

مقاله پژوهشی

کاربرد مدل تراز انرژی برای پیش‌بینی تعرق و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی

سید معین‌الدین رضوانی^۱، حمید زارع ایبانه^{۲*}، محسن گودرزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش جمعیت و محدودیت آب و زمین‌های قابل کشت در ایران به سرمایه‌گذاری قابل توجهی در تولیدهای گلخانه‌ای منجر شده است. با توجه به اثر شرایط خرد اقلیم گلخانه بر عملکرد کمی و کیفی محصول، استفاده از مدل‌های ریاضی برای مطالعه و شبیه‌سازی خرد اقلیم گلخانه ضروری است. هدف از این تحقیق کاربرد و تحلیل یک مدل تراز انرژی برای شبیه‌سازی تعرق و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه است. مطالعه در گلخانه‌ای تجاری با پوشش پلاستیکی و مساحت ۴۳۳۳ مترمربع واقع در توپسرکان انجام شد. دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه با ۲۱ دیتالاگر ثبت شدند. برای داده‌های هواشناسی خارج گلخانه از ایستگاه هواشناسی نصب شده روی سقف گلخانه و داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک توپسرکان استفاده شد. برای تخمین دما، رطوبت نسبی و تعرق محصول داخل گلخانه از تلفیق معادلات تراز انرژی و تعرق استفاده شد. الگوی تغییرات زمانی مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه مشابه بود. خطای جذر میانگین مربعات دمای شبیه‌سازی شده برای تهویه مکانیکی و تهویه طبیعی به ترتیب در کل شبانه روز ۰/۷۲ و ۰/۶۷، روزانه ۰/۸۳ و ۰/۷۷ و شبانه ۰/۴۹ و ۰/۴۹ درجه سلسیوس بود. خطای جذر میانگین مربعات رطوبت نسبی برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز ۴/۴، روزانه ۳/۰ و شبانه ۶/۰ درصد بود. پس از اصلاح مدل، شبیه‌سازی چهار روز خرد اقلیم داخل گلخانه نشان داد دمای داخل گلخانه در روز تا ۳۵°C و در شب به کمتر از ۱۶°C می‌رسد که در محدوده بهینه دمایی برای خیار گلخانه‌ای قرار ندارند. با توجه به دمای بالا (۳۵°C) و رطوبت پایین (۱۵٪ تا ۳۰٪) نیاز به سرمایش تبخیری در بعضی از ساعات روز وجود خواهد داشت. مجموع تعرق شبیه‌سازی شده نیز ۳۰/۲ میلی‌متر به دست آمد. پس از صحت‌یابی و اصلاح مدل، شرایط خرد اقلیم گلخانه در چهار روز شبیه‌سازی و تحلیل شد. نتایج نشان داد با استفاده از مدل تراز انرژی، قبل از احداث گلخانه می‌توان به برآوردی از شرایط خرد اقلیمی گلخانه و نیاز آبی محصول دست یافت.

واژه‌های کلیدی: تعرق، دما، رطوبت نسبی، شبیه‌سازی، کمبود فشار بخار

مقدمه

اراضی قابل کشت آبی نیز طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۳ تا ۹۶-۱۳۹۵ با ۳۳ درصد کاهش از ۲۶۵۰۲۱ به ۱۷۷۹۰۳ هکتار رسیده است و نشان می‌دهد سالانه حدود ۷۰۰۰ هکتار از سطح اراضی قابل کشت آبی کاسته شده است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت آب و زمین‌های قابل کشت در ایران، سرمایه‌گذاری قابل توجهی در تولیدهای گلخانه‌ای صورت گرفته است (خشخوی و همکاران، ۱۳۹۶؛ زارعی، ۱۳۹۶). در سال ۱۳۹۰، سطح گلخانه‌های سبزی و صیفی، توت فرنگی و گیاهان دارویی ایران ۵۹۴۶ هکتار بود که با رشد ۵۴/۱ درصدی در سال ۱۳۹۶ به ۹۱۶۴ هکتار رسید. در همین مدت سطح گلخانه‌ها در استان همدان از ۶۳/۶۵ هکتار با رشد ۲۷/۵۲ درصدی به ۸۱/۳ هکتار رسید. حدود ۵۵ درصد سطح زیرکشت گلخانه‌های استان همدان به خیار و پس از آن، ۱۵ درصد به گوجه‌فرنگی اختصاص دارد (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷).

در استان همدان آب‌های زیرزمینی بیش از ۸۵ درصد منابع آب را تشکیل می‌دهند که عمدتاً در بخش کشاورزی مصرف می‌شوند (شرکت آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۷). میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی از ۲۴۹۰ میلیون متر مکعب در سال ۸۷-۱۳۸۶ به ۲۰۴۷ میلیون متر مکعب در سال ۹۵-۱۳۹۴ رسیده است که منجر به کاهش ۲۳/۴ درصد میزان مصرف آب زیرزمینی طی این مدت شده است. سطح

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(*- نویسنده مسئول: Email: zare@basu.ac.ir)

در حالتی که گلخانه کاملاً بسته است، سبب محدود شدن کاربرد مدل تعلق می‌شود. این محدودیت ناشی از ساده‌سازی در طی استنتاج مدل بود و کاربرد آن زمانی رضایت بخش بود که هوای گلخانه کاملاً با شرایط خارجی هماهنگ باشد. این مدل علاوه بر تخمین تعلق، دما و رطوبت داخل گلخانه را نیز محاسبه کرد (Boulard and Wang, 2000). در مطالعه‌ای با استفاده از تراز انرژی، مدل تجربی جدیدی برای پیش‌بینی دمای کلی پوشش گیاهی بر اساس رگرسیون چندگانه خطی پیشنهاد شد. در این تحقیق حساسیت دمای پوشش گیاهی نشان داد، دمای هوا و تشعشع خورشیدی کلی داخل گلخانه که به راحتی و دقت قابل اندازه‌گیری هستند، بیشترین اثر را داشتند. مدل به‌دست آمده در یک هفته اندازه‌گیری، برآورد مناسبی از دمای برگ را نشان داد (Wang et al., 2004). فتناسی و همکاری‌ها یک مدل خطی را بر اساس توازن حرارت و جرم محصول گلخانه‌ای، که اجازه محاسبه دما و رطوبت داخل گلخانه را هم زمان با دمای محصول می‌داد، توسعه دادند. این مدل برای محصول بدون تنش و کاملاً رشد یافته وقتی اختلاف دمای بین داخل و خارج گلخانه کم است، معتبر بود. مدل تابستان در یک گلخانه تونلی کلاسیک با تهویه طبیعی و با سطح بازشدگی کم (۶٪) و زیاد (۱۸٪) در چچه آزمایش شد. برای اعتبارسنجی مدل از اندازه‌گیری‌های هوای داخل گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل، برای تخمین دقیقی از نرخ تهویه و تعلق تنها با استفاده از ابزارهای ساده اندازه‌گیری مانند حسگرهای دما و رطوبت هوا قابل استفاده است (Fatnassi et al., 2004). سنگار و کوتاری در مطالعه‌ای در حالت ماندگار با تحلیل تراز انرژی و در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت و جرم و داده‌های دمای پیرامونی، تشعشع خورشیدی و رطوبت برای یک روز زمستانی در ماه دسامبر و یک روز تابستانی در ماه می درجه حرارت خاک، گیاه، هوا و پوشش گلخانه را پیش‌بینی کردند. مقادیر برداشت شده و پیش‌بینی شده دمای گلخانه تقریباً با نوسانی بین 2°C تا 3°C مشابه بودند (Senegar and Kothari, 2008). باپتیستا و همکاری‌ها از معادلات تراز رطوبت و حرارت برای تحلیل گلخانه استفاده کردند. این مدل، درجه حرارت محصول را بسیار بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به ویژه طی روز شبیه‌سازی کرد که ناشی از تخمین غلط تبادل حرارت به‌وسیله تعلق بود. شبیه‌سازی ضعیف در شب نیز ناشی از خصوصیات فیزیکی غلط خاک بود. نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی عموماً خوب نبود و مقدار خطا بزرگ‌تر از ۲۰٪ بود. این مدل، دمای هوای داخل و پوشش گلخانه را به طور مطلوبی پیش‌بینی کرد. پس از اصلاح مدل، شبیه‌سازی دمای هوا، محصول و پوشش گلخانه با مقادیر اندازه‌گیری شده، توافق خوبی پیدا کرد (Baptista et al., 2010). کومار و همکاری‌ها یک مدل دینامیکی ساده را برای پیش‌بینی دمای هوا، فشار

گلخانه اکوسیستم پیچیده‌ای است که پدیده‌های فیزیکی مختلفی شامل: تعلق، میعان، تهویه، نشت و غیره در آن اتفاق می‌افتد. با توجه به اهمیت تاثیر شرایط خرد اقلیم گلخانه بر عملکرد کمی و کیفی محصول، مطالعات زیادی روی شرایط خرد اقلیم گلخانه و شبیه‌سازی آن صورت گرفته است. شرایط خرد اقلیم درون گلخانه برای هر فصل، با در نظر گرفتن تغییرات پیوسته شرایط خارجی گلخانه، محاسبه می‌شود. برای انجام بررسی دقیق خرد اقلیم داخل گلخانه، استفاده از مدل‌هایی بر پایه انتقال جرم و حرارت ضروری است. مدل‌های ریاضی بر پایه توازن جرم و انرژی، محیط گلخانه را همگن فرض می‌کنند و نتایج، میانگین متغیرهای خرد اقلیم را نشان می‌دهند (Roy et al., 2002). تنوع زیاد شرایط مرزی و عناصر طراحی، تحلیل خرد اقلیم گلخانه را کاری پیچیده می‌کند. برای مطالعه خرد اقلیم گلخانه، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی برای لحاظ حداکثر شرایط، ضروری است. مهم‌ترین تکنیک‌های شبیه‌سازی در اغلب مطالعات، دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و تراز انرژی^۲ می‌باشند. (Fatnassi et al., 2004; Boulard and Wang, 2000; Sengar and Kothari, 2005; Roy and Boulard, 2005; al., 2004; Kichah et al., 2010; Kim et al., 2008; 2008; 2012; Ali et al., 2014; Ali et al., 2015; Chen et al., 2015; Ali et al., 2018). بررسی منابع نشان می‌دهد اغلب تحقیقات انجام شده در گلخانه‌های تحقیقاتی بوده است (Roy and Boulard, 2005; Kim et al., 2008; 2012; Ali et al., 2014; Kichah et al., 2012; Chen et al., 2015; Ali et al., 2018).

در تحقیقی با استفاده از داده‌های هواشناسی مادرید در یک گلخانه کوچک تحقیقاتی برای شبیه‌سازی شرایط محیط داخلی گلخانه از روش تراز انرژی، شرایط اقلیمی خارجی شامل سرعت باد، رطوبت نسبی ثابت، تشعشع خورشیدی و دما در نظر گرفته شد و تغییرات درجه حرارت، رطوبت و جریان حرارت در داخل گلخانه با شرایط تهویه، گرمایش در شب و درصد پوشش گیاهی، شبیه‌سازی شد (Kindelan, 1980). بولارد و ونگ در آوینیون فرانسه یک مدل تعلق گیاهی ساده گلخانه‌ای را با استفاده از تراز انرژی تشریح کردند که با متغیرهای اقلیمی پیرامونی گلخانه پیش‌بینی می‌شد. اعتبارسنجی این مدل تعلق، با استفاده از داده‌های آزمایشی اندازه‌گیری شده در کشت هیدروپونیک گوجه‌فرنگی وقتی در چچه‌های گلخانه باز بودند و شرایط اقلیمی اوائل بهار زمانی که گلخانه بسته و هوای داخلی کاملاً محدود شده بود، انجام شد. تخمین مدل از بهار به تابستان بهبود یافت و مقایسه آن با مدل‌های پیشین تعلق نشان داد، فرض اقلیم بیرونی به جای خرد اقلیم داخلی به عنوان شرط مرزی و

1- Computational Fluid Dynamics (CFD)

2- Energy Balance

انجام و کارایی مدل ۰/۷۱ به دست آمد. در تابستان کارایی مدل ۰/۸۷ به دست آمد که همبستگی خوب بین مقادیر محاسبه شده و تجربی را نشان داد (Rasheed et al., 2020).

در مطالعات انجام شده برای تحلیل رژیم حرارتی و رطوبتی گلخانه با توجه به نیاز، صورتی از روش تراز انرژی با توجه به شرایط آب و هوایی پیرامونی، نوع سازه و پوشش گلخانه، نوع محصول، استفاده از تهویه طبیعی یا مصنوعی و احتساب تجهیزات سرمایشی و گرمایشی برای پیش‌بینی دما و رطوبت داخل گلخانه، تعرق و میزان تهویه، برآورد انرژی مورد نیاز برای گرمایش یا سرمایش یا اثر نوع پوشش گلخانه بر رژیم حرارتی آن استفاده شده است. تقریباً در تمامی مطالعات بررسی شده در این تحقیق، جزء مطالعه (Rasheed et al., 2020)، پژوهش‌های انجام شده در گلخانه‌های کوچک تحقیقاتی انجام شده است.

در این تحقیق هدف کاربرد مدل تراز انرژی برای شبیه‌سازی و تحلیل تعرق و شرایط خرد اقلیم گلخانه‌ای تجاری و بزرگ با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه است، به طوری که با استفاده از مدل تهیه شده قبل از احداث گلخانه بتوان به برآوردی از شرایط خرد اقلیم و میزان تعرق در گلخانه دست یافت.

مواد و روش‌ها

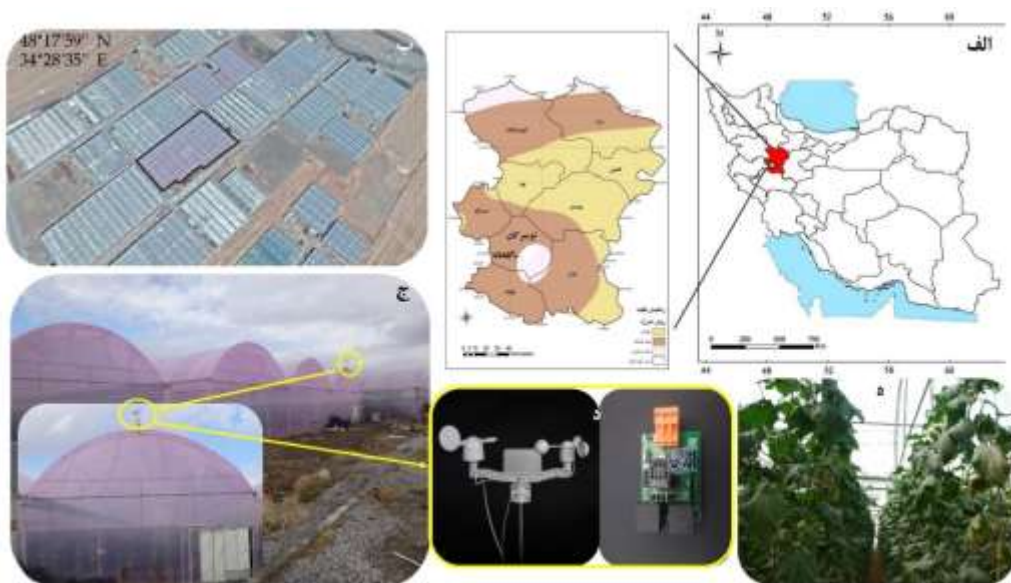
مشخصات گلخانه

گلخانه مورد مطالعه در شهرک گلخانه‌ای دهستان فرسفج واقع در شهرستان توپسرکان، استان همدان در طول $34^{\circ}17'59''$ شرقی و عرض $34^{\circ}28'35''$ شمال جغرافیایی و ارتفاع ۱۶۱۷ m بود (شکل ۱ الف). گلخانه انتخاب شده، گلخانه‌ای تجاری، کوانست با دیوارهای جانبی و پوشش پلاستیکی ۲۰۰ میکرون که سقف آن یک لایه داخلی ۶۰ میکرونی اضافی نیز داشت، بود (شکل‌های ۱ ب و ۱ ج و ۲). مساحت گلخانه ۴۳۳۳ متر مربع، دارای ۱۰ دهانه ۹ متری، ارتفاع تا ناودانی ۴ و تا سقف ۶/۵ متر بود. نیمی از گلخانه، مدتی بعد به گلخانه اولیه اضافه شده بود و عرض کلی دهانه‌ها با احتساب ۱/۵ متر فاصله بین دو قسمت قدیم و جدید ۹۱/۵ متر بود (شکل ۲). دو دریچه تهویه روی دیوارهای جانبی در سمت شرق و غرب و یک دریچه نیز در دیواره انتهایی (شمال) گلخانه قرار داشت. با هدف جلوگیری از تلفات انرژی ناشی از نشت یا تبادل با هوای خارج در فصل زمستان، تنها یک دریچه سقفی در محل اتصال قسمت قدیم و جدید وجود داشت. در بهار و تابستان روزها از تهویه مکانیکی با دمنده خروجی و شب‌ها از تهویه طبیعی استفاده می‌شد. در اندازه‌گیری، ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ تعداد فن‌های خروجی نصب شده، ۹ عدد بود که از ساعت ۰۸:۳۰ تا ۲۰:۳۰ تهویه هوا را انجام می‌دادند. محصول کشت شده در گلخانه، خیار، رقم ناهید، بود که در مرحله رسیدگی میوه قرار داشت. دو ردیف

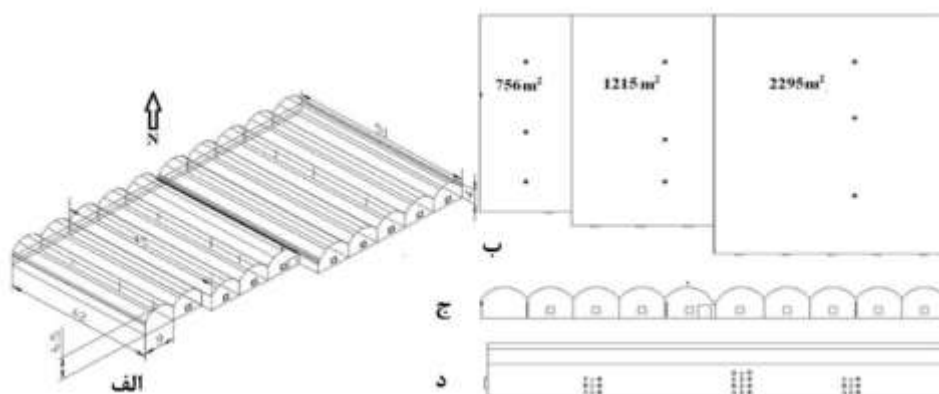
بخار و دمای پوشش گیاهی توسعه دادند. مدل برای کشت گل ژره‌بر^۱ در زمستان و تابستان اعتبارسنجی شد. توافق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده دما در زمستان و تابستان به ترتیب با RMSE برابر 0.73°C و 0.87°C به دست آمد (Kumar et al., 2010). چن و همکاران مدلی ساده برای توصیف دمای داخل گلخانه بر پایه توازن انرژی و فرض ماندگاری شرایط حرارتی را با استفاده از داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده از شرایط مختلف اعتبارسنجی کردند. دقت نتایج پیش‌بینی مدل برای درجه حرارت حدود $1/5^{\circ}\text{C}$ بود (Chen et al., 2011). سالارز مورنو و همکاران در تحقیقی در منطقه مرکزی مکزیک یک مدل تراز انرژی پویا را با هدف پیش‌بینی دمای هوا درون گلخانه‌ای ۱۲۰ مترمربعی با پوشش پلی‌اتیلن، تهویه طبیعی و کشت گوجه فرنگی استفاده نمودند. این مدل تعرق گیاه، تهویه و چگالش درون گلخانه، شرایط آب و هوایی خارج، ویژگی‌های محصول (شاخص سطح برگ، مقاومت روزنه‌ای و آیرودینامیکی)، خصوصیات پوشش و ویژگی‌های گلخانه را در نظر می‌گرفت. نتایج نشان داد مقدار متوسط خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی مدل (EF) به ترتیب ۱/۸۶ درجه سلسیوس، ۲/۲۵۶ و ۰/۶۵۷ به دست آمد. پس از کالیبره کردن مقدار کارایی مدل با افزایش ۳۳/۸۴ درصدی به ۰/۸۹ رسید. هر چند تعرق پیش‌بینی شده به مقادیر موجود در منابع نزدیک نبود ولی مدل به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل رفتار دما درون گلخانه کارایی داشت (Salazar Moreno et al., 2019). علی و همکاران در مطالعه‌ای در تونس یک مدل تراز انرژی پویا را برای توصیف رفتار گرمایی داخل گلخانه به منظور پیش‌بینی تغییرات دمای هوای داخلی گلخانه طی ۹ روز در ماه مارس در دو گلخانه شفاف (سقف و بدنه پلیکسی گلاس 0.03°C متر) و عایق‌بندی شده (سقف پلیکسی گلاس 0.03°C متر، بدنه پلیکسی گلاس 0.04°C و 0.06°C ، مجهز به پرده‌های با نوارهای کوچک آلومینیومی که از غروب آفتاب در قسمت جنوبی مستقر می‌شدند) هر کدام به مساحت ۱۴/۸ مترمربع و کشت گوجه فرنگی اعتبارسنجی کردند. در هر دو گلخانه مقادیر مشابه خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی مدل (EF) به ترتیب ۰/۰۱ درجه سلسیوس و ۰/۹۹ به دست آمد. ضریب تعیین (R^2) در گلخانه عایق بندی شده (۰/۹۰) و در گلخانه شفاف (۰/۸۵) بود (Ali et al., 2020). رشید و همکاران پژوهشی را در یک گلخانه ۷۶۵۰ متر مربعی تیپ ونلو با سقف شیشه‌ای و دیواره‌های پلی‌کربنات مجهز به سایبان و پرده محافظ انرژی در کره جنوبی مدل ساده شده‌ای از تراز انرژی را بدون در نظر گرفتن تعرق با هدف شبیه‌سازی محیط حرارتی گذرا گلخانه ارائه دادند. آزمایشات در زمستان برای اعتبارسنجی مدل

1 - *Gerbera jassemuni*
2- Plexiglass

بوته روی پشته‌هایی با فاصله ۱۵۰ cm با آرایش $36/0 \text{ cm} \times 37/0$ کشت شده و متوسط ارتفاع پوشش گیاهی خیار ۱۹۰ cm بود. دوره کشت خیار نیز از نیمه دوم بهمن ماه تا اوایل مرداد ماه بود.



شکل ۱- گلخانه مورد مطالعه الف: موقعیت گلخانه در استان همدان؛ ب: موقعیت جغرافیایی گلخانه؛ ج: نمای بیرونی گلخانه و محل قرارگیری ایستگاه هواشناسی؛ د: ایستگاه هواشناسی و حسگرها؛ ه: ردیف‌های کشت خیار



شکل ۲- شماتیک گلخانه و ابعاد آن و محل قرارگیری دیتالاگرها، الف: شکل سه بعدی و ابعاد گلخانه؛ ب: نمای بالا دایره‌های سیاه محل قرارگیری حسگرها است؛ ج: نمای جلو؛ د: نمای جانبی

طراحی و ساخت دیتالاگر

برای ثبت و جمع‌آوری داده‌های دما و رطوبت از محیط گلخانه ۲۱ دیتالاگر طراحی و ساخته شد. در این مطالعه از میکروکنترلر Atmega32a (Atmel, Taiwan) از خانواده AVR و ماژول حسگر دما و رطوبت نسبی (SENSIRION, Switzerland) SHT20 برای ساخت دیتالاگر استفاده شد. دقت حسگر دماسنج 0.1°C و میزان خطای اندازه‌گیری دمای آن $\pm 0.3^\circ\text{C}$ است. دقت رطوبت سنج این حسگر نیز 0.4% درصد و میزان خطای اندازه‌گیری رطوبت نسبی ± 3

درصد است. آی سی ساعت، DS1307^۱ بود و از آن برای شمارش ساعت، دقیقه، ثانیه، روز، ماه و سال استفاده شد. برای دیتالاگر برنامه‌ای با کامپایلر Code Vision AVR به زبان C نوشته و پس از کامپایل کردن، فایل اجرایی در حافظه فلش^۲ میکروکنترلر بارگذاری شد.

1- Dallas Semiconductor Integrated Maxim
2- Flash

نصب ایستگاه هواشناسی

یک ایستگاه هواشناسی روی سقف گلخانه در ارتفاع ۷/۵ متری از سطح زمین نصب شد. تجهیزات ایستگاه هواشناسی APRS شامل حسگر دما و رطوبت نسبی (SENSIRION, SHT10 (Switzerland) به ترتیب با دقت دما و رطوبت نسبی 0.5°C و $4/5\%$ ، فشار هوا BMP180 (BOSCH, Germany) با دقت $0.1/12$ hPa، سرعت باد با دقت 0.1 m/s، میزان بارش با دقت 0.1 mm و جهت باد بود. اندازه گیری هر دو ثانیه یک بار انجام و داده های ایستگاه هواشناسی روی یک میکرو SD ثبت می شد (شکل های ۱ج و ۱د).

اندازه گیری تشعشع

برای اندازه گیری تشعشع در مرکز گلخانه یک لوکس متر مدل YK-2005LX با دامنه کاری صفر تا 100000 Lux در بالای پوشش گیاهی نصب شد که توانایی ثبت شدت نور ورودی به داخل گلخانه را در دقیقه داشت. برای تبدیل لوکس به شدت تشعشع بر حسب وات بر مترمربع از ضریب تبدیل $683/2$ استفاده شد (Ryer, 1998). تشعشع خارج گلخانه از ایستگاه سینوپتیک تویسرکان واقع در 14 کیلومتری شمال گلخانه تهیه شد که با توجه صاف و بی ابر بودن آسمان در روز اندازه گیری، میزان تشعشع رسیده به سطح گلخانه را می توان برابر با تشعشع در ایستگاه سینوپتیک فرض کرد.

محل نصب دیتالاگرها

گلخانه در محور طولی به سه بخش تقسیم شد و دیتالاگرها در وسط یک سوم اول، دوم و سوم به صورت عرضی در سه نقطه (دو نقطه جانبی و محور وسط گلخانه) در دو ارتفاع 140 و 220 سانتی متری از سطح زمین نصب شدند (شکل ۲). در کنار دو دریچه جانبی و دریچه انتهایی، دیتالاگر نصب شد. دریچه های جانبی و انتهایی به طور دائم باز بودند و دریچه سقفی وسط گلخانه پس از خاموش شدن فن ها، باز می شد. در هر ثانیه دما و رطوبت نسبی اندازه گیری و روی میکرو SD ذخیره می شدند. پس از اتمام اندازه گیری، میانگین دقیقه ای و ساعتی دما و رطوبت نسبی به دست آمد.

استنتاج معادلات تراز انرژی

برای استنتاج معادلاتی که با استفاده از معادله تراز انرژی و شرایط مرزی پیرامونی گلخانه بتوان دما، رطوبت هوا، دمای گیاه و تعرق داخل گلخانه را تخمین زد، از تلفیق معادله تراز انرژی و تعرق (Boulard and Wang, 2000 ; Boulard A. and Baille, 1993) ; Fatnassi et al., 2004 ; Kumar et al., 2010 ; Bauri and Ganguly, 2013) استفاده شد. معادله تراز انرژی به شکل زیر است:

$$\mu G_o - (K_s - K_c)\Delta T - K_L \Delta e - Q_m = 0 \quad (1)$$

که در آن G_o تشعشع خورشیدی خارج گلخانه بر حسب $\mu\text{W m}^{-2}$ ، μ کارایی حرارتی خورشیدی گلخانه، K_s و K_L به ترتیب ضرایب انتقال گرمای محسوس و نهان به $\text{W}^{-2} \text{K}^{-1}$ و $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$ ، ΔT ، تفاوت دمای بین هوای داخل و خارج گلخانه به $^{\circ}\text{K}$ ، Δe تفاوت فشار بخار بین هوای داخل و خارج گلخانه به Pa ، Q_m جمله ذخیره حرارت، K_C ضریب انتقال حرارت کلی بین داخل و خارج گلخانه به $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ است.

تعرق گیاهی از رابطه زیر محاسبه شد (Fatnassi et al., 2004):

$$\lambda E = \frac{\rho C_p L A I}{\gamma} \left(\frac{e_f^* - e_i}{r_s + r_a} \right) \quad (2)$$

که در آن λ گرمای نهان بخار آب J kg^{-1} ، E تعرق از پوشش گیاهی $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ، ρ دانسیته هوا kg m^{-3} ، e_f^* فشار بخار آب اشباع در دمای برگ Pa ، c_p حرارت ویژه هوا در فشار ثابت $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ، e_i فشار بخار آب داخل گلخانه Pa ، LAI شاخص سطح برگ و γ ثابت سایکرومتری Pa K^{-1} ، r_a مقاومت آئرو دینامیکی به s m^{-1} ، r_s مقاومت روزنه ای به s m^{-1} .

اختلاف بین فشار بخار آب اشباع در دمای برگ و فشار بخار آب هوای داخل گلخانه را می توان با استفاده از رابطه ۳ تخمین زد.

$$e_f^* - e_i = \delta(T_i)\Delta T_f + D_i \quad (3)$$

که در آن $\delta(T_i)$ شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای T_i به Pa K^{-1} ، ΔT_f اختلاف دمای بین هوای داخل گلخانه و پوشش گیاهی و D_i کمبود فشار بخار هوای داخل گلخانه به Pa است. با بسط معادله (۳) (Boulard and Wang, 2000 ; Fatnassi et al., 2004) و تلفیق آن با معادلات (۱) و (۲) یک سیستم معادله خطی به شکل زیر به دست می آید (Boulard and Fatnassi et al., 2004 ; Boulard and Wang, 2000 ; Baille, 1993) ; Bauri and Ganguly, 2013):

$$\begin{cases} (K_s + K_c)\Delta T + K_L \Delta e = \mu G_o - Q_m \\ [\delta(T_i) - \delta(T_o)]\Delta T + \left[\frac{\gamma(r_s - r_a)}{\rho c_p L A I} K_L + 1 \right] \Delta e - \delta(T_i)\Delta T_{fo} = D_o \\ \frac{\rho c_p L A I}{r_a} \Delta T - K_L \Delta e - \frac{\rho c_p L A I}{r_a} \Delta T_{fo} = -R_n \end{cases} \quad (4)$$

با معلوم بودن متغیرهای مربوط به خصوصیات گلخانه (μ ، K_C)، محصول (LAI ، r_a ، r_s) و شرایط مرزی اقلیم خارج گلخانه (G_o ، T_o)، D_o و R_n حل آن می توان ΔT ، Δe ، ΔT_{fo} به دست آورد. در روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) متغیرهای مورد نیاز به شرح زیر تخمین زده شدند (Boulard A. and Baille, 1993) ; Boulard ; Kumar et al., 2010 ; Fatnassi et al., 2004 ; and Wang, 2000 ; Bauri and Ganguly, 2013):

مقاومت آئرو‌دینامیکی به $s\ m^{-1}$ ، r_c مقاومت پوشش گیاهی به $s\ m^{-1}$ ، r_R مقاومت تابشی به $s\ m^{-1}$ ، $LAI =$ شاخص سطح برگ به $m^2\ m^{-2}$. برنامه حل معادلات تراز انرژی و محاسبه تعرق به روش استانگلینی در صفحه گسترده اکسل با استفاده از ویژوال بیسیک کد نویسی شد.

روش تحلیل آماری

برای تحلیل آماری دقت مدل از مقدار متوسط خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) رابطه خطی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده استفاده شد. همچنین کارایی مدل (EF^2) به شکل زیر به دست آمد- (Salazar-Moreno et al., 2019; Ali et al., 2020; Rasheed et al., 2020):

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (13)$$

اگر مدل کامل باشد، مقادیر پیش‌بینی شده برابر با مشاهدات یا مقادیر اندازه‌گیری شده ($y_i = \hat{y}_i$) و کارایی مدل یک خواهد بود. بر عکس، وقتی قسمت دوم سمت راست معادله ۱۳ برابر با یک شود، به معنی برابری مقدار پیش‌بینی شده با میانگین است و در نتیجه $EF = 0$ خواهد شد که نشان دهنده خوب نبودن مدل است. اگر $EF < 0$ باشد، به معنی آن است که مقادیر پیش‌بینی شده تخمین خوبی نسبت به امید ریاضی نیست.

شاخص سطح و مشخصه طولی برگ

برای تخمین مساحت برگ خیار، تعداد ۵۱ برگ با اندازه‌های مختلف انتخاب و با اندازه‌گیری طول و عرض برگ و مساحت آنها رابطه زیر، برای محاسبه سطح یک برگ به دست آمد:

$$A = 0.7775(W \times L) + 0.0003 \quad r^2 = 0.9916 \quad F = 578.87^{***} \quad (14)$$

W و L به ترتیب طول و عرض برگ به متر است. سپس برای تخمین شاخص سطح و مشخصه طولی برگ از ۶ نقطه در سطح گلخانه (یک سوم اول، دوم و سوم) در هر نقطه دو بوته و در مجموع ۱۲ بوته انتخاب و طول و عرض برگ آنها اندازه‌گیری و شاخص سطح و مشخصه طولی برگ خیار به ترتیب برابر با ۳/۳۵ مترمربع بر متر مربع و ۰/۱۶ متر به دست آمدند.

حدود شرایط دما و رطوبت کشت خیار

حدود شرایط خرد اقلیم خیار گلخانه‌ای شامل دامنه دمایی مطلوب روز $25^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ ؛ دمای شب $18^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}$ ؛ دمای حداکثر $38^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ ؛ دمای حداقل $13^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}$ (Ponce et al., 2015; Gruda et al.,)

$$r_a = 305 \left(\frac{d_v}{U_i} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$d_v = \sqrt{LA} \quad (6)$$

LA متوسط سطح هر برگ d_v مشخصه طول برگ U_i متوسط سرعت هوای داخل گلخانه $m\ s^{-1}$.

$$U_i = \frac{\phi_v}{V_g^{2/3}} \quad (7)$$

ϕ_v نرخ تهویه $m^3\ s^{-1}$ (Fatnassi et al., 2004)، V_g حجم گلخانه m^3 .

$$K_s = \frac{\rho C_p \phi_v}{A_g} \quad (8)$$

A_g سطح زمین گلخانه به m^2 .

$$K_L = \frac{\lambda \xi \rho \phi_v}{A_g} \quad (9)$$

ξ فاکتور تبدیل بین محتوی بخار آب هوا در دمای استاندارد و فشار بخار آب هوا $kg_w\ kg_a^{-1}\ Pa^{-1}$ $10^{-6} \times 6/25$.

$$K_c = A + BU_o \quad (10)$$

A و B بستگی به نسبت شکل گلخانه و خصوصیات پوشش گلخانه دارند و برای پوشش تک لایه گلخانه به ترتیب مقادیر ۶ و ۰/۵ و برای گلخانه با پوشش دو لایه به ترتیب مقادیر ۴ و ۰/۲ دارند (Boulard and Baille, 1993; Fatnassi et al., 2004).

$$r_s = 200 \left(1 + \frac{1}{\exp(0.05(\mu G_0 - 50))} \right) \quad (11)$$

r_s مقاومت روزنه‌ای به $s\ m^{-1}$.

این شکل از روش تراز انرژی وقتی تهویه انجام می‌شود و تفاوت بین دمای داخل و خارج گلخانه کم است، استفاده می‌شود (Boulard and Wang, 2000; Fatnassi et al., 2004; Ganguly, 2013).

تخمین تعرق با معادله استانگلینی^۱

استانگلینی معادله پنمن مانیت را برای کاربرد در شرایط گلخانه که سرعت باد کمتر از یک متر بر ثانیه است و ساختار فضایی پوشش گیاهی حالت ایستاده دارد به شکل زیر اصلاح نمود (Prenger et al., 2002; Donatelli et al., 2006; Fazlil-Ilahil, 2009; همکاران، ۱۳۹۷؛ رضوانی و همکاران، ۱۳۹۸):

$$ET_0 = 2 LAI \frac{1}{\lambda} \frac{s(R_n - G) + K_t \frac{VPD \rho C_p}{r_R}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (12)$$

که در آن؛ ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر در ساعت، $\lambda =$ گرمای نهان تبخیر به $MJ\ kg^{-1}$ ، $R_n =$ تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ یا $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$ ، $C_p =$ حرارت ویژه هوا به $kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ، $K_t = 3600$ ، $MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ضریب تبدیل به h^{-1} برای R_n تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$ چگالی هوای متوسط $\rho = 1.2\ kg\ m^{-3}$ ، $\gamma =$ ثابت سایکرومتریکی به $^{\circ}C\ kPa^{-1}$ ، r_a

کل شبانه روز ۳/۱، روزانه ۳/۶ و شبانه ۲/۲ درجه سلسیوس و برای تهویه طبیعی در کل شبانه روز، ۲/۹، روزانه ۳/۳ و شبانه ۲/۲ درجه سلسیوس بود. نمودارهای ۳ و ۴ نشان می‌دهند، تقریباً در تمام ساعات شبانه روز، دما بالاتر از مقدار واقعی، تخمین زده شده است. البته در شب که از تهویه طبیعی استفاده می‌شد، تخمین‌های مقدار دما، خطای کمتری داشت. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی در کل شبانه روز ۰/۷۲، روزانه ۰/۸۳ و شبانه ۰/۴۹ درجه سلسیوس و برای تهویه طبیعی در کل شبانه روز ۰/۶۷، روزانه ۰/۷۷ و شبانه ۰/۴۹ درجه سلسیوس است که از خطای جذر میانگین مربعات به دست آمده در تحقیق (Kumar et al., 2010) با همین مدل و مدل استفاده شده توسط (Salazar-Moreno et al., 2019) کمتر اما از مقدار به‌دست آمده توسط (Ali et al., 2020) بزرگتر است. کارایی مدل در تخمین دما برای تهویه مکانیکی و طبیعی به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۸۸ به‌دست آمد که با مطالعه (Rasheed et al., 2020) در گلخانه با وسعت ۷۶۵۰ متر مربعی برابر است. کارایی مدل در مطالعه حاضر با وجود وسعت بیشتر گلخانه، تقریباً برابر مقدار به‌دست آمده در تحقیق (Salazar-Moreno et al., 2019) ولی از مقدار به‌دست آمده در تحقیق (Ben Ali et al., 2020) کوچک‌تر است. در شب به علت عدم استفاده از فن‌هاب مکنده، مقدار خطا در هر دو حالت یکسان است. به دلیل وجود آسمان صاف و آرام در طول شب، تلفات تشعشی از گلخانه به آسمان بیشتر از مقدار ورودی به آن است و پدیده وارونگی حرارتی اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود مقدار دمای داخل گلخانه کمتر از محیط پیرامونی شده (شکل ۳ و ۴) و تهویه مختل شود (Castilla, 2013). در ساعت ۱۶:۰۰ دمای محیط پیرامونی 33°C و دمای اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه به ترتیب $37/4^{\circ}\text{C}$ و $40/6^{\circ}\text{C}$ است. پیش‌بینی دمای گلخانه بر پایه دمای پیرامونی در این شبیه‌سازی قابل قبول و با نتایج (Boulard and Bailie, 1993) قابل مقایسه و از نتایج (Kumar et al., 2010) دقیق‌تر است.

تخمین رطوبت نسبی داخل گلخانه

مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت نسبی، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود (شکل ۵). در روز مقدار تفاوت مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده کمتر از شب است. مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) رطوبت نسبی شبانه روز ۱۹/۹، روزانه ۱۴/۳ و شبانه ۲۹/۰ درصد بود. در مدل تراز انرژی ارائه شده توسط (Baptista et al., 2010)، خطای تخمین رطوبت نسبی در شب بیشتر از روز و به‌طور کلی بالای ۲۰٪ بود که از خطای مطالعه حاضر بالاتر است. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز ۴/۴، روزانه ۳/۰ و شبانه ۶/۰ است.

(Ponce et al., 2017) و رطوبت نسبی مناسب ۷۰٪ تا ۹۰٪ است (Baptista et al., 2015). شرایط رطوبتی گلخانه با رطوبت نسبی یا کمبود فشار بخار^۱ بیان می‌شود (Baptista, 2007; Castilla, 2013) ولی کمبود فشار بخار نه تنها وضعیت رطوبتی گلخانه را بهتر نشان می‌دهد (Konopaki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018) موثری نشان‌گر خرد اقلیم گلخانه نیز است (Prenger and Ling, 2001) دامنه کمبود فشار بخار برای محصول: $0/2 <$ نامطلوب، صدمه به گیاه و کاهش محصول؛ $0/43 - 0/20$ رشد بیماری‌های قارچی؛ $0/43 - 1/0$ دامنه مطلوب برای رشد گیاه؛ $1/0 >$ تنش آبی و کاهش رشد گیاه، تقسیم‌بندی می‌شود (Prenger and Ling, 2001; Konopaki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018). هم‌چنین حد بالایی کمبود فشار بخار در زمستان $1/1 \text{ kPa}$ و در تابستان $2/7 \text{ kPa}$ گزارش شده است (Castilla, 2013).

نتایج و بحث

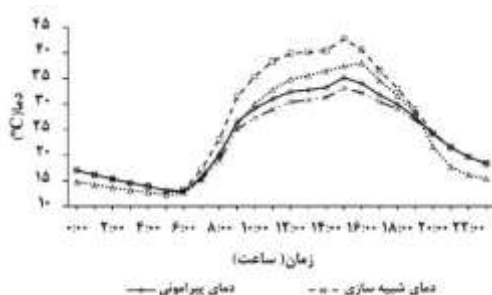
برای شبیه‌سازی، اندازه‌گیری‌های روز ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ در نظر گرفته شد که هم تهویه در گلخانه انجام می‌شد و هم اختلاف بین دمای خارج و داخل گلخانه کم و به طور متوسط $1/1 \pm 9/0^{\circ}\text{C}$ بود.

تخمین دمای داخل گلخانه

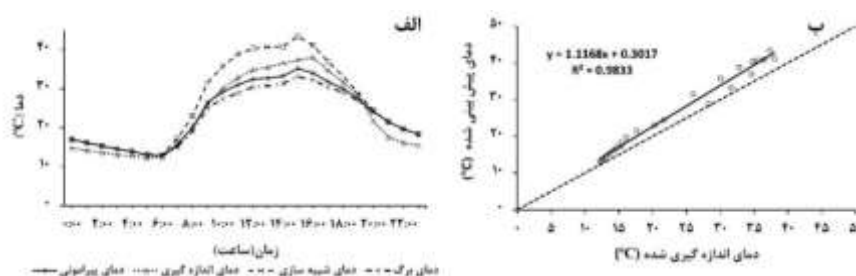
دمای داخل گلخانه، در صورت کارکرد فن‌ها و نیز بدون آنها شبیه‌سازی شد (شکل‌های ۳ و ۴ الف). برای تخمین دمای هوا با استفاده از تهویه مکانیکی، میزان خروج انرژی گرمایی از گلخانه با استفاده از تفاوت دمای داخل و خارج گلخانه و در نظر گرفتن بده حجمی خروجی از گلخانه تخمین زده و از انرژی کل ورودی به گلخانه کم شد. ولی تفاوت چندان بین مقادیر تخمین زده شده با استفاده از تهویه طبیعی و مکانیکی مشاهده نشد. علت اصلی را می‌توان به معادلات تراز انرژی استفاده شده، نسبت داد که در واقع بر مبنای تهویه طبیعی عمل می‌کنند و کارکرد فن‌های مکنده را نیز به صورت تهویه طبیعی بیشتر، در نظر می‌گیرد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت تهویه مکانیکی به تنهایی قادر به کنترل دمای گلخانه نیست. با توجه به این که نتایج، در تهویه مکانیکی و طبیعی مشابه است فقط رابطه رگرسیونی داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده تهویه مکانیکی برای تحلیل آورده شده است.

رابطه رگرسیونی خطی با شیب ۱/۱ توافق خوب بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را نشان داد (شکل ۴ ب). این رابطه مشخص کرد با وجود الگوی مشابه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، مقادیر شبیه‌سازی شده برآوردی بالاتر از مقدار اندازه‌گیری شده داشتند. مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) برای تهویه مکانیکی در

1- Vapour Pressure Deficit (VPD)



شکل ۳- دمای پیرامونی گلخانه، دمای اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده داخل گلخانه و دمای برگ در تاریخ با تهویه طبیعی



شکل ۴- الف: دمای پیرامونی گلخانه، دمای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده داخل گلخانه و دمای برگ با تهویه مکانیکی ب: رابطه خطی بین دمای هوای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده

است. برای بررسی اثر وارونگی حرارتی با استفاده از رابطه رگرسیونی زیر بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده مقدار رطوبت نسبی اصلاح شد.

$$RH_{sim_{adj}} = 1.309 \times RH_{sim} + 6.5 \quad (15)$$

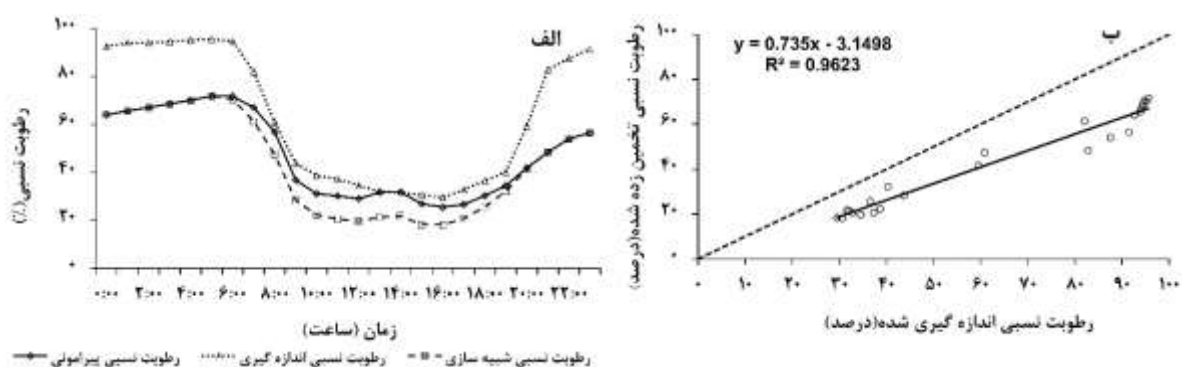
$$r^2 = 0.962 \quad F = 561.406^{***}$$

پس از اصلاح مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) رطوبت نسبی شبانه روز ۴/۰، روزانه ۳/۲ و شبانه ۵/۳ درصد و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز، ۱/۱، روزانه ۰/۸ و شبانه ۱/۴ به دست آمد. کارایی مدل در شبانه روز، روزانه و شبانه به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۸ و ۰/۹۴ به دست آمد.

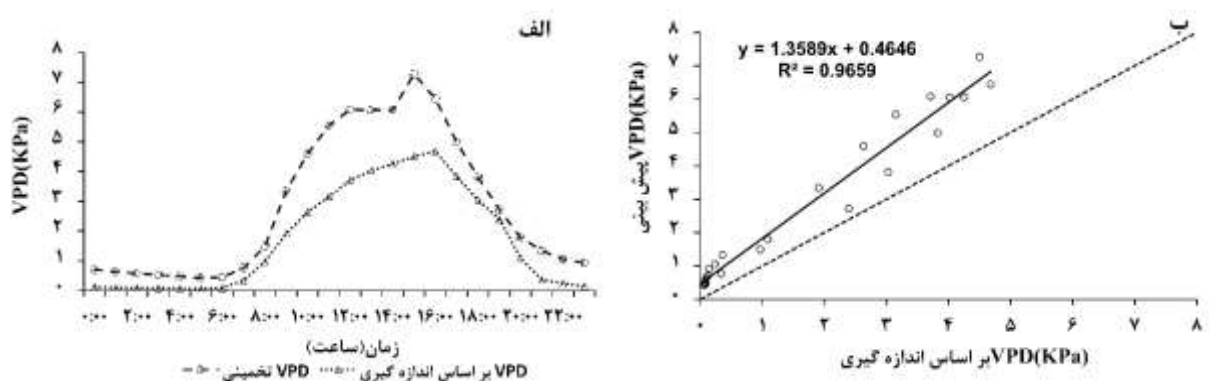
تخمین VPD

کمبود فشار بخار با داده‌های شبیه‌سازی شده، مقادیر بالاتری از داده‌های اندازه‌گیری شده داخل گلخانه داشتند، هر چند الگوی تغییرات آنها روند یکسانی را نشان داد (شکل ۶ الف و ب). دلیل مقدار بالاتر VPD تخمینی، برآورد بالاتر دما و پایین‌تر رطوبت نسبی تخمین زده شده با روش تراز انرژی است. ضریب همبستگی بالا رابطه خطی بین مقادیر کمبود فشار بخار حاصل از داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، الگوی مشابه تغییرات این مقادیر را نشان می‌دهد (شکل ۶ ب). با وجود ضریب همبستگی بالا، پراکنش داده‌ها حول خط برازش یافته، نشان از تفاوت مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده دارد.

کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی در شبانه روز ۰/۳۷ به‌دست آمد که نیاز به اصلاح را نشان می‌داد. بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده در روز مقدار کارایی مدل ۰/۶۷ و در شب تقریباً صفر بود. تفاوت بیشتر مقادیر رطوبت نسبی اندازه‌گیری و تخمین زده شده در شب، به علت وارونگی حرارتی است که سبب کاهش اثر تهویه طبیعی و افزایش رطوبت در گلخانه می‌شود (Castilla, 2013). از طرفی برآورد کم مقدار تعرق بر تخمین مقدار رطوبت داخل گلخانه تاثیرگذار بوده است. رابطه خطی بین مقادیر شبیه‌سازی و تخمین زده شده (شکل ۵ ب)، نشان داد مقادیر تخمین زده شده برآوردی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، دارند. هر چند ضریب همبستگی بالا، تشابه روند تغییرات مقادیر شبیه‌سازی و تخمین زده شده در طی شبانه روز را نشان می‌دهد (شکل ۵ ب). نتایج نشان داد، مقدار رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در شب، تخمین مناسبی از رطوبت نسبی نیست که با نتایج (Boulard and Baille, 1993) توافق ندارد و علت آن هم مختل شدن تهویه به دلیل وارونگی حرارتی است. فنتاسی و همکاران و ونگ و بولارد در تحقیقات خود به وجود خطا در شبیه‌سازی هنگامی که تهویه انجام نمی‌شد، اشاره نموده‌اند (Boulard and Wang, 2000; Fatnassi et al., 2004). ولی در روز دامنه اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده کمتر است. در صورت عدم وجود پدیده وارونگی حرارتی در شب نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی قابل بود. ولی می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی در طول روز، تخمین مناسبی از این متغیر



شکل ۵- الف: رطوبت نسبی پیرامونی گلخانه، اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه با تهویه مکانیکی، ب: رابطه خطی بین رطوبت نسبی اندازه‌گیری و تخمین زده شده



شکل ۶- الف: تغییرات VPD تخمینی و محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده، ب: رابطه خطی بین VPD محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه

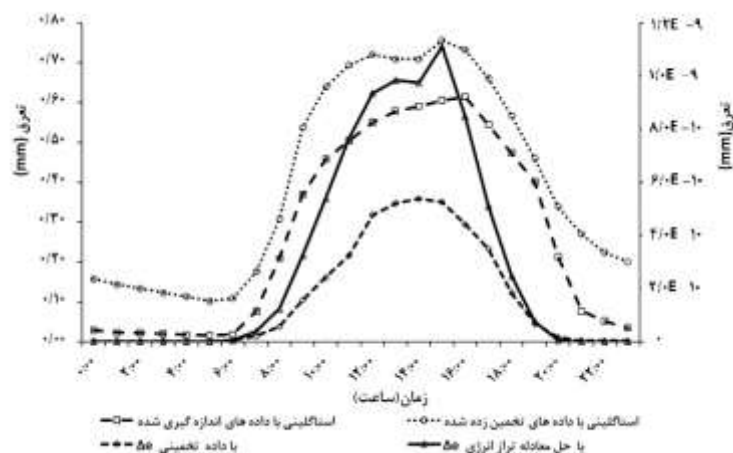
تخمین دما برگ

نتایج نشان داد، در طول روز، برگ دمایی کمتر از دمای هوای گلخانه داشت (شکل‌های ۳ و ۴ الف) که با نتایج فتاسی و همکاران (۲۰۰۴) همخوانی دارد. در شب دمای برگ، برابر دمای هوای تخمین زده شده بود اما از دمای هوای اندازه‌گیری شده بیشتر بود. این شرایط نشان می‌داد در روز امکان میعان رطوبت روی برگ‌ها وجود داشته است.

تخمین تعرق داخل گلخانه

تعرق را می‌توان به سه روش محاسبه کرد، روش اول با رابطه $K_L \Delta e$ که از تفاوت بین فشار بخار آب، هوای داخل و خارج گلخانه (Δe) استفاده می‌شود و از حل معادلات تراز انرژی به دست می‌آید. روش دوم، به جای تفاوت بین فشار بخار آب، هوای داخل و خارج گلخانه، از مقادیر تخمین زده شده فشار بخار آب در دمای شبیه‌سازی شده به روش تراز انرژی در داخل گلخانه و فشار بخار اشباع گلخانه استفاده شد. در حالت سوم، می‌توان با قرار دادن دما و

رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در رابطه تعرق پنمن مانیت اصلاح شده برای گلخانه توسط استانگینی، تعرق را محاسبه کرد. در روش اول، مقدار تعرق بسیار کم تخمین زده می‌شود (شکل ۷) که علت برآورد کم رطوبت داخل گلخانه را می‌توان به آن نسبت داد. در روش دوم، مقدار مجموع تعرق ۲۴ ساعته ۲/۶ میلی‌متر به دست آمد. مقدار تعرق با استفاده از کاربرد دما و رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در معادله استانگینی ۱۰/۲ میلی‌متر محاسبه شد. در صورت استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده داخل گلخانه، مقدار تجمعی تعرق ۲۴ ساعته ۶/۵ میلی‌متر به دست می‌آید. استفاده مستقیم از حل معادله انرژی با داده‌های اقلیمی خارج گلخانه، تخمین درستی از تعرق داخل گلخانه نمی‌دهد که با نتایج بولارد و ونگ (Boulard and Wang, 2000) همخوانی ندارد اما با تحقیق سالارز مورنو و همکاران (Salazar-Moreno et al., 2019) همخوانی دارد. در مطالعه فتاسی و همکاران (Fatnassi et al., 2004) با وجود تعرق در عنوان مقاله، داده‌ای برای مقایسه یا برآوردی از تعرق در مطالعه ایشان موجود نیست که بتوان با تحقیق حاضر مقایسه شود.



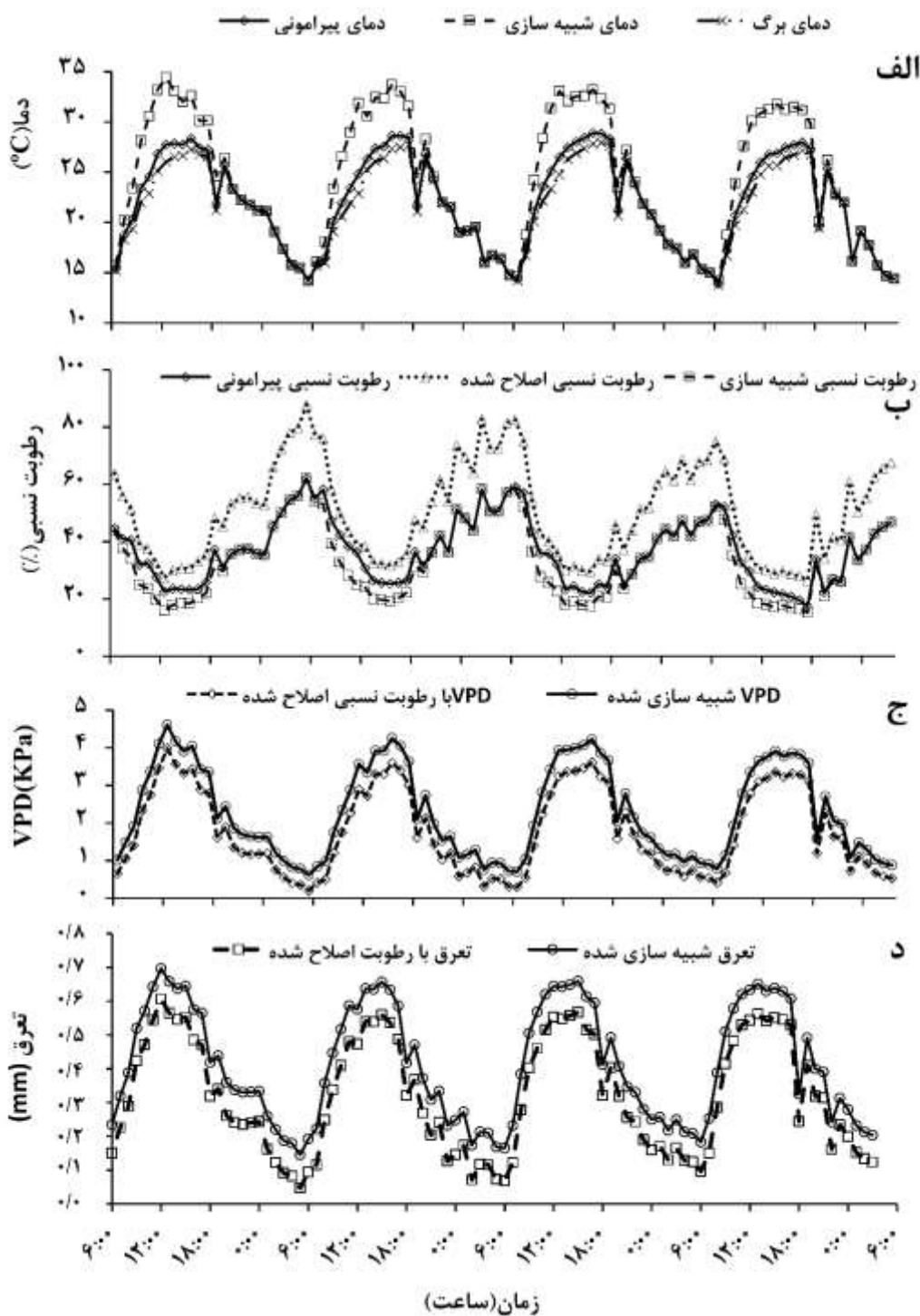
شکل ۷- تخمین تعرق در گلخانه با روش‌های مختلف در گلخانه

تا ۹۰٪ است (Ponce et al., 2015) که شبیه‌سازی نشان داد مقداری که در گلخانه اتفاق خواهد افتاد بدون در نظر گرفتن وارونگی حرارتی در شب و روز کمتر از این مقدار است. با لحاظ کردن وارونگی حرارتی مقدار رطوبت در شب به حدود مطلوب کشت خیار گلخانه‌ای رسید (شکل ۸ ج). هر چند با بررسی کمبود فشار بخار (شکل ۸ ج) مشاهده شد، در حالی که در روز محصول دچار تنش خشکی خواهد شد ($VPD > 1/0$) در شب در صورت عدم وجود وارونگی حرارتی مقدار VPD در حدود مناسب محصول و در دامنه ۰/۶ kPa تا ۰/۸ kPa قرار می‌گیرد. ولی با لحاظ کردن وارونگی حرارتی شرایط برای توسعه بیماری‌های قارچی ($0/2 < VPD < 0/41$) مهیا می‌شود. تعرق با استفاده از داده‌های تخمین زده شده دما و رطوبت نسبی و رابطه استانگلیسی تخمین زده شد. همانگونه که از رابطه (۱۲) و شکل‌های ۸ ج و ۸ د مشاهده می‌شود مقدار و الگوی تغییرات تعرق متأثر از تغییرات و مقدار کمبود فشار بخار است. برای بررسی اثر وارونگی حرارتی و افزایش رطوبت گلخانه در طول شب بر مقدار تعرق شبیه‌سازی شده، با مقدار رطوبت نسبی اصلاح شده نیز مقدار تعرق تخمین زده شد. مجموع تعرق شبیه‌سازی شده در مدت مورد بررسی، ۳۹/۱ میلی‌متر و با در نظر گرفتن افزایش رطوبت نسبی، ۳۰/۲ میلی‌متر به دست آمد که کاهش ۲۳ درصدی در مقدار تعرق را نشان می‌دهد. کاهش تعرق نیز به دلیل کاهش مقدار کمبود فشار بخار ناشی از افزایش رطوبت محیط است. کمبود فشار بخار در بیشتر ساعات روز بالاتر از ۲kPa بود و در ساعاتی به بالاتر از ۴ نیز رسید ولی کاهش در مقدار تعرق به دلیل خشکی زیاد و بسته شده روزنه‌ها مشاهده نشد (شکل‌های ۸ ج و ۸ د) که با نتیجه (Montero et al., 2001) مبنی بر کاهش نیافتن مقاومت پوشش گیاهی (در واقع مقاومت روزنه‌ای) از کمبود فشار بخار ۱/۴ kPa تا ۳/۴ kPa همخوانی دارد.

در این مطالعه مساحت گلخانه ۴۳۳۳ مترمربع و در تحقیق (Boulard and Wang, 2000)، (Fatnassi et al., 2004)، (Salazar-Moreno et al., 2019) و (Ali et al., 2020) به ترتیب ۲۰۸، ۳۸۶، ۱۲۰ و ۱۴/۸ متر مربع بود. مطمئناً اندازه گلخانه بر غیر یکنواختی و در نتیجه دقت مدل تأثیر گذار است. هر چه گلخانه کوچک‌تر باشد، بیشتر متأثر از شرایط محیط پیرامونی است و از طرفی محیط همگن‌تری داشته که به فرضیات استفاده از مدل تراز انرژی نزدیک‌تر است.

شبیه‌سازی ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲

از مدل تهیه شده برای شبیه‌سازی خرد اقلیم و تعرق داخل گلخانه به مدت چهار شبانه روز از تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲ با استفاده از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک تویسرکان استفاده شد (شکل ۸). آمارهای استفاده شده شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تشعشع به فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه ثبت شده بودند که برای شبیه‌سازی متوسط ساعتی آنها به دست آمد. تغییرات دما (شکل ۸ الف) نشان داد، دمای داخل گلخانه تا 35°C افزایش یافت که خارج از دامنه مطلوب دمایی ($25^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$) برای رشد خیار گلخانه‌ای در روز است. در شب نیز دما به کمتر از 16°C رسید که در محدوده بهینه دمایی ($18^{\circ}\text{C} - 16^{\circ}\text{C}$) برای خیار گلخانه‌ای قرار ندارد (Gruda et al., 2017). نتایج مدل نشان داد در صورتی که پدیده وارونگی حرارتی در شب وجود نداشت، رطوبت نسبی گلخانه به کمتر از ۶۰ درصد می‌رسید (شکل ۸ ب). مقادیر اصلاح شده رطوبت نسبی نشان دادند در صورت وقوع پدیده وارونگی حرارتی، مقدار رطوبت نسبی گلخانه، شب‌ها به حدود ۹۰ درصد هم می‌رسد. دامنه مقدار رطوبت نسبی مناسب برای خیار گلخانه‌ای ۷۰٪



شکل ۸- شبیه‌سازی الف: تغییرات دما، ب: تغییرات رطوبت نسبی، ج: تغییرات کمبود فشار بخار، د: تغییرات تعرق در گلخانه از تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲

ایران. (۵) ۱۳. ۱۲۰۳-۱۱۹۱.

زارعی، ق. ۱۳۹۶. چالش‌های سازه‌های گلخانه‌ها در ایران. مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۲ (۲): ۱۶۲-۱۴۹.

زارعی، ق.، سالمی، ح.ر.، رضوانی، س.، و اسفندیاری، ص. ۱۳۹۷. تعیین نیاز آبی خیار گلخانه‌ای در سطح کشور. گزارش نهایی پژوهشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ثبت ۵۴۲۴۷.

شرکت آب منطقه‌ای همدان. ۱۳۹۷. سیمای آب در استان همدان.

خوشخوی، م.، مبلی، م.، عزیزی، م.، وحدتی، ک.، گریگوریان، و.، و تفضلی، ع. ۱۳۹۶. بررسی مسائل و مشکلات گلخانه‌ها و فرآورده‌های گلخانه‌ای در ایران. گزارش نهایی پژوهشی. فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران.

وزارت جهاد کشاورزی. عملکرد گلخانه‌های کشور طی سال‌های ۹۳-۱۳۹۰. ۱۳۹۴. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

وزارت جهاد کشاورزی. گزارش اطلاعات سطح، تولید و عملکرد در هکتار محصولات باغبانی کل کشور در سال ۱۳۹۶. ۱۳۹۷. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

Ali, B.H., Bournet, P.E., Danjou, V., Morille, B., and Migeon, C. 2014. CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering* 127: 159–175.

Ali, B.H., Bournet, P.E., Cannavo, P., and Chantoiseau, E. 2018. Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture* 149: 26–40.

Ali, B.R., Bouadila, S., and Mami, A. 2020. Experimental validation of the dynamic thermal behavior of two types of agricultural greenhouses in the Mediterranean context. *Renewable Energy* 147: 118-129.

Baptista, F.J., Bailey, B.J., Meneses, J.F., and Gracia, L. M.N. 2010. Greenhouses climate modelling: tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2: 285-298.

Bauri, B., and Ganguly, A. 2013. Effect of crop transpiration on the microclimate of a naturally

شکل ۸ نشان داد الگوی تغییرات متغیرهای خرد اقلیمی ۲۴ ساعته در روزهای مختلف تقریباً ثابت است و در نتیجه حتی با شبیه‌سازی روزهای معدودی که توزیع خوبی در طول فصل کشت داشته باشند، می‌توان نیاز آبی محصول و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه را تخمین زد. با توجه به دمای بالا (35°C) و رطوبت پایین (۱۵٪ تا ۳۰٪) در طی روز نیاز به سرمایش تبخیری در بعضی از ساعات روز وجود دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل تراز انرژی برای تخمین میزان تعرق و سایر متغیرهای خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه استفاده شد. الگوی تغییرات ۲۴ ساعته مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دما، رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار داخل گلخانه مشابه بود. نتایج نشان داد تفاوت دمای شبیه‌سازی شده با متغیرهای اقلیمی خارج گلخانه با مقادیر اندازه‌گیری شده داخل کم و در نتیجه نتایج شبیه‌سازی قابل قبول بود به طوری که کارایی مدل در تخمین دما به طور متوسط ۰/۸۷ به دست آمد. تفاوت رطوبت نسبی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به علت وارونگی حرارتی و مختل شدن تهویه طبیعی و افزایش شدید رطوبت گلخانه در شب بود. نتایج نشان داد مقادیر شبیه‌سازی شده دما و رطوبت نسبی به ترتیب برآوردی بالاتر و پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. که سبب بالاتر بودن کمبود فشار بخار نسبی شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر حاصل از اندازه‌گیری بود. کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی ۰/۳۷ بود که با اصلاح مدل، کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی به ۰/۹۶ رسید. شبیه‌سازی ۲۴ ساعته تعرق نشان داد، مدل به تنهایی برآورد خوبی از تعرق نمی‌دهد ولی با استفاده هم‌زمان مدل تراز انرژی و رابطه تعرق استانگلینی می‌توان به مقادیر قابل قبولی رسید. شبیه‌سازی یک دوره چهار روزه نشان داد، مدل تراز انرژی در تلفیق با مدل تعرق استانگلینی با استفاده از داده‌های هواشناسی، می‌تواند به پیش‌بینی و تحلیل شرایط خرد اقلیم و تعرق داخل گلخانه‌ای با تهویه طبیعی قبل از احداث آن کمک کند. اصلاح مدل تراز انرژی برای هنگامی که تهویه ضعیف است یا پدیده وارونگی حرارتی رخ می‌دهد، می‌تواند دامنه کاربرد آن را افزایش دهد. همچنین هماهنگ شدن این مدل با مدل رشد محصول توانایی پیش‌بینی مقدار عملکرد را قبل از احداث گلخانه به دست می‌دهد.

منابع

رضوانی، س.م.، زارع ایبانه، ح.، و گودرزی، م. ۱۳۹۸. توزیع تعرق و کمبود فشار بخار در گلخانه‌ی تجاری. نشریه آبیاری و زهکشی

- of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering* 100(2): 245–255.
- Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, 23(5): 1232-1239.
- Kumar, K.S., Jha, M.K., Tiwari, K.N., and Singh, A. 2010. Modeling and evaluation of greenhouse for floriculture in subtropics. *Energy and Buildings* 42:1075-1083.
- Grange, R.L., and Hand, D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of Horticultural Science* 62: 125–134.
- Kindelan, M. 1980. A dynamic modeling of greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*. 23(5): 1232-1239.
- Konopacki, P.J., Treder, W., and Klamkowski, K. 2018. Comparison of vapour pressure deficit patterns during cucumber cultivation in a traditional high PE tunnel greenhouse and a tunnel greenhouse equipped with a heat accumulator. *Spanish Journal of Agricultural Research* 16 (1): 201.
- Montero J.I., Antóna, A., Muñoz, P., and Lorenzo, P. 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 107:323-332.
- Prenger, J.J., and Ling, P.P. 2001. *Greenhouse Condensation Control Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD)*. Fact Sheet AEX-804. The Ohio state University. Wooster OH. 4.
- Prenger, J.J., Fynn, R.P., and Hansen, R.C. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in greenhouse environment. *Transactions of the ASAE* 45: 1779–1788.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., and Macleery, B. 2015. *Greenhouse design and control*. 1st ed. The Netherlands: CRC Press.
- Rasheed, A., Kwak, C.S., Na, W.H., Lee, J.W., Kim, H.T., and Lee, H.W. 2020. Development of a Building Energy Simulation Model for Control of Multi-Span Greenhouse Microclimate. *Agronomy* 10(9): 1236.
- Roy, J.C., Boulard, T., Kittas, C., and Wang, S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering* 83: 1-20.
- Roy, J.C., and Boulard, T. 2005. CFD predictions of the natural ventilation in a tunnel type greenhouse: influence of wind direction and sensitivity to turbulence models. *Acta Horticulturae* 691: 457–
- ventilated greenhouse. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(3): 337-343.
- Boulard, A., and Baille, T. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 145-157.
- Boulard, T., and Wang, S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 100(1): 25–34.
- Castilla, N. 2013. *Greenhouse technology and management*. 2nd ed. CABI.
- Chen, C., Shen, T., and Weng, Y. 2011. Simple model to study the effect of temperature on the greenhouse with shading nets. *African Journal of Biotechnology*, 10(25): pp.5001-5014.
- Chen, J., Xu F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L.B., and Ai, Q.L. 2015. A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Appl Energy* 141:61–8.
- Donatelli, M., Bellocchi, G., and Carlini, L. 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. *European Journal of Agronomy* 24: 186–192.
- Fazlil-Ilahil, W.F. 2009. *Evapotranspiration models in greenhouse*. MSc, Wageningen agricultural University. Wageningen. Netherlands.
- Fatnassi, H., Boulard, T., and Lagier, J. 2004. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. *Biosystems Engineering* 88(4): 467–478.
- Gruda, N., Sallaku, G. and Balliu, A. 2017. PART III: CROP TECHNOLOGIES: 2. Cucumber. In: Baudoin, W., Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., De Pascale, S., Nicola, S., Urban, L., Tany, J., and Duffy, R. (editors). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries : Principles for sustainable intensification of smallholder farms*. FAO plant production and protection paper 230. Rome. Italy. Food and agricultural organization of the United Nations. 287-299.
- Kichah, A., Bournet, P.E., Migeon, C., and Boulard, T. 2012. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering* 112(1): 22–34.
- Kim, K., Yoon, J.Y., Kwon, H.J., Han, J.-H., Eek Son, J., Nam, S.W., and Lee, I.B. 2008. 3-D CFD analysis

001-009.

Shamshiri, R., Jones, J., Thorp, K.R., Ahmad, D., Man, H.C., and Taheri S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics* 32: 287-302.

Wang, S., Deltour, J., and Smith, L.J. 2004. Leaf Temperature Modeling of Greenhouse Grown Tomato. *International Agricultural Engineering Journal* 13(1 and 2): 64-70.

464.

Ryer, A. 1998. *Light Measurement handbook*. Newburyport, MA: International Light. 64.

Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I.L., and Sánchez Cruz, A.C. 2019. Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: simulation, calibration and evaluation. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 25(1): 45-60.

Sengar, S.H., and Kothari, S. 2008. Thermal modeling and performance evaluation of arch shape greenhouse for nursery raising. *African Journal of Mathematics and Computer Science Research* 1(1):

Application of the Energy Balance Model to Predict Transpiration and Microclimate Conditions inside the Greenhouse Using Meteorological Data

S.M. Rezvani¹, H. Zare Abyane^{2*}, M. Goodarzi³
Received: Aug.29, 2020 Accepted: Oct.21, 2020

Abstract

In recent years, increasing population and limited water and arable land in Iran have led to significant investment in greenhouse production. Due to the effect of greenhouse microclimate conditions on the quantitative and qualitative yield of the product, the use of mathematical models to study and microclimate simulation of the greenhouse is necessary. The objective of this research is to apply and analyze an energy balance model using meteorological data outside the greenhouse to simulate microclimate conditions and the transpiration in a greenhouse. The study was conducted in a commercial greenhouse with plastic cover and an area of 4333 square meters. Temperature and relative humidity data were collected inside the greenhouse with 21 data loggers. For collected meteorological data outside the greenhouse, the meteorological station installed on the roof of the greenhouse and the data of the Tuyserkhan synoptic meteorological station were used. A combination of energy balance and transpiration equation was used to estimate temperature, relative humidity and crop transpiration inside the greenhouse. Estimated transpiration was modified by combining the energy balance model and the Stanghellini transpiration equation. The pattern of temporal variation of the simulated and measured values of temperature and relative humidity inside the greenhouse was similar. The root mean square error of the simulated temperature for mechanical ventilation and natural ventilation was 0.72 and 0.67, 0.83 and 0.77 daily, and 0.49 and 0.49 degrees Celsius, respectively, for the daytime and night time. The root mean square error of relative humidity for mechanical and natural ventilation was 4.4% day and night, 3.0% for daytime, and 6.0% for night time. After modifying the simulation model, four days of microclimate inside the greenhouse showed that the temperature inside the greenhouse reaches 35 °C during the day and less than 16 °C at night, which are not in the optimal temperature range for greenhouse cucumbers. Due to high temperature (35°C) and low humidity (15% to 30%), evaporative cooling will be required at some hours of the day. The total simulated transpiration was 30.2 mm. The estimated temperature was acceptable, but the estimated relative humidity at night differed from the measured values due to thermal inversion. Estimated transpiration was modified by combining the energy balance model and the Stanghellini transpiration equation. After verifying and modifying the model, the microclimate conditions of the greenhouse were simulated and analyzed for four days. The results showed that by using the energy level model before the construction of the greenhouse, it is possible to estimate the microclimate conditions of the greenhouse and the water requirement of the crop.

Keywords: Relative humidity, Simulation, Temperature, Transpiration, Vapor pressure deficit

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: zare@basu.ac.ir)