

## ارزیابی سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم (فن-پد) در گلخانه تحت شرایط محیطی مختلف

مهدی منتظری<sup>۱</sup>، احمد بناکار<sup>۲\*</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup> و هادی پاسدار شهری<sup>۴</sup>

### چکیده

کشت محصولات گلخانه‌ای یک پیشرفت در فناوری تولید محصولات کشاورزی است که از مناطق معتدل تا مناطق گرم‌تر استوایی در حال افزایش است. اگرچه گلخانه از محصولات در برابر شرایط آب و هوایی نامساعد حفاظت می‌کند اما رطوبت و دمای بالا در مناطق حاره‌ای باعث نتیجه معکوس روی تولید محصولات می‌شود. از این رو در چنین مناطقی، کاهش درجه حرارت داخل گلخانه یا تنظیم آن تا نزدیک دمای محیط ضروری است. از آنجایی که طراحی سامانه سرمایش به‌شدت وابسته به شرایط محیطی است، توسعه یک سامانه مناسب که شرایط اقلیم موضعی را برای رشد محصول فراهم کند کار دشواری است؛ بنابراین در این پژوهش عملکرد سامانه سرمایش فن-پد در شرایط مختلف آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا محیط گلخانه توسط نرم‌افزار TRNSYS مدل‌سازی گردید. بعد از صحت‌سنجی مدل با نتایج تجربی، توانایی سامانه در خنک کردن گلخانه و عملکرد سامانه نسبت به پارامترهای سرعت هوا، دما و نسبت رطوبت هوای محیط مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در شرایط محیطی با دمای حباب خشک و نسبت رطوبت به‌ترتیب کمتر از  $40^{\circ}\text{C}$  و  $0/015\text{ kg/kg}$ ، سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم (فن-پد) در سرعت هوای  $1/25\text{ m/s}$  روش مناسبی برای خنک کردن گلخانه است و شرایط مطلوبی جهت رشد محصول فراهم می‌کند. همچنین نتایج نشان داد در نسب رطوبت‌های بیشتر از  $0/015\text{ kg/kg}$  سامانه خنک‌کننده تبخیری به‌تنهایی توانایی خنک کردن گلخانه را ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** خنک‌کننده تبخیری مستقیم، راندمان، فن-پد، گلخانه، مناطق مرطوب، TRNSYS.

**ارجاع:** منتظری م. بناکار ا. قبادیان ب. و پاسدار شهری ه. ۱۳۹۸. ارزیابی سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم (فن-پد) در گلخانه تحت شرایط محیطی مختلف. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. (۱)۸: ۱۰۷-۱۱۶.

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.

\* نویسنده مسئول: [ah\\_banakar@modares.ac.ir](mailto:ah_banakar@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷

## مقدمه

گلخانه یک پیشرفت در فناوری تولید محصولات کشاورزی است که قرن‌هاست از آن برای افزایش تولید در همه اقلیم‌های آب و هوایی استفاده می‌شود. یک گلخانه بخش محدودی از فضاست که در آن کلیه عوامل محیطی کنترل می‌شود و برای کشت‌های متراکم، تولید محصول خارج از فصل مناسب است. اگرچه گلخانه از محصولات در برابر شرایط آب و هوایی نامساعد حفاظت می‌کند اما رطوبت و دمای بالا در مناطق حاره‌ای باعث نتیجه معکوس روی تولید محصولات می‌شود. از این‌رو در چنین مناطقی، کاهش درجه حرارت داخل گلخانه یا تنظیم آن تا نزدیک دمای محیط در طول فصل کشت محصول ضروری است. از آنجایی که طراحی سامانه سرمایش به شدت وابسته به شرایط محیطی است، توسعه یک سامانه مناسب که شرایط اقلیم موضعی را برای رشد محصول فراهم کند کار دشواری است. سامانه‌های مختلفی جهت سرمایش گلخانه‌ها وجود دارد که یکی از مؤثرترین و معمول‌ترین سامانه‌ها، سرمایش تبخیری یا سامانه فن و پد است. این سامانه نسبت به سایر روش‌های سرمایشی دارای ساختار ساده و هزینه نگهداری پایین و مصرف انرژی الکتریکی کمتر است؛ همچنین به دلیل عدم استفاده از گازهای کلروفلوروکربن این سامانه‌ها فاقد اثرات مخرب زیست‌محیطی هستند. با وجود مزایای ذکر شده، سامانه‌های سرمایش تبخیری دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. محدودیت اصلی این سامانه‌ها شرایط محیطی است. با استفاده از این روش در حالت ایده‌آل تنها می‌توان هوا را تا دمای مرطوب محیط سرد کرد. بنابراین در مناطقی که رطوبت هوا زیاد باشد، امکان استفاده از این سامانه جهت تأمین شرایط مساعد رشد گیاه فراهم نیست. از دیگر محدودیت‌های این سامانه عدم امکان کنترل رطوبت هوا است که استفاده از آن را محدود می‌سازد. پژوهش‌های مختلفی در زمینه سرمایش گلخانه صورت گرفته که از جمله می‌توان به مطالعه ( Jain & Tiwari, 2002) اشاره کرد. آنها در مطالعه تجربی و نظری روی گلخانه‌ای  $24\text{ m}^2$  با سامانه سرمایش تبخیری فن-پد، گزارش کردند که با استفاده از سامانه فن-پد دمای هوای گلخانه برخلاف شرایط محیط  $4-5^\circ\text{C}$  کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه پارامتریک جهت بهینه‌سازی پارامترهای سرمایش فن-پد نشان داد که طول گلخانه و ارتفاع پد

سرمایشی بر میزان خنک‌کنندگی مؤثر است. Fuchs *et al.* (2006) رویه‌ای را به منظور ارزیابی خنک‌کننده گرمای نهان از طریق تعرق محصول و تبخیر آزاد آب از سامانه فن-پد مرطوب توسعه دادند. آنها دریافتند که مشخصه ماده پوششی ۳۰٪ عبور تابش خورشید را کاهش می‌دهد، و در نرخ تهویه ۳۰ مرتبه تعویض حجم بر ساعت در طول تابستان دمای گلخانه نزدیک محدوده ایمن رشد محصول، نگه داشته می‌شود. (Kozai & Sase, 1978) و لاندسبرگ Landsberg *et al.* (1979) عملکرد سامانه فن-پد در منطقه نیمه گرمسیری را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که تعرق آزاد محصول درون گلخانه، منجر به کاهش  $12-8^\circ\text{C}$  دمای هوای داخلی تحت شرایط دما و شدت تابش بالای محیط می‌شود. (Kittas *et al.*, 2003) گردایان درجه حرارت و رطوبت در تابستان را در یک گلخانه تولید گل رز مجهز به یک سیستم خنک‌کننده فن-پد که نیمی از سقف پلاستیکی آن سایه‌اندازی شده بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد عملکرد سامانه خنک‌کننده تا ۸۰٪ افزایش و درجه حرارت گلخانه تا ۱۰ درجه سلسیوس پایین‌تر از هوای بیرون کاهش می‌یابد. (Willits, 2003) در یک مطالعه نظری مدل فن تهویه و فن-پد تهویه را برای سرمایش گلخانه ارائه داد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد هنگامی که از پد تبخیری در سامانه خنک‌کننده استفاده نمی‌شود؛ با افزایش جریان هوا تأثیر چندانی در فرایند خنک‌سازی گلخانه حاصل نمی‌شود. باین‌وجود، هنگام استفاده از خنک‌کننده تبخیری، دمای هوای گلخانه و کانوبی با افزایش میزان جریان هوا تا بیشترین نرخ  $0.113\text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  کاهش می‌یابد. (Chandra *et al.*, 1989) مطالعه‌ای تجربی در گلخانه  $24\text{ m}^2$  با پوشش پلاستیکی انجام دادند که در آن از سامانه فن-پد فشار منفی جهت سرمایش و از مدل لانتسبرگ جهت پیش‌بینی دمای هوای داخل گلخانه استفاده شد. نتایج کاهش دمای داخل را در حدود  $5^\circ\text{C}$  نسبت به شرایط بیرون نشان داد. سرمایش تبخیری درون یک گلخانه تجاری مجهز به سامانه فن-پد در طول دوره تابستان در منطقه‌ای خشک توسط Al-Jamal (1994) مورد مطالعه قرار گرفت. او دریافت که جهت دستیابی به شرایط مطلوب در گلخانه در شرایط آب و هوایی خشک، نرخ حجمی جریان ۲۰ مرتبه تغییر هوا بر ساعت ضروری است. (Abdel-wahab, 1994) یک مدل

نامطلوب است. کارایی سامانه‌های سرمایش تبخیری به خاطر رطوبت نسبی بالا کاهش می‌یابد و سرمایش از طریق تبرید یا رطوبت‌زدایی هوا به پژوهش بیشتر و هزینه عملکردی بیشتری نیاز دارد. (FAO و Rault (1990) (1989) گزارش کردند که روش‌های موجود که جهت سرمایش گلخانه در نواحی استوایی وجود دارند مطلوب نیستند و در کل یک هزینه سرشار برای فن‌آوری‌های گلخانه به همراه دارد؛ بنابراین تلاش برای یافتن سامانه سرمایشی ارزان، طبیعی و مناسب به‌ویژه برای گلخانه‌های بسته و گلخانه‌های مرسوم واقع در اقلیم‌های استوایی امری ضروری به نظر می‌رسد. در ادامه تحقیقات انجام شده و با توجه به اهمیت مسئله سرمایش گلخانه به‌ویژه در مناطق مرطوب، در این پژوهش پارامترهای مؤثر بر عملکرد سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم (فن-پد) بررسی می‌گردد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سامانه سرمایش تبخیری مستقیم در فرایند خنک کردن گلخانه، ابتدا محیط گلخانه درون نرم‌افزار TRNSYS مدل‌سازی گردید. TRNSYS یک نرم‌افزار شبیه‌سازی برای حالت گذرا بوده و مخفف واژه Transient System Simulation است. این نرم‌افزار که محصول همکاری مشترک کشورهای آمریکا، فرانسه و آلمان بوده و در دانشگاه ویسکانسین توسعه‌یافته است، اولین بار در سال ۱۹۷۵ میلادی در دسترس عموم قرار گرفت. نرم‌افزار مذکور تاکنون در ۱۷ نسخه مختلف به بازار عرضه شده است که تنها تا نسخه ۱۶ آن در کشور در دسترس است. نرم‌افزار TRNSYS یک نرم‌افزار بر پایه گرافیکی بسیار انعطاف‌پذیر است. محیط نرم‌افزار برای شبیه‌سازی رفتار سامانه‌های حالت گذرا تعبیه شده و دارای یک محیط کامل و گسترده برای شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی سامانه‌ها بر پایه زمان است (Klein, 2007).

گلخانه مورد مطالعه در این پژوهش یک گلخانه کوچک تحقیقاتی به مساحت  $40\text{ m}^2$  (طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر با ۸، ۵ و ۳ متر است) واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس است که ساختمان آن درون نرم‌افزار TRNSYS مدل‌سازی شده است. در این گلخانه زاویه شیب سقف حدود ۳۰ درجه بوده و در

ریاضی به‌منظور تخمین نرخ تبخیر آب، نرخ جریان هوا و اثر سرمایشی در یک سامانه سرمایشی تبخیری در یک ساختمان مزرعه در عربستان سعودی توسعه داد. گزارش شد که با سایه‌اندازی خارجی پوشش سقف گلخانه می‌توان مقدار قابل توجهی در مصرف آب و انرژی صرفه‌جویی کرد. (Davies (2005) در پژوهشی کاربردی بر روی گلخانه‌های واقع در منطقه ابوظبی، به منظور کاهش دما و دستیابی به دماهای پایین‌تر از دمای مرطوب در فضای گلخانه‌ها از سامانه ترکیبی سرمایش تبخیری-دسیکنت مایع استفاده کرد. در این سامانه به منظور سایه‌اندازی و تسهیل در فرایند خنک‌سازی گلخانه و همچنین استفاده از انرژی خورشیدی جهت تأمین حرارت مورد نیاز فرایند دسیکنت از تعدادی صفحات گردآورنده انرژی خورشیدی در قسمت‌هایی از سقف گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که سامانه ترکیبی پیشنهاد شده برای منطقه واقع در خلیج فارس، بیشینه کاهش دمایی حدود  $5^{\circ}\text{C}$  را در فصل تابستان نسبت به سامانه‌های معمولی فن-پد به همراه دارد. (Mannan & Cheema (1979) دو نوع گلخانه بدون تهویه در مقیاس کوچک را در اقلیم گرم هند آزمایش کردند و اندازه‌گیری‌های درجه حرارت داخل گلخانه در تابستان در محدوده  $50-60^{\circ}\text{C}$  به دست آمد. نتایج نشان داد که جاری ساختن لایه نازکی از آب روی سقف در خنک نگه‌داشتن گلخانه در تابستان در محدوده  $12^{\circ}\text{C}$ -۱۰ بسیار مؤثر است. در این پژوهش اشاره‌ای به شرایط رطوبت نسبی نشده است.

(Xu *et al.* (2015) در مطالعه‌ای عملکرد سرمایش تبخیری را در گلخانه‌ای با مساحت  $2304\text{ m}^2$  در شانگهای مورد ارزیابی قرار دادند. آنها توزیع دما و رطوبت را در حالت‌های مختلف شامل استفاده از سرمایش تبخیری به‌تنهایی و به همراه سایه‌اندازی و با تهویه اندازه‌گیری و گزارش کردند. این آزمایش‌ها در آب‌وهوای نیمه گرمسیری و مرطوب انجام شد که در آن شرایط برای سامانه سرمایش تبخیری نامطلوب است. تجزیه و تحلیل نتایج از دیدگاه انرژی نشان داد که سامانه سرمایش تبخیری فن-پد گزینه مؤثری برای سرمایش گلخانه حتی در شرایط آب‌وهوای مرطوب است. (Rault (1989) رایج‌ترین فن‌آوری‌هایی که جهت سرمایش استفاده می‌شوند را برای کاربرد در مناطق استوایی مرطوب ناخوشایند در نظر گرفت. او اظهار کرد که سایه افکندن به‌دلیل محدودیت در نورافکنی خارجی

خيار كشت گردیده كه محدوده دمای كنترلی آن در جدول ۱ ذكر شده است.

راستای شمال- جنوب قرار دارد (شكل ۱). پوشش مورد استفاده در گلخانه از نوع پلی‌كربنات دو جداره با ضریب كلی انتقال حرارت  $3/3 \text{ W/m}^2\text{K}$  است. درون گلخانه گیاه

جدول ۱- محدود دمای رشد ( $^{\circ}\text{C}$ ) برای گیاه خيار (Davies, 2005)

بیشترین	محدوده بهینه		کمترین	محصول
	بیشترین	کمترین		
۳۵	۲۹	۲۷	۱۸	خيار



شكل ۱- گلخانه پژوهشی واقع در دانشكده كشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

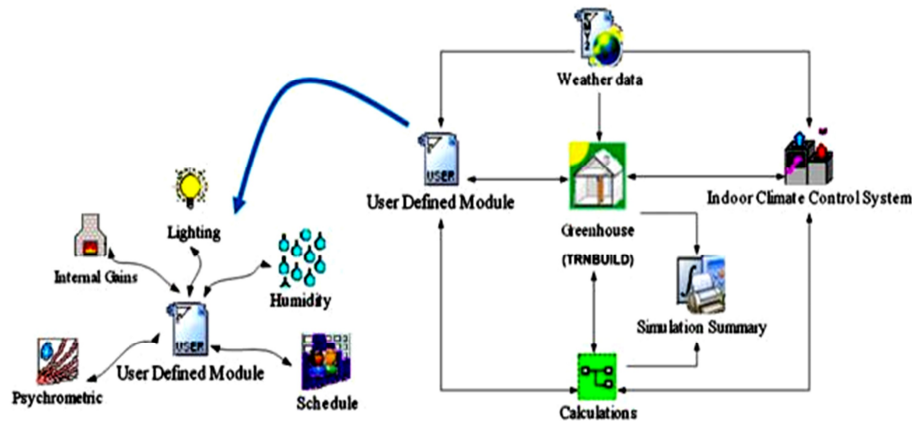
### نتایج و بحث

به‌منظور بررسی صحت مدل ارائه‌شده در این پژوهش، نتایج خروجی شبیه‌سازی گلخانه با داده‌های اندازه‌گیری شده دمای داخلی گلخانه و شدت تابش محیط مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور تغییرات ساعتی دمای داخلی گلخانه و شدت تابش افقی محیط در روز جهت مقایسه در نظر گرفته شده است.

شكل ۳ تغییرات داده‌های شدت تابش افقی و دمای داخلی گلخانه حاصل از خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در ۲۷ تیر را نشان می‌دهد. همان‌طور كه مشاهده می‌شود تطابق قابل قبول بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده وجود دارد. با توجه به این شكل، متوسط اختلاف بین مقادیر دمای شبیه‌سازی و دمای اندازه‌گیری شده گلخانه  $4/7\%$  است. همچنین متوسط اختلاف بین مقادیر شدت تابش افقی مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده  $16/3\%$  است. با توجه به اینکه مدل ارائه شده در حد قابل قبولی نتایج تجربی را پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین از این مدل برای شبیه‌سازی گلخانه در شرایط مختلف دمایی و نسب رطوبت نیز استفاده گردید.

مدل TRNSYS برای تحلیل انرژی گلخانه شامل اجزای متعددی از قبیل: داده‌های هواشناسی، ساختمان گلخانه، مدل‌های تعریف شده (مدل تبخیر و تعرق، نفوذپذیری، تهویه، منابع داخلی تولید حرارت) و سامانه‌های کنترلی می‌باشد. شكل ۱ طرح‌واره این مدل‌سازی را ارائه می‌دهد. در این نرم‌افزار به‌منظور شبیه‌سازی ساختمان گلخانه از ماژول ساختمان چند ناحیه‌ای<sup>۱</sup> (Type 56) استفاده گردیده است. به‌منظور استخراج داده‌های هواشناسی از قبیل شدت تابش، سرعت باد، دما و رطوبت محیط و اطلاعات اقلیمی دیگر، از پایگاه اطلاعات تابشی در سراسر جهان (Meteonorm) كه با عنوان المان Type 109 در نرم‌افزار TRNSYS تعبیه شده استفاده می‌گردد. این المان با هدف خواندن اطلاعات آب و هوایی در بازه‌های زمانی مشخص از فایل موجود در دفترچه داده‌های هواشناسی و تبدیل آن به واحدهای خواسته شده ایجاد شده است. همچنین این المان قابلیت محاسبه و پردازش اطلاعات تابش خورشیدی را برای بدست آوردن میزان تابش روی سطح شیب‌دار و زاویه برخورد تابش روی تعداد دلخواه از سطوح را نیز دارد.

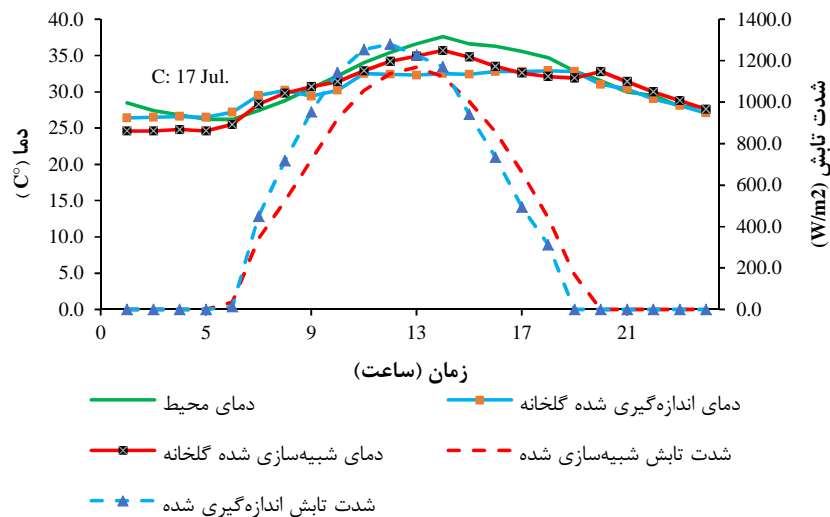
بعد از مدل‌سازی گلخانه پارامترهای موثر بر عملکرد سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم در گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جریان هوای عبوری ( $V_a$ )، دمای حباب خشک ( $T_{db}$ ) و نسبت رطوبت محیط ( $\omega_{amb}$ ) بوده كه هر یک شامل ۵ سطح می‌باشند. جدول ۲ متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. متغیرهای وابسته در این ارزیابی شامل دمای خروجی از پد سلولزی، دمای گلخانه، راندمان سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم ( $\eta_{DE}$ ) و هزینه عملکردی سامانه ( $C_{op}$ ) است. در هنگام بررسی اثر هر پارامتر، آن پارامتر به‌صورت متغیر و بقیه پارامترها ثابت فرض شده‌اند.



شکل ۱- اجزای مدل‌سازی گلخانه در نرم‌افزار TRNSYS

جدول ۲- متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها

سطوح		نماد			متغیرها
۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵	$V_a$ (m/s) سرعت جریان هوا
۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	$T_{db}$ (°C) دمای حباب خشک
۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۰۲۵	$\omega_{amb}$ (kg <sub>water</sub> /kg <sub>dry</sub> ) نسبت رطوبت محیط



شکل ۲- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی شده و تجربی دمای داخلی گلخانه و شدت تابش افقی در تاریخ ۹۶/۴/۲۷ (۱۷ جولای ۲۰۱۷)

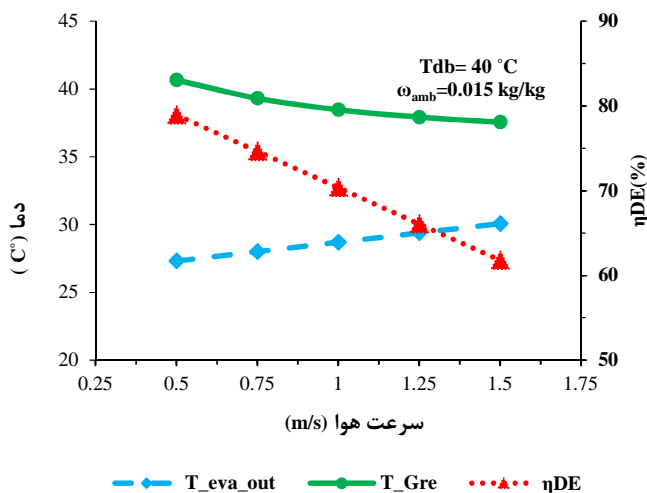
راندمان کاهش یافته و در نتیجه دمای هوای خروجی نیز افزایش می‌یابد.

در پژوهش‌های دیگر نیز نتایج مشابهی منتشر شده است (Malli *et al.*, 2011; Amer *et al.*, 2015; Sayed & Khater, 2014). همان‌طور که مشاهده می‌شود برخلاف دمای هوای خروجی، دمای گلخانه با افزایش سرعت هوا، ۹٪ کاهش یافته و در سرعت ۱/۲۵ m/s به کمترین مقدار خود ۲۹/۹ °C می‌رسد. دلیل این کاهش را می‌توان

شکل ۴ تغییرات دمای گلخانه ( $T_{Gre}$ )، دمای هوای خروجی از پد سلولزی ( $T_{eva,out}$ ) و راندمان خنک‌کننده تبخیری مستقیم ( $\eta_{DW}$ ) را نسبت به سرعت هوا در دمای حباب خشک ۴۰ °C و نسبت رطوبت محیط  $kg_{water}/kg_{dry}$  air ۰/۰۱۵ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود علت این تغییرات را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش سرعت هوای عبوری از پد، فرصت کمتری برای انتقال جرم و حرارت بین آب و هوا وجود دارد؛ بنابراین

به تدریج افزایش پیدا کند. بیشترین مقدار دمای گلخانه در سرعت  $0.5 \text{ m/s}$  برابر با  $32.8^\circ\text{C}$  است که کمتر از حد مجاز ذکر شده در جدول ۱ است. بنابراین در شرایط محیطی ( $\omega_{\text{amb}} = 0.15 \text{ kg/kg}$  و  $T_{\text{db}} = 40^\circ\text{C}$ ) این سامانه برای خنک کردن گلخانه مناسب است و بهتر است در چنین شرایطی از سرعت هوای  $1.25 \text{ m/s}$  استفاده گردد تا شرایط مطلوب‌تری جهت رشد محصول فراهم گردد.

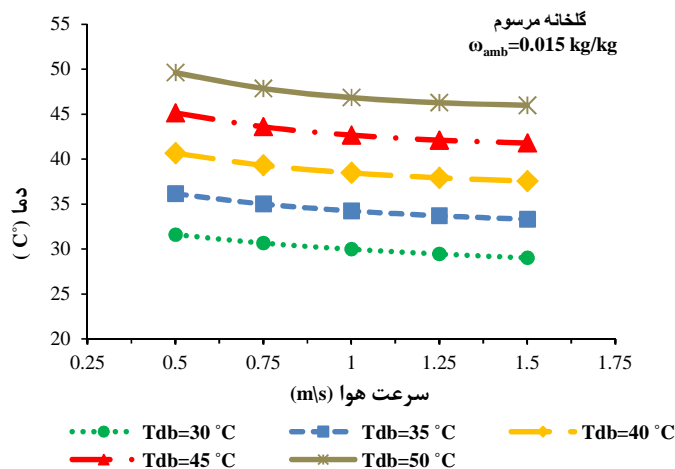
این‌گونه بیان نمود که در اثر افزایش سرعت، علی‌رغم کاهش راندمان خنک‌کننده تبخیری مستقیم، حجم هوای خنک شده بیشتر و در نتیجه ظرفیت سرمایشی سامانه افزایش پیدا می‌کند و باعث می‌گردد دمای گلخانه کاهش یابد. به عبارت دیگر تا سرعت  $1.25 \text{ m/s}$  افزایش ظرفیت سرمایشی بر کاهش راندمان سامانه غلبه می‌کند و از آن به بعد با افزایش سرعت، کاهش راندمان بر ظرفیت سرمایشی غلبه کرده و باعث می‌شود دمای گلخانه



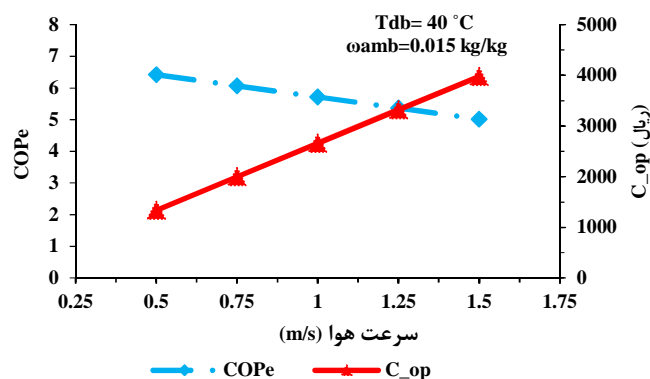
شکل ۳- تغییرات دمای گلخانه، دمای هوای خروجی از پد سلولزی و راندمان خنک‌کننده تبخیری مستقیم نسبت به سرعت هوا

ضریب عملکرد و هزینه‌های عملکردی سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم را نسبت به سرعت هوا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت هوا ضریب عملکرد الکتریکی ( $\text{COP}_e$ )  $21.8\%$  کاهش می‌یابد. در سرعت  $0.5 \text{ m/s}$  ضریب عملکرد الکتریکی دارای بیشترین مقدار  $6/42$  می‌باشد. این روند کاهشی را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش سرعت هوای عبوری از پد، فرصت کمتری برای انتقال جرم و حرارت بین آب‌وهوا وجود دارد و در نتیجه دمای هوای خروجی افزایش و ضریب عملکرد سامانه کاهش می‌یابد. همچنین هرچه سرعت بیشتر باشد، افت فشار هوا بیشتر و میزان تبخیر آب کمتر می‌شود. در نتیجه هزینه الکتریسته مصرفی افزایش و هزینه آب کاهش می‌یابد و در کل، مجموع هزینه‌های سامانه مطابق شکل ۵ افزایش می‌یابد؛ بنابراین در طراحی، بهتر است سرعت هوای عبوری از پد کمترین مقدار مجاز انتخاب شود.

شکل ۵ تغییرات دمای داخلی گلخانه در دماهای مختلف محیط و در نسبت رطوبت  $0.15 \text{ kg/kg}$  نسبت به سرعت هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای گلخانه با دمای محیط رابطه مستقیمی دارد و با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که در شرایط محیطی با نسبت رطوبت  $0.15 \text{ kg/kg}$  و دمای محیط کمتر از  $35^\circ\text{C}$  دمای داخلی گلخانه در حد مطلوب و مناسب برای رشد محصول بوده و می‌توان گفت سامانه سرمایشی تبخیری مستقیم گزینه مناسبی برای خنک کردن فضای داخلی گلخانه است. در دمای  $40^\circ\text{C}$  در صورتی که سرعت هوا برابر با  $1.25 \text{ m/s}$  باشد، می‌توان از این سامانه نیز برای گلخانه استفاده نمود. برای مناطقی با دمای محیط بیشتر از  $40^\circ\text{C}$   $T_{\text{db}}=40^\circ\text{C}$  نمی‌توان از این سامانه استفاده کرد و باید برای کاهش دمای گلخانه از روش‌های دیگر از قبیل سایه‌اندازی و استفاده از مه پاش نیز استفاده نمود. شکل ۶ تغییرات



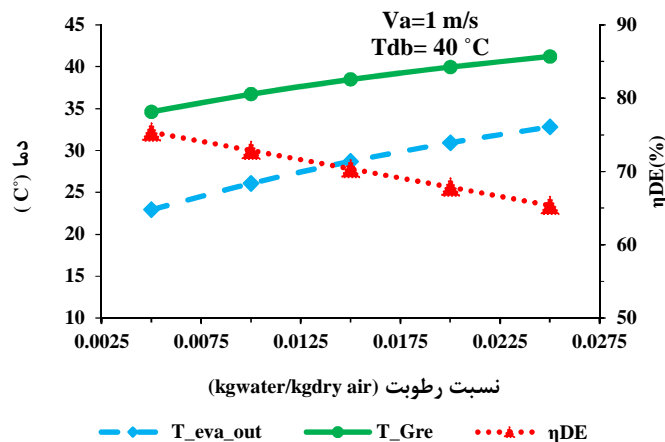
شکل ۴- تغییرات دمای گلخانه در دماهای مختلف محیط نسبت به سرعت هوا



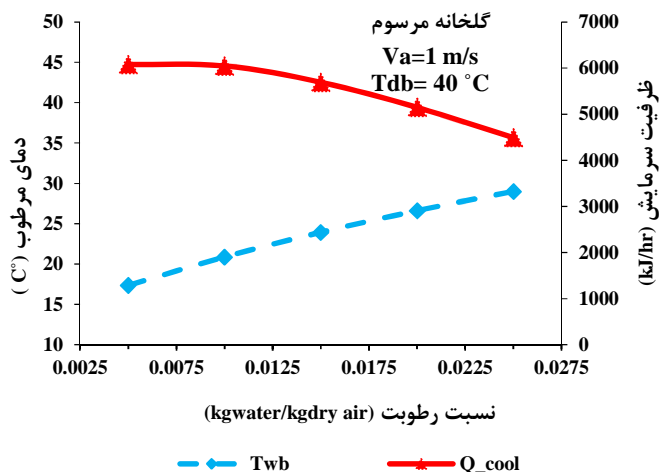
شکل ۵- تغییرات ضریب عملکرد و هزینه‌های عملکردی سامانه خنک‌کننده مستقیم نسبت به سرعت هوا

شکل ۷ تغییرات دمای گلخانه، دمای هوای خروجی از پد سلولزی و راندمان خنک‌کننده تبخیری مستقیم را نسبت به تغییرات نسبت رطوبت محیط در دمای حباب خشک  $40^{\circ}\text{C}$  و سرعت هوای  $1\text{ m/s}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت رطوبت، راندمان کاهش و در نتیجه دمای هوای خروجی از پد افزایش می‌یابد. به طوری که با تغییر نسبت رطوبت از  $0.005$  به  $0.025\text{ kg/kg}$  راندمان  $13/3\%$  کاهش و دمای هوای خروجی  $43\%$  افزایش می‌یابد. در سرعت  $0.5\text{ m/s}$  راندمان دارای بیشترین مقدار  $75/4\%$  و دمای خروجی دارای کمترین مقدار  $22/9^{\circ}\text{C}$  می‌باشند. کاهش راندمان سامانه به این دلیل است که با افزایش نسبت رطوبت هوای ورودی به پد سلولزی، ظرفیت آن برای جذب رطوبت کاهش و در نتیجه انتقال جرم و حرارت بین آب‌وهوای ورودی به پد سلولزی کاهش یافته که خود منجر به کاهش ظرفیت سرمایشی سامانه می‌شود (شکل

۷). همچنین علت افزایش دمای خروجی از پد را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش نسبت رطوبت، دمای مرطوبت افزایش می‌یابد و به طبع منجر به افزایش دمای خروجی می‌شود. سید و خاطر در پژوهش‌های خود به نتایج مشابهی دست یافتند (Sayed & Khater, 2014). همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت رطوبت، دمای گلخانه حدود  $28/3\%$  افزایش یافته که ناشی از کاهش ظرفیت سرمایشی سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم است. دمای گلخانه در نسبت رطوبت  $0.005\text{ kg/kg}$  دارای کمترین مقدار  $26/2^{\circ}\text{C}$  است و در نسبت رطوبت‌های بیشتر به مقدار بیشتر از  $30^{\circ}\text{C}$  می‌رسد که از محدوده بهینه مناسب برای رشد محصول بیشتر است. بنابراین در شرایط ( $V_a = 1\text{ m/s}$  و  $T_{db} = 40^{\circ}\text{C}$ ) این سامانه برای خنک کردن گلخانه در مناطقی با نسبت رطوبت کمتر از  $0.015\text{ kg/kg}$  مناسب می‌باشد.



شکل ۶- تغییرات دمای گلخانه، دمای هوای خروجی از پد سلولزی و راندمان خنک‌کننده تبخیری مستقیم با نسبت رطوبت محیط



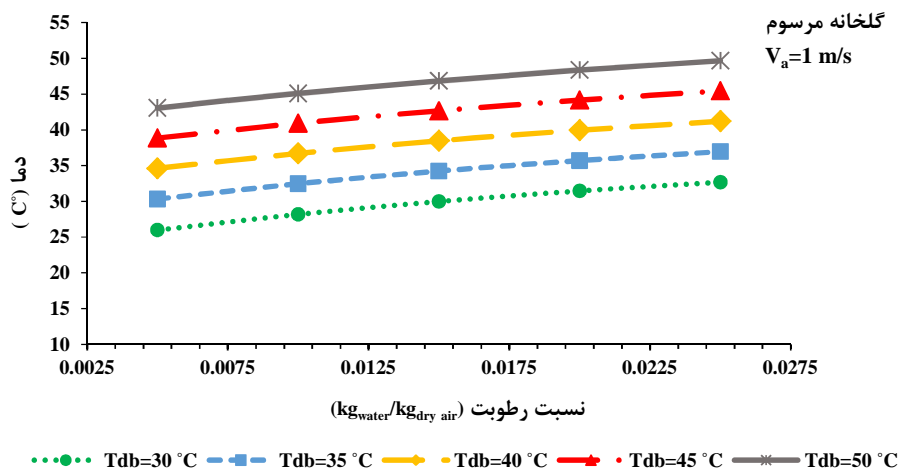
شکل ۷- تغییرات دمای مرطوب و ظرفیت سرمایشی خنک‌کننده تبخیری مستقیم با نسبت رطوبت محیط

که در مناطقی با نسب رطوبت و دمای بالاتر استفاده کرد، که باید این مسئله بررسی گردد.

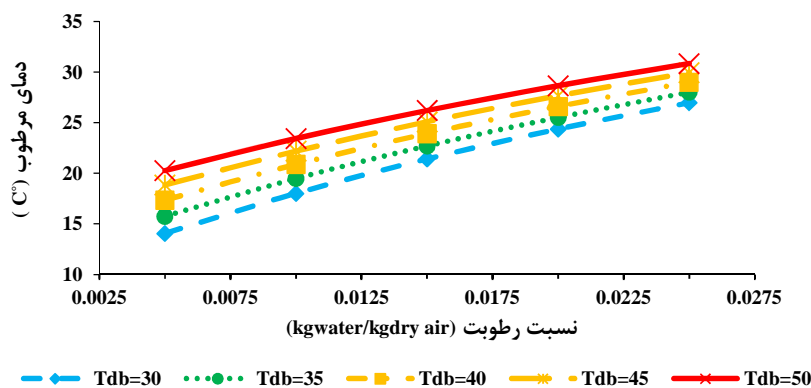
شکل ۱۰ تغییرات ضریب عملکرد سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم را در دما  $T_{db}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، سرعت  $1\text{ m/s}$  و نسبت رطوبت‌های مختلف محیط نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت رطوبت ضریب عملکرد الکتریکی ( $COP_e$ )  $26/1\%$  کاهش می‌یابد. در این سرعت ضریب عملکرد الکتریکی سامانه دارای بیشترین مقدار  $6/1$  است. این روند کاهش را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش نسبت رطوبت، ظرفیت جذب رطوبت توسط هوا کاهش یافته و به طبع میزان انتقال جرم و حرارت بین آب و هوا نیز کاهش می‌یابد و منجر به افزایش دمای هوای خروجی از پد سلولزی و در نتیجه کاهش بار ظرفیت سرمایشی و ضریب عملکرد سامانه می‌شود.

شکل ۹ تغییرات دمای داخلی گلخانه مرسوم در دما و نسبت رطوبت‌های مختلف محیط و در سرعت هوای  $1\text{ m/s}$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دماهای مختلف با افزایش نسبت رطوبت هوا، دمای گلخانه افزایش می‌یابد. دمای گلخانه با دمای محیط رابطه مستقیمی دارد و با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که در مناطقی با نسبت رطوبت کمتر از  $0.015\text{ kg/kg}$  و دمای حباب خشک کمتر از  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  می‌توان از این سامانه سرمایش تبخیری مستقیم جهت خنک کردن گلخانه‌هایی که در آن گیاه خیار کشت شده است استفاده نمود. البته با توجه به نمودار دمای مرطوب در دما و نسب رطوبت‌های مختلف (شکل ۹) احتمال این وجود دارد که با تغییر ابعاد پد سلولزی بتوان از این سامانه برای خنک کردن گلخانه‌هایی

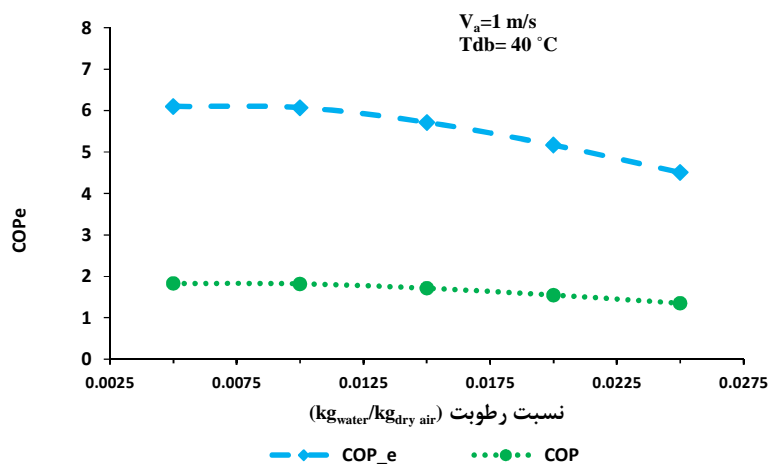




شکل ۸- تغییرات دمای گلخانه مرسوم، در دما و نسبت رطوبت‌های مختلف محیط



شکل ۹- تغییرات دمای مرطوب در دما و نسبت رطوبت‌های مختلف محیط



شکل ۱۰- تغییرات ضریب عملکرد سامانه خنک‌کننده مستقیم در نسبت رطوبت‌های مختلف

### نتیجه‌گیری

می‌یابد. به طوری که با تغییر سرعت هوا از ۰/۵ m/s به ۱ m/s راندمان ۲۲٪ کاهش و دمای هوای خروجی ۱۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که در

نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش سرعت هوا، راندمان کاهش و دمای هوای خروجی از پد افزایش

- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
11. Kozai, T. and Sase, S. 1978. A Simulation of Natural Ventilation for a Multi-Span Greenhouse. Symposium on Potential Productivity in Protected.
  12. Landsberg, J. J., White, B. and Thorpe, M.R. 1979. Computer Analysis of the Efficacy of Evaporative Cooling for Glasshouses in High Energy Environments. Journal of Agricultural Engineering Research. Elsevier, 24(1): 29-39.
  13. Malli, A. Seyf, H. Layeghi, M. Sharifian, S. and Behravesh, H. 2011. Investigating the Performance of Cellulosic Evaporative Cooling Pads. Energy Conversion and Management, 52(7): 2598-2603.
  14. Mannan, K. D. and Cheema, L. S. 1979. Year-Round Studies on Natural Cooling and Heating of Greenhouses in Northern India.
  15. Rault, P. A. 1989. A Tunnel Greenhouse Adapted to the Tropical Low Land Climate. II Workshop on Greenhouse Construction and Design.
  16. Sayed, El. and Khater, G. 2014. Performance of Direct Evaporative Cooling System under Egyptian Conditions, 2(2): 2-9.
  17. Willits, D. H. 2003. Cooling Fan-Ventilated Greenhouses: A Modelling Study, 84: 315-29.
  18. Xu, J. Li, Y. Wang, R. Z. Liu, W. and Zhou, P. 2015. Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. Applied Energy, 138: 291-301.

شرایط محیطی با دمای حباب خشک و نسبت رطوبت به‌ترتیب کمتر از  $40^{\circ}\text{C}$  و  $0/015 \text{ kg/kg}$ ، سامانه خنک‌کننده تبخیری مستقیم (فن-پد) در سرعت هوای  $1/25 \text{ m/s}$  روش مناسبی برای خنک کردن گلخانه است و شرایط مطلوبی جهت رشد محصول فراهم می‌کند. همچنین نتایج نشان داد در مناطقی با نسبت رطوبت‌های بیشتر از  $0/015 \text{ kg/kg}$  سامانه خنک‌کننده تبخیری به‌تنهایی توانایی خنک کردن گلخانه را ندارد و باید از روش‌های دیگر از قبیل استفاده از پرده سایه‌انداز و مه پاش کمک گرفت.

### سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت جهت حمایت مالی خود در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

### منابع

1. Abdel-wahab, S K. 1994. Energy and Water Management in Evaporative Cooling Systems in Saudi Arabia. Resources, Conservation and Recycling.
2. Al-Jamal, K. 1994. Greenhouse Cooling in Hot Countries. Energy. 19 (11): 1187-92.
3. Amer, O. Boukhanouf, R. and Ibrahim H. G. 2015. A Review of Evaporative Cooling Technologies, 6(2): 111-117
4. Chandra, P. Singh, J. K. and Majumdar G. 1989. Some Results of Evaporative Cooling of a Plastic Greenhouse. Journal of Agricultural Engineering.
5. Davies, P. A. 2005. A Solar Cooling System for Greenhouse Food Production in Hot Climates. Solar Energy, 79(6): 661-68.
6. FAO. 1990. Protected Cultivation in the Mediterranean Climate. Rome: FAO.
7. Fuchs, M., Ehud, D. and Eugene, P. 2006. Evaporative Cooling of a Ventilated Greenhouse Rose Crop. Agricultural and Forest Meteorology, 138 (1-4): 203-15.
8. Jain, D. and Tiwari G. N. 2002. Modeling and Optimal Design of Evaporative Cooling System in Controlled Environment Greenhouse. Energy Conversion and Management, 43(16): 2235-50.
9. Kittas, C. Bartzanas, T. and Jaffrin, A. 2003. Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse Equipped with Evaporative Cooling Pads, 85: 87-94.
10. Klein, S. A. 2007. TRNSYS 16: Volume 1 Getting Started. In Trnsys 16, 1:1-87. by the