

Article Type

Review Article

مروری

نوع مقاله

Evapotranspiration Models in the Greenhouse Cultures: Data Analysis and Methods

O.Raja^{1*}, M.Parsinejad², A.Khorsand¹, B.Chehrenegar³

1- Researcher, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. 2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Ph.D. in Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore.

*Corresponding Author Email: omid.raja@ut.ac.ir

Received 03-02-2025
Revised 06-04-2025
Accepted 07-04-2025
Available Online 20-09-2025

مدل‌های تبخیر و تعرق در کشت‌های گلخانه‌ای: تحلیل داده‌ها و روش‌ها

امید رجا^{۱*}، مسعود پارسی‌نژاد^۲، افشین خورشند^۱، بهداد چهره‌نگار^۳

۱- پژوهشگر، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. ۲- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- دکتری مهندسی عمران، دانشگاه ملی سنگاپور، سنگاپور.

*رایانامه نویسنده مسئول: omid.raja@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۱/۱۵
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۱/۱۷
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۱/۱۸
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

Abstract

The accurate estimation of evapotranspiration in greenhouses is crucial for the optimal utilization of water resources and accurate irrigation scheduling, leading to improved water use efficiency. Various experimental and physical models are commonly used to estimate evapotranspiration based on climate data. In this review, the relationship between greenhouse technology and reference models for estimating evapotranspiration (ET_o) or crop evapotranspiration estimation models (ET_c) was analysed. The classification of greenhouses, the equipment commonly used, and the data collected for ET_o and ET_c measurements were also analysed in this study. In general, this study aimed to evaluate, and summarise the currently available ET_o and ET_c models used in different greenhouse categories, and to assess the degree of accuracy of the widely used models in estimating ET_o and ET_c . The results showed that the FAO-56 Penman-Monteith equation performed best among all models and can be considered as the best method for estimating ET_o in low-tech plastic greenhouses that are widely used in Iran. If greenhouse ET_c models become more user-friendly and accessible, the likelihood or chance of rapid dissemination and adoption of advances in ET_c estimation technology by a larger community of greenhouse crop producers will increase. The overview presented in this study highlighted the relationship between greenhouse technology and ET_o and ET_c models. Studies have also shown that the knowledge and methods available in ET_c measurements can positively increase the sustainability of greenhouse agriculture.

Keywords: Crop Evapotranspiration, FAO-56 Penman-Monteith, Reference Evapotranspiration, Technology, Water Requirement.

چکیده

برآورد دقیق تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها برای استفاده بهینه از منابع آب و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری که منجر به بهبود راندمان مصرف آب می‌شود، اهمیت بالایی دارد. مدل‌های تجربی و فیزیکی متعددی به طور گسترده برای تخمین نرخ تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های آب و هوایی استفاده می‌شوند. در این پژوهش ارتباط بین فناوری گلخانه‌ها و مدل‌های برآورد تبخیر تعرق مرجع (ET_o) یا مدل‌های برآورد تبخیر تعرق گیاه کشت شده (ET_c) تجزیه و تحلیل شدند. همچنین دسته‌بندی گلخانه‌ها، تجهیزاتاتی که معمولاً استفاده می‌شوند و داده‌های جمع‌آوری شده برای اندازه‌گیری‌های ET_o و ET_c در این پژوهش بررسی شدند. به طور کلی این بررسی با هدف ارزیابی و خلاصه کردن مدل‌های ET_o و ET_c موجود حال حاضر و مورد استفاده در دسته‌های مختلف گلخانه‌ای و ارزیابی سطح دقت مدل‌های پرکاربرد در برآورد ET_o و ET_c انجام شد. نتایج نشان داد معادله پنمن - مانتیث FAO 56 بهترین عملکرد را در بین همه مدل‌ها به همراه دارد و می‌توان آن را به عنوان بهترین روش برای تخمین ET_o در گلخانه‌های پلاستیکی با فناوری پایین دانست که به طور گسترده در ایران استفاده می‌شوند. اگر مدل‌های ET_c گلخانه‌ای کاربر پسندتر و در دسترس‌تر شوند، احتمال یا شانس انتشار سریع و پذیرش پیشرفت‌ها در فناوری تخمین ET_c توسط یک جامعه بزرگ‌تر تولیدکنندگان محصولات گلخانه‌ای، افزایش می‌یابد. در بررسی اجمالی ارائه شده در این مطالعه، ارتباط بین فناوری‌های گلخانه‌ای و مدل‌های ET_o و ET_c برجسته شدند. همچنین بررسی‌ها نشان داد، دانش و روش‌های موجود در اندازه‌گیری‌های ET_c می‌توانند به طور مطلوب پایداری کشاورزی گلخانه‌ای را افزایش دهند.

واژه‌های کلیدی: پنمن - مانتیث فائو ۵۶، تبخیر تعرق گیاه، تبخیر تعرق مرجع، فناوری، نیاز آبی.

How to cite this article:

Raja, O., Parsinejad, M., Khorsand, A., & Chehrenegar, B. (2025). Evapotranspiration Models in the Greenhouse Cultures: Data Analysis and Methods. Journal of Water and Sustainable Development, 12(2), 193-215. <http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i2.2502-1403>

در گلخانه‌ها اختیاری است، اما به‌کارگیری هرکدام از مدل‌ها به نوع گلخانه (گلخانه‌های با فناوری پایین، متوسط یا بالا) به‌دلیل شرایط آب و هوای متفاوت در درون آن‌ها، داده‌های در دسترس و اندازه‌گیری شده در درون و بیرون آن‌ها، بستگی دارد. هر کدام از مدل‌ها به داده‌های آب و هوایی خاصی نیاز دارند تا بتواند مقدار تبخیر و تعرق را برآورد کنند. علاوه بر این، داده‌های در دسترس و اندازه‌گیری شده متفاوت در هر کدام از گلخانه‌ها یکی از عوامل مهم در تعیین انتخاب مدل تبخیر و تعرق است. همچنین، دقت مدل در برآورد تبخیر و تعرق در هر نوع گلخانه می‌تواند عاملی برای انتخاب و به‌کارگیری آن مدل باشد.

نیاز آبیاری یک محصول برابر است با آب مورد نیاز گیاه که از تفاوت بین بارندگی و نیاز آبی (ET) برآورد می‌شود. از نظر فنی و در شرایط گلخانه‌ای با توجه به عدم دریافت مستقیم بارندگی، نیاز خالص آبیاری برابر با نیاز آبی (ET) محصول است. حجم ناخالص آب آبیاری برابر با مقادیر نیاز خالص آبی کشت (ET) با در نظر گرفتن نیاز آبخویی و تلفات ناشی از راندمان آبیاری و یکنواختی توزیع است. از آنجایی که بارندگی وارد گلخانه نمی‌شود و به‌دلیل آبیاری با دور کم و به تعداد بالا با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، رطوبت خاک به‌طور پیوسته نزدیک به ظرفیت زراعی نگهداشته می‌شود؛ بنابراین، عموماً می‌توان فرض کرد که مقدار آبیاری مورد نیاز محصولات در گلخانه معادل و بسیار نزدیک مقدار نیاز خالص آبی (ET) است (Fernandez و همکاران، ۲۰۱۰). بررسی دانش و تجربیات عملی دانشمندان از منطقه خاور نزدیک و شمال آفریقا، به‌ویژه از الجزایر، قبرس، مصر، اردن، لبنان، لیبی، مالت، مراکش، سوریه، تونس و ترکیه با همکاری کمیسیون کشت حفاظت شده انجمن بین‌المللی برای موضوع علوم باغبانی (ISH) نشان داده است برای برآورد دقیق ET از دو معادله‌ها رگریوز (Pruitt و Doorenbos، ۱۹۷۷) و مدل تابش آلمریا (Fernandez و همکاران، ۲۰۱۰) و معادله تابش FAO (Pruitt و Doorenbos، ۱۹۷۷) در مناطق مدیترانه‌ای استفاده شده است (FAO، ۲۰۱۳). به‌کارگیری این دو روش برای برآورد ET با توجه به محدودیت داده‌های هواشناسی و سادگی آن‌ها (در مقایسه با معادله پنمن-مانتیت فائو) در گلخانه‌های با پوشش پلاستیکی تحت شرایط آب و هوای مدیترانه‌ای، توصیه شده‌اند (Fernandez و همکاران، ۲۰۱۰).

در این پژوهش در ابتدا تئوری تبخیر و تعرق در شرایط گلخانه تشریح شده است. سپس متداول‌ترین مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع (ET) مورد استفاده در انواع گلخانه‌ها بررسی

با گسترش کشت‌های گلخانه‌ای در سراسر جهان، برآورد دقیق نیاز خالص آبی محصول^۱ (ET) و مدیریت آبیاری، بسیار مهم شده‌اند. برآورد دقیق ET بر اساس روش مناسب برای مدیریت آبیاری و نیز دستیابی به عملکرد بالا و کیفیت مطلوب محصول، ضروری است (Nikolaou و همکاران، ۲۰۱۹)؛ به‌طوری که تعیین مقدار آن بر دسترسی گیاهان به عناصر غذایی، شوری خاک و آلودگی آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد (Folegatti و Blanco، ۲۰۰۴). روش‌های مختلفی برای تعیین نیاز آبی (ET) در گلخانه‌ها وجود دارند. به طور کلی شرایط آب و هوایی متفاوتی در هر نوع گلخانه وجود دارد که بر روند فیزیکی و تعیین میزان ET گلخانه تأثیر می‌گذارد (Fernandes و همکاران، ۲۰۰۳؛ Rahimikhoob و همکاران، ۲۰۲۰). نیاز آبی گیاهان را می‌توان با روش‌های مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری یا برآورد کرد. متداول‌ترین روش مستقیم نیاز آبی از طریق لایسیمتر است (Baille، ۱۹۹۲). روش غیرمستقیم شامل اندازه‌گیری تابش خالص، دمای سطح محصول و کمبود فشار بخار آب است.

در محیط گلخانه، ET یک محصول مشخص تحت تأثیر بیان انرژی کل سامانه گلخانه است و به شدت به ویژگی‌های گلخانه (مواد و نوع پوشش) و تجهیزات کنترل آب و هوا (توری سایه‌بان، سامانه‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه) بستگی دارد (Boulard، ۲۰۰۷؛ Stanghellini و Katsoulas، ۲۰۱۹)؛ بنابراین، برای تعیین ET باید همه این عوامل در انواع گلخانه‌ها از جمله گلخانه‌های با فناوری بالا مانند گلخانه‌های بسته و کنترل شده تا گلخانه‌های سنتی با پوشش پلاستیکی و فناوری پایین، در نظر گرفته شوند.

مطالعات زیادی برای توسعه مدل‌های تبخیر و تعرق^۲ (ET) و مقایسه مدل‌های مناسب برای محصولات در انواع گلخانه‌ها انجام شده‌اند. به‌طور کلی دقت هر مدل به نوع گلخانه و شرایط آب و هوای حاکم در آن، بستگی دارد (Karaca و همکاران، ۲۰۱۸). بررسی‌ها نشان دادند برآورد نیاز آبی (ET) در گلخانه عمدتاً با استفاده از مدل پنمن-مانتیت فائو^۳ انجام می‌شود (Takakura و همکاران، ۲۰۰۹؛ Moazed و همکاران، ۲۰۱۴؛ Rahimikhoob و همکاران، ۲۰۲۰). معادله پنمن-مانتیت فائو عموماً برای برآورد نیاز آبی تحت شرایط آب و هوای بیرون از گلخانه (محیط باز) است. با این حال، بسیاری از پژوهش‌ها از مدل پنمن-مانتیت فائو برای برآورد نیاز آبی در گلخانه‌ها با اعمال تغییراتی در ضرایب معادله آن، استفاده کردند. اگرچه هنوز استفاده از نوع مدل تبخیر و تعرق برای برآورد نیاز آبی

نام برده شده در کلمات کلیدی، عنوان و/ یا چکیده مقالات است. به طور کلی بررسی و تحلیل مقاله‌ها، براساس سوالات مشخص شده در این مطالعه انجام گرفت.

تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق (ET) فرآیندی است که آب را در فاز بخار از سطوح به جو باز می‌گرداند. تبخیر و تعرق را می‌توان شامل دو فرآیند تبخیر از سطوح آزاد آب مانند مخازن، گودال‌ها یا از پوشش گیاهی، خاک و سطوح زمین و تعرق شامل انتقال آب از خاک به ریشه‌های گیاه و سپس انتقال آب از طریق گیاه به برگ و در نهایت تبخیر آب از داخل برگ تقسیم کرد.

تبخیر و تعرق به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد و لذا جدا کردن این دو پارامتر از یکدیگر دشوار است (Allen و همکاران، ۱۹۹۷). تبخیر و تعرق مرجع ET_0 ، میزان تبخیر و تعرق از سطح مرجع فرضی مانند چمن یا یونجه با ویژگی‌های خاص تحت شرایط مطلوب مصرف بدون کمبود آب است. در واقع ET_0 بیانگر تقاضای آب و هوا و اتمسفری است. تبخیر و تعرق بالقوه ET_p به حداکثر مقدار آبی گفته می‌شود که می‌توان از سطحی با منبع آب فراوان از طریق تبخیر و تعرق حذف کرد. بر خلاف تبخیر و تعرق مرجع، تبخیر و تعرق بالقوه حداکثر سطح تبخیر و تعرقی است که می‌توان از یک سطح در شرایط ایده‌آل، به آن رسید. تبخیر و تعرق بالقوه برای تجزیه و تحلیل تقاضای آب در مناطق بزرگ مانند مخازن آب، کاربرد بیشتری دارد؛ در حالی که تبخیر و تعرق مرجع برای ارزیابی محصول مناسب‌تر است، زیرا دقیق‌تر است و تغییرات مربوط به محصول را نشان می‌دهد.

تبخیر و تعرق گیاه ET_c مقدار آبی است که از طریق فرآیند تبخیر و تعرق تحت شرایط استاندارد و مطلوب بدون تنش‌های آبی، کودی و شوری از یک محصول مشخص از سطوح خاک و گیاه خارج می‌شود (Pidwirny، ۲۰۰۶). مقدار ET_c بیانگر نیاز آبی محصول است (Allen و همکاران، ۱۹۹۷). مقدار ET_c را می‌توان با ضرب ET_0 در ضرایب گیاهی K_c در مراحل مختلف رشد محاسبه کرد (معادله ۱). مقادیر K_c در مراحل مختلف رشد متفاوت است و به خصوصیات گیاه و میانگین اثرات تبخیر از خاک، بستگی دارد (Allen و همکاران، ۱۹۹۷):

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

در این معادله، ET_c تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر در روز)، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز) و K_c ضریب گیاهی (بدون بعد) است.

شدند. در نهایت نیز مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق بر اساس نوع گلخانه، محصولات و داده‌های آب و هوایی در دسترس و اندازه‌گیری شده در گلخانه‌ها، دسته‌بندی شده‌اند.

شناسایی مناسب‌ترین روش برآورد نیاز آبی محصول منجر به مدیریت آبیاری مناسب در گلخانه خواهد شد که می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف منابع آب و کود، درآمد کشاورزان را بهبود بخشد. در واقع در این مطالعه به سؤالات زیر پاسخ داده می‌شود:

۱. چه مدل‌هایی برای برآورد نیاز آبی در گلخانه وجود دارد؟
۲. مدل‌های تبخیر و تعرق چگونه بر اساس نوع محصول، گلخانه‌ها یا شرایط آب و هوایی طبقه‌بندی می‌شوند؟
۳. چه نوع داده‌هایی برای برآورد تبخیر و تعرق در مدل‌های موجود، نیاز هستند؟
۴. چگونه مدل پنمن-مانتیت در برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه کاربرد دارد؟
۵. بهترین مدل‌های کاربردی برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه چیستند؟
۶. مدل تبخیر و تعرق چه معیارهایی باید داشته باشد تا عملاً قابل اعتماد باشد؟

مواد و روش‌ها

در این پژوهش بررسی جامعی در خصوص استفاده از مدل‌های تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها در مطالعات مختلف، شده است. بررسی انجام شده در برگزیده مجموعه‌ای از مقالات مجلات معتبر می‌باشد که شامل مطالعات مربوط به اولین مدل توسعه یافته ET در سال ۱۹۴۸ (Bot، ۱۹۸۳) تا مطالعات در زمینه برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها تا سال ۲۰۲۴ است (Yan، ۲۰۲۴؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۲۴). این مقالات شامل مطالعات داخلی و خارجی متعددی هستند که از پایگاه‌های مختلف شناخته شده از جمله Wiley Online Library، Springer، Scopus، Magiran، SID و Since Direct اخذ شده‌اند. علاوه بر این سایر منابع بررسی شده نیز شامل گزارش‌های پژوهشی معتبر و فصل‌های کتاب در تلاش برای غنی‌سازی کیفیت این بررسی در نظر گرفته شده است. این کار روی مدل‌های اصلی تبخیر و تعرق و تکنیک‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها، تمرکز دارد و دستورالعمل‌های کلی را برای تخمین ET برای کشاورزی در محیط‌های بسته (گلخانه) پیشنهاد می‌کند.

روش جستجوی مورد استفاده برای شناسایی مطالعات مرتبط، شامل جستجوی طیف متنوعی از عبارات مرتبط با دو گفته

همرفت^۹ نامیده می‌شود. تبادل و انتقال انرژی بین هوای داخل گلخانه و سطوح داخلی مانند پوشش، گیاه، لوله‌های گرمایشی و سطح خاک، به روش همرفت انجام می‌شود (Iddio و همکاران، ۲۰۲۰). همین فرآیند برای تبادل گرما بین سطح بیرونی گلخانه و هوای آزاد خارج از گلخانه نیز صادق است. انتقال گرما از طریق فرآیند همرفت بخش اعظمی از آب و هوای داخل گلخانه را تعیین می‌کند (Tadj و همکاران، ۲۰۰۷). پوشش گلخانه انرژی را از سطح داخلی به هوای داخل گلخانه و در نهایت هوای بیرون از آن مبادله می‌کند. انتظار می‌رود همرفت طبیعی^{۱۰} در داخل گلخانه به دلیل سرعت هوای کم ناشی از اختلاف دمای موجود در آن اتفاق بیافتد؛ در حالی که در خارج از گلخانه، همرفت اجباری^{۱۱} به دلیل سرعت هوای ناشی از باد پیش‌بینی می‌شود. تبادل گرمای همرفتی به شرح معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$q_{cnv} = \alpha_h A_s (T_a - T_s) \quad (2)$$

که در این معادله، T_s و T_a به ترتیب دمای هوای محیط و دمای سطح پوشش گلخانه (کلوین)، A_s مساحت سطح پوشش (مترمربع) و α_h ضریب انتقال گرما (وات بر مترمربع بر کلوین) است. ضریب انتقال گرما به خصوصیات سیال و پارامترهای سامانه از جمله هندسه و پوشش گلخانه بستگی دارد. Bot (۱۹۸۳) انتقال گرما از طریق همرفت به و یا از پوشش گلخانه و همچنین جریان از پوشش گلخانه را اندازه‌گیری کرد. نتایج نشان داد انتقال گرما منجر به همرفت طبیعی از سطوح داخلی و خارجی پوشش گلخانه با سرعت کم تا ۳ متر بر ثانیه می‌شود. در سرعت‌های باد بالاتر، همرفت اجباری در خارج از گلخانه مشاهده می‌شود.

گیاه منبع اصلی دریافت انرژی خورشیدی در کشت‌های گلخانه‌ای است. این انرژی به گرمای نهان و محسوس تبدیل می‌شود. در نهایت این گرمای نهان و محسوس از طریق فرآیند همرفت به گلخانه منتقل می‌شوند؛ بنابراین تعادل و بیلان انرژی یک گیاه در گلخانه ناشی از جذب تابش خورشیدی به‌ویژه PAR، تبادل گرمای نهان و محسوس و نیز تبادل تابش گرمایی با قسمت‌های مختلف گلخانه است (Richard و Bello، ۲۰۰۷). در گرمایش گلخانه با لوله‌های آب گرم، انتقال گرما بین لوله‌ها و هوا به روش همرفت انجام می‌شود. طول و قطر لوله از معیارهای مهم در تعیین میزان تبادل گرما هستند. در بیلان انرژی قسمت‌های مختلف گلخانه، تبادل گرما با خاک به‌دلیل اندازه‌گیری نسبتاً کوچک روزانه، اهمیت کمی دارد (Allen و همکاران، ۱۹۹۷). با این حال، سطح خاک تابش گرمایی را با سایر اجزای گلخانه مبادله می‌کند.

در گلخانه، تعرق از سطح گیاه مهم‌ترین جزء اتلاف انرژی است که بر میزان تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد. تبخیر و تعرق در گلخانه شامل بیلان انرژی تابش خالص خورشیدی، انتقال گرما و تبخیر از سطح سایه‌انداز گیاه است. بیشتر مدل‌هایی که بر اساس بیلان انرژی توسعه یافته‌اند، معمولاً برآورد مناسب‌تری از تعرق را ارائه می‌دهند (Jessica و همکاران، ۲۰۰۱). بیلان انرژی توسط بخش‌های مهم گلخانه شامل پوشش گلخانه، آب و هوا در گلخانه، نوع محصول و خاک، تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Bot، ۱۹۸۹). در زیر متغیرهای بیلان انرژی در گلخانه شرح داده شده‌اند.

الف) تابش خورشیدی

تابش خورشیدی را می‌توان به تابش مستقیم خورشید و تابش پراکنده منتشر شده در اتمسفر توسط ابرها تقسیم کرد. محدوده طول موج انتشار انرژی خورشیدی به سطح زمین بین ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است. طول موج مطلوب برای رشد گیاه بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر است. این ناحیه از طیف، تابش فعال فتوسنتزی^{۱۲} (PAR) نامیده می‌شود. تنها بخش کوچکی از انرژی PAR جذب گیاه و مستقیماً در فرآیند فتوسنتز مصرف می‌شود و بخش دیگر به گرما تبدیل می‌شود.

پوشش گلخانه بر تابش مستقیم و انتشار تابش خورشیدی اثر می‌گذارد به‌طوری‌که بر اساس آن، میزان انتشار و تابش قابل دسترس برای محصول تعیین می‌شود. این میزان را می‌توان بر اساس قوانین بازتاب، جذب و انتقال نور از مواد پوشش گلخانه تعیین کرد. برای این منظور، خواص و قابلیت انتشار نور از پوشش و ساختار گلخانه، زاویه تابش ورودی و هندسه گلخانه باید مشخص شوند. Bot (۱۹۸۹) برای جزء مستقیم تابش خورشیدی، زاویه تابش خورشید را با توجه به موقعیت خورشید بر اساس زمان، تاریخ و عرض جغرافیایی منطقه و نیز جهت و هندسه گلخانه تعیین کرده است. تابش پراکنده تحت شرایط ابری از توزیع شدت تابش روی نیمکره ناشی می‌شود که برای شرایط مختلف آب و هوا به‌ویژه آسمان صاف یا ابری، متفاوت است. تابش خورشیدی در بین پارامترهای محیطی، یکی از مهم‌ترین پارامترها است که بر تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۰).

ب) تبادل گرما

انتقال انرژی از طریق جریان از مکانی به مکان دیگر یا از یک سطح به یک سطح دیگر در جهت جریان و یا بالعکس

ج) بیلان بخار^{۱۳}

علاوه بر تبخیر از سطح مرطوب، تعرق گیاه منبع اصلی افزایش بخار آب در محیط گلخانه است. تغییرات بخار از طریق چگالش و تهویه صورت می‌گیرد؛ به طوری که معادله زیر برای بیلان بخار برقرار است:

$$E - C - V = 0 \quad (3)$$

که در آن E تعرق گیاه، C و V به ترتیب بخار از طریق چگالش و تهویه است. مقدار بخار آب موجود در هوا عمدتاً به طور معکوس به دمای هوای گلخانه بستگی دارد. رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار، قدرت خشک شدن^{۱۳} هوا را مشخص می‌کنند. در واقع بر اساس مقدار بخار آب، هوا در دمای معین قادر به جذب و نگهداری آن است. دمایی که در آن بخار شروع به اشباع شدن می‌کند، دمای نقطه شبنم نامیده می‌شود. در دمای نقطه شبنم، رطوبت نیز موجود و پنهان است.

نتایج و بحث

مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه

برآورد دقیق تبخیر و تعرق در گلخانه یک پارامتر کلیدی در مدیریت بهینه آب برای تولید محصولات گلخانه‌ای است. برآورد غیرمستقیم تبخیر و تعرق در گلخانه را می‌توان با استفاده از داده‌های آب و هوا، انجام داد. با وجود اینکه

مدل‌های تعرق متعددی در منابع موجود هستند (Graaf, ۱۹۸۸; Hamer, ۱۹۹۸; Joliet, ۱۹۹۴; Okuya و Okuya, ۱۹۸۸)، اما مطالعه مدل‌های تبخیر و تعرق مناسب‌تر است؛ زیرا هر دو فرآیند تبخیر و تعرق را در محیط گلخانه در نظر می‌گیرند (Huang و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، تشخیص و جداسازی هر دو فرآیند دشوار است، زیرا به طور هم‌زمان رخ می‌دهند (Allen و همکاران، ۱۹۹۷). با درک این موضوع، پرکاربردترین مدل‌های تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها در این مطالعه، بررسی شدند. ۱۰ مدل تبخیر و تعرق پرکاربرد بر اساس مطالعات صورت گرفته و با توجه به شرایط گلخانه در جدول (۱) ارائه شدند.

در یک دسته‌بندی مدل‌های تبخیر و تعرق را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد: مدل‌های انتقال جرم، مبتنی بر دما، مبتنی بر تشعشع و مدل‌های ترکیبی که هم آیرودینامیک و هم تعادل انرژی را لحاظ می‌کنند. مدل‌های ET_p مبتنی بر انتقال جرم فقط بر اساس آیرودینامیک پایه‌گذاری شده‌اند. مدل‌های مبتنی بر دما مانند مدل هارگریوز و سامانی، فقط دما را در نظر می‌گیرند. مدل‌های مبتنی بر تشعشع مانند معادله پریستلی-تیلور، تعادل انرژی را برای محاسبات ET_p در نظر می‌گیرند. دسته چهارم (هم آیرودینامیک و هم تعادل انرژی) مدل‌های ترکیبی مانند مدل پنمن-مانتیت برای تعیین ET_p

جدول ۱- انواع مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق مورد استفاده در گلخانه

مدل‌های تبخیر و تعرق	طبقه‌بندی	منبع
FAO Penman	مدل ترکیبی بر اساس بیلان انرژی	مدل فیزیکی Singh و Yadava, ۲۰۰۳
FAO Penman-Monteith	مدل ترکیبی بر اساس بیلان انرژی	مدل فیزیکی Allen و همکاران, ۱۹۹۸
Stanghellini	مدل ترکیبی بر اساس بیلان انرژی	مدل فیزیکی Stanghellini, ۱۹۸۷
Fynn	مدل ترکیبی بر اساس بیلان انرژی	مدل فیزیکی Fynn و همکاران, ۱۹۹۳
Penman-Monteith Screen-house	مدل ساده شده پنمن-مانتیت	مدل فیزیکی Möller و همکاران, ۲۰۰۴
Energy Balance equation	بر اساس بیلان انرژی	مدل فیزیکی Takakura و همکاران, ۲۰۰۹
FAO Radiation	بر اساس تابش خورشیدی	مدل تجربی Pruitt و Doorenboss, ۱۹۷۵
Priestley Taylor	بر اساس تابش خورشیدی	مدل تجربی Priestley و Taylor, ۱۹۷۲
Hargreaves	بر اساس دما و تابش خورشیدی	مدل تجربی Hargreaves و همکاران, ۱۹۸۵
Simplified model	مدل ساده شده پنمن-مانتیت	مدل تجربی Baille و همکاران, ۱۹۹۴

داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد و در درجه اول زمانی مفید است که داده‌های هواشناسی به ویژه تابش خالص خورشیدی در دسترس نباشد. با این حال ادغام یک ثابت تجربی در این مدل می‌تواند منجر به تخمین بیش از حد نرخ ET_c و تضعیف دقت این مدل شود (Ghiat و همکاران، ۲۰۲۱).

نوع تبخیر و تعرق قابل برآورد براساس مدل‌های تبخیر و تعرق

مرور بر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مدل‌های تبخیر و تعرق توسعه داده شده برای گلخانه‌ها اغلب تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) را برآورد می‌کنند (Fernandes و همکاران، ۲۰۰۳). Allen و همکاران (۱۹۹۷) نشان دادند ET_o میزان تبخیر و تعرق از سطح گیاه مرجع در شرایط استاندارد و بدون تنش آب را نشان می‌دهد؛ در حالی که تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) با حاصل ضرب تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) در ضریب گیاهی (K_c) برآورد می‌شود.

K_c ضریبی است که بیان‌کننده تفاوت بین تبخیر و تعرق یک گیاه مشخص و گیاه مرجع است. پارامترهای آب و هوا تنها عوامل مؤثر بر ET_o می‌باشند؛ بنابراین، برآورد ET_o بر اساس داده‌های آب و هوا انجام می‌شود. در واقع ET_o بیان‌کننده تقاضای شرایط جوی در مکان و زمان خاصی از سال است و خصوصیات گیاه و عوامل خاک را در نظر نمی‌گیرد (Allen و همکاران، ۱۹۹۷؛ Scheff و Frierson، ۲۰۱۴)، اما ET_c متأثر از خصوصیات گیاه و عوامل خاک است که از طریق K_c از ET_o متمایز می‌شود. همچنین، ET_c می‌تواند مستقیماً بر اساس داده‌های آب و هوا و گیاه با ترکیب ضریب آلیبدو مطابق با خصوصیات خاص گیاه، مقاومت‌های آئرودینامیکی و تاج پوشش گیاه و نیز شاخص سطح برگ (LAI) برآورد شود (Allen و همکاران، ۱۹۹۷). با تعریف ET_o و ET_c ، نوع تبخیر و تعرق برآورد شده توسط ده مدل پرکاربرد در گلخانه در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

نوع تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل‌های استنگلینی، فین و پنمن-مانتیت فائو در مطالعات مختلف مشخص نشده است. به طور کلی، تبخیر و تعرق برآورد شده مخصوصاً توسط مدل‌هایی که ET_c را برآورد می‌کنند، براساس دستورالعمل ارائه شده توسط Allen و همکاران (۱۹۹۷) تعریف شده است. تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) در FAO 56 مستقیماً بر اساس داده‌های آب و هوا و گیاه برآورد می‌شود؛ بنابراین، براساس بررسی مطالعات انجام شده نوع تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل‌های استنگلینی، فین، پنمن-مانتیت فائو Screen-house و مدل ساده شده، تبخیر و تعرق گیاهی (ET_c) معرفی شده است.

و مدل پنمن-مانتیت اصلاح شده FAO 56 برای تعیین ET_o هستند (Nikolaou و همکاران، ۲۰۲۳).

مدل‌های تحلیلی تبخیر و تعرق موجود، کاملاً بر اساس قوانین فیزیکی بوده و از این قوانین برای پیش‌بینی تخمین‌های مبتنی بر روابط علی استفاده می‌کنند (مانند مدل اصلی پنمن-مانتیت). مدل‌های تجربی (آماري) بر اساس همبستگی‌های توسعه یافته از روابط تجربی براساس داده‌های مشاهداتی و تجربی استوار هستند (مانند مدل هارگریوز). مدل‌های تجربی ساده، اما فاقد اهمیت فیزیکی و دقت منطقه‌ای هستند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۰). زمانی که داده‌های ورودی دقیق کافی وجود داشته باشد، استفاده از مدل‌های فیزیکی مناسب‌تر از مدل‌های تجربی هستند (Subedi و Chavez، ۲۰۱۵).

به طور کلی دو روش برای برآورد غیرمستقیم تبخیر و تعرق شامل مدل‌های تجربی یا مدل‌های مبتنی بر فیزیک وجود دارند. مدل‌های تبخیر و تعرق بیان شده در جدول (۱) برخی از مدل‌های مبتنی بر قوانین فیزیکی و بر اساس توازن انرژی و ترکیبی از نظریه‌های مختلف است. مدل‌های دیگر در واقع مدل‌های تجربی هستند که تبخیر و تعرق را بر اساس روابط تجربی مستخرج با استفاده از پارامترهای تابش خورشید، دما و رطوبت نسبی برآورد می‌کنند (Panda و Kashyap، ۲۰۰۱). Jessica و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند مدل‌های تجربی معمولاً برای یک منطقه خاص در یک دوره زمانی مشخص، توسعه می‌یابند که ممکن است همیشه برای دوره‌های زمانی و مکانی دیگر مناسب نباشد. تبخیر و تعرق گیاه تحت کشت گلخانه (ET_g) را می‌توان با ضرب ET_o در ضرایب گیاهی (K_g) در مراحل مختلف رشد برآورد کرد.

به طور کلی معادله اصلی پنمن-مانتیت یک مدل قدرتمند برای تخمین تبخیر و تعرق در نظر گرفته می‌شود، زیرا هر دو مقاومت آئرودینامیکی و سطحی را ترکیب می‌کند. با این حال محدودیت‌های این مدل در محاسبه مقاومت سطح، رخ می‌دهد که مستلزم جمع‌آوری و مدل‌سازی فشرده داده‌ها است. در مدل پنمن-مانتیت ساده شده FAO 56، عبارت مقاومت سطحی با یک اصطلاح ثابت به دنبال یک محصول مرجع و شرایط استاندارد جایگزین می‌شود. با این حال، ساده‌سازی عبارت مقاومت سطحی می‌تواند دقت برآوردهای ET را کاهش دهد. مدل پریستلی-تیلور مدل خوبی برای محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه زمانی است که داده‌های آئرودینامیکی در دسترس نیستند، بنابراین به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد. با این حال، دست‌کم گرفتن نرخ‌های ET با استفاده از این مدل در شرایط فرارفتی^۴ گزارش شده است. به طور مشابه، مدل هارگریوز و سامانی به

جدول ۲- نوع تبخیر و تعرق برآورد شده توسط ۱۰ مدل تبخیر و تعرق ارائه شده در گلخانه

مدل تبخیر و تعرق	نوع تبخیر و تعرق	گیاه مرجع یا نوع گیاه	منبع
پنمن فائو	ETo	یونجه	Yadava و Singh, ۲۰۰۳
پنمن-مانتیت فائو	ETo	چمن	Allen و همکاران, ۱۹۹۸
تابش فائو	ETo	چمن	Doorenboss و Pruitt, ۱۹۷۵
پریستلی-تیلور	ETo	چمن	Priestley و Taylor, ۱۹۷۲
هارگریوز	ETo	چمن	Hargreaves و همکاران, ۱۹۸۵
معادله بیلان انرژی	ETo	گوجه فرنگی	Takakura و همکاران, ۲۰۰۹
استنګلینی	ETc	گوجه فرنگی	Stanghellini, ۱۹۸۷
فین	ETc	گل داوودی	Fynn و همکاران, ۱۹۹۳
پنمن-مانتیت فائو Screen-house	ETc	فلفل دلمه‌ای	Möller و همکاران, ۲۰۰۴
مدل ساده شده	ETc	گیاهان زینتی*	Baille و همکاران, ۱۹۹۴

* گونه‌های زینتی: Begonia, Cyclamen, Gardenia, Gloxinia, Hibiscus, Impatiens, Pelargonium, Poinsettia and Schefflera

به‌کارگیری مدل‌های تبخیر و تعرق در گلخانه براساس داده‌های

در دسترس

داده‌های موجود برای استفاده از مدل‌های تبخیر و تعرق باید کافی و قابل اتکا باشند. همه داده‌ها یا پارامترهای تعریف شده در یک مدل را نمی‌توان به‌دلیل کمبود تجهیزات اندازه‌گیری، تخصص یا حتی هزینه‌بر بودن تامین تجهیزات، در گلخانه‌ها اندازه‌گیری کرد. داده‌های اصلی مورد نیاز برای مدل‌های تبخیر و تعرق مورد استفاده در گلخانه‌ها، در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

در شرایطی که داده‌های محدودی برای برآورد تبخیر و تعرق در دسترس است، گلخانه‌دار باید از مدل‌های تبخیر و تعرقی استفاده کند که پارامترهای کمتری در معادلات آن‌ها تعریف شده‌اند. مدل پریستلی-تیلور فقط به اندازه‌گیری تابش خالص خورشیدی نیاز دارد. در معادله اصلی مدل پریستلی-تیلور، داده‌های مربوط به شار حرارتی خاک مورد نیاز است. باین‌حال شار حرارتی خاک در بیشتر شرایط نسبتاً کوچک است و می‌توان آن را نادیده گرفت (Allen و همکاران، ۱۹۹۷؛ Stanghellini, ۱۹۸۷). مدل‌های هارگریوز و تابش فائو، مدل‌های مبتنی بر تابش می‌باشند که می‌توانند در شرایطی که اطلاعات کمتری در دسترس هستند نیز استفاده شوند (Aslan و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، Allen و همکاران

(۱۹۹۷) در نشریه FAO 56 توصیه کردند زمانی که داده‌های آب و هوایی کمی وجود دارند، می‌توان از مدل هارگریوز برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده کرد. از طرف دیگر وقتی داده‌های آب و هوایی کامل‌تری به‌ویژه سرعت باد و تابش خالص در دسترس هستند، استفاده از مدل پنمن-مانتیت فائو گزینه بهتری برای برآورد تبخیر و تعرق خواهد بود (Khorsand و همکاران، ۲۰۲۱؛ Guo و همکاران، ۲۰۲۱).

تبخیر و تعرق را می‌توان با مدل‌هایی که معادلات آن‌ها شامل شاخص سطح برگ (LAI) است، با داده‌های محدودی دیگری مانند تابش خالص و کمبود فشار بخار با استفاده از مدل‌های فین و مدل ساده شده ارائه شده توسط Baille و همکاران (۱۹۹۴)، برآورد کرد. سایر مدل‌های ارائه شده در جدول (۳) به داده‌های دقیق‌تری برای برآورد تبخیر و تعرق نیاز دارند. برای شرایطی که داده‌های آب و هوایی کاملی وجود نداشته باشند، معادله پنمن-مانتیت فائو نشریه FAO ۵۶، ساده‌سازی شده است (Baille و همکاران، ۱۹۹۴). برخی از مطالعات نیز با وجود انتخاب مدل‌های تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های موجود و اندازه‌گیری شده، از مدل ساده مانند هارگریوز برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده کرده‌اند (Haofang, ۲۰۲۳). با این‌حال، باید توجه داشت که برآورد تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های محدود و مدل‌های ساده، ممکن است دقیق

جدول ۳- داده‌های اصلی مورد نیاز انواع مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق مورد استفاده در گلخانه

داده مورد نیاز									مدل تبخیر و تعرق
etc.	LAI	RH	VPD	Tw	To	Ta	U	Rn	
-	-	%	kPa	°C	°C	°C	m/s	kJ/m ² /s	
							*	*	پنمن فائو
		*	*			*	*	*	پنمن-مانتیت فائو
		*						*	تابش فائو
								*	پریستلی-تیلور
*			*	*		*		*	پریستلی-تیلور (شامل تابش خورشیدی)
						*		*	هارگریوز
	*		*		*	*		*	استنگلینی
	*		*					*	فین
				*		*		*	معادله بیلان انرژی
	*		*					*	مدل ساده شده
*			*			*	*	*	پنمن-مانتیت فائو Screen-house

Rn: تابش خورشیدی، u: سرعت باد، Ta: دمای بیرون از گلخانه، To: دمای برگ، Tw: دمای سطحی (میانگین دمای سطح سایه‌انداز گیاه)، VPD: کمبود فشار بخار، RH: رطوبت نسبی، LAI: شاخص سطح برگ و etc: داده‌های دیگر مانند قابلیت انتقال پوشش گلخانه و اندازه‌گیری مقاومت لایه مرزی برگ در گلخانه Penman-Monteith Screen-house.

گلخانه‌ها استفاده می‌شود. از لایسیمتر بر اساس رویکرد بیلان آب و خاک برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در گلخانه پلاستیکی و Screen-house استفاده شده است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ کیخایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Møller و Assouline، ۲۰۰۷؛ Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Rafie و Mahbod، ۲۰۲۰؛ Bastug و همکاران، ۲۰۲۴). Møller و همکاران (۲۰۰۴) از لایسیمتر واسنجی شده با جریان‌سنج شیره (SF) و ادی کوواریانس (EC) در داخل گلخانه Screen-house (Teitel و همکاران، ۲۰۱۷) برای اندازه‌گیری تعرق از سطح گیاه و تبخیر و تعرق استفاده کردند.

جریان‌سنج شیره یک حس‌گر دارد که جریان گرما و تعرق را اندازه‌گیری می‌کند (Gong و همکاران، ۲۰۱۹؛ Yao و همکاران، ۲۰۲۳)، درحالی‌که حس‌گرهای EC بخار آب یا شار حرارتی از سطح پوشش گیاه را اندازه‌گیری می‌کنند. تغییرات وزن در یک لایسیمتر وزنی نشان‌دهنده میزان تبخیر و تعرق تجمعی

و مطمئن نباشند. همچنین، Allen و همکاران (۱۹۹۷) توصیه کردند از مدل‌های تبخیر و تعرقی که فقط به پارامترهای آب و هوایی محدود برای برآورد تبخیر و تعرق نیاز دارند، کمتر استفاده شود.

وسایل اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در گلخانه

گلخانه‌ها از نظر میزان فناوری و تجهیزات به‌کار رفته در آن‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند. به‌طور کلی هر چه سطح فناوری بالاتر باشد، آن گلخانه پتانسیل بیشتری برای ایجاد شرایط رشد کنترل شده و مناسب دارد. به‌طور کلی تقسیم‌بندی گلخانه‌ها از نظر میزان استفاده از فناوری‌های روز جهان به شرح جدول (۴) است (Pardossi و همکاران، ۲۰۰۴؛ Kipp، ۲۰۱۰). وسایل مورد استفاده در گلخانه‌ها برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق نیز در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. بیشتر از لایسیمترها برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در

و رشد گیاه در طول دوره رشد است که در مطالعات Fynn و همکاران (۱۹۹۳) و Lopez-Cruz و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شده است. سایر وسایل مانند ترازوی الکترونیکی وزنی^{۱۵}، میزان آب مصرفی توسط گیاه و تلفات از بستر کشت را اندازه‌گیری می‌کند (موزن‌زاده، ۱۳۹۴؛ Baille و همکاران، ۱۹۹۴؛ Jessica و همکاران، ۲۰۰۱؛ Gong و همکاران، ۲۰۱۹). ترازوهای الکترونیکی وزنی از قسمت‌های خاصی شامل ورودی تأمین

آب و زهکشی تشکیل شده است؛ به طوری که براساس ورود و خروج آب، میزان آب مصرفی و تلفات (زهاب) از بستر کشت، اندازه‌گیری می‌شود. تعداد گیاهان موجود در ترازو نیز به اندازه گلدان و مرحله رشد گیاهان، بستگی دارد (Baille و همکاران، ۱۹۹۴). سلول‌های خاصی^{۱۶} برای اندازه‌گیری تحرق گیاه توسط Liu و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شدند. این سلول‌ها با دقت ۵ گرم در زیر هر سطل تحت کشت گیاهان، قرار داده شدند.

جدول ۴- دسته‌بندی انواع گلخانه‌ها بر اساس ویژگی‌های مهم در آن‌ها

نوع گلخانه			ویژگی‌ها
فناوری بالا	فناوری متوسط	فناوری پایین	
پلاستیک دو لایه، پلی‌کربنات و شیشه	پلاستیک یک لایه و دو لایه و شیشه	پلاستیک یک لایه	نوع پوشش
≥ 5 ($6 < H \leq 9$)	≤ 4 ($4 < H \leq 6$)	≤ 2 (≤ 3)	بلندی گلخانه از زیر ناوانی (متر) (از زیر سقف)
گلخانه‌های انحنادار چند دهانه بلند (قوسی یا گنبدی)، گلخانه‌های بدون انحنای چند دهانه (طرح ونلو هلندی) بلند	گلخانه‌های انحنادار چند دهانه (قوسی یا گنبدی) به نسبت بلند	تونل‌های کوتاه یک دهانه، گلخانه‌های چند دهانه چوبی یا فلزی	شکل سطح مقطع هندسی
پیشرفته	متفاوت و در حد میانه	ضعیف	سطح خودکارسازی و مکانیزاسیون
بیشتر غیرشیمیایی و در موارد کمی شیمیایی (کنترل تلفیقی قوی)	بیشتر شیمیایی و در موارد کمی غیرشیمیایی (کنترل تلفیقی ضعیف)	شیمیایی	شیوه کنترل آفات و بیماری‌ها
کامل هستند.	به‌طور معمول ندارند.	به‌طور معمول ندارند.	وسایل کنترل شرایط محیطی (گرمایش، سرمایش، تهویه و غیره)
غیرخاکی بسته	خاکی یا غیرخاکی باز	خاکی	روش کشت

جدول ۵- وسایل اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در انواع گلخانه‌ها

نوع گلخانه	خصوصیات گلخانه	تجهیزات	مرجع
گلخانه با فناوری پایین	گلخانه پلاستیکی	لایسیمتر	Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹
	Screen-house	لایسیمتر	Möller و همکاران، ۲۰۰۴؛ Möller و Assouline، ۲۰۰۷
	Screen-house	کوواریانس ادی (EC)	Möller و همکاران، ۲۰۰۴؛ Tanny و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ghat و همکاران، ۲۰۲۱
گلخانه با فناوری متوسط	تهویه طبیعی	لایسیمتر	Blanco و Folegatti، ۲۰۰۳؛ López-Cruz و همکاران، ۲۰۰۸؛ Huang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Jo و همکاران، ۲۰۲۱؛ Bastug و همکاران، ۲۰۲۴
	تهویه طبیعی	جریان سنج شیره	Takakura و همکاران، ۲۰۰۹؛ Huang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۱
	تهویه طبیعی	سلول‌های وزنی	Liu و همکاران، ۲۰۰۸؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۱؛ Shi و همکاران، ۲۰۲۳؛ Yuan و همکاران، ۲۰۲۳
	تهویه طبیعی	روش بیلان آب	Valdés-Gómez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Casanova و همکاران، ۲۰۰۹؛ Ibrahim و همکاران، ۲۰۲۴
	تهویه اجباری	لایسیمتر	Nikolaou و همکاران، ۲۰۲۳
گلخانه با فناوری بالا	محیط کنترل شده	لایسیمتر	Fynn و همکاران، ۱۹۹۳؛ Rahimikhoob و همکاران، ۲۰۲۰؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۰a؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۵
	محیط کنترل شده	ترازوی الکترونیکی وزنی	Jessica و همکاران، ۲۰۰۱؛ Baille و همکاران، ۱۹۹۴؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۰b

متر و تشت تبخیر کوچک‌تر از همان جنس با ابعاد کوچک‌تر شامل قطر ۰/۶ متر و عمق ۰/۲۵ متر ساخته شده‌اند. هر دو تشت روی تخته (سکوی) چوبی با ارتفاع ۰/۱۵ متر از سطح خاک نصب می‌شوند. تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) با ضرب تبخیر از تشت در ضریب تشت (۰/۸۵) در داخل گلخانه) برآورد می‌شود. اتمومتر (Altenhofen، ۱۹۸۵) شامل یک کاشی سرامیکی است که توسط یک قطعه ضخیم سبز رنگ پوشانده شده است و روی یک مخزن آب استوانه‌ای شکل نصب شده است. آب با استفاده از لوله مکش به کاشی واقع در قسمت پایین مخزن وارد می‌شود. فشار اتمسفر درون مخزن توسط یک سوراخ تهویه کوچک حفظ می‌شود. یک لوله پلاستیکی شفاف جهت نشان دادن سطح آب در مخزن به صورت جانبی نصب شده است. اتمومتر با پوشاندن کاشی با یک قطعه سبز رنگ، آب از دست رفته از محصول یونجه آبیاری شده (تبخیر و تعرق مرجع) را اندازه‌گیری می‌کند. اتمومتر در ارتفاع ۱/۵

استفاده از لایسیمترها یک روش معمول برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها بوده است (Stanghellini، ۱۹۸۷؛ Lazarovitch و همکاران، ۲۰۰۶؛ Aslan و همکاران، ۲۰۲۴). اگرچه همان‌طور که قبلاً ذکر شد، اندازه‌گیری تبخیر و تعرق گیاه با استفاده از لایسیمتر با دقت بالایی انجام نمی‌شود. با این حال Allen و همکاران (۱۹۹۷) در نشریه 56 FAO، بیان کردند لایسیمترهای وزنی دقیق می‌توانند میزان آب مصرفی را به‌طور مستقیم از طریق محاسبه تغییر جرم تا دقت چند صدم میلی‌متر، اندازه‌گیری کنند.

علاوه بر وسایل بیان شده در جدول (۵) به صورت محدود از اتمومتر^{۱۷}، تشت تبخیر از نوع کلاس A و نیز یک نوع تشت تبخیر کوچک‌تر^{۱۸} برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها استفاده شده است (Blanco و Folegatti، ۲۰۰۴؛ Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Casanova و همکاران، ۲۰۰۹). تشت تبخیر کلاس A از ورق گالوانیزه ۲۲، قطر ۱/۲۱ متر و عمق ۰/۲۵۵

متر از سطح خاک نصب می‌شود. Pérez و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند تشت تبخیر و اتمومتر، بهترین وسایل برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) در گلخانه است. همچنین، Blanco و Folegatti (۲۰۰۴) نشان دادند اتمومتر بهترین عملکرد را در برآورد ET_0 در گلخانه دارد؛ بنابراین، علاوه بر لایسیمتر وزنی، دستگاه اتمومتر ممکن است برای تخمین تبخیر و تعرق در گلخانه گزینه مناسبی باشد.

به طور کلی لایسیمتر برای اندازه‌گیری ET_0 استفاده می‌شود (Yan و همکاران، ۲۰۲۴). لایسیمتر در داخل گلخانه منعکس‌کننده کلیه شرایط حاکم بر مصرف آب گیاه است (Lazarovitch و همکاران، ۲۰۰۶؛ Gong و همکاران، ۲۰۱۹). مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق توسط لایسیمتر در انواع گلخانه‌ها متفاوت خواهد بود که نشان‌دهنده نرخ مصرف متفاوت آب در انواع گلخانه‌ها حتی برای گیاه مشابه است (Gong و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به این‌که استفاده از لایسیمتر همیشه برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق در گلخانه فراهم نیست؛ بنابراین، روابط و معادلات تجربی با دقتی مناسب می‌توانند به عنوان جایگزین استفاده شوند (Parsinejad و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین در مطالعات دیگر برآورد تبخیر و تعرق توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، الگوریتم‌های یادگیری

ماشین، ادغام داده‌های سنجش از راه دور و فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT) با استفاده از پارامترهای آب و هوایی محدود در مقایسه با استفاده از لایسیمترها و سنسورهای رطوبت خاک توصیه شده‌اند (Yuan و همکاران، ۲۰۲۳؛ Haofang، ۲۰۲۳).

داده‌های هواشناسی گلخانه

اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در داخل گلخانه ضروری است، زیرا این داده‌ها در برآورد نیاز آبی گیاهان نقش دارند. همچنین دقت اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های تبخیر و تعرق بسیار مهم است. روش‌های قرارگیری تجهیزات اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی بر اساس مطالعات انجام شده در داخل یا خارج از گلخانه‌ها در جدول (۶) نشان داده شده‌اند. بر اساس مطالعات انجام شده، از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در داخل و بیرون از گلخانه برای برآورد تبخیر و تعرق در انواع گلخانه‌ها استفاده شده است. داده‌های هواشناسی در مطالعات Baille و همکاران (۱۹۹۴)، Jessica و همکاران (۲۰۰۱)، Tanny و همکاران (۲۰۰۶)، Liu و همکاران (۲۰۰۸)، Takakura و همکاران (۲۰۰۹) و Bonachela و همکاران (۲۰۲۴) فقط در داخل گلخانه اندازه‌گیری شده‌اند. داده‌های هواشناسی در داخل گلخانه

جدول ۶- قرارگیری وسایل اندازه‌گیری هواشناسی در گلخانه‌ها

نوع گلخانه	خصوصیات گلخانه	قرارگیری وسایل اندازه‌گیری هواشناسی	مرجع
گلخانه	گلخانه پلاستیکی	داخل و خارج گلخانه	Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۰
با فناوری پایین	Screen-house	داخل و خارج گلخانه	Möller و همکاران، ۲۰۰۴؛ Möller و Assouline، ۲۰۰۷
	Screen-house	داخل گلخانه	Tanny و همکاران، ۲۰۰۶
گلخانه با فناوری متوسط	تهویه طبیعی	داخل و خارج گلخانه	Lopez-Cruz و همکاران، ۲۰۰۸؛ Valdes-Gomez و همکاران، ۲۰۰۹؛ Ahmad و Jaafar، ۲۰۱۹؛ Jo و همکاران، ۲۰۲۱؛ Shi و همکاران، ۲۰۲۳؛ Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴
	تهویه طبیعی	داخل گلخانه	Liu و همکاران، ۲۰۰۸؛ Takakura و همکاران، ۲۰۰۹؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۱؛ Bastug و همکاران، ۲۰۲۴
	تهویه اجباری	داخل و خارج گلخانه	Nikolaou و همکاران، ۲۰۲۳
گلخانه با فناوری بالا	محیط کنترل شده	داخل گلخانه	Baille و همکاران، ۱۹۹۴؛ Jessica و همکاران، ۲۰۰۱؛ Huang و همکاران، ۲۰۲۰؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۰a
	محیط کنترل شده	داخل و خارج گلخانه	Fynn و همکاران، ۱۹۹۳؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۵؛ Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴

که معرف داده‌های هواشناسی داخل گلخانه باشد، مفید واقع شود. به‌منظور استفاده کامل از داده‌های هواشناسی خارج از گلخانه و تبدیل آن به شرایط داخل گلخانه، ممکن است استفاده از یک روش مناسب مانند ضرب تصحیح راه‌حل خوبی باشد (Ahmad و Jaafar، ۲۰۱۹). برای انجام این کار باید مطالعات بیشتری در خصوص ارتباط بین آب و هوای داخل و خارج گلخانه انجام شود. کارایی نه‌چندان بالای مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌های با فناوری متوسط نیز باید به خوبی مورد توجه قرار گیرد. برای مدیریت بهتر آبیاری در این نوع گلخانه‌ها، نیاز به مدل‌های تبخیر و تعرقی است که بتوانند دقت بالایی را همانند گلخانه‌های با فناوری پایین و بالا ارائه دهند. تحقیقات بیشتر برای توسعه مدل‌های جدید یا داشتن یک عامل تصحیح کننده برای تبیین شرایط در گلخانه‌های با فناوری متوسط، ضروری به نظر می‌رسند.

دقت به‌کارگیری مدل‌های تبخیر و تعرق در گلخانه

دقت مدل‌های تبخیر و تعرق برای هر دسته از انواع گلخانه‌ها از نظر میزان فناوری به کار گرفته شده در آن‌ها براساس برخی مطالعات انجام شده، در جدول (۷) نشان داده شده است. دقت هر مدل از مقایسه تبخیر و تعرق برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر مطالعه گزارش شده است. در این جدول دقت مدل‌ها بر اساس بررسی مطالعات مقایسه و مرتب شده است.

برای گلخانه‌ای با فناوری پایین می‌توان گلخانه‌ها را به سه دسته تقسیم‌بندی کرد. این گلخانه‌ها شامل گلخانه با پوشش پلاستیکی و ساختار ضعیف، با یا بدون مالچ و گلخانه‌های با سقف مسطح (Screen-house) هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر از مدل‌های پنمن فائو و پنمن-مانتیت فائو در این نوع از گلخانه‌ها استفاده شده‌اند. علاوه براین، اغلب از مدل ساده‌تر و مبتنی بر تابش و دما مانند مدل‌های گریوز و پریستلی-تیلور نیز استفاده شده است (Katsoulas و Stanghellini، ۲۰۱۹؛ Ghiat و همکاران، ۲۰۲۱؛ Jo و همکاران، ۲۰۲۱؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۵). مدل‌های پیچیده‌ای مانند استنگلینی و فین در بررسی منابع برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه با ساختار ضعیف یافت نشد یا کمتر استفاده شده است. دلیل این امر این است که این مدل‌ها عمدتاً برای شرایط گلخانه با محیط کنترل شده توسعه داده شده‌اند (Jung و همکاران، ۲۰۲۲). با این حال، این سوال مطرح می‌شود که آیا این مدل‌ها ممکن است تبخیر و تعرق را با دقت خوبی در گلخانه‌های با فناوری کم برآورد کنند؟ برای برآورد تبخیر و

شامل تابش خورشیدی، تابش خالص، دمای هوا، دمای سطح برگ و سرعت باد، با استفاده از وسایل مختلف اندازه‌گیری شده‌اند. اندازه‌گیری‌ها در نزدیکی گیاه تحت کشت داخل گلخانه انجام شده‌اند؛ به‌طوری‌که برخی از تجهیزات تقریباً ۳۰ سانتی‌متر بالاتر از تاج و پوشش گیاه قرار داشته‌اند. در مدل‌های تبخیر و تعرق، از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری‌های شده در داخل گلخانه به‌طور مستقیم برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده شده است.

با وجود اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی در داخل گلخانه، برخی از مطالعات داده‌های هواشناسی خارج از گلخانه (در نزدیکی گلخانه) را نیز اندازه‌گیری کرده‌اند. این اندازه‌گیری‌ها عمدتاً در گلخانه‌های با فناوری پایین و سپس در گلخانه‌های با فناوری متوسط و بالا انجام شده است. مشخص است که آب و هوای داخل گلخانه‌های با فناوری پایین به‌دلیل ساختار، وسایل و مواد و پوشش آن‌ها، به آب و هوای خارج از گلخانه نزدیک است (Morille و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی در داخل گلخانه بسیار اهمیت دارد، زیرا این داده‌ها به خوبی شرایط حاکم در محیط گلخانه را منعکس می‌کنند. داده‌های هواشناسی در خارج از گلخانه بیشتر در گلخانه‌های با فناوری پایین در ارتباط بود؛ زیرا شرایط آب و هوا در داخل این نوع از گلخانه‌ها بیشتر منعکس‌کننده شرایط خارج از گلخانه (شرایط مزرعه) است. برآورد تبخیر و تعرق در داخل گلخانه بیشتر بر اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی در داخل آن تمرکز داشته است. علاوه بر این در مطالعات بیشتر از داده‌های هواشناسی خارج از گلخانه برای مقایسه وضعیت آب و هوا به‌ویژه تابش، دما و سرعت باد بین داخل و خارج گلخانه استفاده شده است. بررسی مطالعات مربوط به گلخانه‌ها نشان می‌دهد از داده‌های آب و هوای ایستگاه هواشناسی واقع در فاصله‌ای دور از گلخانه یا داده‌های هواشناسی قدیمی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده نشده است. در همه مطالعات از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده در داخل یا خارج گلخانه (در نزدیکی گلخانه) استفاده کرده بودند. تنها استفاده از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده بر اساس ایستگاه هواشناسی خارج از گلخانه ممکن است منجر به ایجاد خطا در برآورد تبخیر و تعرق شود، زیرا تنها داده‌های اندازه‌گیری شده خارج از گلخانه نمی‌توانند به‌طور دقیق آب و هوای داخل گلخانه را منعکس کنند. البته همیشه امکان اندازه‌گیری شرایط آب و هوای داخل گلخانه به دلیل کمبود امکانات و وسایل، تخصص و هزینه‌بر بودن وسایل وجود ندارد؛ بنابراین، ممکن است استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مجاور گلخانه

تعرق با استفاده از مدل‌های پیچیده استنگلینی و فین باید پارامترهای آب و هوایی بیشتری اندازه‌گیری شوند که ممکن است به تجهیزات با هزینه بالا نیاز داشته باشند (Yan و همکاران، ۲۰۲۰؛ رضوانی و همکاران، ۱۴۰۱)؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت به‌کارگیری مدل‌های رایج و ساده تبخیر و تعرق به

این دلیل بوده است که این مدل‌ها می‌توانند تبخیر و تعرق را با دقت بالایی برآورد کنند. علاوه بر این، پارامترهای آب و هوای کمتری باید اندازه‌گیری انجام شوند که می‌تواند هزینه‌های نگهداری و تمام شده تولید در گلخانه را کاهش دهد (Yan و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۷- خلاصه نتایج مدل‌های تبخیر و تعرق برای انواع گلخانه‌ها. R^2 : ضریب تبیین (بدون بعد)، RE: خطای نسبی (درصد)، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا (میلی‌متر).

منبع	نوع محصول	میزان دقت		وسيله اندازه‌گیری	مدل تبخیر و تعرق	مشخصات گلخانه	نوع گلخانه
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² = 0/98	RE=1/7%	لایسیمتر	پنمن فائو	گلخانه با پوشش پلاستیکی، بدون مالچ پاشی)	گلخانه با فناوری پایین
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/97	RE=2/7%	لایسیمتر	پنمن-مانتیت فائو		
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/97	RE=-3/7%	لایسیمتر	تابش فائو		
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/97	RE=3/7%	لایسیمتر	هارگریوز		
Rahimikhoob و همکاران، ۲۰۲۰	چمن چندساله	R ² =0/98	RMSE=0/07	لایسیمتر	پنمن-مانتیت فائو		
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/97	RE=-2/6%	لایسیمتر	هارگریوز	گلخانه با پوشش پلاستیکی (مالچ پاشی)	
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/98	RE=8/5%	لایسیمتر	پنمن-مانتیت فائو		
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/98	RE=-10/7%	لایسیمتر	تابش فائو		
Fernandez و همکاران، ۲۰۰۹	چمن چندساله	R ² =0/98	RE=-11/6%	لایسیمتر	پنمن فائو		
Möller و همکاران، ۲۰۰۴	فلفل دلمه‌ای	R ² =0/94	RE=3/8%	لایسیمتر	پنمن-مانتیت فائو screen-house	Screen-house	گلخانه با فناوری متوسط
Möller و Assouline، ۲۰۰۷؛ Tanny و همکاران، ۲۰۰۶	فلفل دلمه‌ای، موز	R ² =0/93	-	لایسیمتر	پنمن-مانتیت فائو		

نوع گلخانه	مشخصات گلخانه	مدل تبخیر و تعرق	وسیله اندازه‌گیری	میزان دقت	نوع محصول	منبع
گلخانه با فناوری متوسط	دارای تهویه طبیعی	استنگلینی	لایسیمتر	$R^2=0/72$ $RMSE=2/4$	گوجه‌فرنگی	López-Cruz و همکاران، ۲۰۰۸
		معادله بیلان انرژی	جریان سنج شیره	-	گوجه‌فرنگی	Takakura و همکاران، ۲۰۰۹
		پنمن فائو	سلول‌های وزنی	$RE=6/1\%$	موز	Liu و همکاران، ۲۰۰۸
		پریستلی-تیلور*	روش بیلان آب	-	گوجه‌فرنگی	Valdés-Gómez و همکاران، ۲۰۰۹
		پنمن-مانتیت فائو	سلول‌های وزنی	$RMSE=17/1$	گوجه‌فرنگی، موز	Liu و همکاران، ۲۰۰۸؛ López-Cruz و همکاران، ۲۰۰۸
		تابش فائو	سلول‌های وزنی	-	موز	Liu و همکاران، ۲۰۰۸
		هارگریوز	سلول‌های وزنی	-	موز	Liu و همکاران، ۲۰۰۸
		پریستلی-تیلور	سلول‌های وزنی	-	موز	Liu و همکاران، ۲۰۰۸
		پنمن-مانتیت فائو	لایسیمتر	$RMSE=0/17$	خیار	Ahmad و Jaafar، ۲۰۱۹
		هارگریوز-سامانی	لایسیمتر	$RMSE=0/22$	خیار	Ahmad و Jaafar، ۲۰۱۹
		تابش فائو	لایسیمتر	$RMSE=0/20$	خیار	Ahmad و Jaafar، ۲۰۱۹
		پریستلی-تیلور*	لایسیمتر	$RMSE=0/54$	گوجه‌فرنگی	Gong و همکاران، ۲۰۲۱
		مکینگ	لایسیمتر	$RMSE=1/29$	توت‌فرنگی	Jo و همکاران، ۲۰۲۱
		پنمن-مانتیت فائو	لایسیمتر	$RMSE=0/12$	فلفل شیرین	Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴
		پنمن-مانتیت فائو	لایسیمتر	$RMSE=0/16$	خیار	Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴
		هارگریوز-سامانی	لایسیمتر	$RMSE=0/07$	فلفل شیرین	Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴
		هارگریوز-سامانی	لایسیمتر	$RMSE=0/09$	خیار	Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴
	دارای تهویه اجباری	پریستلی-تیلور اصلاح شده *	لایسیمتر	-	خیار	Nikolaou و همکاران، ۲۰۲۳

منبع	نوع محصول	میزان دقت		وسیله اندازه گیری	مدل تبخیر و تعرق	مشخصات گلخانه	نوع گلخانه
Stanghellini, ۱۹۸۷؛ Jessica و همکاران، ۲۰۰۱	گوجه فرنگی، درخت افرا قرمز	$R^2=0/96$	-	ترازوی الکترونیکی وزنی	استنگلینی	محیط کنترل شده	گلخانه با فناوری بالا
Fynn و همکاران، ۱۹۹۳؛ Jessica و همکاران، ۲۰۰۱	گل داوودی، درخت افرا قرمز	$R^2=0/94$	RMSE=6	لایسیمتر	فین		
Jessica و همکاران، ۲۰۰۱	درخت افرا قرمز	$R^2=0/89$	RMSE=21	ترازوی الکترونیکی وزنی	پنمن- مانتیت فائو		
Jessica و همکاران، ۲۰۰۱	درخت افرا قرمز	$R^2=0/87$	RMSE=16/1	ترازوی الکترونیکی وزنی	پنمن فائو		
Baille و همکاران، ۱۹۹۴	گونه های زینتی	$R^2=0/87-0/97$	RMSE=17/9	ترازوی الکترونیکی وزنی	مدل ساده		
Villarreal-Guerrero و همکاران، ۲۰۱۲	لفل دلماه ای	$R^2=0/95$	-	ترازوی الکترونیکی وزنی	پنمن- مانتیت فائو		
Villarreal-Guerrero و همکاران، ۲۰۱۲	گوجه فرنگی	$R^2=0/96$	-	ترازوی الکترونیکی وزنی	پنمن- مانتیت فائو، استنگلینی		
Acquah و همکاران، ۲۰۱۸	گوجه فرنگی	$R^2=0/94$	-	جریان سنج شیره	استنگلینی		
Gong و همکاران، ۲۰۲۰b	گوجه فرنگی	$R^2=0/87$	RMSE=0/58	لایسیمتر	پنمن- مانتیت فائو		
Gong و همکاران، ۲۰۲۰b	گوجه فرنگی	$R^2=0/84$	RMSE=0/06	لایسیمتر	پریستلی- تیلور		
Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴	گوجه فرنگی	$R^2=0/97$	RMSE=0/31	لایسیمتر	پنمن- مانتیت فائو		
Wang و همکاران، ۲۰۲۵	بادمجان	$R^2=0/75$	-	لایسیمتر	پنمن- مانتیت فائو		

* در معادله پریستلی - تیلور از R_n داخل گلخانه استفاده شده است.

از هر دو مدل تبخیر و تعرق ساده و پیچیده در گلخانه با فناوری متوسط استفاده شده است. مدل استنگلینی، بهترین مدل برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌ای با فناوری متوسط با تهویه طبیعی بوده است (Acquah و همکاران، ۲۰۱۸). مدل استنگلینی برای گلخانه‌ای توسعه داده است که شاخص سطح برگ (LAI) در آن اندازه‌گیری شده باشد. شاخص سطح برگ یک پارامتر مهم است که در برآورد تعرق از سطح برگ تأثیر زیادی می‌گذارد (Ghiat و همکاران، ۲۰۲۱). مدل‌های تابش فائو و هارگریوز، کمترین دقت را در برآورد تبخیر و تعرق در این نوع گلخانه‌ها دارند. این دو مدل، مدل‌های مبتنی بر تابش هستند که از پارامترهای ورودی آب و هوای کمتری در برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه استفاده می‌کنند.

در گلخانه‌های با فناوری بالا، اکثر مطالعات از مدل‌های پیچیده تبخیر و تعرق استفاده کرده‌اند. هر شش مدل ذکر شده در جدول (۷) دقت بالایی دارند و می‌توانند در این نوع از گلخانه‌ها استفاده شوند. پارامترهای ورودی در بیشتر این مدل‌ها شامل LAI، کمبود فشار بخار، مقاومت سطح برگ یا سطح سایه‌انداز گیاه و میزان دقیق تابش دریافتی از پوشش گلخانه است. اگر برای محاسبه تبخیر و تعرق در گلخانه با فناوری بالا از مدل‌های ساده‌تری صرفاً بر اساس دما یا تابش استفاده شود، تبخیر و تعرق ممکن است دارای بیش برآورد یا کم برآورد باشد (Jessica و همکاران، ۲۰۰۱؛ Ghiat و همکاران، ۲۰۲۱).

میزان دقت (ضریب تبیین) مدل‌های تبخیر و تعرق بر اساس تبخیر و تعرق اندازه‌گیری و برآورد شده در هر سه نوع گلخانه متفاوت است (جدول ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد ضریب تبیین بالایی در گلخانه‌های با فناوری پایین و بالا وجود دارد؛ درحالی‌که در گلخانه‌های با فناوری متوسط، ضریب تبیین کمتر از بقیه بوده است. مدل‌های پنمن فائو، پنمن-مانتیت فائو، تابش فائو و هارگریوز عمده مدل‌های تبخیر و تعرق مورد استفاده در گلخانه‌های با فناوری پایین بودند. اصولاً این مدل‌ها برای شرایط بیرون از گلخانه طراحی شده‌اند. در نتیجه شرایط داخل گلخانه‌های با فناوری پایین تقریباً منعکس‌کننده شرایط بیرون از گلخانه است؛ زیرا آب و هوای داخل این نوع از گلخانه‌ها به شدت به شرایط خارج از گلخانه وابسته است (Tognoni و همکاران، ۱۹۹۹؛ اکبری فرد و همکاران، ۱۳۹۴). ساختار این نوع از گلخانه‌ها به گونه‌ای است که شرایط آب و هوای بیرون از گلخانه بر آب و هوای داخل آن تأثیر می‌گذارد؛ زیرا تبادل هوا به‌طور پیوسته از طریق باز شدن درها، پنجره‌ها و صفحه نمایش‌ها، اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، تجهیزات کنترل آب و هوایی خاصی در گلخانه‌های با فناوری پایین وجود ندارد

تا بتواند آب و هوای داخل گلخانه را تغییر دهد؛ بنابراین، ضریب تبیین بالا بین مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده توسط این مدل‌ها و تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در این نوع از گلخانه‌ها، می‌تواند به دلیل ارتباط بین آب و هوای بیرون و داخل باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد ضریب تبیین بالایی نیز بین تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل‌های تبخیر و تعرق شامل مدل‌های استنگلینی، فین، پنمن مانتیت فائو و پرستلی - تیلور و تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در گلخانه‌های با فناوری بالا به دست آمده است. برای این نوع از گلخانه‌ها، بیشتر از مدل‌های تبخیر و تعرق خاص مانند مدل استنگلینی و فین استفاده شده است. این مدل‌ها عمدتاً برای شرایط گلخانه‌ای توسعه یافته‌اند (Fynn و همکاران، ۱۹۹۳؛ Stanghellini، ۱۹۸۷) که در آن معمولاً سرعت هوا کم است و آب و هوای داخل گلخانه با آب و هوای خارج از آن تفاوت دارد (گلخانه‌های با آب و هوای کنترل شده).

به طور کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط گلخانه، معادله استاندارد برای تعیین تبخیر و تعرق یک محصول خاص وجود ندارد. دلیل این امر آن است که آب و هوای گلخانه باتوجه به نوع گلخانه، مکان، جهت ساخت (جانمایی)، مواد پوششی، حجم گلخانه، مکانیسم تهویه، استفاده از پرده حرارتی و سایه‌بان، تغییر می‌کند. با این حال می‌توان معادله جدید ایجاد کرد یا معادلات موجود را برای هر گلخانه مختلف در همان منطقه واسنجی کرد (Wang و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین پیشنهاد می‌شود معادلات تبخیر و تعرق مورد استفاده بسته به نوع گلخانه‌های رایج در منطقه انتخاب و در صورت لزوم با توجه به شرایط بیان شده، اصلاح شود (Karaca و همکاران، ۲۰۱۸). گرچه بررسی مطالعات دیگر نشان می‌دهد روش پنمن-مانتیت فائو یکی از کامل‌ترین مدل‌ها برای برآورد تبخیر و تعرق براساس تشعشع خالص خورشیدی و محصول، مقاومت‌های روزنه‌ای و آیرودینامیکی بوده و بهترین عملکرد را دارد (Katsoulas و Stanghellini، ۲۰۱۹؛ Khorsand و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ghiat و همکاران، ۲۰۲۱؛ Khorsand و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین برای برآوردهای دقیق تبخیر و تعرق که اثر تغییرات آب و هوایی (مانند افزایش غلظت CO₂ محیط) یا شرایط رشد (مانند تنش شوری) را روی سطح برگ نشان می‌دهد، روش پنمن-مانتیت اصلی توصیه می‌شود. به جای پذیرش فرضیات نشریه FAO 56 مربوط به مقاومت‌های داخلی و آیرودینامیکی گیاه، اندازه‌گیری‌های مستقیم مقاومت‌های روزنه‌ای و لایه

مرزی را می‌توان انجام داد و در معادله پنمن-مانتیت اصلی ادغام کرد (Turan و همکاران، ۲۰۰۹؛ Li و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند برای واسنجی مدل‌های موجود با شرایط خاص اقلیمی و رشد، استفاده شوند (Yan و همکاران، ۲۰۲۰).

استفاده از مدل‌های استگلینی و فین برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌های با فناوری بالا تأیید شده است. زمانی که از مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و پنمن فائو نیز در این نوع گلخانه‌ها استفاده شده است، میزان ضریب تبیین بالا بوده است (Rahimikhoob و همکاران، ۲۰۲۰)، اما برای مدل‌های استگلینی و فین ضریب تبیین پایین‌تری در مقایسه با کاربرد مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و پنمن فائو در گلخانه‌های با فناوری پایین گزارش شده است؛ بنابراین مدل‌های پنمن-مانتیت فائو و پنمن فائو برای گلخانه‌های با فناوری پایین مناسب‌تر می‌باشند (Yan و همکاران، ۲۰۲۱).

هرچند از هر دو مدل توسعه یافته استگلینی و فین برای شرایط مزرعه (بیرون از گلخانه) و در گلخانه‌های با فناوری متوسط استفاده شده است؛ اما ضریب تبیین پایین‌تری در گلخانه‌های با فناوری متوسط در مقایسه با گلخانه‌های با فناوری پایین و بالا به‌دست آمده است. مدل استگلینی بالاترین دقت و مدل پریستلی-تیلور (معادله اصلی) کمترین دقت را در برآورد تبخیر و تعرق در این نوع از گلخانه‌ها ارائه می‌دهند. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل‌های تبخیر و تعرق پیچیده ضریب تبیین بالاتری را نسبت به مدل‌های ساده تبخیر و تعرق (مبتنی بر دما یا تابش) دارند. با این حال هیچ‌کدام از مدل‌های تبخیر و تعرق پیچیده و ساده استفاده شده در این نوع از گلخانه‌ها، ضریب تبیین بالاتری نسبت به گلخانه‌های با فناوری پایین و بالا ندارند. شرایط آب و هوای خاصی در گلخانه‌های با فناوری متوسط وجود دارد به‌طوری‌که هر دو شرایط حاکم در گلخانه‌های با فناوری پایین و بالا را نشان می‌دهد. به‌ویژه هنگامی که تهویه طبیعی در گلخانه از طریق باز کردن سقف، پنجره‌ها یا دریچه‌ها اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، ساختار گلخانه و تجهیزات استفاده شده در این نوع از گلخانه‌ها تقریباً مشابه با گلخانه‌های فناوری بالا است. ترکیب این عوامل می‌تواند یکی از دلایل تعیین ضریب تبیین پایین‌تر در این نوع گلخانه‌ها باشد. مدل‌هایی برای استفاده در این نوع از گلخانه‌ها مناسب‌تر است که بتوانند به خوبی بیلان انرژی را با توجه به تمام عوامل موجود و تأثیرگذار در گلخانه، برآورد کنند.

به‌طورکلی توصیه می‌شود دقت و اعتبارسنجی مدل‌های تبخیر

و تعرق بر اساس داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده واقعی به‌ویژه در داخل انواع گلخانه‌ها، ارزیابی شود (Casanova و همکاران، ۲۰۰۹). در این شرایط دقت مدل‌ها و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها قابل اعتمادتر خواهد بود. به‌طورکلی در اکثر مطالعات اولویت از مدل‌های رایج و ساده برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌های با فناوری پایین استفاده شده است. با وجود سادگی، این مدل‌ها با دقت قابل قبولی تبخیر و تعرق را برآورد می‌کنند. بر اساس دقت مدل‌ها، کاربرد مدل پنمن-مانتیت فائو در گلخانه پلاستیکی (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Casanova و همکاران، ۲۰۰۹؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۰b؛ Clothier و همکاران، ۲۰۲۲؛ Bonachela و همکاران، ۲۰۲۴) و مدل‌ها رگروز (با محاسبه ضریب انتقال تابش از پوشش گلخانه) و مدل پریستلی-تیلور در گلخانه Screen-house توصیه می‌شود (جوزی و همکاران، ۱۴۰۲؛ Katsoulas و Stanghellini، ۲۰۱۹؛ Gong و همکاران، ۲۰۲۰b؛ Nikolaou و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، کاربرد مدل استگلینی برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌های با فناوری متوسط و بالا نیز با توجه به داشتن بالاترین دقت پیشنهاد می‌شود (Karaca و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ghia و همکاران، ۲۰۲۱). توصیه می‌شود مدل استگلینی را با ساختار گلخانه (به عنوان مثال، نوع پوشش، پوشش زمین، شکل سقف)، شرایط محیطی لازم برای رشد (مانند تهویه، سرمایش، گرمایش)، نوع آبیاری و تغذیه (مانند کشت هیدروپونیک) و نوع محصول، تطبیق داده شود.

نتیجه‌گیری

برآورد دقیق تبخیر و تعرق (نیاز آبی) در گلخانه یک عامل کلیدی در مدیریت آب کشت‌های گلخانه‌ای است. برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه را می‌توان به‌طور غیرمستقیم با استفاده از داده‌های آب و هوایی برآورد کرد. نیاز آبیاری یک محصول برابر است با آب مورد نیاز گیاه که از تفاوت بین بارندگی و نیاز آبی (ET) برآورد می‌شود. نیاز خالص آبیاری در شرایط گلخانه‌ای با توجه به عدم دریافت مستقیم بارندگی، برابر با نیاز آبی (ET) محصول است. حجم ناخالص آب آبیاری برابر با مقادیر نیاز خالص آبی کشت (ET) با در نظر گرفتن نیاز آبخوبی و تلفات ناشی از راندمان آبیاری و یکنواختی توزیع آب است. با توجه به اینکه بارندگی وارد گلخانه نمی‌شود و به دلیل آبیاری با دور کم و به تعداد بالا به روش قطره‌ای، رطوبت خاک به‌طور پیوسته نزدیک به ظرفیت زراعی نگهداشته می‌شود؛ بنابراین، بیشتر می‌توان فرض کرد که مقدار آب مورد نیاز محصولات در گلخانه معادل و بسیار نزدیک مقدار نیاز خالص آبی است.

وهارگریوز، کمترین دقت را در برآورد تبخیر و تعرق در این نوع گلخانه‌ها دارند. از مدل‌های استگلینی و فین برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌های با فناوری بالا استفاده شده است. همچنین در صورت استفاده از مدل‌های پنمن - مانتیث فائو و پنمن فائو در این نوع گلخانه‌ها، میزان دقت برآورد تبخیر و تعرق بالا بوده است. به‌طور کلی دقت هر مدل به نوع گلخانه و شرایط آب و هوای حاکم بر آن، بستگی دارد. بررسی نتایج مطالعات مختلف در خصوص برآورد نیاز آبی گیاه (ET_c) در گلخانه‌ها نشان داده است که بیشتر از مدل پنمن - مانتیث فائو برای انجام این کار، استفاده شده است. اگرچه معادله پنمن - مانتیث فائو بیشتر برای برآورد نیاز آبی تحت شرایط آب و هوای بیرون از گلخانه (محیط باز) است، با این حال، بسیاری از پژوهش‌ها از مدل پنمن - مانتیث فائو برای برآورد نیاز آبی در گلخانه‌ها استفاده کرده‌اند. اگرچه هنوز استفاده از یک مدل تبخیر و تعرق مشخص برای برآورد نیاز آبی در گلخانه‌ها اثبات نشده است، اما به‌کارگیری هر کدام از مدل‌ها به نوع گلخانه به‌دلیل شرایط آب و هوایی متفاوت درون آن‌ها، به داده‌های در دسترس و اندازه‌گیری شده در درون و بیرون آن‌ها بستگی دارد. هر کدام از مدل‌ها به داده‌های آب و هوایی خاصی نیاز دارند تا بتوانند مقدار مقدار تبخیر و تعرق را برآورد کنند. علاوه بر این، داده‌های در دسترس و اندازه‌گیری شده متفاوت در هر کدام از گلخانه‌ها، یکی از عوامل مهم در تعیین انتخاب مدل تبخیر و تعرق است. لازم به ذکر است دقت مدل در برآورد تبخیر و تعرق در هر نوع گلخانه نیز می‌تواند عاملی برای انتخاب آن مدل باشد.

پی‌نوشت‌ها

1. Crop evapotranspiration
2. Evapotranspiration
3. Penman-Monteith
4. Reference evapotranspiration
5. Potential evapotranspiration
6. Crop evapotranspiration
7. Photosynthetic Active Radiation
8. Heat exchange
9. Convection
10. Natural convection
11. Forced convection
12. Vapour balance
13. Drying power
14. Advection
15. Electronic weighing balance
16. Load cells
17. Atmometer
18. Reduced pan

مدل‌های تعرق متعددی در منابع برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه موجود هستند، اما اغلب مدل‌های تبخیر و تعرق مناسب‌تر هستند؛ زیرا هر دو فرآیند تبخیر و تعرق را در محیط گلخانه در نظر می‌گیرند. علاوه بر این، تشخیص و جداسازی هر دو فرآیند دشوار است، زیرا به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند. با درک این موضوع، پرکاربردترین مدل‌های تبخیر و تعرق در گلخانه در این مطالعه بررسی شدند. دو روش برای برآورد غیرمستقیم تبخیر و تعرق شامل مدل‌های تجربی یا مدل‌های مبتنی بر قوانین فیزیک، وجود دارند. به‌طور کلی مدل‌های تبخیر و تعرق در برخی از مدل‌ها مبتنی بر قوانین فیزیک و بر اساس توازن انرژی و ترکیبی از نظریه‌های مختلف هستند. مدل‌های دیگر درواقع مدل‌های تجربی هستند که تبخیر و تعرق را بر اساس روابط تجربی مستخرج از پارامترهای تابش خورشید، دما و رطوبت نسبی برآورد می‌کنند. در گلخانه، تعرق از سطح گیاه مهم‌ترین جزء اتلاف انرژی است که بر میزان تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد. تبخیر و تعرق در گلخانه شامل بیلان انرژی تابش خالص خورشیدی، انتقال گرما و تبخیر از سطح سایه‌انداز گیاه است. بیشتر مدل‌هایی که بر اساس بیلان انرژی توسعه یافته‌اند، معمولاً برآورد مناسب‌تری از تعرق را ارائه می‌دهند.

مدل‌های تبخیر و تعرق مختلفی برای برآورد نیاز آبی کشت‌های گلخانه‌ای استفاده شده‌اند. گلخانه‌ها براساس نوع فناوری به سه نوع گروه گلخانه‌ها با فناوری پایین، متوسط و بالا تقسیم می‌شوند. فناوری گلخانه نیز مربوط به ساختار، مواد و مصالح، تجهیزات و امکانات گلخانه می‌شوند. به‌طور کلی نیاز آبی در گلخانه (ET_c) برای یک محصول مشخص تحت تأثیر بیلان انرژی کل سامانه گلخانه است و به‌شدت به ویژگی‌های گلخانه و تجهیزات کنترل آب و هوا بستگی دارد. بنابراین، برای تعیین ET_c باید همه این عوامل در انواع گلخانه‌ها از جمله گلخانه‌های با فناوری بالا مانند گلخانه‌های بسته و کنترل شده تا گلخانه‌های سنتی با پوشش پلاستیکی و فناوری پایین در نظر گرفته شوند. مطالعات زیادی برای توسعه مدل‌های تبخیر و تعرق، مقایسه و انتخاب مدل(های) مناسب برای کشت‌ها در انواع گلخانه‌ها، انجام شده‌اند. بررسی‌ها نشان داد که بیشتر از مدل‌های پنمن فائو و پنمن - مانتیث فائو در گلخانه‌های با فناوری پایین استفاده شده است. علاوه بر این، از مدل ساده‌تر و مبتنی بر تابش و دما مانند مدل هارگریوز و پریستلی - تیلور نیز استفاده شده است. از هر دو مدل تبخیر و تعرق ساده و پیچیده در گلخانه با فناوری متوسط استفاده شده است. مدل استگلینی، بهترین مدل برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه‌ای با فناوری متوسط بوده است. مدل‌های تابش فائو

- Acquah, S.J., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., Zhao, B., Wu, H., & Zhang, H. (2018). Application and evaluation of Stanghellini model in the determination of crop evapotranspiration in a naturally ventilated greenhouse. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(6), 95-103.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L.S., & Pruitt, W.O. (1997). Proposed Revision to the FAO Procedure for Estimating Crop Water Requirements. *Acta Horticulturae*, 449, 17-34. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1997.449.2>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, 300(9), D05109. Rome, Italy.
- Altenhofen, J. (1985). A modified atmometer for on-farm ET determination. In National conference on advances in evapotranspiration, Hyatt Regency Chicago, Ill. (USA), 16-17 Dec 1985. American Society of Agricultural Engineers. USA.
- Aslan, G.E., Bastug, R., Karaca, C., Kurunc, A., Buyuktas, D., & Navarro, A. (2024). Effects of Saline Irrigation Water Applications on Evapotranspiration Partitioning and Crop Coefficient of Tomato Grown in Mediterranean-Type Greenhouses. *Agronomy*, 14(8), 1771. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081771>
- Baille, A. (1992). Water Status Monitoring in Greenhouse Crops. *Acta Horticulturae*, 304, 15-28. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1992.304.1>
- Baille, M., Baille, A., & Laury, J.C. (1994). A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59(3-4), 217-232. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90015-9)
- Bastug, R., Bayuktas, D., Bayuktas, K., Aydinsakir, K., Onus, A.N., & Karaca, C. (2024). Evapotranspiration and crop coefficients of some vegetable crops grown under greenhouse conditions. *Journal of Water and Climate Change*, 15(7), 3236-3259. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.093>
- Blanco, F.F., & Folegatti, M.V. (2003). Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 285-291. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662003000200017>
- Blanco, F.F., & Folegatti, M.V. (2004). Evaluation of evaporation-measuring equipments for estimating evapotranspiration within a greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(2-3), 184-188. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662004000200004>
- Bonachela, S., Fernandez, M.D., Hernandez, J., & Karaca, C. (2024). Computing air temperature and humidity for reference crop evapotranspiration calculation in passive
- ابراهیمی، میلاد، رضاوردی‌نژاد، وحید، بشارت، سینا، و عبدی، مریم. (۱۳۹۷). تعیین تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی مراحل رشد گیاه دارویی ریحان در کشت گلخانه‌ای. مدیریت آب و آبیاری، ۸(۱)، ۱-۱۳. doi: 10.22059/jwim.2018.244085.573
- اکبری فرد، سعید، بختیاری، بهرام، محمد میرحبیبی، محمد، و رضایی استخروئیه، عباس. (۱۳۹۴). مقایسه تبخیر و تعرق مرجع روزانه محاسبه شده و واقعی در شرایط گلخانه‌ای در اقلیم نیمه‌خشک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹(۶)، ۹۳۷-۹۴۷.
- جوزی، مهدی، ابراهیمی پاک، نیاز علی، و تافته، آرش. (۱۴۰۲). برآورد تبخیر تعرق 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)، ۱-۱۶. doi: 10.22034/hydro.2023.53196.1271
- رضوانی، سید معین الدین، زارعی، قاسم، و سالمی، حمیدرضا. (۱۴۰۱). تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی خیار گلخانه‌ای در منطقه همدان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۵(۵)، ۹۰۴-۹۱۶. doi: 10.1001.1.20087942.1401.16.5.2.7
- رفیعی، محمد رفیع، معاضد، هادی، قائمی، علی اصغر، و برومند نسب، سعید. (۱۳۹۵). ارزیابی روش FAO-56 در برآورد تبخیر-تعرق و ضرایب گیاهی بادنجان در شرایط گلخانه و مزرعه. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۲)، ۷۷-۵۹. doi: 10.22055/jise.2016.12112
- کیخایی، فاطمه، زارعی، قاسم، گنجی خرم دل، ناصر، و صادقی، صادق. (۱۳۹۹). تعیین نیاز آبی ارقام گل رز در گلخانه هیدروپونیک. پژوهش آب در کشاورزی، ۴(۴)، ۳۴-۵۴۲. doi: 10.22092/jwra.2021.123622
- مودن‌زاده، روزبه. (۱۳۹۴). اندازه‌گیری و مدل‌سازی تبخیر-تعرق خیار در شرایط درون گلخانه. آب و خاک، ۵(۲۹)، ۱۲۴۷-۱۲۶۱. doi: 10.22067/jsw.v29i5.38053

Mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management*, 302, 108991.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108991>

- Bot, G.P. (1983). *Greenhouse Climate: from Physical Processes to A Dynamic Model*. Doctoral dissertation, Bot, Landbouwhogeschool Wageningen. Promotor (en): J. Schenk. - Wageningen: Landbouwhogeschool - 240, Netherlands.
- Bot, G.P.A. (1989). *Greenhouse Simulation Models*. *Acta Horticulturae*, 245, 315-325.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.1989.245.42>
- Boulard, T. (2007). *Evapotranspiration*. *Encyclopedia of Water Science*, Second Edition (Print Version), 337-342. CRC Press. Boca Raton, US state.
<https://doi.org/10.1201/noe0849396274.ch84>
- Casanova, P.M., Messing, I., Joel, A., & Caeete, M.A. (2009). Methods to Estimate Lettuce Evapotranspiration in Greenhouse Conditions in the Central Zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1).
<https://doi.org/10.4067/s0718-58392009000100008>
- Clothier, B., Al Tamimi, M., Green, S., Hammami, Z., Ammar, K., Al Ketbi, M., Al-Shrouf, A. M., Dawoud, M., & Kennedy, L. (2022). *Evapotranspiration and Crop Coefficients Using Lysimeter Measurements for Food Crops in the Hyper-Arid United Arab Emirates*. *SSRN Electronic Journal*, 1-36.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4092705>
- Doorenboss, J., & Pruitt, W. (1975). *Guidelines for predicting crop water requirement*. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 24. 179. Rome, Italy.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 1. Rome, Italy.
- Fernandes, C., Cora, J.E., & Araújo, J.A.C.de. (2003). *Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses*. *Scientia Agricola*, 60(3), 591-594.
<https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000300027>
- Fernandez, M.D., Baeza, E., Cespedes, A., Perez-Parra, J., & Gazquez, J.C. (2009). Validation of on-farm crop water requirements (PrHo) model for horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Acta Horticulturae*, 807, 295-300.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.2009.807.40>
- Fernandez, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., Lopez, J. C., Granados, M. R., Gallardo, M., & Fereres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 28(6), 497-509.
<https://doi.org/10.1007/s00271-010-0210-z>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas*. Plant Production and Protection Division, Paper 217. 640 pp. Rome, Italy.
- Fynn, R.P., Al-Shooshan, A., Short, T.H., & McMahon, R.W. (1993). *Evapotranspiration measurement and modeling for a potted chrysanthemum crop*. *Transactions of the ASAE*, 36(6), 1907-1913.
<https://doi.org/10.13031/2013.28541>
- Ghat, I., Govindan, R., & Al-Ansari, T. (2023). Evaluation of evapotranspiration models for cucumbers grown under CO2 enriched and HVAC driven greenhouses: A step towards precision irrigation in hyper-arid regions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1155443>
- Ghat, I., Mackey, H.R., & Al-Ansari, T. (2021). A Review of Evapotranspiration Measurement Models, Techniques and Methods for Open and Closed Agricultural Field Applications. *Water*, 13(18), 2523.
<https://doi.org/10.3390/w13182523>
- Gong, X., Liu, H., Sun, J., Gao, Y., & Zhang, H. (2019). Comparison of Shuttleworth-Wallace model and dual crop coefficient method for estimating evapotranspiration of tomato cultivated in a solar greenhouse. *Agricultural Water Management*, 217, 141-153.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.012>
- Gong, X., Qiu, R., Sun, J., Ge, J., Li, Y., & Wang, S. (2020a). Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 235, 106154.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106154>
- Gong, X., Wang, S., Xu, C., Zhang, H., & Ge, J. (2020b). Evaluation of Several Reference Evapotranspiration Models and Determination of Crop Water Requirement for Tomato in a Solar Greenhouse. *HortScience*, 55(2), 244-250. <https://doi.org/10.21273/hortsci14514-19>
- Gong, X., Qiu, R., Ge, J., Bo, G., Ping, Y., Xin, Q., & Wang, S. (2021). Evapotranspiration partitioning of greenhouse grown tomato using a modified Priestley-Taylor model. *Agricultural Water Management*, 247, 106709.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106709>
- Graaf, R.d. (1988). *Automation of the Water Supply of Glasshouse Crops by Means of Calculation the Transpiration and Measuring the Amount of Drainage Water*. *Scientia Horticulturae (ISHS)* 229, 219-232.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.1988.229.21>
- Guo, D., Chen, Z., Huang, D., & Zhang, J. (2021). Evapotranspiration Model-based Scheduling Strategy for Baby Pakchoi Irrigation in Greenhouse. *HortScience*, 56(2), 204-209. <https://doi.org/10.21273/hortsci15513-20>
- Hamer, P.J.C. (1998). Validation of A Model Used for Irrigation Control of a Greenhouse Crop. *Acta Horticulturae*, 458, 75-82.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.1998.458.8>

- Haofang, D. (2023). Advances in Modelling Techniques for Greenhouse Microclimate and Evapotranspiration: An Overview. *American Journal of Biomedical Science and Pharmaceutical Innovation*, 3(07), 1-4.
<https://doi.org/10.37547/ajbspi/Volume03Issue07-01>
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., & Riley, J.P. 1985. Agricultural Benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(2), 113-124.
doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:2(113))
- Huang, S., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., Acquah, S. J., Yu, J., Li, L., Ma, J., & Opoku Darko, R. (2020). Modeling evapotranspiration for cucumber plants based on the Shuttleworth-Wallace model in a Venlo-type greenhouse. *Agricultural Water Management*, 228, 105861.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105861>
- Ibrahim, Y.M., Buyuktas, D., & Karaca, C. (2024). Evaporation and Transpiration Components of Crop Evapotranspiration and Growth Parameters of Lettuce Grown under Greenhouse Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 150(5), 1-16.
<https://doi.org/10.1061/jidedh.ireng-10256>
- Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorro, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109480.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>
- Jaafar, H.H., & Ahmad, F. (2019). Determining Reference Evapotranspiration in Greenhouses from External Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(9), 1-12.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001404](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001404)
- Jessica, J., Prenger, R., Peter F., Robert, C., & Hansen, D. (2001). An Evaluation of Four Evapotranspiration Models. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 018010, 1-10.
<https://doi.org/10.13031/2013.7500>
- Jo, W.J., Kim, D.S., Sim, H.S., Ahn, S.R., Lee, H.J., Moon, Y.H., Woo, U.J., & Kim, S.K. (2021). Estimation of Evapotranspiration and Water Requirements of Strawberry Plants in Greenhouses Using Environmental Data. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.684808>
- Joliet, O. (1994). HORTTRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(1), 23-37.
<https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1003>
- Jung, D.H., Lee, T.S., Kim, K., & Park, S.H. (2022). A Deep Learning Model to Predict Evapotranspiration and Relative Humidity for Moisture Control in Tomato Greenhouses. *Agronomy*, 12(9), 2169.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12092169>
- Karaca, C., Tezcan, A., Bayaktas, K., Bayaktas, D., & Bastug, R. (2018). Equations developed to estimate evapotranspiration in greenhouses. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 28(4), 482-489.
<https://doi.org/10.29133/yyutbd.427115>
- Kashyap, P.S., & Panda, R.K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), 9-25.
[https://doi.org/10.1016/s0378-3774\(01\)00102-0](https://doi.org/10.1016/s0378-3774(01)00102-0)
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 9(7), 392.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9070392>
- Keykhai, F., Zareai, G., Ganji Khorramdel, N., & Sadeghi, S. (2021). Determining Crop Water Requirement of Rose Varieties in Hydroponic Greenhouse, *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(4), 531-542.
doi: [10.22092/jwra.2021.123622](https://doi.org/10.22092/jwra.2021.123622)
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A. & Besharat, S., (2019). Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 224(105740), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105740>
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Heris, A.M., Rahimi, A. & Besharat, S., (2020). Response of maize and black gram yield and water productivity to variations in canopy temperature and crop water stress index. *International Agrophysics*, 34(3), 381-390.
<https://doi.org/10.31545/intagr/126439>
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S. & Sadraddini, A.A., (2021). Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. *Scientific reports*, 11(869), 1-19.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79516-3>
- Kipp, J.A. (2010). Optimal climate regions in Mexico for greenhouse crop production (No. GTB-1024). *Wageningen UR Greenhouse Horticulture*, 1-24. Netherlands.
- Lazarovitch, N., Ben-Gal, A., & Shani, U. (2006). An Automated Rotating Lysimeter System for Greenhouse Evapotranspiration Studies. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 801-804. Portico.
<https://doi.org/10.2136/vzj2005.0137>
- Li, X., Kang, S., Niu, J., Huo, Z., & Liu, J. (2019). Improving the representation of stomatal responses to CO₂ within the Penman-Monteith model to better estimate evapotranspiration responses to climate change. *Journal of Hydrology*, 572, 692-705.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.029>

- Liu, H.J., Cohen, S., Tanny, J., Lemcoff, J.H., & Huang, G. (2008). Estimation of banana (*Musa sp.*) plant transpiration using a standard 20 cm pan in a greenhouse. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(3-4), 311-323.
<https://doi.org/10.1007/s10795-008-9058-2>
- López-Cruz, I. L., Olivera-López, M., & Herrera-Ruiz, G. (2008). SIMULATION OF GREENHOUSE TOMATO CROP TRANSPIRATION BY TWO THEORETICAL MODELS. *Acta Horticulturae*, 797, 145-150.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.797.18>
- Moazed, H.A. Ghaemi, A. & Rafiee M.R. (2014). Evaluation of Several Reference Evapotranspiration Methods: A Comparative Study of Greenhouse and Outdoor Conditions. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 38(C2), 421-437.
doi: 10.22099/ijstc.2014.2419
- Møller, M., Tanny, J., Li, Y., & Cohen, S. (2004). Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127(1-2), 35-51.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.08.002>
- Møller, M., & Assouline, S. (2007). Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science*, 25(2), 171-181.
<https://doi.org/10.1007/s00271-006-0045-9>
- Morille, B., Migeon, C., & Bournet, P. E. (2013). Is the Penman-Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2019). Irrigation of Greenhouse Crops. *Horticulturae*, 5(1), 7.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae5010007>
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2023). Assessment of the Priestley-Taylor coefficient and a modified potential evapotranspiration model. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100075.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100075>
- Okuya, A., & Okuya, T. (1988). The Transpiration of Greenhouse Tomato Plants in Rockwool Culture and Its Relationship to Climatic Factors. *Acta Horticulturae*, 230, 307-312.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.1988.230.39>
- Pardossi, A., Tognoni, F., & Incrocci, L. (2004). Mediterranean greenhouse technology. *Chronica Horticulturae*, 44(2), 28-34.
- Parsinejad, M., Raja, O., & Chehrenegar, B. (2022). Practical analysis of remote sensing estimations of water use for major crops throughout the Urmia Lake basin. *Agricultural Water Management*, 260, 107232.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107232>
- Perez, M.D., Villanueva, D.G., Medina, J.C., Ferre, F.C., & Rodriguez, E.J.F. (2003). Utilización de mallas anti-insectos como protección en invernaderos mediterráneos: efectos de la densidad de hilos y de la fotoselectividad sobre la difusión del tylocv (virus de la cuchara) en el cultivo de tomate. In *Innovaciones tecnológicas en cultivos de invernadero* (pp. 165-175). Ediciones Agrotécnicas.
- Pidwirny, M. (2006). Actual and Potential Evapotranspiration. *Fundamental of Physical Geography*, 2nd Edition.
<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8j.html>
- Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:otaosh%3E2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:otaosh%3E2.3.co;2)
- Rafie, M., & Mahbod, M. (2020). Application of logistic model to estimate eggplant yield and dry matter under different levels of salinity and water deficit in greenhouse and outdoor conditions. *Water SA*, 46(3), 419-428.
<https://doi.org/10.17159/wsa/2020.v46.i3.8652>
- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. *Irrigation Science*, 38(4), 389-400.
<https://doi.org/10.1007/s00271-020-00680-5>
- Richard L. & Bello, B.A. (2007). Evapotranspiration: Greenhouses. *Encyclopedia of Water Science*, Second Edition, 337-342.
<https://doi.org/10.1081/e-ews2-120010311>
- Scheff, J., & Frierson, D.M.W. (2014). Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. *Journal of Climate*, 27(4), 1539-1558.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00233.1>
- Shi, W., Zhang, X., Xue, X., Feng, F., Zheng, W., & Chen, L. (2023). Analyzing Evapotranspiration in Greenhouses: A Lysimeter-Based Calculation and Evaluation Approach. *Agronomy*, 13(12), 3059.
<https://doi.org/10.3390/agronomy13123059>
- Stanghellini, C. (1987). Transpiration of Greenhouse Crops: an aid to climate management. Ph. D, Wageningen University and Research, Wageningen, Netherlands.
<https://doi.org/10.18174/202121>
- Subedi, A., & Chavez, J.L. (2015). Crop evapotranspiration (ET) estimation models: a review and discussion of the applicability and limitations of ET methods. *J Agric Sci*, 7(6), 50.
<http://dx.doi.org/10.5539/jas.v7n6p50>
- Tadj, N., Draoui, B., Theodoridis, G., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2007). Convective Heat Transfer in A Heated Greenhouse Tunnel. *Acta Horticulturae*, 747, 113-120.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.2007.747.11>

- Takakura, T., Kubota, C., Sase, S., Hayashi, M., Ishii, M., Takayama, K., Nishina, H., Kurata, K., & Giacomelli, G. A. (2009). Measurement of evapotranspiration rate in a single-span greenhouse using the energy-balance equation. *Biosystems Engineering*, 102(3), 298–304.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.12.004>
- Tanny, J., Cohen, S., Elmowitz, D., Liu, H., & Grava, A. (2006). Measuring and Predicting Evapotranspiration in a Banana Screenhouse. *Acta Horticulturae*, 718, 538–546.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.2006.718.63>
- Teitel, M., Vitoshkin, H., Geoola, F., Karlsson, S., & Stahl, N. (2017). Greenhouse and screenhouse cover materials: Literature review and industry perspective. In *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant*, 1227, 31–44. Beijing, China.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.4>
- Tognoni, F., Pardossi, A., & Serra, G. (1999). Strategies to Match Greenhouses to Crop Production. In *International Symposium on Growing Media and Hydroponics*, 481, 451–462.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.1999.481.52>
- Turan, M.A., Elkarim, A.H.A., Taban, N., & Taban, S. (2009). Effect of salt stress on growth, stomatal resistance, proline and chlorophyll concentrations on maize plant. *African Journal of Agricultural Research*, 4(9), 893–897.
- Valdes-Gomez, H., Ortega-Farias, S., & Argote, M. (2009). Evaluación del Consumo de Agua de un Cultivo de Tomate en Invernadero Usando el Método de Priestley-Taylor. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 3–11.
<https://doi.org/10.4067/s0718-58392009000100001>
- Villarreal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G.A., & Arbel, A. (2012). Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering*, 111(2), 217–228.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.015>
- Wang, L., Iddio, E., & Ewers, B. (2021). Introductory overview: Evapotranspiration (ET) models for controlled environment agriculture (CEA). *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106447.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106447>
- Wang, B., Bao, R., Yan, H., Zheng, H., Wu, J., Zhang, C., & Wang, G. (2025). Study of evapotranspiration and crop coefficients for eggplant in a Venlo-type greenhouse in South China. *Irrigation and Drainage*, 74(2), 556–568.
<https://doi.org/10.1002/ird.3025>
- Yadava, R., & Singh, T. B. (2003). Stability analysis in wheat for grain protein. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 63(04), 337–338.
- Yan, H., Huang, S., Zhang, C., Gerrits, M. C., Wang, G., Zhang, J., Zhao, B., Acquah, S. J., Wu, H., & Fu, H. (2020). Parameterization and Application of Stanghellini Model for Estimating Greenhouse Cucumber Transpiration. *Water*, 12(2), 517.
<https://doi.org/10.3390/w12020517>
- Yan, H., Joe Acquah, S., Zhang, J., Wang, G., Zhang, C., & Opoku Darko, R. (2021). Overview of modelling techniques for greenhouse microclimate environment and evapotranspiration. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(6), 1–8.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211406.3948>
- Yan, H., Zhao, S., Zhang, C., Zhang, J., Wang, G., Li, M., Deng, S., Liang, S. & Jiang, J. (2024). Calibration and assessment of evapotranspiration methods for cucumber plants in a Venlo-type greenhouse. *Irrigation and Drainage*, 73(1), 119–135.
<https://doi.org/10.1002/ird.2856>
- Yao, M., Gao, M., Wang, J., Li, B., Mao, L., Zhao, M., Xu, Z., Niu, H., Wang, T., Sun, L., & Niu, D. (2023). Estimating Evapotranspiration of Greenhouse Tomato under Different Irrigation Levels Using a Modified Dual Crop Coefficient Model in Northeast China. *Agriculture*, 13(9), 1741.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13091741>
- Yuan, H., Feng, C., Li, J., Zhang, J., Wang, X., & Cheng, M. (2023). A Method to Estimate Evapotranspiration in Greenhouse Conditions by Artificial Neural Networks Using Limited Climate Parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2650(1), 012029.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2650/1/012029>
- Zhang, Z., Liu, S., Liu, S., & Huang, Z. (2010). Estimation of Cucumber Evapotranspiration in Solar Greenhouse in Northeast China. *Agricultural Sciences in China*, 9(4), 512–518.
[https://doi.org/10.1016/s1671-2927\(09\)60124-3](https://doi.org/10.1016/s1671-2927(09)60124-3)
- Zhang, J., Bai, Y., Yan, H., Guo, H., Yang, S., & Wang, J. (2020). Linking observation, modelling and satellite-based estimation of global land evapotranspiration. *Big Earth Data*, 4(2), 94–127.
<https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1743612>