–تعرق بر اساس داده‌های هواشناسی ارائه شده‌اند که بسیاری از آن‌ها وابستگی مکانی دارند، چرا که داده‌های هواشناسی متفاوتی را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و بر اساس فرضیات متنوعی، توسعه یافته‌اند (Fernandez et al., 2010; Baudoin et al., 2013). انتخاب بهترین روش از طریق مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده با روش‌های مستقیم نظیر لایسیمتر و کرت کنترل شده، انجام می‌شود. امروزه از لایسیمترهای وزنی برای اندازه‌گیری مستقیم تبخیر–تعرق گیاهی استفاده می‌شود. لایسیمترهای متنوعی از نظر اندازه، فناوری و ویژگی‌های کف آن وجود دارد و هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (Dolezal et al., 2018). میکرولایسیمترها با گنجایش خاک کمتر و هزینه پایین‌تر نسبت به لایسیمترهای بزرگ، مناسب برای کاربرد در گلخانه هستند.

تعیین نیاز آبی و در پی آن تأمین نیاز آبیاری گیاهان، از اهمیت بالایی در مدیریت آب کشاورزی در مقیاس منطقه‌ای دارد (Pereira et al., 2020). روش استاندارد تعیین تبخیر–تعرق گیاه در نشریه فائو ۵۶ آمده است که شامل محاسبه تبخیر–تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی است (Allen et al., 1998). روش پنمن–مانتث فائو یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر–تعرق گیاه مرجع است که توسط فائو توصیه شده است (جوزی و همکاران، ۱۴۰۲). درستی برآوردهای این روش در بسیاری از نقاط دنیا با اقلیم‌های متنوع تأیید شده است (Mandal and Chanda, 2023; Hunasigi et al., 2023; Zhao et al., 2010). به همین دلیل بسیاری از روش‌های تجربی دیگر بر اساس آن واسنجی شده‌اند (فولادمند، ۱۳۸۹). مشکل اصلی روش پنمن–مانتث فائو نیاز به داده‌های ورودی زیاد است که در برخی مناطق فراهم نیست. به همین دلیل در برخی مناطق استفاده از روش‌های تجربی با داده‌های ورودی کمتر، مدنظر قرار می‌گیرد. روش هارگریوز روش ساده‌ای است که نیاز به داده‌های ورودی کمی دارد و در کنار نسخه اصلاح شده آن توسط سامانی، در مواقعی که امکان استفاده از روش پنمن فراهم نیست توسط فائو توصیه شده است (Allen et al., 1998). در روش هارگریوز از میانگین، کمینه و بیشینه دمای هوا و تابش فرازمینی برای محاسبه تبخیر–تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ایران کشوری پهناور با اقلیم‌های متنوعی است، بایستی برای هر منطقه روش یا روش‌های مناسب تخمین تبخیر–تعرق توسعه یافته و یا از بین روش‌های موجود بهترین روش‌ها تعیین شوند. فرمول‌های تجربی عموماً بر اساس داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی به محاسبه تبخیر–تعرق گیاه مرجع می‌پردازند. اما در گلخانه‌ها به‌دلیل بسته بودن فضای آن نمی‌توان از داده‌های هواشناسی ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استفاده کرد، بنابراین بایستی روش‌های جدید توسعه داد یا فرمول‌های موجود را برای شرایط داخل گلخانه اصلاح کرد و پارامترهای هواشناسی را در داخل گلخانه اندازه‌گیری کرد. در این راستا مطالعات ارزشمندی برای فضای باز صورت گرفته است (زارع‌ابیانه و همکاران، ۱۳۹۳؛ پوریزدان‌خواه و همکاران، ۱۳۹۷؛ مربوطه و همکاران، ۱۳۹۷؛ طافی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رمضانی‌اعتدالی و صفری، ۱۴۰۲؛ دین‌پژوه و همکاران، ۱۴۰۲)، اما در خصوص معرفی روش‌های مناسب در گلخانه، مطالعات کمتری انجام شده است (امیدی و همکاران، ۱۳۹۶).

در تمامی روش‌های تجربی تخمین تبخیر–تعرق، با توجه به ماهیت تجربی آن‌ها و به‌دلیل شرایط خاص اقلیمی و جغرافیایی منطقه‌ای که در آن توسعه یافته‌اند و یا با هدف ساده‌سازی و تطبیق با نتایج مشاهده‌ای، ضرایب و توان‌هایی به‌کار رفته‌اند که وابستگی مکانی دارند (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). بنابراین کاربرد آن‌ها در سایر مناطق موجب کاهش دقت نتایج خواهد شد. در چنین مواردی می‌توان با انجام مطالعات لایسیمتری اقدام به اصلاح این روش‌ها نمود و یا روش‌هایی که دقت کمتری دارند را با روش‌هایی که در منطقه مورد مطالعه تأیید شده‌اند، صحت‌سنجی و اصلاح کرد. موسوی بیگی و همکاران (۱۳۸۸) اقدام به اصلاح روش پنمن–مانتث فائو در استان خراسان رضوی براساس داده‌های لایسیمتری نمودند. شهابی‌فر و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای از برخی روش‌های تجربی برآورد تبخیر–تعرق گیاه مرجع در مقایسه با داده‌های لایسیمتری کشت چمن در گلخانه استفاده کردند. در این مطالعه روش پنمن–مانتیث فائو نتایج مناسبی ارائه کرد. عصاری و همکاران (۱۳۸۸) تبخیر–تعرق واقعی چمن در گلخانه را با شبکه عصبی مصنوعی تخمین زدند و نتایج مناسبی به‌دست آوردند. نتایج مطالعه ویارئال گوررو و همکاران نشان داد که از بین سه روش استانگیلینی، پنمن–مانتیث و تاکاکورا در گلخانه مجهز به مه‌پاش و دارای تهویه طبیعی، روش استانگیلینی بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای داشته است (Villarreal-Guerrero et al., 2012).

کم‌آبی و خشکسالی در سرتاسر جهان در حال گسترش است، علاوه بر آن تغییر اقلیم موجب تشدید در کم‌آبی و بروز بیشتر پدیده‌های نادر مانند مقادیر کم باران، طولانی شدن دوره‌های خشکی و دمای بالا می‌شود (Pascual-Seva and Pascual, 2021). بنابراین بایستی به سمت راهکارهایی برای کاهش مصرف آب حرکت کرد. گسترش کشت گلخانه‌ای پتانسیل کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب آبیاری را دارد. امروزه به‌دلیل کمبود آب، زمین، تنوع‌طلبی

مردم، تولید خارج از فصل محصول و امکان کسب درآمد بالاتر، کشت گیاهان گلخانه‌ای رونق گرفته است (امیدی و همکاران، ۱۳۹۶). در کشت گلخانه‌ای تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان برای داشتن یک مدیریت کارآمد آبیاری در شرایط کنترل شده ضروریست، چرا که آبیاری روی کمیت و کیفیت محصول اثر انکارناپذیری دارد. با توجه به نبود روش مناسب برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در گلخانه و نقش اساسی آن در مدیریت آبیاری، در مطالعه حاضر اقدام به کشت لایسیمتری چمن در داخل گلخانه و اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق گیاه مرجع شد و در ادامه بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده، نتایج روش پنمن-مانتیث بر اساس نشریه فائو ۵۶ و همچنین فائو ۲۱۷، روش هارگریوز، روش هارگریوز-سامانی و نسخه‌های اصلاح شده آن ارزیابی شدند. با استفاده از روش حداقل مربعات خطا روش هارگریوز و نسخه‌های اصلاح شده آن اصلاح مجدد و ارزیابی شدند. در انتها با استفاده از روش رگرسیون گام به گام به‌عنوان روش آماری، دو مدل ساده و کاربردی برای برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در داخل گلخانه توسعه داده شد. همچنین برای اولین بار از روش سطح پاسخ به‌عنوان یک روش ریاضی برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه استفاده شد.

مواد و روش‌ها

شهر میانادشت (ایمان شهر) استان اصفهان در موقعیت جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این شهر از تجمیع شهرهای اشترجان و میانادشت از جمله شهرهای بخش مرکزی شهرستان فلاورجان، در فاصله ۲۰ کیلومتری شهرستان اصفهان قرار دارد (شکل ۱). شهر میانادشت از شرق به مراتع سهروفیروزان، از غرب به محله میانادشت، از جنوب به کوه‌های زاگرس و مرز زرین شهر و از شمال به روستای مهرنجان و قسمتی به سهروفیروزان منتهی می‌شود. شغل اکثر مردم کشاورزی است و در مجاورت رودخانه زاینده‌رود قرار دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۹).

با توجه به بسته بودن فضای گلخانه و عدم امکان تعمیم داده-های ایستگاه هواشناسی به فضای داخلی آن، داده‌های هواشناسی شامل دمای متوسط، کمینه و بیشینه و همچنین رطوبت نسبی هوا در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در داخل گلخانه و نزدیک میکرولایسیمترها اندازه‌گیری شدند (شکل ۲). شاخص‌های آماری پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آمده است.

شکل ۱- موقعیت استان اصفهان روی نقشه کشور و موقعیت فلاورجان روی نقشه استان اصفهان

جدول ۱- میانگین داده‌های هواشناسی ثبت شده در داخل گلخانه

	دمای حداکثر (°C)	دمای حداقل (°C)	دمای میانگین (°C)	رطوبت نسبی (%)
میانگین	۲۸/۸	۱۱/۱	۱۹/۹	۷۳/۲
کمینه	۲۰	۳	۱۴	۴۳
بیشینه	۴۰	۱۹	۲۸/۵	۹۱

شکل ۲- نحوه استقرار میکرولایسیمتر در گلخانه و نمای فوقانی و جانبی بیرون گلخانه

برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه، از روش پنمن-مانتث فائو استفاده شد (Allen et al., 1998). رابطه (۱) برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن-مانتیث استفاده می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (۱)$$

در این رابطه: ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)، Rn تابش خالص ورودی به سطح ($MJ/m^2/day$)، U2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s)، T میانگین دمای هوا (°C)، es فشار بخار اشباع (kPa)، ea فشار بخار واقعی هوا (kPa) و Δ شیب منحنی فشار بخار (kPa/°C) هستند. Δ از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\Delta = \frac{2504\exp[17.2\,T/(T+237.3)]}{(T+237.3)^2} \quad (۲)$$

روش هارگریوز (Hargreaves and Allen, 2003) از رابطه (۳) برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می‌کند:

$$ET_0=0.0023\times(T+17.8)\times(Tmax-Tmin)^{0.5}\times Ra \quad (۳)$$

در این رابطه: ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)، Ra

تابش فرازمینی ($MJ/m^2/day$)، T، Tmax و Tmin به‌ترتیب میانگین، حداکثر و حداقل دمای روزانه (°C) می‌باشند.

روش هارگریوز-سامانی از رابطه (۴) برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می‌کند (Hargreaves and Samani, 1985). این روش نیاز به داده‌های کمی دارد (دما و تابش فرازمینی) که معمولا در گلخانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و رابطه ساده‌ای نیز دارد که توسط گلخانه‌داران بر خلاف روش‌های پیچیده نظیر پنمن-مانتیث قابل استفاده است.

$$ET_0=0.408\times0.0023\times(T+17.8)\times(Tmax-Tmin)^{0.5}\times Ra \quad (۴)$$

در این رابطه: ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/day)، Ra تابش فرازمینی ($MJ/m^2/day$)، T، Tmax و Tmin به‌ترتیب میانگین، حداکثر و حداقل دمای روزانه (°C)، 0.408 ضریب تبدیل واحد $MJ/m^2/day$ به mm/day می‌باشند.

سامانی با استفاده از داده‌های دما و تابش خورشیدی، ضریب اصلاحی برای روش هارگریوز-سامانی ارائه کرد که در رابطه (۵) نشان داده شده است (Samani, 2000):

$$ET_0=0.408\times0.0135\times KT\times(T+17.8)\times(Tmax-Tmin)^{0.5}\times Ra \quad (۵)$$

در رابطه (۴)، KT ضریب اصلاحی و تابعی درجه دو از تفاوت دمای حداقل و حداکثر است و از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$KT=0.00185\times(Tmax-Tmin)^2-0.0433\times(Tmax-Tmin)+0.4023 \quad (۶)$$

روابط بالا بر اساس داده‌های مشاهداتی میکرولایسیمتر و با کمک نرم‌افزار SPSS و با روش رگرسیون و روش حداقل مربعات خطا اصلاح شدند. همچنین با استفاده از روش رگرسیون دو مدل جدید توسعه داده شد.

در پژوهش حاضر از روش سطح پاسخ نیز کمک گرفته شد. در این روش ورودی‌ها شامل دمای بیشینه، دمای کمینه، رطوبت نسبی هوا و تابش فرازمینی در قالب متغیرهای مستقل x_1 تا x_4 و تبخیر-تعرق گیاه مرجع به‌عنوان متغیر وابسته y یا پاسخ در رابطه ۷ تعریف شد. در این روش بین متغیرهای مستقل و وابسته یکسری مدل‌های ریاضی مختلفی مانند خطی، پلی‌نومیال درجه دو، پلی‌نومیال درجه سه و غیره برقرار و ارزیابی می‌شود و بر اساس آماره‌های خطا بهترین مدل انتخاب می‌شود (Oehlert, 2000).

$$y=f(x_1, x_2, x_3, x_4)+\varepsilon \quad (۷)$$

در این رابطه: y متغیر وابسته یا پاسخ، f تابع عملکرد، x_1 تا x_4 متغیرهای مستقل و ε متغیر خطا است. برای ارزیابی روش‌های مورد استفاده برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقایسه با نتایج لایسیمتری، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد که در روابط ۸ تا ۱۰ نشان داده شده‌اند:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum(ET_{0L}-ET_{0C})^2}{n}} \quad (۸)$$

$$NRMSE=100\times\frac{RMSE}{\overline{ET_{0C}}} \quad (۹)$$

$$R^2=\frac{(\sum(ET_{0L}-\overline{ET_{0L}})(ET_{0C}-\overline{ET_{0C}}))^2}{\sum(ET_{0L}-\overline{ET_{0L}})\sum(ET_{0C}-\overline{ET_{0C}})} \quad (۱۰)$$

در روابط ۸ تا ۱۰، ET_{0C} و $\overline{ET_{0C}}$ به‌ترتیب تبخیر-تعرق گیاه مرجع محاسبه شده و میانگین آن هستند. ET_{0L} و $\overline{ET_{0L}}$ به‌ترتیب تبخیر-تعرق گیاه مرجع اندازه‌گیری شده و میانگین آن با استفاده از میکرولایسیمتر هستند و n تعداد کل داده‌هاست. R^2 نشان دهنده همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده (ضریب تبیین) است. کمینه مقدار آن صفر و بیشینه آن برابر یک است، هر چه مقدار این آماره به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر است. آماره RMSE تفاوت میان داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است. هر چه مقدار این آماره کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت روش مورد بررسی بالاتر است. اگر مقدار آماره NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، رتبه آن روش عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، رتبه خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، رتبه متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد، دارای رتبه ضعیف است (Khaledian et al., 2009). این پژوهش در یک گلخانه با داربست فلزی و پوشش پلاستیکی با ارتفاع تاج ۴/۵ متر واقع در شهرستان میانداشت در استان اصفهان انجام شد. مساحت گلخانه در مجموع ۴۵۰۰ متر مربع و دارای دو بخش تفکیک شده با یک راهروی میانی بود. مساحت هر بخش ۲۰۲۵ متر مربع با ابعاد ۴۵×۴۵ متر بود. گلخانه صرفا مجهز به یک سیستم گرمایشی و تامین نور بود. همچنین سامانه سرمایشی پد و فن با توجه به فصل‌های مورد مطالعه، خاموش بود. این مطالعه برای تعیین نیاز آبی چمن، در پاییز و زمستان سال ۱۳۹۹ و بهار ۱۴۰۰ انجام شد. به‌منظور انجام آزمایش سه میکرولایسیمتر از جنس PVC، با قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر تهیه شدند. بسترکشت انتخاب شده در این مرحله از آزمایش، ترکیب کوکوپیت و پرلیت با نسبت ۱:۱ بود. برای اندازه‌گیری وزن اشباع هر بستر، ابتدا وزن خالی هر میکرولایسیمتر اندازه‌گیری شد و سپس بستر تهیه شده با کمک یک پیمانه به هر میکرولایسیمتر اضافه شد تا هر کدام میزان بستر یکسانی داشته باشند. برای تعیین وزن هر میکرولایسیمتر در شرایط ظرفیت مزرعه، هر سه میکرولایسیمتر به مدت ۴۸ ساعت در ظروف حاوی آب قرار گرفتند. به‌منظور جلوگیری از تبخیر آب، روی سطح هر میکرولایسیمتر یک پوشش پلاستیک گذاشته شد. بعد از گذشت ۴۸ ساعت، میکرولایسیمترها از آب خارج شده و اجازه داده شد تا آب ثقلی به شکل زه‌آب خارج شود. بعد از قطع خروج آب، هر گلدان با کمک یک

ترازوی با دقت یک گرم وزن شد و به‌عنوان وزن میکرولایسیمتر در حد ظرفیت مزرعه تا پایان آزمایش انتخاب شد و از وزن چمن صرفنظر شد. سپس در هر سه عدد آن‌ها چمن اسپورت کشت گردید تا به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متری برسند. پس از آماده شدن چمن‌ها، از دماسنج ماکسیمم/ مینیمم و دماسنج تر/خشک (ساخت شرکت FDA آلمان) برای اندازه‌گیری دما و رطوبت در وسط گلخانه و نزدیک میکرولایسیمترها استفاده شد. هر روز کاهش وزن چمن‌ها با کمک ترازوی با دقت یک گرم و ظرفیت ۳۰ کیلوگرم یادداشت گردید و به میزان کاهش وزن، مجددا آبیاری صورت گرفت تا همواره میکرولایسیمترها در حالت ظرفیت مزرعه باقی بمانند. در صورت وجود زه‌آب در زیر میکرولایسیمترها، وزن آب اندازه‌گیری شد و از میزان آب روز قبل کاسته شد. سپس تبخیر-تعرق چمن به‌عنوان تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) لحاظ شد.

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های چمن کشت شده در میکرولایسیمتر در داخل گلخانه و روش پنمن-مانتیث فائو با استفاده از دمای حداقل و حداکثر اندازه‌گیری شده در داخل گلخانه برای ماه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج داده‌های لایسیمتری نشان داد که بیشترین و کمترین تبخیر-تعرق گیاه چمن به‌ترتیب ۱/۷۱ و ۰/۳۳ میلی‌متر در روز و به‌ترتیب در ماه‌های فروردین و آذر بود. تبخیر-تعرق گیاه در داخل گلخانه کمتر از فضای باز است (Fazlil Ilahi, 2009). دلیل این امر کاهش قابل ملاحظه دو داده ورودی اثر گذار بر تبخیر-تعرق در داخل گلخانه یعنی تشعشع و سرعت باد است. تشعشع در داخل گلخانه بسته به پوشش آن حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد (Fernandez et al., 2010; Baudoin et al., 2013). تیتل و همکاران سرعت باد را در داخل و بیرون گلخانه اندازه‌گیری کردند و مشاهده کردند که سرعت باد در داخل گلخانه کاهش زیادی دارد (Teitel et al., 2008). سرعت باد در داخل گلخانه به حدود ۰/۳-۰/۱ متر بر ثانیه می‌رسد (Fernandez et al., 2010; Baudoin et al., 2013). بنابراین نیاز به روشی هست که بر اساس داده‌های محدود هواشناسی ثبت شده در فضای داخل گلخانه، برآورد مناسبی را از تبخیر-تعرق گیاه مرجع انجام دهد. در شرایط محدودیت داده هواشناسی می‌توان از نرم‌افزار کراپ‌وات با ورودی صرفاً دما و روش هارگریوز و فرمول‌های تصحیح شده آن استفاده کرد (Allen et al., 1998). نتایج محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات که مبتنی بر روش پنمن-مانتیث فائو هست و با داده‌های هواشناسی ثبت شده در داخل گلخانه در جدول ۲ آمده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نرم‌افزار کراپ‌وات علیرغم استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در داخل گلخانه نتوانسته است با دقت مناسبی تبخیر-تعرق گیاه مرجع را برآورد کند. کمترین و بیشترین مقدار تخمین زده شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات ۲/۳۴ و ۵/۸۴ میلی‌متر در روز بود که با مقادیر مشاهده‌ای اختلاف زیادی دارد. هر چند ضریب تبیین بیانگر تعقیب مناسب روند تغییرات تبخیر-تعرق گیاه مرجع در طول فصل است (R^2=0.80)، ولی RMSE و NRMSE بیانگر اختلاف مقادیر برآوردی و مشاهده شده است. بنابراین استفاده از این روش توصیه نمی‌شود. دلیل تخمین نامناسب تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط این روش، استفاده از صرفا یک داده ورودی برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع یعنی دما در داخل گلخانه است و نقش سایر عوامل موثر بر تبخیر-تعرق نظیر رطوبت نسبی و تشعشع در نظر گرفته نشده است (Fernandez et al., 2010). حال آنکه، رطوبت نسبی بر میزان تبخیر-تعرق تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.

جدول ۲- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات مبتنی بر روش پنمن-مانتیث فائو ٥٦

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از کراپ‌وات (mm/day)
آذر	۰/۳۳	۲/۳۴
دی	۰/۴۲	۲/۷۳
بهمن	۰/۷۱	۳/۳۱
اسفند	۱/۳۹	۴/۳۷
فروردین	۱/۷۱	۵/۸۴
R^2	-	۰/۸۰
RMSE(mm/day)	-	۲/۷۰
NRMSE(%)	-	۳۳۲
رتبه	-	ضعیف

جدول ۳- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات مبتنی بر روش پنمن-مانتیث فائو ۲۱۷

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از کراپ‌وات براساس نشریه فائو ۲۱۷(mm/day)
آذر	۰/۳۳	۱/۰۷
دی	۰/۴۲	۱/۳۴
بهمن	۰/۷۱	۱/۸۸
اسفند	۱/۳۹	۳/۰۹
فروردین	۱/۷۱	۳/۴۳
R^2	-	۰/۷۹
RMSE(mm/day)	-	۱/۲۹
NRMSE(%)	-	۱۵۸
رتبه	-	ضعیف

با توجه به توصیه‌های نشریه ۲۱۷ فائو، مقادیر تشعشع داخل گلخانه از طریق کاهش ۴۰ درصدی مقادیر اندازه‌گیری شده در فضای باز تخمین زده شد. سرعت باد نیز طبق توصیه این نشریه به ۱/. متر بر ثانیه کاهش یافت (Fernandez et al., 2010; Baudoin et al., 2013). نتایج در جدول ۳ آمده است. علیرغم بهبود نتایج نسبت به حالتی که صرفا دما برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده شده، دقت آن بر اساس شاخص‌های خطا ضعیف است (NRMSE>30%). آلن و همکاران کاربرد روش هارگریوز را به‌عنوان جایگزینی برای روش پنمن-مانتیث فائو در صورت کمبود داده توصیه کرده‌اند (Allen et al., 1998).

نتایج محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش هارگریوز و نسخه‌های اصلاح شده آن در جدول ۴ آمده‌اند. شاخص‌های خطا نشان دهنده عملکرد ضعیف هر سه روش در مقایسه با مقادیر مشاهده‌ای تبخیر-تعرق گیاه مرجع است. علیرغم استفاده از داده‌های هواشناسی ثبت شده در داخل گلخانه، این روش‌ها نتوانستند برآورد مناسبی از تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مقایسه با داده‌های لایسیمتری بر اساس شاخص‌های خطا ارائه دهند (NRMSE>30%) و رتبه ضعیف را کسب کردند. هر چند که مقادیر شاخص‌های خطا (RMSE و NRMSE) در مورد روش هارگریوز-سامانی و هارگریوز-سامانی اصلاح شده بهتر از روش هارگریوز بود که با نتایج جوزی و همکاران (۱۴۰۲) همراستا است. روش هارگریوز تخمین مناسبی از تبخیر-تعرق گیاه مرجع برای دوره‌های پنج روزه و بیشتر ارائه می‌دهد (Hargreaves, 1989; Hargreaves and Allen, 2003; Berti et al., 2014)، ولی معمولا نیاز به تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در دوره‌های کوتاه‌تری وجود دارد. عدم دقت مناسب این روش در مطالعات متعددی مشاهده شده است (Temesgen et al., 2005; Trajkovic, 2007; Sivaprakasam et al., 2011). اصولا این روش‌ها برای فضای باز توسعه یافته‌اند و برای فضای بسته گلخانه مناسب نیستند.

جدول ٤- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با روش هارگریوز، هارگریوز-سامانی و هارگریوز-سامانی اصلاح شده

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز-سامانی (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده (mm/day)
آذر	۰/۳۳	۲/۴۲	۰/۹۹	۱/۲
دی	۰/۴۲	۲/۸۷	۱/۱۷	۱/۸۸
بهمن	۰/۷۱	۳/۴۵	۱/۴۱	۱/۸۶
اسفند	۱/۳۹	۴/۴۵	۱/۸۲	۲/۶۳
فروردین	۱/۷۱	۵/۷۰	۲/۳۳	۴/۱۰
R^2	-	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۴۰
RMSE(mm/day)	-	۲/۸۰	۰/۶۸	۱/۵۶
NRMSE(%)	-	۳۴۵	۸۴	۱۹۳
رتبه	-	ضعیف	ضعیف	ضعیف

با توجه به نتایج فوق، واسنجی روش هارگریوز و نسخه‌های اصلاح شده آن با داده‌های اندازه‌گیری شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع ضروری است (Droogers and Allen, 2002; Vanderlinden et al., 2004; Berti et al., 2014). جدول ۵ مقادیر محاسبه شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های تصحیح شده هارگریوز و هارگریوز-سامانی اصلاح شده در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری توسط لایسیمتر را نشان می‌دهد. علیرغم استفاده از داده‌های هواشناسی داخل گلخانه و نیز اصلاح این روش‌ها بر اساس داده‌های لایسیمتری، شاخص‌های خطا نشان دهنده عدم موفقیت روش‌های تصحیح شده برای برآورد مناسب تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه هستند. وجود خرداقلیم متفاوت از فضای باز (Fernandez et al., 2010; Baudoin et al., 2013) موجب عدم موفقیت واسنجی روش هارگریوز و نسخه‌های اصلاحی آن شد. بنابراین بهتر است روش یا روش‌های جدیدی برای گلخانه توسعه یابد. در این راستا، در مطالعه حاضر روابط ۱۱ و ۱۲ به‌عنوان مدل اول و دوم توسعه یافته از طریق رگرسیون گام به گام و با استفاده از داده‌های هواشناسی داخل گلخانه و داده‌های میکرولایسیمتر چمن پیشنهاد شدند. همبستگی بین تابش فرازمینی و دمای بیشینه با تبخیر-تعرق گیاه مرجع مشاهده‌ای به ترتیب r=0.92 و r=0.67 بالاتر از همبستگی دمای کمینه و رطوبت نسبی با تبخیر-تعرق گیاه مرجع مشاهده‌ای می‌باشد. بنابراین روش رگرسیون گام به گام دو مدل با لحاظ کردن تابش فرازمینی به تنهایی و تابش فرازمینی و دمای بیشینه ارائه کرد:

$$ET_0 = -1.588 + 0.251\ Ra \quad (۱۱)$$

$$ET_0 = -1.876 + 0.229\ Ra + 0.017\ Tmax \quad (۱۲)$$

جدول ۵- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با استفاده از روش هارگریوز اصلاح شده

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز اصلاح شده (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده مجددا تصحیح شده (mm/day)
آذر	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۵۸
دی	۰/۴۲	۰/۷۷	۰/۷۶
بهمن	۰/۷۱	۰/۹۴	۰/۸۴
اسفند	۱/۳۹	۱/۲۱	۰/۹۸
فروردین	۱/۷۱	۱/۵۱	۱/۲۱
R^2	-	۰/۸۱	۰/۳۵
RMSE(mm/day)	-	۰/۳۳	۰/۳۳
NRMSE(%)	-	۴۱	۳۶
رتبه	-	ضعیف	ضعیف

جدول ۶ نتایج محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های توسعه یافته در مطالعه حاضر از طریق رگرسیون گام به گام را نشان می‌دهد. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تابش فرازمینی و دمای حداکثر وجود دارد. استفاده از تابش فرازمینی به تنهایی و یا به همراه دمای بیشینه، به‌خوبی باعث تخمین دقیق‌تر تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه در مقایسه با داده‌های لایسیمتری شده است. ضریب تبیین برای مدل اول و دوم به‌ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۸۵ شد که نشان دهنده همبستگی مناسب داده‌های اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده از طریق مدل‌های توسعه یافته است. مقدار شاخص خطای RMSE برای هر دو مدل ۰/۱۵ میلی‌متر در روز است و شاخص خطای NRMSE رتبه خوب را کسب کرده که نسبت به تمام روش‌های قبلی بررسی شده وضعیت مناسب‌تری دارد. بنابراین توصیه می‌شود از فرآیند ارائه شده در این مطالعه برای توسعه روش محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانه استفاده شود، چرا که گلخانه‌ها دارای تنوع بالایی در شرایط ویژه خود هستند (Baudoin et al., 2013) و امکان ارائه یک روش برای همه این شرایط مقدور نیست.

رابطه ۱۳ با استفاده از روش سطح پاسخ بین تبخیر-تعرق گیاه مرجع و پارامترهای هواشناسی دمای بیشینه، دمای کمینه، رطوبت نسبی و تابش فرازمینی تعیین شد. رابطه به‌دست آمده قدری طولانی است، اما با استفاده از فرمول‌نویسی در نرم‌افزار اکسل و یا برنامه-نویسی رایانه‌ای به‌راحتی قابل استفاده است. این رابطه توانست بهترین تخمین از تبخیر-تعرق گیاه مرجع را در بین روش‌های مورد استفاده در این مطالعه انجام دهد. نتایج در جدول ۷ ارائه شده‌اند. بالاترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۵) و پایین‌ترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا (۰/۱۳ میلی‌متر در روز) در بین روش‌های مختلف در روش سطح پاسخ به‌دست آمد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطا در رده خوب قرار گرفت، هر چند کمترین مقدار را در بین روش-های مورد مطالعه داشت (۱۶/۴ درصد). سایر پژوهشگران نیز نتایج مناسبی با این روش ریاضی در مطالعات پیشین در حوزه‌های

مطالعاتی دیگر به‌دست آوردند که نشان می‌دهد روش سطح پاسخ در ابزاری مناسب است (شیرازی و همکاران، ۱۳۹۹؛ حسینی، ۱۴۰۲). مطالعه حاضر برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در داخل گلخانـه،

جدول ٦- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با استفاده از مدل‌های توسعه داده شده

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مدل اول (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مدل دوم (mm/day)
آذر	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۲۹
دی	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲
بهمن	۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۷۷
اسفند	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۳۳
فروردین	۱/۷۱	۱/۵۷	۱/۶۲
R^2	-	۰/۸۴	۰/۸۵
RMSE(mm/day)	-	۰/۱۵	۰/۱۵
NRMSE(%)	-	۱۸	۱۸
رتبه	-	خوب	خوب

مدل اول و دوم به‌ترتیب بر اساس روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه شده‌اند.

$$ET_0=\exp(-47.46314+1.61193\times Tmax-0.055772\times Tmin-0.026174\times RH+9.42289\times Ra+0.048938\times Tmax \times Tmin-0.015483\times Tmax\times RH-0.268777\times Tmax\times Ra-0.016779\times Tmin\times RH-0.132765\times Tmin\times Ra+ 0.048098\times RH\times Ra-0.002711\times Tmax^2+0.056421\times Tmin^2+0.001270\times RH^2-0.594895\times Ra^2+ 0.000031\times Tmax\times Tmin\times RH-0.00111\times Tmax\times Tmin\times Ra+0.000863\times Tmax\times RH \times Ra+0.00066\times Tmin \times RH\times Ra-5.62713e-6\times Tmax^2\times Tmin -0.000179\times Tmax^2\times RH-0.000087\times Tmax^2\times Ra-0.001751\times Tmax\times Tmin^2-0.000124\times Tmax\times RH^2+0.011034\times Tmax\times Ra^2-0.000168\times Tmin^2\times RH-0.003118\times Tmin^2\times Ra+0.000084\times Tmin\times Ra^2+0.009673\times Tmin\times Ra^2-0.000359\times RH^2\times Ra-0.001388\times RH\times Ra^2+0.000203\times Tmax^3+ 0.001038\times Tmin^3-.000010\times RH^3+0.007724\times Ra^3 \quad (۱۳)$$

جدول ۷- مقایسه ET_0 اندازه‌گیری شده با میکرولایسیمتر و محاسبه شده با استفاده از روش سطح پاسخ

	تبخیر-تعرق گیاه چمن (mm/day)	تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش سطح پاسخ (mm/day)
آذر	۰/۳۳	۰/۳۶
دی	۰/۴۲	۰/۴۹
بهمن	۰/۷۱	۰/۸۰
اسفند	۱/۳۹	۱/۳۹
فروردین	۱/۷۱	۱/۹۴
R^2	-	۰/۹۵
RMSE(mm/day)	-	۰/۱۳
NRMSE(%)	-	۱۶/۴
رتبه	-	خوب

نتیجه‌گیری

به‌منظور مدیریت مناسب آبیاری در گلخانه و کاهش مصـرف آب، نیاز به تعیین دقیق نیاز آبی گیاه هست. تخمین صحیح تبخیـر-تعـرق گیاه مرجع شرط لازم برای تعیین دقیق نیاز آبی است. در اکثر روش-های تجربی موجود با استفاده از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در فضای باز اقدام به تخمین تبخیر-تعرق گیـاه مرجـع مـی‌کننـد. در صورتی که فضای بسته گلخانه دارای شرایط ویژه‌ای است و نمی‌توان داده‌های هواشناسی موجود را برای آن در نظر گرفت. بـرای مـدیریت بهتر گلخانه برخی عوامل هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند که می‌توان از این داده‌ها برای تخمین تبخیر-تعـرق گیـاه مرجـع اسـتفاده کـرد. بسیاری از روش‌های تجربی موجود بر اساس فرضیاتی توسعه یافته‌اند که متناسب با فضای باز هستند. در مطالعـه حاضـر، ابتـدا روش‌هـای توصیه شده توسط فائو ۵۶ بـر اسـاس شـاخص‌هـای R^2، RMSE و NRMSE ارزیابی شدند، اما نتایج نشان دادند که تبخیر-تعـرق گیـاه

مرجع در مقایسه با داده‌های لایسیمتری با دقت مناسبی برآورد نشدند. روش پنمن-مانتیث، بر اساس توصیه‌های نشریه فائو ۲۱۷ اصلاح شد ولی مجددا دقت نتایج مناسب نبود. نتایج روش هارگریوز و نسخه‌های اصلاح شده آن در مقایسه با داده‌های لایسیمتری ارزیابی شد و با توجه به تفاوت نتایج با داده‌های مشاهده‌ای، ضرورت اصلاح روش‌ها یا توسعه روش جدید مشخص شد. در ادامه نیز علیرغم اصلاح روش‌ها بر اساس داده‌های هواشناسی و روش حداقل مربعات خطا، نتایج مناسبی حاصل نشد. بنابراین، توسعه روش‌های مناسب فضای گلخانه با استفاده از روش رگرسیون گام به گام و روش سطح پاسخ با داده‌های هواشناسی ثبت شده در داخل گلخانه و در مقایسه با داده‌های لایسیمتر مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که در درجه اول روش سطح پاسخ (شاخص‌های R^2، RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۱۳ میلی‌متر در روز و ۱۶/۴ درصد بودند) و در درجه دوم مدل‌های توسعه یافته آماری (شاخص‌های R^2، RMSE و NRMSE به ترتیب حداقل ۰/۸۴، ۰/۱۵ میلی‌متر در روز و ۱۸ درصد بودند) با دقت مناسب‌تری تبخیر-تعرق گیاه مرجع را برآورد می‌کنند و می‌توانند برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی گیاهان مختلف با لحاظ کردن ضریب گیاهی به‌کار روند. با توجه به نقش بالای پوشش گلخانه در کاهش تشعشع توصیه می‌شود که در مطالعات بعدی مقدار تشعشع در کنار اندازه‌گیری دمای حداقل و حداکثر در داخل گلخانه اندازه‌گیری شود. توسعه مدل‌های جدید تبخیر-تعرق گیاه مرجع که مستقل از روش‌های مناسب فضای باز هستند و با حداقل داده ورودی تخمین مناسبی از تبخیر-تعرق دارند، راهکاری مناسب برای مدیریت بهینه آبیاری گلخانه خواهد بود. توصیه می‌شود که در مطالعات آینده برای اندازه‌گیری تغییرات وزن لایسیمتر در طول دوره مطالعه از حس‌گرهای دیجیتال وزن استفاده شود تا از جابه‌جایی روزانه لایسیمترها جلوگیری شود و بتوان میکرولایسیمترهای بزرگ‌تری استفاده کرد.

منابع

امیدی، ا.، خالدیان، م.، حسن‌پور اصیل، م. و الفتی چیرانی، ج. ۱۳۹۶. برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی گل سوسن در شرایط کشت گلخانه‌ای در شهرستان رشت. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱(۶): ۱۱۲۰-۱۱۱۱.

پوریزدان‌خواه، ه.، خالدیان، م.، رضوی‌پور، ت. و رضایی، م. ۱۳۹۷. انتخاب مناسب‌ترین معادله‌های تجربی تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع و واسنجی ضرایب آن‌ها. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۱): ۲۰۸-۱۹۹.

جوزی، م.، ابراهیمی‌پاک، ن. و تافته، آ. ۱۴۰۲. برآورد تبخیرتعرق گیاه مرجع با روش‌های هارگریوز سامانی و هارگریوز سامانی اصلاح شده و ارزیابی آن‌ها با استفاده از سامانه نیاز آبی گیاهان در استان کرمانشاه. هیدروژئولوژی. ۸(۱): ۱۶-۱.

جهانداری، ج.، حجازی، ر.، جوزی، س.ع. و مرادی، ع. ۱۴۰۱. اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی-زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم‌افزار InVEST. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. ۲(۴): ۱۰۶-۹۱.

حزباوی، ز.، پرچمی، ن.، علایی، ن. و بابایی، ل. ۱۳۹۹. ارزیابی و تحلیل وضعیت سلامت آبخیز کوزه تپراقی، استان اردبیل. حفاظت منابع آب و خاک. ۹(۳): ۱۲۱-۱۴۱.

حسینی، ی. ۱۴۰۲. ارزیابی روش‌های زمین‌آماری و سطح پاسخ در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک. تحقیقات کاربردی خاک. ۱۱(۴): ۷۶-۶۳.

دین‌پژوه، ی.، جهانبخش‌اصل، س. و موسوی‌جهانی، ل. ۱۴۰۲. ارزیابی کارایی سه مدل تجربی در تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه). دانش آب و خاک. ۳۳(۳): ۳۲-۲۱.

رمضانی‌اعتدالی، ه. و صفری، ف. ۱۴۰۲. ارزیابی اثر برخی از روش های دمایی و تشعشعی برآورد تبخیر-تعرق مرجع (ETo) بر تبخیر-تعرق واقعی و زیست توده ذرت. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷(۱): ۱۳-۱.

زارع‌ابیانه، ح.، سقائی، ص.، ارشادفتح، ف. و نوذری، ح. ۱۳۹۳. مدلسازی و پیش‌بینی تبخیرتعرق گیاه مرجع با سری زمانی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). هواشناسی کشاورزی. ۲(۱): ۵۶-۴۵.

سامانه نیاز آبی گیاهان کشور. ۱۴۰۳. موسسه تحقیقات خاک و آب. http://niwr.ir

شهابی‌فر، م.، عصاری، م.، کوچک‌زاده، م. و میرلطیفی، س.م. 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): ۲۰-۱۳.

شیرازی، م.، خادم‌الرسول، ع. و صفی‌الدین‌اردبیلی، س.م. ۱۳۹۹. ارزیابی روش‌های یادگیری نظارتی هوشمند و سطح پاسخ برای بهینه‌سازی عوامل موثر بر فرسایش خاک (مطالعه‌ی موردی حوزه آبخیز امامزاده عبدا... باغملک). تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۷): ۱۶۶۶-۱۶۵۳.

طافی، ش.، پیغان، خ.، باقری‌خانقاهی، م.، صالحی‌پور باورصاد، ت. و سلطانی‌محمدی، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی چهارده روش تخمین تبخیر-

تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: استان مازندران). آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۳): ۵۲۰-۵۱۰.

عصاری، م.، کوچک‌زاده، م.، شهابی‌فر، م. و بیات، ک. ۱۳۸۸. تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع درون گلخانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۶(۱): ۱۰۷-۱۲۷.

فولادمند، ح. ۱۳۸۹. پیش‌بینی ماهانه تبخیرتعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس. دانش آب و خاک. ۲۰(۴): ۱۶۹-۱۵۷.

مربوطه، ب.، اشرف زاده، ا.، وظیفه دوست، م. و خالدیان، م. ۱۳۹۷. مقایسهٔ تبخیر- تعرق واقعی محصول MOD16 و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAP مطالعهٔ موردی: مزارع تحت کشت ذرت در استان قزوین. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۲): ۶۲ تا ۷۱.

مرکز آمار ایران. ۱۳۹۹. سال‌نامه آماری کشور ۱۳۹۷. دفتر ریاست، روابط عمومی و همکاری‌های بین‌الملل، تهران. ۹۳۰ صفحه.

موسوی‌بایگی، م.، عرفانیان، م. و سرمد، م. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیروتعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و خاک. ۲۳(۱): ۹۹-۹۱.

نادریان‌فر، ا.، دلبری، م.، افراسیاب، پ. و کهخامقدم، پ. ۱۳۹۹. مقایسه فرآیندهای مختلف پهنه‌بندی تبخیرتعرق مرجع در ایران. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۳(۳): ۳۱-۱۷.

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.

Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S. and Qaryouti, M. 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops. FAO plant production and protection paper No 217. Rome, Italy.

Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F. and Borin, M. 2014. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in North-eastern Italy. Agricultural Water Management. 140: 20-25.

Cabello, V., Willaarts, B., Aguilar, M., and Del Moral, L., 2015. River basins as social-ecological systems: linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. Ecology and Society, 20(3): 1-20. doi:10.5751/ES-07778-200320.

Dolezal, F., Hernandez-Gomis, R., Matula, S., Gulamov, M., Mihalikova, M. and Khodjaev, S., 2018. Actual evapotranspiration of unirrigated grass in a smart field lysimeter. Vadose Zone Journal, 17: 170173.

Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome, Irrigation and Drainage. Paper. 24: 144 (revised version of the 1975 edition).

Droogers, P. and Allen, R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage System. 16: 33–45.

Fazlil Ilahi, W.F.B. 2009. Evapotranspiration models in greenhouse. MSc. Thesis. Wageningen University.

Fernandez, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., Lopez, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M. and Fereres, E. 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrigation Science. 28: 497-509.

Hargreaves, G.H., 1989. Accuracy of estimated reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 115(6): https://doi.org/10.1061

Hargreaves, G.H. and Allen, R.G., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 129(1): 53-63.

Hargreaves, G.L. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1.2: 96-99.

Hunasigi, P., Jedhe, S., Mane, M. and Patil-Shinde, V., 2023. Multilayer perceptron neural network based models for prediction of the rainfall and reference crop evapotranspiration for sub-humid climate of Dapoli, Ratnagiri District, India. Acta Ecologica Sinica. 43(1): 154-201.

Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P. and Rosique, P., 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: The case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. Agricultural Water Management. 96: 757-770.

Maina, M.M., Amin, M.S.M., Rowshon, M.d.K., Aimrun, W., Samsuzana, A.A. and Yazid, M.A., 2014. Effects of crop evapotranspiration estimation techniques and weather parameters on rice crop water requirement. Australian Journal of Crop Science. 8(4): 495-501.

Mandal, N. and Chanda, K., 2023. Performance of machine learning algorithms for multi-step ahead prediction of reference evapotranspiration across various agro-climatic zones and cropping seasons. Journal of Hydrology. 620: 129418.

Oehlert, W.G. 2000. Design and analysis of experiments: response surface design. New York: W.H. Freeman and Company.

2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 131 (1): 73–84.

Trajkovic, S. 2007. Hargreaves versus Penman–Monteith under humid conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. (1): 38–42.

Tsai, Y.W., Lin, J.Y., and Chen, Y.C., 2021. Establishment of the watershed health indicators and health check of reservoirs. Ecological Indicator. 127: 107779. doi:10.1016/j.ecolind.2021.107779

Vanderlinden, K., Giráldez, J.V. and Van Mervenne, M. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 129 (1): 53–63.

Villarreal-Guerreroa, F., Kaciraa, M., Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Linker, R. and Arbel, A., 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging. Scientia Horticulturae. 134: 210-221.

Zhao, W., Liu, B. and Zhang, Z., 2010. Water requirements of maize in the middle Heine River basin, China. Agricultural Water Management. 97(2): 215-223.

Pascual-Seva, N. and Pascual, B., 2021. Determination of crop coefficient for chufa crop (Cyperus esculentus L. var. sativus Boeck) for sustainable irrigation scheduling. Science of the Total Environment. 768: 144975.

Pereira, L.S., Paredes, P. and Jovanovic, N., 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. Agricultural Water Management. 241: 106357.

Samani, Z., 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 126(4): 81-104.

Sivaprakasam, S., Murugappan, A. and Mohan, S. 2011. Modified Hargreaves equation for estimation of ET_0 in a hot and humid location in Tamilnadu State, India. International Journal of Engineering Sciences and Technology. 3(1): 592–600.

Teitel. M., Liran, O., Tanny, J. and Barak, M. 2008. Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate. Biosystems Engineering. 101(1): 111-122.

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. and Frame, K.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 19, Jun.-Jul. 2025, p. 203-215

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۹، خرداد - تیر ۱۴۰۴، ص. ۲۱۵-۲۰۳

Estimation of Reference Evapotranspiration in Greenhouses Using Statistical and Mathematical Methods

K. Janghorban[1], J. Olfati[2], M. R. Khaledian[3,*], H. Hassanabadi[4], Y. Hamidoghli[5]
Recived: Dec.17, 2024 Accepted: Mar.07, 2025

Abstract

Saving water consumption and increasing water productivity in the agricultural sector, as the largest consumer of water, is essential. To achieve this goal, it is necessary to correctly calculate water requirements based on the reference evapotranspiration and the crop coefficient. The aim of the present study is to introduce a suitable method for calculating the reference evapotranspiration in greenhouse conditions. To achieve this goal, grass was cultivated in a microlysimeter inside the greenhouse and its water consumption was measured. At the same time, meteorological data inside the greenhouse including minimum and maximum temperatures and relative humidity were measured. The reference evapotranspiration was estimated using the FAO Penman-Monteith methods with the help of CropWat software based on the temperature inside the greenhouse and also based on the method of FAO report No 217, Hargreaves method, Hargreaves-Samani method, modified Hargreaves-Samani method, modified Hargreaves method based on lysimeteric data using the regression method, modified Hargreaves-Samani method which was again estimated based on lysimeteric data using the regression method. The results were compared with the lysimetric results based on R^2, RMSE, and NRMSE indices. The findings of the study showed that the methods used had NRMSE above 30% and were not suitable for estimating the reference evapotranspiration. Next, the reference evapotranspiration was estimated with two models developed based on stepwise regression as statistical methods and response surface method as mathematical method with meteorological data measured inside the greenhouse. In the first place, the response surface method and then the developed statistical methods had more appropriate results based on error indicators compared to other methods. In the response surface method, the values of R^2, RMSE, and NRMSE indices were 0.95, 0.13 mm/day, and 16.4%, respectively. The values of R^2, RMSE, and NRMSE indices for the two stepwise regression methods were at least 0.84, 0.15 mm/day, and 18%, respectively. The methods developed in the present study can be used to more accurately estimate the reference evapotranspiration with a few number of easily available input data and can be used to properly manage greenhouse irrigation, preventing water waste, and increasing the water productivity and other production inputs.

Keywords: Crop Water Requirement, Grass, Regression, Response Surface Method

1- Ph.D. Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2- Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran
3- Associate Professor, Department of Water Eng., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; P.O.BOX 41635-3756, Rasht, Iran, and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran
4- Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
5- Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran
(*- Corresponding Author Email: khaledian@guilan.ac.ir)