

A review of methods for determining potential evapotranspiration in greenhouses with an approach of use in smart irrigation

M. Ghobadinia^{1*}, A.R. Ghasemi²

Extended Abstract

Introduction:

The increasing scarcity of water resources in arid and semi-arid regions, driven by population growth, climate change and extended droughts, highlights the necessity for sustainable agricultural practices. Greenhouse cultivation offers a practical solution for such challenging environments, particularly in countries like Iran, which experience severe water shortages. Developing greenhouse cultivation and implementing smart water management systems are essential strategies for enhancing water-use efficiency. Accurate estimation of crop water requirement in greenhouses is essential for optimizing irrigation schedules and improving productivity. This study reviews various methods for estimating evapotranspiration (ET) in greenhouses, evaluates their effectiveness and provides recommendations. Greenhouse environments differ from open-field conditions, due to controlled factors such as air temperature, humidity and wind speed. In addition to the controlled variables, uncontrollable factors like altitude (which affects atmospheric pressure) and solar radiation can influence the performance of ET estimation methods. Understanding the strengths and limitations of different approaches is essential for developing reliable models tailored to greenhouse conditions.

Review of Research Studies:

Several methods have been proposed for estimating greenhouse evapotranspiration. Some methods, such as Turc, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani and Blaney-Criddle, exhibit poor accuracy and are unsuitable for greenhouse applications. These methods oversimplify complex environmental interactions or rely on limited meteorological data, resulting in significant deviations from actual ET values. Other methods, including FAO-Radiation, Priestley-Taylor and FAO-Penman, provide relatively acceptable results but still show considerable errors under certain conditions. While they incorporate more variables than simpler methods, their reliance on assumptions about energy balance and climatic relationships limits their precision. The Penman-Monteith equation is a methods that widely used and recommended by many researchers. This approach is recognized by the Food and Agriculture Organization (FAO) as the standard for estimating reference evapotranspiration (ET_0) and integrates key meteorological parameters such as air temperature, humidity, wind speed and solar radiation into a comprehensive energy balance framework. Its adaptability to diverse climatic conditions makes it particularly suitable for greenhouse environments where microclimatic factors are precisely controlled. Another promising method is the Stanghellini equation, specifically designed for greenhouse conditions. Although fewer studies have evaluated this approach, initial findings suggest that Stanghellini equation provides highly accurate estimates when applied in technologically advanced greenhouses. In contrast, the FAO-Penman-Monteith variant shows weaker performance, especially in low-tech greenhouse settings, highlighting the importance of aligning methodology selection with greenhouse infrastructure. The diversity in the performance among some of these methods across various regions can be attributed to uncontrollable parameters such as altitude, which affects air pressure. Also, the variations in the amount of the important parameter such as solar radiation, despite the possibility of controlling it in greenhouses, can be important and lead to differ the results among the methods in distinct regions, due to the difference in its control methods. The choice of input parameters in the equations also influences accuracy. Therefore, careful calibration and validation based on local conditions are imperative. Alternative approaches, such as lysimeters and evaporation pans, offer high accuracy. Lysimeters, while providing direct measurements of plant water consumption, are time-consuming and impractical for large-scale applications. Similarly, evaporation pans

1- Associated Professor of the Department of Water Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

2- Associated Professor of the Department of Water Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

* Corresponding Author: mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

Received: 2025/01/20

Accepted: 2025/03/01

require precise depth measurements and coefficient adjustments, making them less suitable for automated greenhouse management systems.

Conclusion:

The literature review showed that no single method can be universally recommended for all greenhouse conditions. However, the findings suggest that the Penman-Monteith, FAO-Penman-Monteith and Stanglini methods are more reliable and exhibit less error in estimating greenhouse evapotranspiration compared with other methods. Their ability to utilize multiple meteorological parameters, and adapt to controlled greenhouse environments has demonstrated greater accuracy than alternative methods. Additionally, the literature review revealed that for low-tech greenhouses, the Penman-Monteith and FAO-Penman-Monteith methods are preferred due to their ease of application; while in technologically advanced greenhouses, the Stanghellini equation is more beneficial, provided that careful calibration is performed. These methods enable smart irrigation systems, facilitating real-time adjustments and optimization of water use efficiency. Consequently, while lysimeters represent the most accurate method for direct measurement of evapotranspiration, their limitations make them unsuitable for widespread use in greenhouses. Similarly, evaporation pans lack the precision required for modern greenhouse management. Therefore, well-calibrated empirical equations such as Penman-Monteith and Stanghellini, can enhance water efficiency in greenhouses. It is recommended that future research concentrate on refining and calibrating these methods through extensive field testing and using technological advances such as sensors to improve data collection and model accuracy.

Keywords: Evaporation pan, Evapotranspiration equations based on main crop, lysimeter, Smart greenhouse management.

Citation: Ghobadinia, M., Ghasemi, A.R., 2025. A review of methods for determining potential evapotranspiration in greenhouses with an approach of use in smart irrigation. Iranian Water Research Journal. 57(2). pp. 13-34. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15088.2660>



مروری بر روش‌های تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل در گلخانه با رویکرد کاربرد در آبیاری هوشمند

مهدی قبادی نیا^{۱*} و احمد رضا قاسمی^۲

چکیده

توسعه تولید محصولات گلخانه‌ای و هوشمندسازی مصرف آب، راهکاری مناسب برای افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی است. از این‌رو تخمین نیاز آبی گلخانه‌ها نیاز به یک بررسی جامع دارد. در این پژوهش مطالعات انجام شده روی روش‌های برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه در دنیا و ایران بررسی شد. نتایج نشان داد روش‌های فائو-تابش، پریستلی-تیلور و فائو-پنمن نتایج به نسبت قابل قبولی ارائه کردند. روش‌هایی مانند پنمن، پنمن-مانتیت-فائو و استانگلینی نیز که در مطالعات بیشتری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، نسبت به روش‌های دیگر نتایج دقیق‌تری را ارائه کرده‌اند. همچنین نتایج نشان دهنده تفاوت عملکرد یک روش در مناطق مختلف بود. استفاده از پارامترهای آب و هوایی متفاوت و تفاوت در ارتفاع منطقه که بر فشار هوا مؤثر است، می‌تواند دلیل این تفاوت باشد. در انتها می‌توان نتیجه گرفت هرچند لایسی‌متر می‌تواند دقیق‌ترین نتیجه را حاصل نماید ولی به دلیل وقت‌گیر بودن نمی‌توان آن را توصیه نمود. روش تشت تبخیر گلخانه نیز به دلیل نیاز به ابزار دقیق اندازه‌گیری عمق آب و ضریب تشت، کارایی لازم را ندارد. بنابراین، بر اساس نتایج پژوهش‌های مختلف، می‌توان روش‌های پنمن-مانتیت، پنمن-مانتیت-فائو و استانگلینی را برای برآورد تبخیر و تعرق گلخانه با خطایی قابل قبول توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: تشت تبخیر، لایسی‌متر، مدل‌های مبتنی بر گیاه مرجع، مدیریت هوشمند گلخانه.

ارجاع: قبادی نیا، م.، قاسمی، ا.ر.، ۱۴۰۴. مروری بر روش‌های تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل در گلخانه با رویکرد کاربرد در آبیاری هوشمند، مجله پژوهش آب ایران، ۵۷(۲)، صص. ۱۳-۳۴. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15088.2660>

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: mahdi.ghobadi@gmail.com و mahdi.ghobadi@sku.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

مقدمه

در دنیای امروز، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی کشاورزی، به ویژه در بخش گلخانه‌ها، مدیریت بهینه مصرف آب است. با توجه به تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت جهانی و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، اهمیت بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از راه‌های موثر با توجه به پیشرفت‌های اخیر، هوشمندسازی مصرف آب در گلخانه‌ها و دیگر بخش‌های کشاورزی است. گلخانه‌ها به دلیل شرایط کنترل‌شده‌ای که دارند، می‌توانند با مدیریت دقیق‌تر منابع، بهره‌وری بالاتری داشته باشند، اما مصرف آب در این سیستم‌ها به دلیل نیاز مداوم گیاهان به رطوبت و شرایط خاص محیطی، به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها تبدیل شده است (Steduto et al., 2012). برای هوشمندسازی نیاز به ابزار یا روابط دقیق برای تعیین نیاز آبی گیاه است. نحوه تعیین تبخیر و تعرق در گلخانه یکی از چالش‌های پیش‌روی هوشمندسازی است. تبخیر و تعرق به مجموعه فرآیندهایی اطلاق می‌شود که در آن آب از سطح خاک و گیاهان به صورت بخار به جو منتقل می‌شود. این فرآیند تحت تأثیر عوامل محیطی مختلفی همچون دما، رطوبت، سرعت باد و شدت تابش خورشید قرار دارد و محاسبه دقیق آن می‌تواند نقش مهمی در تعیین میزان آبی مورد نیاز گیاه داشته باشد (Allen et al., 1998).

گلخانه‌ها دارای خرد اقلیم متفاوت از بیرون گلخانه هستند و مشخص بودن میزان تبخیر و تعرق گیاه در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه (ساعت) برای مدیریت دقیق آب آبیاری و اقلیم گلخانه ضروری است (Harms, 2022).

Gavilan et al. (2015) گزارش دادند که هیچ روش استاندارد برای تعیین تبخیر و تعرق محصولات گلخانه‌ای وجود ندارد. در هوشمندسازی هدف تعیین میزان تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها با استفاده از مدل‌های ریاضی و ابزارهای اندازه‌گیری دقیق، برای محاسبه زمان و میزان آبیاری است. این مدل‌ها می‌توانند با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی و شدت تابش، میزان دقیق تبخیر و تعرق را محاسبه کرده و به کاهش مصرف آب در گلخانه‌ها کمک کنند (Harms, 2022).

مدل‌های تبخیر و تعرق برای گلخانه‌ها اولین بار در اروپا و آمریکای شمالی برای برخی از سبزیجات مانند گوجه فرنگی (Stanghellini, 1987; Jolliet and Bailey, 1992)، خیار (Yang et al., 1990) و کاهو (Pollet et al., 1999) توسعه یافتند. در این مناطق از عرض‌های شمالی، تهویه گلخانه‌های

شیشه‌ای به ندرت در طول فصل رشد مورد نیاز است. به همین دلیل، رشد گیاهان در گلخانه‌ها، بسیار کمتر از رشد در فضای باز است (Katsoulas and Kittas, 2011). برعکس، تعرق گیاهان گلخانه‌ای در مناطق دارای آب و هوای مدیترانه‌ای یا مناطق گرم با آب و هوای مشابه بسیار بیشتر به همرفت وابسته است (Boulard and Wang, 2000).

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که میزان تبخیر و تعرق در گلخانه کمتر از خارج از گلخانه است (Orgaz et al., 2005; Möller and Assouline, 2007; Fernández et al., 2010). پژوهش‌گران گزارش کردند که دلیل این امر ناشی از کاهش قابل توجه (تا ۵۶ درصد) تابش خورشید و همچنین کاهش سرعت باد در داخل گلخانه است. آن‌ها همچنین توضیح دادند که توری سایه‌بان و پرده‌های حرارتی ایجاد شده در ماه‌های بهار و تابستان، شدت تابش خورشید در گلخانه را کاهش می‌دهد.

Ilahi (2009) گلخانه‌ها را در سه دسته تکنولوژی پایین، متوسط و بالا تقسیم‌بندی کرده و بیان می‌دارد که گلخانه‌های با تکنولوژی بالا مناسب هوشمندسازی هستند.

باید به این نکته توجه داشت که میزان تبخیر و تعرق گیاهی با میزان آب مصرفی گلخانه می‌تواند متفاوت باشد. میزان آب مصرفی گلخانه شامل نیاز آبی گیاه، تامین نیاز رطوبتی محیط گلخانه و سایر نیازهای گلخانه است که می‌تواند با توجه به تکنولوژی گلخانه و نوع مصرف گیاه از هیدرومدول ۰/۲۵ تا ۱/۶۵ لیتر بر ثانیه بر هکتار برای گلخانه متغیر باشد (نشریه ۴۷۴ معاونت راهبردی ریاست جمهوری).

برای تعیین تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های اقلیمی دو روش متفاوت در گلخانه‌ها بر اساس گیاه مرجع و گیاه اصلی وجود دارد. برخی از پژوهش‌گران از معادلات تبخیر و تعرق که برای شرایط مزرعه استخراج شده است به طور مستقیم در شرایط گلخانه استفاده کردند، در حالی که برخی دیگر از پژوهش‌گران پس از اصلاح این معادلات بر اساس شرایط گلخانه، از آن‌ها استفاده کردند (Karaca et al., 2018).

در این مقاله مروری، به بررسی روش‌ها و مدل‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق که در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که کلیه مطالعات ذکر شده در این مقاله روی تبخیر و تعرق گلخانه انجام شده است.

۱- روش‌های لایسیمیتری و تشت تبخیر

۱-۱- روش میکرو لایسیمیتری (روش بیلان آب)

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق است که برای تعیین تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. اساس این روش بر بیلان آب متمرکز است. بیلان آب ورودی و خروجی در میکرو لایسیمیتری‌ها با معادله ۱ نشان داده می‌شود.

$$P + I \pm R_o = ET_o + D_p \pm \Delta S \quad (1)$$

که در آن P بارندگی (mm)، I آب ورودی (mm)، ET_o تبخیر

و تعرق مرجع (mm)، D_p نفوذ عمقی (mm)، R_o رواناب سطحی (mm)، که صفر در نظر گرفته می‌شود و ΔS تغییر ذخیره رطوبتی (mm) است. در جدول ۱، مطالعاتی که روی تعیین تبخیر و تعرق در گلخانه با استفاده از لایسیمیتری انجام شده، آمده است. این روش دقیق‌ترین روش تعیین میزان آب مورد نیاز گیاه در گلخانه است و به‌صورت مستقیم میزان تبخیر و تعرق را مشخص می‌کند. اما برای محاسبه نیاز آبی نیاز به ابزار دقیقی دارد که در برخی موارد هزینه بالایی دارد. همچنین نیاز به کارشناس خبره برای برداشت و محاسبه داده‌ها دارد.

جدول ۱ - مطالعات انجام شده روی روش میکرو لایسیمیتری در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Amiri et al. (2011)	اصفهان	خشک و سرد	چمن	روش مناسبی است و چندین معادله با این روش مقایسه شد
۲	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	روش مناسبی است و چندین معادله با این روش مقایسه شد
۳	Orgaz et al. (2005)	آلمریا-اسپانیا	مدیترانه‌ای	لوبیا سبز، خربزه، هندوانه و فلفل	مقدار K_c برای خربزه و فلفل به‌صورت دقیق برآورد شد
۴	Bonachela et al. (2006)	سواحل مدیترانه‌ای اسپانیا	مدیترانه‌ای	گوجه فرنگی، لوبیا سبز، کدو سبز، فلفل دلمه‌ای، خربزه	عملکرد لوبیا سبز بهاره آبیاری شده بر اساس تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده کمتر از عملکرد بر اساس تبخیر و تعرق محاسبه شده است. در بقیه محصولات تفاوتی مشاهده نشد
۵	Sagar et al. (2022)	هند	زمستان سرد و خشک و تابستان گرم و خشک	گل داوودی	یک میکرو لایسمتر وزنی برای برآورد آب در سامانه هوشمند توسعه دادند که نتایج قابل قبولی داشت
۶	Goyal et al. (2023)	-	-	خیار	از میکرو لایسمتر و روش پنمن مانیتیت فائو ۵۶ برای تخمین تبخیر و تعرق و ضرایب گیاهی استفاده کردند و دقت نتایج تبخیر و تعرق به‌دست آمده را تایید کردند

۱-۲- روش تشت تبخیر کلاس A

تشت تبخیر کلاس A که ظرفی استوانه‌ای از جنس آهن گالوانیزه (با قطر ۱۲۱ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵/۴ سانتی‌متر) است، یکی از روش‌های بسیار رایج در تخمین تبخیر و تعرق در گلخانه می‌باشد که به دلیل سادگی، هزینه نسبتاً کم و توانایی تخمین تبخیر و تعرق روزانه به‌طور گسترده در جهان استفاده می‌شود. معادله تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از ضریب تشت از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$ET_o = K_p \times E_{pan} \quad (2)$$

که در آن K_p ضریب تشت و E_{pan} تبخیر از تشت است. لازم به ذکر است که برای تبدیل تبخیر و تعرق پتانسیل به تبخیر و تعرق گیاهی نیاز به ضریب گیاهی است. مطالعات انجام شده

روی تشت تبخیر کلاس A در گلخانه در جدول ۲ آمده است. این روش هرچند داده‌های مناسبی ارائه کرده است اما به دلیل فضای زیادی که از گلخانه می‌گیرد مناسب گلخانه نیست. همچنین در بحث هوشمندسازی نیز کاربردی نخواهد داشت.

۱-۳- روش تشت تبخیر گلخانه (قطر کاهش یافته ۶۰ سانتی‌متر)

با توجه به اندازه بزرگ تشت تبخیر کلاس A و عدم کارایی آن در گلخانه، تشت تبخیر کوچک‌تری با عنوان تشت تبخیر کوچک استاندارد توسط خان و همکاران پیشنهاد شد (Khan et al., 1998). این تشت از جنس آهن گالوانیزه با قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است.

جدول ۲ - مطالعات انجام شده روی تشت تبخیر کلاس A در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Amiri et al. (2011)	اصفهان	خشک	چمن	مطالعه در درون و بیرون گلخانه انجام شد. برای بیرون گلخانه ضریب همبستگی آن با داده‌های لایسیمتری ۰/۷۵ و برای درون گلخانه ۰/۹۷ گزارش شد
۲	Fernández et al. (2010)	اسپانیا	مدیترانه‌ای	چمن	ضریب تشت بین ۰/۷۷ تا ۰/۷۹ گزارش شد
۳	Ucar et al. (2011)	ترکیه	-	میخک	بهترین نتیجه در این مطالعه با $Kp=0.79$ به دست آمد
۴	Shi et al. (2023)	پکن	نیمه مرطوب	گوجه	ضریب تشت برابر یک را مناسب گزارش کردند
					با ضریب همبستگی ۰/۸۸ با داده‌های لایسیمتری عملکرد مناسبی داشته است

نتایج پژوهش‌های پژوهشگرانی که از این روش در گلخانه استفاده نموده بودند در جدول ۳ - آمده است. از این روش نیز نتایج مناسبی حاصل شده است و نسبت به تشت کلاس A فضای کمتری اشغال می‌کند. برای استفاده از این روش در بحث هوشمندسازی نیازمند ابزار دقیق اندازه‌گیری عمق آب می‌باشد. همچنین ضریب گیاهی در این روش نیز باید مشخص شود.

جدول ۳ - مطالعات انجام شده روی تشت تبخیر گلخانه (قطر ۶۰ سانتی‌متر)

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	مقدار ۰/۴۶ برای ضریب تشت
۲	Amiri et al. (2011)	اصفهان	خشک	چمن	ضریب تشت ۰/۹۴ و ضریب همبستگی ۰/۹۸ با داده‌های لایسیمتری عملکرد خیلی خوبی نشان داد
۳	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	ضریب تشت ۰/۷۳
۴	Blanco and Folegatti (2004)	برزیل	-	گوجه‌فرنگی	نتایج متوسط

انرژی، روشی را برای محاسبه تبخیر و تعرق ارائه نمود که به روش ترکیبی یا معادله پنمن معروف است (Penman, 1948).

$$\lambda(ET_0) = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \quad (3)$$
که در آن ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm.d^{-1})$ ، R_n شدت تابش خالص $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، G شار گرمایی خاک $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، λ گرمای نهان تبخیر $(MJ.Kg^{-2})$ ، γ ثابت سایکرومتری $(Kp.^{\circ}C^{-1})$ ، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا $(Kp.^{\circ}C^{-1})$ ، $(e_s - e_a)$ کمبود اشباع (Kpa) و $f(u)$ تابع باد است. نتایج مطالعات انجام شده روی این روش نشان می‌دهد که کارایی نسبتاً قابل قبولی ارائه نکرده است (جدول ۵).

۲-۲ - مدل مک‌کینک

روش مک‌کینک بر اساس معادله ۴ نتایج خوبی را در اقلیم‌های مرطوب و سرد نشان داده ولی نتایج آن در مناطق خشک خیلی رضایت‌بخش نبوده است (Makkink, 1957).

$$ET_0 = 0.061 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_s}{58.5} - 0.12 \quad (4)$$

۱-۴ - روش تشت تبخیر کوچک گلخانه (قطر کاهش یافته ۲۰ سانتی‌متر)

با توجه به ابعاد تشت تبخیر کلاس A، در چین یک تشت تبخیر با قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر به عنوان تشت تبخیر استاندارد گلخانه معرفی شد (Liu et al., 2008). بر اساس مطالعات موجود که در جدول ۴ آمده است، در میان روش‌های تشت تبخیر به نظر می‌رسد، این تشت تبخیر گلخانه از نظر هزینه و ابعاد، می‌تواند مناسب‌ترین روش تعیین میزان تبخیر و تعرق در گلخانه باشد اما به دلیل کمبود مطالعات در مناطقی غیر از چین نیازمند بررسی این روش در دیگر نقاط جهان است.

۲- روش‌های مبتنی بر مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق بر اساس تبخیر و تعرق گیاه مرجع

۱-۲ - معادله پنمن

پنمن با استفاده از ترکیب روش‌های آئرودینامیک و توازن

گلخانه با حداقل داده اندازه‌گیری، تبخیر و تعرق را از این معادله محاسبه کرد؛ با این حال مطالعات نشان می‌دهد که همبستگی بالایی با داده‌های لایسیمیتری ندارد و در اولویت معادلات قرار نمی‌گیرد (جدول ۶).

در این معادله ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$)، R_s تابش خورشیدی روزانه ($Cal.cm^{-2}.d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا ($^{\circ}C^{-1}.mbar$) و γ ثابت سایکرومتری ($^{\circ}C^{-1}.Kp$) است. این معادله پارامترهای کمی را برای اندازه‌گیری نیاز دارد و به نظر می‌رسد می‌توان برای

جدول ۴ - مطالعات انجام شده روی تشت تبخیر در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	-	موز	به کاربردن تشت تبخیر با قطر ۲۰ سانتی‌متر و اعلام ضریب تشت برابر یک با کارایی خوب در برآورد تبخیر و تعرق
۲	Zeng et al. (2009)	چین	-	خریزه	به کاربردن تشت تبخیر با قطر ۲۰ سانتی‌متر و اعلام ضریب تشت برابر یک و عملکرد مناسب نتایج این تشت در برآورد تبخیر و تعرق

جدول ۵ - مطالعات انجام شده روی معادله پنمن در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی مناسب ولی همراه با اندکی کم برآوردی و با ضریب همبستگی ۰/۶۷ با داده‌های لایسیمیتری و RSME برابر ۱/۴۴
۲	Prenger et al. (2002)	اوهاییو	-	افرا	با R^2 برابر ۰/۲۱۴ نتیجه نامناسبی برای این روش گزارش شد
۳	Abedi Koupai et al. (2009)	اصفهان	خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۸۱ و کارایی ۰/۶۶ ضعیف‌ترین نتیجه را در بین روش‌های مختلف نشان داد
۴	Guo et al. (2021)	چین	-	کلم چینی	با ضریب همبستگی ۰/۳۸ با داده‌های لایسیمیتری نتیجه غیرقابل قبول در برآورد تبخیر و تعرق داشته است
۵	Gong et al. (2020)	چین	-	گوجه	با در نظر گرفتن یک ضریب اصلاحی برابر ۱/۱ برای معادله نتایج قابل قبولی نشان داد

۲-۳ - مدل تورک

معادله تورک در مناطق غرب اروپا استفاده شده است. از این روش در داخل گلخانه به دلیل رطوبت دایمی بالای ۵۰ درصد برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده می‌شود (Turc, 1963).

$$ET_0 = 0.013 \frac{T_a}{T_a + 15} (R_s + 50) \quad (5)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$)، R_s تابش خورشیدی روزانه ($Cal.cm^{-2}.d^{-1}$) و T_a میانگین دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$) است.

آنچه که از نتایج پژوهش‌ها مشخص است (جدول ۷)، محدود بودن تعداد پژوهش‌های انجام شده روی این روش در گلخانه است که البته از همین تعداد محدود نیز نتایج خوبی حاصل نشده است. علت آن می‌تواند تعداد پارامترهای کم ورودی باشد. مقدار رطوبت، پارامتر مهمی است که در این معادله به آن توجه نشده است؛ بنابراین مدل مناسبی برای تعیین تبخیر و تعرق در گلخانه و همچنین هوشمندسازی نمی‌باشد.

جدول ۶ - مطالعات انجام شده روی معادله مک کینک در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۵۲ با نتایج لایسمتری، کارایی پایینی داشته
۲	Fathalian and Nouri (2011)	تهران	نیمه خشک	خیار	کارایی این روش را مناسب گزارش کردند
۳	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی مناسب (کم برآوردی) با ضریب همبستگی ۰/۶۸ و میزان خطایی برابر ۱/۳۲ نشان داد
۴	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه‌ای	چمن	نتایج نشان دادند که این روش با خطای ۱/۹ میلی‌متر در روز کارایی بسیار پایینی نسبت به سایر روش‌ها دارد
۵	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۷۱ با داده‌های لایسمتری عملکرد قابل قبولی را داشته است

جدول ۷ - مطالعات انجام شده روی معادله تورک در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	عدم کارایی با ضریب همبستگی ۰/۳۱ با داده‌های لایسمتری و خطایی برابر ۳/۴۲ میلی‌متر
۲	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه‌ای	چمن	این روش با خطای ۱/۲۴ میلی‌متر در روز دقت پایینی نشان داد
۳	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	نیمه مرطوب	چمن	با ضریب همبستگی برابر ۰/۵۲ با داده‌های لایسمتری ضعیف‌ترین عملکرد را بین چندین روش نشان داد

۴-۲ - مدل تورک اصلاح شده

تورک در سال ۱۹۶۱ معادله خود را به صورت معادله زیر اصلاح کرد (Turc, 1961).

$$ET_0 = a_T \times 0.013 \frac{T_a}{T_a + 15} \times \frac{23.8856 \times R_s + 50}{\lambda} \quad (۶)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$), R_s تابش خورشیدی روزانه ($Cal.cm^{-2}.d^{-1}$), T_a میانگین دمای

روزانه هوا ($^{\circ}C$), λ گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-2}$) و a_T ضریبی است که برای رطوبت نسبی بیشتر از ۵۰ درصد برابر یک می‌باشد. بر اساس بررسی‌های انجام شده در مطالعات کمی این مدل مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج حاصل از این مدل نیز قابل قبول نبوده است. بنابراین نتایج مدل قابل استناد نمی‌باشد (جدول ۸).

جدول ۸ - مطالعات انجام شده روی معادله تورک اصلاح شده در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی برابر ۰/۴۷ با داده‌های لایسمتری ضعیف‌ترین نتیجه را در میان روش‌های مختلف داشته است
۲	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی پایین با ضریب همبستگی ۰/۶۵ با داده‌های لایسمتری و خطای برابر ۲/۹ میلی‌متر

۵-۲ - مدل جنسن-هیز

جنسن و هیز بر اساس مشاهدات آب مصرفی نواحی غربی آمریکا، یک رابطه خطی به منظور برآورد ET_0 به دست آوردند (Jensen and Haise, 1963). معادلات زیر چگونگی محاسبات را نشان می‌دهند.

$$ET = C_T(T - T_x)R_s \quad (۷)$$

$$C_T = \frac{1}{45 - \left(\frac{h}{137}\right) + \frac{365}{(es_{max} - es_{min})}} \quad (۸)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(es_{max} - es_{min}) - \frac{h}{500} \quad (۹)$$

بخار اشباع به ازای حداقل روزانه دمای هوا در سردترین ماه سال (mb)، h ارتفاع از سطح دریا (m) و R_s شدت تابش خورشیدی ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) در دوره مورد نظر است. این مدل هرچند پارامترهایی با قابلیت اندازه‌گیری در گلخانه دارد اما در پژوهش‌های زیادی استفاده نشده است و نتایج این پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد که عملکرد مناسبی در برآورد تبخیر و تعرق ندارد (جدول ۹).

$$es_{max} = \exp\left(\frac{19.08T_{max} + 429.41}{T_{max} + 237.3}\right) \quad (10)$$

$$es_{min} = \exp\left(\frac{19.08T_{min} + 429.41}{T_{min} + 237.3}\right) \quad (11)$$

که در آن: T میانگین روزانه دما ($^{\circ}C$)، T_{min} حداقل دمای روزانه هوا در سردترین ماه سال ($^{\circ}C$)، T_{max} حداکثر دمای روزانه هوا در گرمترین ماه سال ($^{\circ}C$)، es_{max} فشار بخار اشباع به ازای حداکثر روزانه دمای هوا در گرمترین ماه سال (mb)، es_{min} فشار

جدول ۹ - مطالعات انجام شده روی معادله جنسن-هیز در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی نامناسب با ضریب همبستگی ۰/۴۲ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۲/۴۵
۲	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه‌ای	چمن	مقایسه نتایج این مدل با داده‌های لایسمتری نشان دادند که این روش با ضریب تبیین ۰/۷۵ و خطای ۰/۷ دقت مناسبی ندارد
۳	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	نیمه مرطوب	چمن	با ضریب همبستگی برابر ۰/۶۴ با داده‌های لایسمتری عملکرد ضعیفی داشته است

شدت تابش خالص معادل با $(mm.d^{-1})$ ، W ضریب وزنی که بستگی به درجه حرارت و عرض جغرافیایی دارد و c فاکتور تعدیل وابسته به میانگین رطوبت، طول روز و سرعت باد است. این معادله ساده می‌باشد و پارامترهای قابل اندازه‌گیری در گلخانه دارد.

هر چند نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که برآوردهای این مدل در برخی موارد ضعیف است و همبستگی بالایی با مقادیر اندازه‌گیری لایسمتری ندارد (جدول ۱۰). این مدل نیاز به مطالعه بیشتری برای تعیین دقیق‌تر ضرایب دارد.

۲-۶ - مدل فائو-تابشی

دورنبوس و پروت یک روش تابشی به صورت معادله ۱۲ با استفاده از تابش خورشید برای برآورد تبخیر و تعرق ارائه کردند. این روش از روش مک کینک اقتباس شده و برای مکان‌هایی که وسایل اندازه‌گیری باد و رطوبت نسبی در دسترس نیست و یا برآوردهای معقولی امکان‌پذیر نمی‌باشد، توصیه می‌گردد (Doorenbos and Pruitt, 1977).

$$ET_0 = cWR_s \quad (12)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$)، R_n

جدول ۱۰ - مطالعات انجام شده روی معادله فائو تابشی در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی حدود ۰/۵۴ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۰/۸۱ کارایی نسبتاً پایینی را در میان روش‌ها نشان داد
۲	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی مناسب (بهترین برآورد) با ضریب همبستگی ۰/۶۵ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۱/۶ داشته است
۳	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	مدیترانه‌ای	موز	کارایی ضعیف با ضریب همبستگی ۰/۵۲ با داده‌های لایسمتری
۴	Casanova et al. (2009)	شیلی	نیمه خشک مدیترانه‌ای	کاهو	عملکرد خوبی داشت و در مقیاس هفتگی نتایج بهتری نشان داد. ضریب همبستگی با داده‌های لایسمتری ۰/۷۳ است
۵	Fernández et al. (2010)	اسپانیا	مدیترانه‌ای	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۹۷ با داده‌های لایسمتری نتیجه خوبی ارائه داد هرچند مدل اندکی کم برآوردی داشت
۶	Gong et al. (2020)	چین	گرم و خشک	گوجه فرنگی	نتایج قابل قبول ارزیابی شد البته با در نظر گرفتن ضریب اصلاحی ۱/۱۴

۲-۷- مدل پرستلی-تیلور

پرستلی و تیلور یک معادله ترکیبی ساده شده برای استفاده در نواحی مرطوب مطابق زیر پیشنهاد کردند (Priestley and Taylor, 1972).

$$ET_0 = 1.26 \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (13)$$

که در آن: R_n میزان تشعشع خورشید ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) و Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا ($^{\circ}C^{-1}.mbar$) و γ ثابت سایکرومتری ($^{\circ}C^{-1}.Kp$) است.

نتایج مطالعات (جدول ۱۱) این معادله نشان می‌دهد که نتایج قابل قبولی داشته و در بیشتر مطالعات ضریب همبستگی بالایی نشان داده است.

۲-۸- مدل فائو-پنمن

مدل فائو پنمن (۱۹۷۵)، اصلاح شده مدل پنمن است که در آن تابع باد حساس‌تر از مدل ارائه شده توسط پنمن در سال ۱۹۴۸ می‌باشد.

$$\lambda(ET_0) = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times 6.43(a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (14)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$)، R_n شدت تابش خالص ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)، G شار گرمایی خاک ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) که مقدار این پارامتر نسبت به انرژی تابش خالص ناچیز بوده و بر اساس پیشنهاد فائو ۵۶ برای فواصل روزانه صفر در نظر گرفته می‌شود، λ گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-2}$)، γ ثابت سایکرومتری ($^{\circ}C^{-1}.Kp$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا ($^{\circ}C^{-1}.Kp$)، $(e_s - e_a)$ کمبود اشباع (Kpa)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($mm.s^{-1}$)، a و b ثابت‌های تجربی که مقدارشان به ترتیب برابر یک و ۰/۵۳۷ است. این مدل در پژوهش‌های گلخانه، مورد توجه قرار نگرفته است و دو مطالعه‌ای که در این پژوهش آمده، نشان می‌دهد عملکرد قابل قبولی داشته است (جدول ۱۲).

جدول ۱۱ - مطالعات انجام شده روی معادله پرستلی - تیلور در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی حدود ۰/۶ با داده‌های لایسمتری عملکرد نسبتاً مناسبی داشته است
۲	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی مناسب (کم برآوردی) با ضریب همبستگی ۰/۶۴ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۱/۸۶
۳	Liu et al. (2008)	فلسطین	مدیترانه‌ای	موز	با ضریب تبیین ۰/۴۷ نتیجه ضعیفی نشان داد
۴	Valdés-Gómez et al. (2009)	کالیفرنیا	-	گوچه فرنگی	عملکرد مناسب با تخمین تبخیر و تعرق با ۶/۱٪ خطا
۵	Gong et al. (2020), (2022)	چین	گرم و خشک	گوچه فرنگی	در مقایسه با دو مدل پنمن و پنمن-مانتیت با خطای ۰/۶ میلی‌متر بر روز و ۶/۷ درصد بیش برآوردی عملکرد بهتری نشان داد
۶	Guo et al. (2021)	چین	-	کلم چینی	با ضریب همبستگی ۰/۷۲ با داده‌های لایسمتری بهترین نتیجه را نسبت به روش‌های دیگر ارائه نمود
۷	Harms (2022)	هلند	-	گوچه	با ضریب همبستگی ۰/۸۵ با داده‌های لایسمتری نتیجه خوبی در برآورد ساعتی داشت اما عنوان شده برای برنامه‌ریزی آبیاری مناسب نیست
۸	Yan et al. (2024)	چین	گرمسیری مرطوب	خیار	نتایج مناسبی داشته است
۹	Gao et al. (2024)	چین	معتدل قاره‌ای	گوچه	در مرحله اول و دوم رشد بیش برآوردی، در مراحل توسعه و میانی نتیجه نسبتاً قابل قبول نشان داد

۲-۹- معادله پنمن - مانتیت

روش پنمن - مانتیت به وسیله جان مانتیت در ۱۹۸۶ ارائه گردید که در این روش سطح پوشش گیاهی بر خلاف روش پنمن که سطح آب در نظر گرفته شده است، یک سطح مرطوب

است. به عبارت دیگر در روش پنمن - مانتیت فرض می‌شود که کل سطح پوشش گیاهی یک برگ بزرگ با روزه‌های موجود در آن است و مقاومت روزه‌ها نیز در معادله پنمن - مانتیت لحاظ شده است.

می‌باشد که از معادله اصلی پنمن - مانتیث و معادلات آیرودینامیک و مقاومت‌های سطحی به‌دست آمده است (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (16)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$), R_n شدت تابش خالص ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), G شار گرمایی خاک ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), λ گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-2}$), γ ثابت سایکرومتری ($Kp.^{\circ}C^{-1}$), Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا ($Kp.^{\circ}C^{-1}$), $(e_s - e_a)$ کمبود اشباع (Kpa), u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($mm.s^{-1}$) و T میانگین دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$) است.

این رابطه مانند پنمن-مانتیث در مطالعات زیادی در نقاط مختلف جهان بررسی شده (جدول ۱۴) و نتایج نسبتاً خوبی با ضریب همبستگی بالا داشته است. این مدل نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از مدل‌های کاربردی در هوشمندسازی و برآورد نیاز آبی در گلخانه مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعات مختلف نشان داده شده با تغییر ضریب مقاومت دینامیکی در گلخانه، مدل نتایج دقیق‌تری ارائه داده که نیاز است پژوهش‌های بیشتری در خصوص مشخص نمودن یک عدد ثابت قابل قبول، انجام شود.

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p}{r_a}(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (15)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$), R_n شدت تابش خالص ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), G شار گرمایی خاک ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), λ گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$), C_p گرمای ویژه هوا ($MJ.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$), ρ جرم مخصوص هوا ($kg.m^{-3}$), γ ثابت سایکرومتری ($Kp.^{\circ}C^{-1}$), r_c مقاومت پوشش گیاهی در برابر انتقال بخار آب، r_a مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما و بخار آب از سطح مرطوب به هوا، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا ($Kp.^{\circ}C^{-1}$) و $(e_s - e_a)$ کمبود اشباع (Kpa) است. این معادله در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته (جدول ۱۳) و نتایج خوبی با ضریب همبستگی بالا با نتایج لایسی‌متری داشته است. همچنین در نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه به‌عنوان روش پیشنهادی برای تعیین نیاز آبی گلخانه در ایران پیشنهاد شده است. با توجه به انجام مطالعات متعدد روی این روش در گلخانه، به نظر می‌رسد می‌تواند به‌عنوان روشی در هوشمندسازی گلخانه‌ها استفاده شود.

۱۰-۲ - مدل پنمن-مانتیث - فائو

در این روش محاسبه تبخیر و تعرق به‌صورت ساعتی یا روزانه

جدول ۱۲ - مطالعات انجام شده روی معادله فائو پنمن در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	مدیترانه‌ای	موز	کارایی متوسط با ضریب همبستگی با داده‌های لایسیمتری ۰/۶۷
۲	Fernández et al. (2010)	اسپانیا	مدیترانه‌ای	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۹۸ با داده‌های لایسیمتری نتیجه خوبی داشت

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} (0.0023)(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (17)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$), λ گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-2}$), T_{mean} میانگین روزانه دما ($^{\circ}C$), T_{min} حداقل دمای هوا روزانه ($^{\circ}C$), T_{max} حداکثر دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$) و R_a تابش برون زمینی ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) می‌باشد.

۱۱-۲ - مدل هارگریوز

مدل هارگریوز تنها به داده‌های دما و تابش شده نیاز دارد. این مدل در مواردی قابل استفاده است که اطلاعات هواشناسی محدود باشد. از روش مزبور بیشتر در آمریکای لاتین و به‌منظور برآورد آب موردنیاز گیاهان استفاده می‌شود (Hargreaves and Samani, 1985).

جدول ۱۳ - مطالعات انجام شده روی معادله پنمن - مانیتیت در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Amiri et al. (2008)	اصفهان	-	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۸۰ با داده‌های لایسمتری و کارایی مدل ۰/۷۳ بهترین نتیجه را نشان داد
۲	Prenger et al. (2002)	اوهایو	-	افرا	با R^2 برابر با ۰/۴۸۱ نسبت به داده‌های لایسمتری نتیجه نامناسب ارائه نمود
۳	Medrano et al. (2005)	اسپانیا	مدیترانه‌ای	خیار	عملکرد بالایی برای تخمین آب مورد نیاز گیاه در شرایط اقلیم مدیترانه داشت
۴	Abedi Koupai et al. (2009)	اصفهان	خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۸۹ با داده‌های لایسمتری و کارایی ۰/۸۶ نتیجه مناسب و خوبی ارائه نمود
۵	Casanova et al. (2009)	شیلی	نیمه خشک مدیترانه‌ای	کاهو	عملکرد قابل قبولی داشت و در مقیاس هفتگی نتایج بهتری نشان داد. ضریب همبستگی با داده‌های لایسمتری ۰/۸ گزارش شده است
۶	Villarreal-Guerrero et al. (2012)	آریزونای آمریکا	-	لفل دلمه‌ای- گوجه	بهترین نتیجه با R^2 برابر با ۰/۹۶ در بین سایر روش‌ها
۷	Qiu et al. (2013)	استان کانسو چین	گرم و خشک	لفل تند	با ترکیب معادله PM با استاندارد لینی توانست تخمین دقیقی از نیاز آبی به‌دست آورد
۸	Gong et al. (2017)	چین	-	گوجه	با استفاده از یک ترکیب مقاومت پوشش و مقاومت زمین نتایج قابل قبولی گرفت
۹	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	نیمه مرطوب	چمن	بهترین نتیجه را بین روش‌های دیگر داشته است، ضریب همبستگی با داده‌های لایسمتری برابر ۰/۹۸ بوده است
۱۰	Harms (2022)	هلند	-	گوجه	با ضریب همبستگی ۰/۸۵ بهترین نتیجه در بین مدل‌های انتخابی را داشت
۱۱	Shi et al. (2023)	شمال شرقی چین	سرد	گوجه	با ضریب همبستگی ۰/۹۱ با داده‌های لایسمتری مدل عملکرد خوبی داشت، البته مدل دارای کم‌برآوردی است
۱۲	Yan et al. (2024)	چین	نیمه گرمسیری مرطوب	خیار	نتایج مناسبی در برآورد تبخیر و تعرق نشان داد
۱۳	Gao et al. (2024)	چین	معتدل قاره‌ای	گوجه	در مرحله اول رشد کم‌برآوردی، مرحله دوم بیش برآوردی و در مراحل توسعه و میانی نتایج نسبتاً قابل قبول ارائه کرده است

جدول ۱۴ - مطالعات انجام شده روی معادله پنمن - مانیتیت - فائو در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Amiri et al. (2008)	اصفهان	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی حدود ۰/۷ با داده‌های لایسمتری و کارایی مدل برابر ۰/۶۱ نتیجه مناسبی نشان داد
۲	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	با ضریب همبستگی حدود ۰/۶۱ با داده‌های لایسمتری بهترین عملکرد را در میان روش‌ها داشته است
۳	Fathalian and Nouri (2011)	تهران	نیمه خشک	خیار	کارایی نامناسبی نشان داد
۴	Rafiee et al. (2016)	شیراز	مدیترانه‌ای	بادمجان - چمن	نشان دادن که این معادله در شرایط گلخانه کم برآوردی دارد
۵	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	کارایی نامناسب با ضریب همبستگی ۰/۶۴ با داده‌های لایسمتری و خطای برابر ۲/۳۲ میلی‌متر بر روز نشان داد
۶	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	مدیترانه‌ای	موز	با ضریب تبیین ۰/۶۳ بعد از مدل FAO-Penman بالاترین عملکرد را نشان داد
۷	Fernández et al. (2010)	اسپانیا	مدیترانه‌ای	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۹۷ با داده‌های لایسمتری و شیب خط ۰/۸۳ نتیجه خوبی داشت هرچند مدل کم برآوردی نشان داد. فرض معادله ثابت گرفتن ra برابر با ۱۵۰ s.m ⁻¹ بود

۸	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه‌ای	چمن	نتایج نشان دادند مناسب‌ترین معادله با کمترین میزان خطا برای تخمین ET_0 روزانه در گلخانه است
۹	Guo et al. (2021)	چین	-	کلم چینی	با ضریب همبستگی ۰/۷۱ با داده‌های لایسمتری نتیجه خوب ارائه نمود
۱۰	Gong et al. (2020)	چین	-	گوجه	نتایج قابل قبولی ارائه نمود
۱۱	Gao et al. (2024)	چین	معتدل قاره‌ای	گوجه	در هر ۴ مرحله رشد نتایج قابل قبولی داشت

جدول ۱۵ - مطالعات انجام شده روی معادله هارگریوز در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	عدم کارایی با ضریب همبستگی ۰/۲۴ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۲/۱۳
۲	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	-	موز	کارایی کم با ضریب همبستگی ۰/۴۹ با داده‌های لایسمتری
۳	Fernández et al. (2010)	اسپانیا	نیمه خشک	چمن	با در نظر گرفتن قابلیت انتقال گلخانه‌ای به جای تشعشع و ضریب همبستگی ۰/۹۷ با داده‌های لایسمتری نتایج خوبی داشت
۴	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه‌ای	چمن	نتایج نشان دادند که این روش با ضریب تبیین ۰/۶۰ با داده‌های لایسمتری کارایی نسبتاً پایینی دارد

(جدول ۱۵) اما به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که این مدل کارایی مناسبی در برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه نداشته است.

در این مدل رطوبت گلخانه‌ها که یکی از پارامترهای مهم در ایجاد نیاز آبی در گیاه است در این معادله وجود ندارد. با وجودی که مطالعات محدودی روی این مدل انجام شده است

جدول ۱۶ - مطالعات انجام شده روی معادله هارگریوز - سامانی در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Fathalian and Nouri (2011)	تهران	-	خیار	کارایی مناسب (بهترین نتیجه)
۲	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	عدم کارایی با ضریب همبستگی ۰/۲۸ با داده‌های لایسمتری و RSME برابر ۱/۱۴
۳	Liu et al. (2008)	فلسطین اشغالی	مدیترانه‌ای	موز	عملکرد ضعیفی نشان داد
۴	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	چمن	نیمه مرطوب	با ضریب همبستگی برابر ۰/۶۹ با داده‌های لایسمتری عملکرد متوسطی را داشته است
۵	Shi et al. (2023)	پکن	گوجه	نیمه مرطوب	کمترین کارایی را در میان مدل‌های انتخابی داشت

۲-۱۲ - مدل هارگریوز - سامانی

$$ET_0 = 0.0162 (k_T) \cdot R_a \cdot TD^{0.5} (T + 17.8) \quad (18)$$

$$K_T = 0.075 \left(\frac{S}{TD} \right)^{0.5} \quad (19)$$

$$TD = (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (20)$$

این روش از داده‌های لایسمتری چمن در ایالت دیویس کالیفرنیا در مدت ۸ سال استنتاج شده و علت ارایه آن در دسترس نبودن داده‌های تابش خورشیدی بوده است (Hargreaves and Samani, 1985).

ارایه دهند، روش اصلاح شده بلانی-کریدل را برای برآورد ET_0 توصیه نمودند. رابطه اصلاح شده بلانی-کریدل به صورت زیر است.

$$ET_0 = C \times [P(0.46T + 8)] \quad (21)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm.d^{-1})$ ، T میانگین دمای روزانه $(^{\circ}C)$ ، P درصد متوسط ساعات روشنایی روزانه در طول ماه که تابع عرض جغرافیایی و ماه بوده که از جدول مربوط به دست می آید، C فاکتور تعدیل کننده وابسته به حداقل رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد است. بررسی های انجام شده روی مقالات مرتبط با گلخانه نشان داد که روی این روش مطالعات زیادی انجام نشده است (جدول ۱۷) و نتایج این مطالعات نیز نشان گر کارایی پایین این روش می باشد.

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm.d^{-1})$ ، R_a تابش برون زمینی $(mm.d^{-1})$ ، S درصد ساعات روشنایی $(\frac{n}{N} \times 100)$ (n ساعات آفتابی واقعی و N حداکثر ساعات آفتابی)، همچنین T_{max} حداکثر دمای روزانه هوا $(^{\circ}C)$ ، T_{min} حداقل دمای روزانه هوا $(^{\circ}C)$ و T میانگین دمای روزانه هوا $(^{\circ}C)$ و K_T ضریب اصلاح است. هر چند که مطالعات انجام شده روی این مدل محدود است (جدول ۱۶) اما این مطالعات نشان می دهد که معادله هارگریوز-سامانی نیز مانند معادله هارگریوز کارایی مناسبی در برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه را نداشته است.

۲-۱۳ - معادله بلانی - کریدل فائو

(Doorenbos et al. 1975) برای اینکه تعریف بهتری از اثر اقلیم، روی آب مورد نیاز گیاه با استفاده از رابطه بلانی-کریدل

جدول ۱۷ - مطالعات انجام شده روی معادله بلانی - کریدل فائو در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Shahabifar et al. (2010)	تهران	نیمه خشک	چمن	عدم کارایی در مقیاس روزانه با ضریب همبستگی حدود ۰/۴۹ با داده های لایسیمتری. نتایج در مقیاس هفتگی بهتر بود
۲	Moazed et al. (2014)	شیراز	مدیترانه ای	چمن	این روش با ضریب تبیین ۰/۶ با داده های لایسیمتری و خطای ۰/۶۴ میلی متر کارایی کمی دارد

$$r_R = \frac{\rho C_p}{4\sigma(T+273.15)^3} \quad (24)$$

که در آن: ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm.d^{-1})$ ، R_n شدت تابش خالص $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، G شار گرمایی خاک $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، K_t ضریب تبدیل واحد برابر با ۳۶۰۰ ثانیه بر ساعت، λ گرمای نهان تبخیر $(MJ.kg^{-1})$ ، C_p گرمای ویژه هوا $(MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1})$ ، ρ جرم مخصوص هوا $(kg.m^{-3})$ ، γ ثابت سایکرومتری $(KPa.^{\circ}C^{-1})$ ، r_c مقاومت پوشش گیاهی در برابر انتقال بخار آب $(s.m^{-1})$ ، r_a مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما و بخار آب از سطح مرطوب به هوا $(s.m^{-1})$ ، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا $(KPa.^{\circ}C^{-1})$ ، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع هوا (KPa) ، r_{ns} مقاومت تشعشعی $(s.m^{-1})$ ، R_{ns} تشعشع موج کوتاه خالص $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، R_s تابش خورشیدی سطح زمین $(MJ.m^{-2}.d^{-1})$ ، T میانگین دمای هوا ساعتی یا روزانه $(^{\circ}C)$ ، T_0 دمای برگ $(^{\circ}C)$ ، σ ثابت استفان بولتزمن $(MJ.m^{-2}.K^{-4}.d^{-1})$ و LAI شاخص سطح برگ $(m^2.m^{-2})$ است.

۳- معادلات تبخیر و تعرق مبتنی بر گیاه حاکم در گلخانه

این معادلات تبخیر و تعرق را به طور مستقیم بدون نیاز به تعیین ضرایبی مانند K_c یا K_{pan} تعیین می کند. این معادلات با اصلاح معادلات پیشین و افزودن پارامترهای مختلف مشخصه های گیاه به معادله پنمن - مانیتث اصلاح شده اند و شامل موارد زیر هستند:

۳-۱ - استانگلینی (Stanghellini 1987)

(Stanghellini 1987) معادله پنمن-مانیتث را با افزودن پارامترهای جدید برای توصیف بهتر سیستم گلخانه و محصول اصلاح کرد. این پارامترهای جدید از مقاومت های داخلی و خارجی گیاه با در نظر گرفتن اقلیم گلخانه و سرعت باد حاصل شد. سطح پوشش گیاه یا شاخص سطح برگ به گونه ای تعریف شد که سطوح بالایی و پایینی برگ را شامل شود (معادلات ۲۲ تا ۲۴).

$$ET_0 = 2LAI \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n - G) + K_t \frac{\rho C_p}{r_R} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right] \quad (22)$$

$$R_n = \frac{0.07R_{ns} - 252\rho C_p(T - T_0)}{r_R}, \quad R_{ns} = 0.77R_s \quad (23)$$

جدول ۱۸ - مطالعات انجام شده روی معادله استانگلینی در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Prenger et al. (2002)	اوهایو	-	افرا	با R^2 برابر با ۰/۸۷ با داده‌های لایسمتری بهترین نتیجه در بین مدل‌های انتخابی داشت
۲	Abedi Koupai et al. (2009)	اصفهان	خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۹۳ با داده‌های لایسمتری و کارایی ۰/۹۱ بهترین نتیجه را نشان داد
۳	Villarreal-Guerrero et al. (2012)	آریزونای آمریکا	-	فلفل دلمه‌ای- گوجه	نتیجه خیلی خوب با R^2 برابر با ۰/۹۶ با داده‌های لایسمتری داشت
۴	Pamungkas et al. (2014)	ژاپن	-	گوجه	نتیجه مناسب اما کمی بیش‌برآوردی دارد
۵	Acquah et al. (2018)	چین	موسمی نیمه گرمسیری مرطوب	گوجه فرنگی	با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۰ با داده‌های لایسمتری نتایج بسیار خوبی داشت
۶	Harms (2022)	هلند	-	گوجه	با ضریب همبستگی ۰/۸۹ با داده‌های لایسمتری هر چند نتایج مناسبی داشت ولی اندکی بیش‌برآوردی نشان داد

C_p ، $(J.m^{-2}.s^{-1})$ ، ρ جرم مخصوص هوا $(kg.m^{-3})$ ، گرمای ویژه هوا $(J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1})$ ، λ گرمای نهان تبخیر $(J.kg^{-1})$ ، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (Pa) ، γ ثابت سایکرومتری $(^{\circ}C^{-1}.Pa)$ ، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع هوا $(Pa.^{\circ}C^{-1})$ ، r_e مقاومت خارجی پوشش گیاهی در برابر گرمای محسوس $(s.m^{-1})$ ، r_i مقاومت داخلی پوشش در برابر انتقال بخار $(s.m^{-1})$ و LAI شاخص سطح برگ $(m^2.m^{-2})$ است.

این مدل نیز در تعداد محدودی از مطالعات در گلخانه بررسی شده است (جدول ۱۹) و نتایج نشان می‌دهد که نمی‌توان آن را به عنوان مدلی قابل استناد در تعیین میزان آب مورد نیاز استفاده کرد. هر چند در مطالعات (Ilahi 2009) بیان شده که این مدل برای گلخانه‌های با تکنولوژی بالا مناسب است.

روی این مدل چندین پژوهش انجام شده است که نتایج آنها نشان می‌دهد این روش جزو روش‌هایی است که نتیجه خوبی حاصل کرده است (جدول ۱۸).

۳-۲ - فین (Fynn et al., 1993)

اگرچه این مدل مشابه معادله استانگلینی است، اما تابش خورشیدی و محاسبه شار گرمایی استفاده شده توسط استانگلینی در این مدل حذف شده است. Fynn et al. (1993) پیشنهاد کردند که دمای برگ و هوا برای ساده‌سازی اندازه‌گیری‌های مورد نیاز، برابر در نظر گرفته شود (Ilahi, 2009).

$$ET_0 = \frac{2LAI\rho \frac{C_p}{r_e}(e_s - e_a) + \Delta(R_n - G)}{\Delta + \lambda\gamma r_i} \quad (25)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mm.d^{-1})$ ، R_n شدت تابش خالص $(J.m^{-2}.s^{-1})$ ، G شار گرمایی خاک

جدول ۱۹ - مطالعات انجام شده روی معادله فین در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Prenger et al. (2002)	اوهایو	-	افرا	با ضریب کارایی برابر با ۰/۸۴۸ - بدترین عملکرد در بین مدل‌های انتخابی
۲	Abedi Koupai et al. (2009)	اصفهان	خشک	چمن	با ضریب همبستگی ۰/۸۷ با داده‌های لایسمتری و کارایی ۰/۷۲ نتیجه خیلی خوبی ارائه نمود

$$ET = \frac{R_n - h(T - T_w) - G}{l} \quad (26)$$

که در آن: ET شار تبخیر و تعرق گیاه $(kg.m^{-2}.h^{-1})$ ، R_n تشعشع خالص بالای پوشش $(kJ.m^{-2}.h^{-1})$ ، h ضریب انتقال حرارت همرفتی هوا $(kJ.m^{-2}.h^{-1}.K^{-1})$ که در

۳-۳ - تاکاکورا (Takakura et al., 2009)

این معادله به‌عنوان روش تعادل حرارتی نیز شناخته می‌شود. Takakura et al. (2009) گزارش کرده‌اند که این معادله ساده‌تر و دقیق‌تر از معادله پنمن-مانتیت فائو است.

مطالعات محدودی روی این روش انجام شده است و همین مطالعات محدود نیز نتایج قابل قبولی داشته است (جدول ۲۰). به نظر می‌رسد مطالعات برای توصیه این روش در سامانه هوشمند کافی نیست. با این حال (Ilahi (2009 این روش را نیز مناسب گلخانه‌ها با تکنولوژی بالا دانسته است.

داخل گلخانه مقدار آن می‌تواند برابر ۷ وات بر مترمربع درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شود، T دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، T_w دمای سطح (میانگین کلی دمای سطح تاج گیاه و سطح زمین) ($^{\circ}\text{C}$)، G شار گرمایی خاک ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) و l حرارت ناشی از تبخیر ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) است. با توجه به بررسی‌های انجام شده،

جدول ۲۰ - مطالعات انجام شده روی معادله تاکاکورا در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقليم	گياه	نتيجه
۱	Villarreal-Guerrero et al. (2012)	آریزونا	-	فلفل دلمه‌ای- گوجه	نتیجه نسبتاً مناسب با ضریب همبستگی ۰/۶۶ با داده‌های لایسیمتری نشان داد
۲	Harms (2022)	هلند	-	گوجه	با ضریب همبستگی ۰/۸۵ با داده‌های لایسیمتری نشان داد

جامع از نظر کارایی روش‌های مورد استفاده برای تخمین تبخیر و تعرق است. در این پژوهش روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه در دنیا و ایران بررسی و نتایج زیر حاصل شد. در بین روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های متعدد، نتایج برخی در اغلب مناطق ضعیف و غیرقابل قبول بود که می‌توان به روش‌هایی مانند تورک، مک‌کینک، جنسن-هیز، هارگریوز-سامانی و بلانی کریدل اشاره کرد. برخی روش‌ها نیز مانند روش‌های فائو-تابش، پریسلی-تیلور و فائو-پنمن نتایج متوسطی برای برآورد تبخیر و تعرق در گلخانه ارائه کرده‌اند.

یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تخمین تبخیر و تعرق گلخانه که در پژوهش‌های بیشتری مورد استفاده قرار گرفته است روش پنمن-مانتیت است. این روش نسبت به روش‌های دیگر نتایج دقیق‌تری را نشان داده است.

همچنین این روش در نشریه ۴۷۴ سازمان برنامه و بودجه به‌عنوان روش پیشنهادی برای تعیین نیاز آبی گلخانه در ایران نیز پیشنهاد شده است. در کنار این روش، معادله استانگلینی نیز نتایج بسیار دقیقی ارائه نموده است، هرچند تعداد مطالعات انجام شده روی این معادله محدود و نیاز به بررسی بیشتری دارد. برخی روش‌های معروف دیگر مانند روش پنمن-مانتیت-فائو نیز در برخی مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج آن نسبت به نتایج روش پنمن-مانتیت و معادله استانگلینی ضعیف‌تر و در برخی موارد غیرقابل قبول گزارش شده است. (Ilahi (2009 در مطالعه خود بیان کرد که روش‌های پنمن-مانتیت و پنمن-مانتیت-فائو در گلخانه‌های با تکنولوژی پایین و روش استانگلینی در گلخانه‌های با تکنولوژی بالا نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

۴- سایر موارد

مطالعات متعددی نیز با استفاده از روش‌های شبکه عصبی، رگرسیون خطی و غیر خطی و شبکه عصبی و فازی انجام شده است اما این روش‌ها معمولاً منطقه‌ای هستند و قابلیت استفاده در سایر نقاط را ندارند. در جدول زیر (جدول ۲۱) به برخی از این مدل‌ها اشاره شده است. همچنین برخی معادلات تخمین تبخیر و تعرق گلخانه که تعداد بسیار محدودی مطالعه روی آن انجام شده است نیز در این جدول ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

قرارگیری ایران در یک اقلیم خشک و نیمه‌خشک در کنار افزایش جمعیت، تغییر اقلیم و وقوع خشکسالی‌های طولانی منجر به بحرانی شدن وضعیت منابع آبی کشور شده است. از سوی دیگر افزایش نیاز کشور به مواد غذایی باعث فشار بیش از حد به منابع آب سطحی و زیرزمینی شده. بنابراین حرکت به سمت راهکارهای کاربردی به منظور افزایش کارایی مصرف آب یک استراتژی کلیدی برای شرایط کنونی است. توسعه کشت‌های گلخانه‌ای، راهکاری عملی و مناسب برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک مانند ایران است. در چنین شرایطی استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای مدیریت گلخانه‌ها می‌تواند کارایی استفاده از آن‌ها را تا حد زیادی افزایش دهد. هوشمندسازی گلخانه که امروزه به‌شدت مورد توجه تولیدکنندگان بزرگ گلخانه‌ای قرار گرفته است می‌تواند نقش بالایی در افزایش بهره‌وری از آب داشته باشد که این امر نیاز به تخمین دقیق نیاز آبی گیاهان در گلخانه دارد. بنابراین گام نخست برای تخمین نیاز آبی در گلخانه‌ها، انجام یک بررسی

جدول ۲۱ - مطالعات انجام شده روی سایر روش‌ها در گلخانه

ردیف	مرجع	منطقه مورد مطالعه	اقلیم	گیاه	نتیجه
۱	Amiri et al. (2008)	اصفهان	خشک	چمن	با مطالعه روی معادله تابشی که مشابه روش معرفی شده در نشریه ۴۷۴ ایران است ($ET_0 = K \times T \times \frac{RG_0}{2.5}$) نشان دادند که این روش با ضریب همبستگی ۰/۵ با داده‌های لایسمتری و کارایی مدل ۰/۳ ضعیف‌ترین نتیجه را داشته است
۲	Shahabifar et al. (2010)	تهران	-	چمن	این مطالعه روی معادله پنمن مانتیث ASCE انجام و نشان دادند که مدل با ضریب همبستگی حدود ۰/۶ عملکرد خوبی معادل پن‌من مانتیث فانو را در میان روش‌ها داشته است
۳	Abedi Koupai et al. (2011)	اصفهان	خشک	فلفل، گوجه	یک مدل رگرسیون غیرخطی بین تبخیر و تعرق، متوسط دمای روزانه، درصد تابش خورشیدی و ارتفاع گیاه با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۰ ارائه نمودند
۴	Moazen-zadeh (2015)	تهران	نیمه خشک	خیار	روش‌های رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی (شبکه عصبی بهتر از رگرسیون خطی) را استفاده و نتایج قابل قبولی ارائه کردند
۵	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک		از مدل مک‌کلود استفاده نمود و نتیجه گرفتند که ناکارآمدترین مدل با ضریب همبستگی ۰/۱۱ و $RSME$ ۳/۲۳ است
۶	Akbarifard et al. (2016)	کرمان	گرم و خشک	چمن	از مدل مدل جنسن-هیز اصلاح‌شده استفاده نمودند و عدم کارایی با ضریب کارایی ۰/۱۵ و $RSME$ برابر ۱/۸۵ را گزارش کردند
۷	Rahimikhoob et al. (2022)	کرج	نیمه خشک	چمن	نشان دادند که سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی عملکرد بهتری نسبت به شبکه عصبی دارد
۸	Abedi Koupai et al. (2009)	اصفهان	خشک	چمن	مدل شبکه عصبی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ و کارایی ۰/۹۳ بهترین نتیجه را نشان دادند
۹	Casanova et al. (2009)	شیلی	نیمه خشک	کاهو	نشان دادن که روش Andersson evaporimeter بهترین نتیجه را دارد
۱۰	Zi-kun et al. (2010)	شمال شرق چین	خشک		با روش رگرسیون نشان دادند که تبخیر گیاه خیار با تبخیر از تشت همبستگی بالایی دارد. ضریب تبیین آن معادل ۰/۸۷ به‌دست آمد. در حالیکه، ضریب تعیین بین تبخیر واقعی و تبخیر پتانسیل کمتر و تنها ۰/۴۶ است
۱۱	Hernández-Salazar et al. (2019)	مکزیک	-		گوجه‌فرنگی با بسط یک مدل عصبی-فازی برای برآورد تبخیر و تعرق نتایج قابل قبولی برای تخمین تبخیر و تعرق ارائه نمودند
۱۲	Rahimikhoob et al. (2020)	کرج	نیمه مرطوب	چمن	روش ایمارک، کوپایز و والیانتر را بررسی به‌ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۸۳، ۰/۸۲ و ۰/۷۷ را گزارش نمود. همچنین روش آبتو با ضریب همبستگی ۰/۷۵ عملکرد متوسط نشان داد
۱۳	Gong et al. (2019)	چین	گرم و پرباران	گوجه‌فرنگی	از مدل Shuttleworth-Wallace برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده و نشان دادند این مدل با خطای ۰/۶۳ در سال ۲۰۱۵ و ۰/۶۱ در سال ۲۰۱۶ توانایی مناسبی برای تخمین تبخیر و تعرق دارد
۱۴	Darouich (2021)	سوریه	نیمه خشک	گل ختمی	مدلی با عنوان SIMDualKc را برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق ارائه کرد. این تحقیق مبانی پایه را برای توسعه مدلی برای محاسبه تبخیر و تعرق محصولات گلخانه‌ای ایجاد کرد، اما هنوز موانعی برای توسعه چنین مدلی وجود دارد
۱۵	Jung et al. (2022)	کره جنوبی	-	گوجه	نشان دادند که مدل یادگیری عمیق برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق نتایج قابل قبولی دارد
۱۶	Ge et al. (2022)	چین	گوجه		روش‌های یادگیری ماشین را برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق استفاده کرده و نشان دادند که دقت پیش‌بینی مدل (میانگین مربعات خطا ۰/۰۴۷) خوب است
۱۷	Shi et al. (2023)	پکن	گوجه‌فرنگی		نشان دادند که روش شبکه عصبی در تخمین تبخیر و تعرق کارایی خوبی دارد

- Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), pp. 2528-2535.
2. Abedi-Koupai, J., Eslamian, S.S. and Zareian, M.J., 2011. Measurement and modeling of water requirement and crop coefficient for cucumber, tomato and pepper using microlysimeter in greenhouse. *Science and Technology of Greenhouse Crops*, 2(7), pp. 51-63. [In Persian]
 3. Acquah, S.J., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., Zhao, B., Wu, H., and 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), pp. 95-103.
 4. Akbarifard, S., Bakhtiari, B., Mirhabibi, M., Rezaie Estakhroei, A. 2016. Comparison Calculated and Actual Daily Reference Evapotranspiration in Greenhouse Conditions in a Semi-arid Climate. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(6), pp. 937-947. [In Persian]
 5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300p.
 6. Amiri, M.J., Abedi Koupai, J., Eslamian, S.S., and Lendi, E. 2008. Comparison of several computational methods for estimating water requirements in greenhouses. In *3rd Conference on Water Resources Management*, Tabriz. [In Persian]
 7. Amiri, M.J., Abedi-Koupai, J. and Eslamian, S.S., 2011. Evaluation of the performance of evaporation pans in greenhouse environment. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, 2(1), pp.63-73. [In Persian]
 8. Blanco, F.F., and Folegatti, M.V. 2004. Evaluation of evaporation-measuring equipments for estimating evapotranspiration within a greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8, pp. 184-188.
 9. Bonachela, S., González, A.M., and Fernández, M.D. 2006. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*, 25, pp. 53-62. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0034-z>
 10. Boulard, T., and Wang, S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), pp. 25-34.
 11. Casanova, M.P., Messing, I., Joel, A., and Cañete, A.M. 2009. Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), pp. 60-70.
 12. Darouich, H., Karfoul, R., Ramos, T.B., Moustafa, A., Shaheen, B., and Pereira, L.S. 2021. Crop water requirements and crop coefficients for jute mallow (*Corchorus olitorius* L.) using the SIMDualKc model and assessing irrigation strategies for the Syrian Akkar region. *Agricultural Water Management*, 255, 107038. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107038>

در انتها می‌توان نتیجه گرفت که هرچند لایسی متر دقیق‌ترین روش تعیین تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان در گلخانه‌ها است ولی به دلیل وقت‌گیر بودن استفاده از آن نمی‌توان آن را برای تمام شرایط توصیه کرد. همچنین استفاده از تشت‌های تبخیر کلاس A و تشت اصلاح شده مخصوص گلخانه به دلیل نیاز به اندازه‌گیری دقیق عمق آب و همچنین تخمین دقیق ضریب تشت نمی‌تواند در موضوع هوشمندسازی گلخانه کارآمدی لازم را داشته باشند. بنابراین استفاده از معادلات تخمین دقیق تبخیر و تعرق برای هوشمندسازی گلخانه‌ها توصیه می‌گردد. علی‌رغم اینکه به‌دست آوردن روش دقیق و مناسب برای هر شرایط نیاز به بررسی دقیق دارد ولی بر اساس مطالعات انجام شده می‌توان روش‌های پنمن-مانتیت، پنمن-مانتیت-فائو و استانگلینی را برای این امر توصیه نمود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه شهرکرد به‌خاطر در اختیار قرار دادن امکانات لازم برای این پژوهش، تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری، تحلیل و جمع‌بندی مطالب
نویسنده دوم: جمع‌آوری منابع، ویرایش و بازبینی مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Abedi Koupai, J., Amiri, M.J., and Eslamian, S.S. 2009. Comparison of artificial neural network and physically based models for estimating of reference evapotranspiration in greenhouse. *Australian*

- conditions. Irrigation and Drainage. <https://doi.org/10.1002/ird.2793>
24. Guo, D., Chen, Z., Huang, D., and Zhang, J. 2021. Evapotranspiration model-based scheduling strategy for baby pakchoi irrigation in greenhouse. HortScience, 56(2), pp. 204-209.
25. Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied engineering in agriculture, 1(2), pp.96-99.
26. Harms, K. 2022. An analysis of four different models for quantifying tomato transpiration in a soilless greenhouse. MSc Thesis. Technical University Delft, The Netherlands.
27. Hernández-Salazar, J.A., Hernández-Rodríguez, D., Hernández-Cruz, R.A., Ramos-Fernández, J.C., Márquez-Vera, M.A., and Trejo-Macotela, F.R. 2019. Estimation of the evapotranspiration using ANFIS algorithm for agricultural production in greenhouse. In 2019 IEEE International Conference on Applied Science and Advanced Technology (iCASAT), pp. 1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iCASAT.2019.8915449>
28. Ilahi, W.F.F. 2009. Evapotranspiration models in greenhouse. Master thesis, Agricultural and BioResearch Engineering, Wageningen University, The Netherlands.
29. Jensen, M.E. and Haise, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89(4), pp.15-41.
30. Jolliet, O., and Bailey, B.J. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. Agricultural and Forest Meteorology, 58(1-2), pp. 43-62. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90046-T](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90046-T)
31. Jung, D.-H., Lee, T.S., Kim, K., and Park, S.H. 2022. A Deep Learning Model to Predict Evapotranspiration and Relative Humidity for Moisture Control in Tomato Greenhouses. Agronomy, 12, pp. 2169. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092169>
32. Karaca, C., Tezcan, A., Büyüktaş, K., Büyüktaş, D., and Baştuğ, R. 2018. Equations developed to estimate evapotranspiration in greenhouses. Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences, 28(4), pp. 482-489.
33. Katsoulas, N., and Kittas, C. 2011. Greenhouse crop transpiration modelling. In Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications, pp. 312-328.
34. Khan, L.P., Gill, J.A., and Acosta, R. 1998. Design and performance of a hydraulic lysimeter for measurement of potential evapotranspiration. Bioagro, 10(1), pp. 11-17.
35. Liu, H.J., Cohen, S., Tanny, J., Lemcoff, J.H., and Huang, G. 2008. Estimation of banana (Musa sp.) plant transpiration using a standard 20 cm pan in a greenhouse. Irrigation and Drainage Systems, 22, 13. Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, (24).
14. Fathalian, N., and Nouri, M.R. 2011. Determination of crop evapotranspiration and crop coefficient of cucumber using microlysimeter under greenhouse conditions. Soil and Plant Journal, 3(4), pp. 125-134. [In Persian].
15. Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, 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, pp. 497-509. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0240-7>
16. Fynn, R.P., Alshooshan, A., Short, T.H., and McMahon, R.W. 1993. Evapotranspiration measurement and modeling for a potted chrysanthemum crop. Transactions of the ASAE, 36(6), pp. 1907-1913.
17. Gao, S., Li, Y., Gong, X., and Li, Y. 2024. Parameterization of Four Models to Estimate Crop Evapotranspiration in a Solar Greenhouse. Plants, 13(11), pp. 1579. <https://doi.org/10.3390/plants13111579>
18. Ge, J., Zhao, L., Yu, Z., Liu, H., Zhang, L., Gong, X., and Sun, H. 2022. Prediction of Greenhouse Tomato Crop Evapotranspiration Using XGBoost Machine Learning Model. Plants, 11(15), pp. 1923. <https://doi.org/10.3390/plants11151923>
19. Gong, X., Wang, S., Xu, C., Zhang, H., and Ge, J. 2020. Evaluation of Several Reference Evapotranspiration Models and Determination of Crop Water Requirement for Tomato in a Solar Greenhouse. Hortscience, 55(2), pp. 244-250. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14514-19>
20. Gong, X., Liu, H., Sun, J., Gao, Y., Zhang, X., Jha, S.K., Zhang, H., Ma, X., and Wang, W. 2017. A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse. Journal of Arid Land, 9, pp. 530-546. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0001-9>
21. Gong, X., Liu, H., Sun, J., Gao, Y., and 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, pp. 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.012>
22. Gong, X., Bo, G., Liu, H., Ge, J., Li, X. and Gao, S. 2022. Performance of the Improved Priestley-Taylor Model for Simulating Evapotranspiration of Greenhouse Tomato at Different Growth Stages. Plants 11, no. 21: 2956. <https://doi.org/10.3390/plants11212956>
23. Goyal, P., Sharda, R., Siag, M., and Biwalkar, N. 2023. Development of the crop coefficient for vertically trained cucumber vines grown in soilless media under naturally ventilated greenhouse

- <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12112> [In Persian].
48. Rahimikhoob, H., Sohrabi, T. and Delshad, M., 2020. Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. *Irrigation Science*, 38, pp.389-400. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00680-5>
 49. Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., Delshad, M. 2022. Performance Evaluation of Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Estimating Reference Evapotranspiration under Greenhouse Conditions, *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(3), pp. 499-511. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00682-6>. [In Persian].
 50. Sagar, A., Hasan, M., Singh, D.K., Al-Ansari, N., Chakraborty, D., Singh, M.C., and Elbeltagi, A. 2022. Development of smart weighing lysimeter for measuring evapotranspiration and developing crop coefficient for greenhouse Chrysanthemum. *Sensors*, 22(16), pp. 6239. <https://doi.org/10.3390/s22166239>
 51. Shahabifar, M., Esafari, M., Kuchakzadeh, M., and Mir LATIFI, S.M. 2010. Evaluation of some computational methods for estimating reference crop evapotranspiration using lysimeter data under greenhouse conditions. *Agricultural Water Research*, 24(1), pp. 13-19. [In Persian].
 52. Shi, W., Zhang, X., Xue, X., Feng, F., Zheng, W., and Chen, L. 2023. Analyzing Evapotranspiration in Greenhouses: A Lysimeter-Based Calculation and Evaluation Approach. *Agronomy*, 13, pp. 3059. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123059>
 53. Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops an aid to climate management. Wageningen University, 150p.
 54. Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., and Raes, D. 2012. Crop yield response to water. FAO, Rome, 99p.
 55. Takakura, T., Kubota, C., Sase, S., Hayashi, M., Ishii, M., Takayama, K., Nishina, H., Kurata, K., and Giacomelli, G.A. 2009. Measurement of evapotranspiration rate in a single-span greenhouse using the energy-balance equation. *Biosystems Engineering*, 102(3), pp. 298-304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.01.007>
 56. Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12, pp.13-49.
 57. Ucar, Y., Kazaz, S., Askin, M.A., Aydinsakir, K., Kadayifci, A., and Senyigit, U. 2011. Determination of irrigation water amount and interval for carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) with pan evaporation method. *HortScience*, 46(1), pp. 102-107.
 58. Valdés-Gómez, H., Ortega-Farías, S., and Argote, M. 2009. Evaluation of the water requirements for a greenhouse tomato crop using the Priestley-Taylor Method. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(3), pp. 11.
 - pp. 311-323. <https://doi.org/10.1007/s10795-008-9058-2>
 36. Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11, pp.277-288.
 37. Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M., and Montero, J. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae*, 105(2), pp. 163-175. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.024>
 38. Moazed, H., Ghaemi, A.A., and Rafiee, M.R. 2014. Evaluation of several reference evapotranspiration methods: a comparative study of greenhouse and outdoor conditions. *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 38(C2), pp. 421-437.
 39. Moazenadeh, R. 2015. Measurement and Modeling of Cucumber Evapotranspiration Under Greenhouse Condition. *Water and Soil*, 29(5), pp. 1247-1261. [doi: 10.22067/jsw.v29i5.38053](https://doi.org/10.22067/jsw.v29i5.38053)
 40. Möller, M., and Assouline, S. 2007. Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science*, 25(2), pp. 171-181. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0052-8>
 41. Orgaz, F., Fernández, M.D., Bonachela, S., Gallardo, M., and Fereres, E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*, 72(2), pp. 81-96. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.010>
 42. Pamungkas, A.P., Hatou, K., and Morimoto, T. 2014. Evapotranspiration model analysis of crop water use in plant factory system. *Environmental Control in Biology*, 52(3), pp. 183-188.
 43. Pollet, S., Bleyaert, P., and Lemeur, R. 1999. Calculating the evapotranspiration of head lettuce by means of the Penman Monteith model. *Bet Dagan*, 1999.
 44. Prenger, J.J., Fynn, R.P., and Hansen, R.C. 2002. A Comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, 45(6), pp. 1779-1788.
 45. Priestley, C., and Taylor, R. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), pp. 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
 46. Qiu, R., Kang, S., Du, T., Tong, L., Hao, X., Chen, R., Chen, J., and Li, F.E. 2013. Effect of convection on the Penman-Monteith model estimates of transpiration of hot pepper grown in solar greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 160, pp. 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.014>
 47. Rafiee, M. R., Moazed, H., Ghaemi, A. A., and Broomandnasab, S. 2016. FAO-56 Method for Estimating Evapotranspiration and Crop Coefficients of Eggplant in Greenhouse and Outdoor Conditions, *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(2), pp. 59-77.

<https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000300002>

59. Villarreal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G.A., and Arbel, A. 2012. Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering*, 111(2), pp. 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.01.004>
60. Yan, H., Zhao, S., Zhang, C., Zhang, J., Wang, G., Li, M., Deng, S., Liang, S., and Jiang, J. 2024. Calibration and assessment of evapotranspiration methods for cucumber plants in a Venlo-type greenhouse. *Irrigation and Drainage*, 73(1), pp. 119-135.
61. Yang, X., Short, T.H., Fox, R.D., and Bauerle, W.L. 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51(3-4), pp. 197-209. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90007-K](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90007-K)
62. Zeng, C.Z., Bie, Z.L., and Yuan, B.Z. 2009. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*, 96(4), pp. 595-602. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.12.004>
63. Zi-kun, Z., Shi-qi, I., Su-hui, I. and Zhi-jun, H. 2010. Estimation of Cucumber Evapotranspiration in Solar Greenhouse in Northeast China. *Agricultural Sciences in China*, 9(4), pp. 512-518. [doi:10.1016/S1671-2927\(09\)60124-3](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60124-3)
- 64.

