



بررسی استفاده از سامانه سرمایش تبخیری با ستون‌های خیس‌شونده برای گلخانه در ایران

مجتبی سلطانی نژاد^{۱*}، حمید مرتضی پور^۲، کاظم جعفری نعیمی^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم- دانشکده کشاورزی- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم- دانشکده مهندسی- دانشگاه بزرگمهر قائنات- قائن- ایران.

۳- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم- دانشکده کشاورزی- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران.

چکیده

هزینه‌های کاهش یافته در نتیجه بهره‌مندی از این سامانه دوره بازگشت سرمایه تجهیز گلخانه به سامانه پیشنهادی را به ۳/۷ سال رساند. همچنین نتایج شبیه‌سازی، بیانگر عملکرد بهتر سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در شهرهایی با رطوبت نسبی کم مانند یزد و کرمان بود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

واژه‌های کلیدی:

سرمایش تبخیری، انتشار دی اکسید کربن، دوره بازگشت سرمایه.

کشت و تولید گلخانه‌ای، علی‌رغم کاهش مصرف آب و سودآوری بالایی که دارد، به علت وجود آب و هوای گرم و خشک ایران، تقاضای انرژی برای سامانه‌های خنک‌کننده را افزایش می‌دهد. انتخاب سامانه‌های خنک‌کننده، به‌طور مستقیم بر مقدار انرژی مصرفی و انتشار گازهای آلاینده محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. با هدف کاهش مصرف انرژی مورد نیاز خنک‌سازی گلخانه‌ها، یک سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده با الگوبرداری از بادگیرها و دودکش‌های خور شیدی برای خنک‌سازی یک گلخانه به مساحت ۱۰ مترمربع در نرم‌افزار ترنسزس شبیه‌سازی شد و رفتار حرارتی، آثار زیست‌محیطی و تحلیل اقتصادی آن برای یک دوره ۶ ماهه در فصل‌های بهار و تابستان، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌داد، بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک‌سازی گلخانه در گرم‌ترین روزهای سال ۹/۵ کیلووات ساعت است. سامانه سرمایشی پیشنهادی، قادر به تولید ۱/۵ کیلووات ساعت بار سرمایشی بود و سهم خنک‌سازی آن برای سرمایش گلخانه به‌طور میانگین سالانه ۲۷/۳ درصد محاسبه و برآورد گردید. به ازای هر مترمربع گلخانه در یک دوره ۶ ماهه، بیش از ۲۸۵ کیلووات ساعت صرفه‌جویی در مصرف برق به‌وجود آمد و از تولید و انتشار ۱۸۸/۳ کیلوگرم انواع آلاینده جلوگیری شد.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: soltaninejad.mojtaba.1991@gmail.com



۱. مقدمه

رشد جمعیت و محدودیت در نهاده‌های اصلی کشاورزی نظیر زمین و آب مناسب، کشت گلخانه‌ای را دارای اهمیت و سود آوری ویژه‌ای کرده است [۱]. باوجود اینکه کشت و تولید گلخانه‌ای منجر به کاهش مصرف آب مصرفی برای رشد و نمو گیاه و محصول می‌شود اما به دلیل آب و هوای گرم و خشک ایران، گلخانه‌ها به خنک‌سازی بیشتری نیاز دارند که منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود [۲]. نتایج تحقیقات نشان داده، حدود ۶۵ تا ۸۵ درصد مصرف انرژی و ۷۰ تا ۸۵ درصد از هزینه‌ها در یک گلخانه به تهویه هوا مربوط می‌شود [۳، ۴].

بخش‌های مرکزی ایران به دلیل دور بودن از منابع آب‌های سطحی وسیع، در شرایط آب و هوایی گرم و خشک قرار دارند و دارای محدوده دمایی بالا، تابش خورشیدی قوی و بادهای محلی و متلاطم هستند. روزهای گرم با رطوبت کم، مشکل اصلی در این مناطق می‌باشد. در فصل گرم، محدوده دمای حباب خشک حدود ۴۳-۴۹ درجه سلسیوس است، در حالی که دمای مطلوب برای شرایط کشت گلخانه‌ای ۲۴-۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد [۵]. دمای بالا در طول ماه‌های تابستان، تقاضای انرژی برای سامانه‌های خنک‌کننده را افزایش می‌دهد و افزایش مصرف انرژی منجر به تولید و انتشار بیشتر آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۶]. رشد تقاضای انرژی، نقش کلیدی در روند افزایشی انتشار آلاینده‌های زیست محیطی داشته است به نحوی که در سال ۲۰۱۷ سرانه تولید دی اکسیدکربن به ازاء هر نفر به عدد ۴/۴ تن رسید. در سال ۲۰۱۸ هم با توجه به رشد مصرف سوخت‌های فسیلی، تولید آلاینده‌ها نسبت به سال ۲۰۱۵، ۳/۵ درصد رشد داشت [۷]. از این رو، استفاده از روش‌های تهویه مطبوع و خنک‌سازی بهینه و کم مصرف که از تولید و انتشار آلاینده‌های بیشتر جلوگیری به عمل آورد، به خصوص در ایران که شدت عرضه و مصرف انرژی به ترتیب ۴۱/۶ و ۳۷/۵ درصد بیشتر از میانگین جهانی است، اهمیت بالایی دارد. حدود ۲۰ درصد از انرژی مصرفی جهان به منظور تهویه مطبوع مصرف می‌شود [۷].

۲. سامانه سرمایش تبخیری

انتخاب سامانه‌های تهویه مطبوع و خنک‌سازها، به‌طور مستقیم بر مقدار انرژی مصرفی و تولید و انتشار گازهای آلاینده محیط زیست در جو تأثیر می‌گذارد. انواع مختلفی از سامانه‌های خنک‌کننده وجود دارند که هوای خنک را برای مصارف خانگی یا تجاری فراهم

می‌کند. خنک‌کننده تبخیری با فناوری ساده از قرن‌ها پیش تاکنون، به شکل‌های مختلف مانند بادگیرهای سنتی، کولرهای آبی، ایرواشرها و ... هوای خنک مورد نیاز را تأمین کرده است و همچنین امروزه راهی امیدوارکننده برای کاهش انتشار آلاینده‌ها و مصرف انرژی فراهم می‌کند. سرمایش تبخیری بر مبنای یک اصل ساده استوار است، با تبخیر آب، گرمای نهان تبخیر آن از هوای اطراف جذب و در نتیجه، باعث کاهش دمای هوا در مجاورت محل تبخیر آب خواهد شد [۸]. یک سامانه خنک‌کننده تبخیری به دلیل ظرفیت قابل توجه افزایش رطوبت هوا که منجر به کاهش قابل توجه دما می‌شود، از نظر عملکرد حرارتی در شرایط آب و هوایی گرم و خشک جذاب است [۹]. خنک‌سازی گلخانه‌ها هم در حال حاضر، به طور متداول با سامانه‌های فن و پد، که نوعی از سامانه‌های تبخیری می‌باشند، انجام می‌شود. این سامانه‌ها از بادبزن‌های مکند و یا دمند هوا که در یک سمت و پدهای سلولزی که در سمت دیگر گلخانه نصب می‌شود، تشکیل شده است. عملکرد این سامانه‌ها بدین شکل است که با مکش فن‌ها و جریان هوا، قطرات آب پمپاژ شده بر روی پدها به هوا وارد می‌شود و این ذرات برای بخار شدن، گرمای هوا را جذب کرده، در نتیجه، باعث خنک شدن جریان هوا می‌شود [۱۰].

در خصوص کارایی سامانه سرمایشی فن و پد، مطالعات زیادی انجام شده است. در صنعت تولید گل و گیاهان زینتی، بهینه‌سازی شرایط محیطی رشد به‌ویژه دمای محیط در تمام فصل‌های سال، بسیار مهم است. صادقی و همکاران [۱۱] پژوهشی با هدف بررسی کارایی سامانه خنک‌کننده فن و پد در گلخانه‌های رز شاخه‌ای در مناطق خشک و نیمه خشک ایران، در یک گلخانه تحقیقاتی با سازه رایج تونلی-پلاستیکی انجام دادند. فاکتورهای اصلی مؤثر مورد بررسی در کارایی سامانه سرمایشی گلخانه، شامل تابش نور خورشیدی دریافتی و دمای خشک و تر بیرون و داخل گلخانه در گرم‌ترین روزهای تابستان بودند. براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، کارایی سامانه سرمایش فن و پد در گلخانه‌ای در شرایط منطقه شهر محلات بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بسته به محل (فاصله از پد) و شرایط آب و هوایی ساعت داده‌برداری تغییر می‌کند. همچنین، کارایی سامانه در گرم‌ترین ساعت از گرم‌ترین روز سال، در محل ورود هوا از پد، حدود ۷۵ درصد برآورد شد. در پژوهشی دیگر، تجزیه و تحلیل داده‌های یک سامانه سرمایش تبخیری فن و پد که برای خنک‌سازی یک گلخانه مورد استفاده قرار گرفته بود، توسط کیتاس و همکاران [۱۲] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در این تحقیق، موفق شدند دمای گلخانه را در حدود ۱۰ درجه سلسیوس خنک‌تر از محیط بیرون با کارایی ۸۰ درصد حفظ کنند.

فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی جهت استفاده از سامانه‌های سرمایش تبخیری به‌خصوص بادگیرهایی که به سامانه تبخیری مجهز شده باشند و برای خنک‌سازی گلخانه‌های مناطق گرم و کویری ایران استفاده شود، انجام نشده است، لذا در این تحقیق سامانه سرمایش تبخیری پیشنهاد شده توسط نوروزی و ونریس به علت مصرف انرژی کم، برای سرمایش یک گلخانه آزمایشگاهی در دانشگاه شهید باهنر کرمان در نظر گرفته شد و بر اساس معادلات استخراج شده در آن تحقیق شبیه‌سازی رفتار حرارتی آن‌ها با نرم‌افزار TRNSYS انجام شد و بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تحلیل فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از سامانه سرمایش تبخیری با ستون‌های خیس‌شونده برای گلخانه در ایران انجام شد.

۳. اجزاء و روش تحقیق

۳-۱. گلخانه

به‌منظور شبیه‌سازی سامانه سرمایشی مورد نظر و بررسی کارایی آن از مدل گلخانه‌ای که در آزمایشگاه انرژی خورشیدی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان موجود بود، استفاده شد. در تحقیقی، شجاعی و همکاران [۲۱] از یک سامانه سرمایش تبخیری فن و پد برای سرمایش این گلخانه استفاده کردند. نتایج نشان داد سامانه فن و پد استفاده شده توانست در بازه‌ای از زمان آزمایش، دمای گلخانه را تا $20/6$ درجه سلسیوس خنک کند. برای شبیه‌سازی، ابعاد این گلخانه ۵ متر طول، ۲ متر عرض، با ارتفاع کمینه $1/5$ متر در جنوب و بیشینه $2/75$ متر در شمال، در نظر گرفته شد. ساختار گلخانه از یک قاب فولادی (لوله مستطیلی با سطح مقطع 4×4 سانتی‌متر) تشکیل شده که با ورق پلی‌کربنات شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر (دو لایه ۲ میلی‌متری از پلی‌کربنات و یک لایه ۶ میلی‌متری از هوا مابین دو لایه پلی‌کربنات) پوشانده شده بود. گلخانه از سمت شمال در مجاورت یک ساختمان با مصالح آجری قرار داشت (شکل شماره ۱). از این رو در محاسبات انتقال حرارات، داده‌های دیوار شمالی گلخانه، برابر دیوار ساختمان آجری در نظر گرفته شد. در (جدول شماره ۱) مشخصات و اطلاعات استفاده شده برای گلخانه درج شده است.

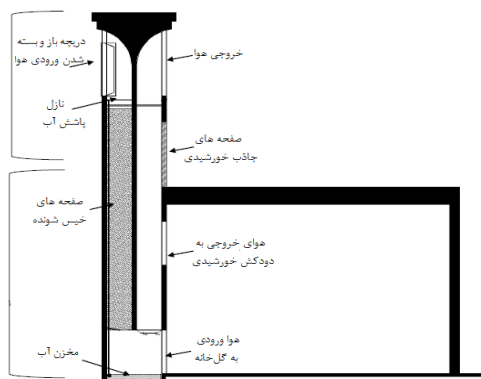


شکل ۱: تصویر گلخانه مدل شده در نرم‌افزار.

یکی از روش‌های خنک‌سازی غیرفعال که با مصرف انرژی بسیار پایین انجام می‌شود، استفاده از بادگیرها است. بادگیرها، برج‌های کوچکی هستند که ارتفاع آن‌ها بین ۵ تا ۳۳ متر از سقف ساختمان‌ها برافراشته شده‌اند. بادگیرها به طور معمول در اکثر مناطق گرم و خشک یا مرطوب ساخته می‌شود [۱۳، ۱۴]. بادگیر به عنوان یک سامانه خنک‌کننده برای ارائه تهویه مطلوب و محیط داخلی دلپذیر با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد عمل می‌کند. جریان باد، روی پره‌های داخلی بادگیرها فشار مثبتی را در یک سمت بادگیر ایجاد می‌کند، در حالی که دهانه‌های بادگیر در طرف دیگر، با فشار منفی مواجه می‌شود. از این‌رو، مانند یک سامانه تهویه، هوای گرم و آلوده به بیرون رانده می‌شود [۱۵].

استفاده از بادگیرها به طور کلی، به عنوان روشی هوشمندانه برای استفاده مستقیم از انرژی باد که آسایش حرارتی و تهویه غیرفعال را برای ساکنان ساختمان در آب و هوای گرم و خشک فراهم کرده است، در نظر گرفته می‌شود [۱۶، ۱۷]. تحقیقی که بر روی عملکرد یک بادگیر با سامانه پاشش آب بر بالای آن در مناطق کویری توسط کلانتر [۱۸] به صورت تجربی و عددی انجام شد، نشان دهنده تأثیر مهم خنک‌کننده تبخیری در منطقه گرم و خشک بود، زیرا اگر سامانه تبخیری در بادگیر تعبیه شود، دما به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. پشتگیری و محبتی [۱۹] در تحقیقی، تهویه و سرمایش طبیعی یک ساختمان دو طبقه متصل به بادگیر که در آن از پاشش آب برای کاهش دمای هوای محیط استفاده شده بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اگرچه سامانه پیشنهادی آن‌ها نمی‌توانست با سامانه‌های تبرید تراکمی اینورتردار در مناطقی که در آن رطوبت نسبی هوای محیط بالا است، رقابت کند، اما مصرف انرژی الکتریکی کمتری برای خنک‌سازی ساختمان نسبت به خنک‌کننده‌های تبخیری مرسوم داشت. در سال ۲۰۱۸، نوروزی و ونریس، یک سامانه سرمایش تبخیری ستونی مجهز به ستون‌ها و سطوح خیس‌شونده ارائه کردند. در این سامانه بدلیل آنکه، جریان هوا موازی با ستون‌های خیس عبور می‌کرد، نه از داخل آن، توان مصرفی دمنده بسیار کاهش یافت [۲۰]. این سامانه، الگویی از یک بادگیر چهارطرفه با ساختار دودکش خورشیدی و مجهز به دو قسمت خنک‌کننده تبخیری (تیغه‌های خیس‌شونده و پدهای بازکن قابل تنظیم) بود. در این تحقیق، معادلات عملکرد بادگیر، استخراج، و به صورت تجربی اعتبارسنجی گردید.

برای خنک‌سازی و سرمایش گلخانه‌ها روش‌ها و مطالعات زیاد و گسترده‌ای انجام شده است. اما هنوز یک مطالعه جامع و کاربردی



شکل ۲: اجزای سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده [۲۰]

نمونه، دارای ارتفاع ۲/۵ متر، مقطع $۰/۴۰ \times ۰/۲۰$ متر، شامل مجرای ورودی و مجرای خروج هوا (دودکش خورشیدی)، با دهانه‌های هوا $۰/۴۰$ متر بالاتر از دستگاه بود. دیوارها از یک صفحه پلی کربنات به ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شده‌اند که سطوح بیرونی آن توسط ورقه آلومینیومی براق پوشیده شده است تا جذب تابش خورشیدی به حداقل برسد. در داخل مجرای ورودی، یک بخش تیغه‌ای با شکل متقاطع (+) وجود دارد که از چهار پرده گونی با عرض $۰/۱۰$ متر و طول $۱/۸۰$ متر تشکیل شده است. یک لایه نی به ضخامت ۱ سانتی‌متر که به صورت پد ساخته شده بود در دهانه ورودی هوا نصب شد. برای پاشیدن آب بر روی پد و تیغه‌ها از یک لوله باریک استفاده می‌شود. در انتهای دستگاه یک دریچه برای خروجی سامانه قرار دارد. دهانه در جنوب توسط یک صفحه مسدود شده است، بنابراین در این تحقیق، سازه به عنوان بادگیر یک طرفه عمل می‌کند و برای بهبود تهویه هوا یک دریچه به ابعاد $۰/۲ \times ۰/۲$ متر در طرف مقابل جای‌گیری سامانه نصب شد. در صورت وجود سرعت باد مطلوب، بادگیر به عنوان یک تهویه عمل می‌کند که در آن هوای تازه وارد ساختمان شده و هوای گرم و آلوده بر اساس فشار باد تخلیه می‌شود. در واقع، سرعت باد، غالب‌ترین نیروی محرکه برای حرکت هوا از طریق مجرا است. در مواقعی که سرعت باد کم است و یا زاویه مناسب ندارد، برای افزایش

کارایی سامانه، یک دمنده به گردش جریان هوا کمک می‌کند. نازل‌های آب که در قسمت بالای پد و قسمت تیغه‌ها نصب شده‌اند برای خیس‌کردن پدها و افزایش اثر شناوری استفاده می‌شوند. این عمل، منجر به کاهش دما و افزایش چگالی هوا شده که حرکت رو به پایین هوای تازه از طریق سامانه را ممکن می‌سازد.

جدول ۱: مشخصات و اطلاعات فنی ساختمان گلخانه استفاده شده در تحقیق.

مساحت m^2	ضخامت m	ضریب هدایت حرارتی $(k/h.m^2.K)$	ظرفیت گرمایی ویژه $(g.kj/kK)$	چگالی (kg/m^3)	
۷/۵	۰/۰۱	۰/۹۴	۱/۰۱۲	۲۲۵	دیوار جنوبی
۱۳/۷۵	۰/۳	۳/۲	۸/۳	۱۵۰	دیوار شمالی
۴/۲۵	۰/۰۱	۰/۹۴	۱/۰۱۲	۲۲۵	دیوارها
۱۱/۸	۰/۰۱	۰/۹۴	۱/۰۱۲	۲۲۵	سقف
۱۰	—	—	—	—	کف*

* با توجه به اینکه گلخانه از کف به زمین ختم می‌شود، انتقال حرارت از این مرز صفر فرض شد.

۲-۳. سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده

این مطالعه با شبیه‌سازی یک بادگیر با سطح مقطع مربعی که به همراه یک سامانه پد و فن بار سرمایشی گلخانه را تأمین می‌کند،

انجام شد. عملکرد بادگیر طراحی شده، قبل‌تر مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است [۲۰]. دستگاه در نظر گرفته شده، یک بادگیر مجهز به دو قسمت خنک‌کننده تبخیری (تیغه‌های خیس شده و پدهای بازکن قابل تنظیم) می‌باشد که با ساختار دودکش خورشیدی تکمیل گردیده است. این سازه با مقطع مربع و ابعاد حاصل از نتایج مطالعات قبلی ساخته شد [۲۲، ۲۳]. (شکل شماره ۲) اجزای اصلی سامانه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳-۳. نرم‌افزار

$$L(d_p) = [0.04631 - 1.444 * 10 - 3d_p] \ln \frac{d_p}{2.5}$$

$$\omega_t = \frac{C_p T_a + (\omega h g)_a - C_p T_t}{(h g)_t} \quad (4)$$

که در آن C_p گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم کلونین)، ω نسبت رطوبت هوا (کیلوگرم رطوبت بر کیلوگرم هوا) و $h g$ گرمای نهان است. t و a به ترتیب به جریان هوای داخلی و خارجی اشاره دارد. همچنین نرخ تبخیر آب m_v از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد [۲۵].

$$m_v = h_D A_m (w_c - w_a) \quad (6)$$

که در آن h_D ضریب انتقال جرم (گرم بر مترمربع ثانیه)، A_m سطح خیس‌شده ستون‌ها (مترمربع)، w_c نسبت رطوبت هوای اشباع در دمای مورد نظر است. w_a نسبت رطوبت جریان هوای داخلی است. ضریب انتقال جرم را می‌توان با استفاده از رابطه ۷ به‌دست آورد [۲۵].

$$h_D = \frac{h_i}{C_p} \quad (7)$$

که در آن h_i ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی داخلی هوا (وات بر مترمربع کلونین) است که با رابطه (۸) به دست می‌آید [۲۵].

$$h_i = 2.8 + 3v_i \quad (8)$$

که در آن v_i برای تهویه مناسب گلخانه در اقلیم گرم و خشک به پیشنهاد جکسون و همکاران [۲۶] با توجه به سطح دهانه ورودی هوا، ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد که با یک دمنده ۳۰ وات به ابعاد ۰/۲۵*۰/۲۵ متر مربع امکان تأمین آن وجود دارد. در نهایت بار سرمایشی سامانه با استفاده از رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$Q_c = m_a C_p (\Delta T) \quad (9)$$

که در آن m_a نرخ جریان جرمی هوای ورودی به سامانه (کیلوگرم بر ثانیه) و ΔT اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از سامانه خنک‌کننده (سلسیوس) است.

۴. شبیه‌سازی

فرایند شبیه‌سازی در نرم‌افزار TRNSYS سه قسمت اصلی گروه‌بندی و تقسیم می‌شود:

۴-۱. داده‌های آب و هوایی

برای داده‌های آب و هوایی می‌توان از کتابخانه استاندارد نرم‌افزار استفاده کرد. کتابخانه استاندارد، شامل حدود ۱۵۰ مدل مختلف

برای مدل‌سازی و استخراج داده از نرم‌افزار ترنسیس (TRNSYS) استفاده شد. این نرم‌افزار، قابلیت شبیه‌سازی رفتار حرارتی گلخانه و مدل سرمایشی مدنظر را داشت. نرم‌افزار ترنسیس برای طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف مکانیکی، برقی و در یک کلمه، تأسیسات ساختمان استفاده می‌شود. هدف اصلی این نرم‌افزار، طراحی تأسیسات مکانیکی ساختمان با تمرکز بر روی سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) می‌باشد. این ابزار توسط آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه ویسکنسین آمریکا ارائه شده است. نکته قابل ملاحظه در این نرم‌افزار، باز بودن کدهای آن است، به‌طوری‌که کاربر می‌تواند سامانه مورد نظر خودش را آن‌گونه که نیاز هست گسترش دهد. در این نرم‌افزار، پارامترهای ورودی، متناسب با گلخانه و کارکرد سامانه، به هر یک از اجزاء داده شد. نرم‌افزار با انجام اعمال ریاضی بر روی پارامترها، بر اساس روابط از قبل تعریف‌شده، ورودی و خروجی‌ها را به دو صورت گرافیکی و عددی نمایش داد.

۳-۳-۱. روابط

کاهش دمای هوا هنگام عبور از پوشال خیس‌شده با رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۴].

$$T_i = T_a - \eta(T_a - T_{wb}) \quad (1)$$

در این رابطه η بازده خنک‌کننده تبخیری، T_a و T_{wb} به ترتیب دمای حباب خشک و تر هوای محیط ($^{\circ}C$) هستند و T_t دمای هوا را بعد از عبور از پدها ($^{\circ}C$) مشخص می‌کند. بازده پد به ضخامت لایه آن (dp) بر حسب سانتی‌متر و سرعت هوای عبور از پد (v_i) بر حسب متر بر ثانیه بستگی دارد که با توجه به معادله‌های ۲ تا ۴ قابل محاسبه است [۲۴].

$$\eta = f(v_i) + L(d_p) \quad (2)$$

$$f(v_i) = -0.02325v_i + 0.899$$

$$v_i < 1 \text{ m/s}$$

$$f(v_i) = -0.04525v_i^4 + 0.26v_i^3 - 0.635v_i^2 + 0.57774v_i + 0.714$$

$$v_i < 1 \text{ m/s}$$

(3)

در سال‌های اخیر ایران را نشان می‌دهد [۲۷]. تأمین بخشی از بار سرمایشی گلخانه به وسیله سامانه پیشنهادی، منجر به کاهش فعالیت سامانه مرسوم و در نتیجه کاهش مصرف برق شد. کاهش مصرف برق، کاهش مصرف انرژی و همچنین کاهش تولید و انتشار آلاینده‌ها را به دنبال دارد. با استفاده از جدول ۲ و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آثار زیست‌محیطی بهره‌مندی هر مترمربع گلخانه به سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده محاسبه و برآورد گردید.

جدول ۲: مقدار آلاینده منتشر شده به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی (گرم بر کیلووات ساعت) [۲۷].

SP M	CH	CO	CO 2	SOx	NO x
۰.۸	۱۰۲۴	۱۰۰۱	۵۹/۳	۱۹۰۶	۱۹۰۶
۱/۸	۰	۰	۸	۰	۰

لازم به ذکر است با توجه به تلفات انرژی از نیروگاه‌ها تا مصرف‌کننده (۹)، میانگین ۹/۹۹ درصد تلفات انرژی در محاسبات لحاظ گردید.

۶. تحلیل اقتصادی

۶-۱. هزینه ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای

از جمله مهمترین آثار کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای در طول دوره بهره‌برداری است. هزینه انتشار آلاینده‌ها در گروه هزینه‌های ملموس، ولی غیر قابل اندازه‌گیری دسته‌بندی می‌گردد. علت چالش‌برانگیز بودن محاسبه هزینه کربن پیچیدگی فرایند ارزش‌گذاری بر روی کالاهای زیست‌محیطی به دلیل دشواری محاسبه قیمت واقعی آن‌ها است [۲۸]. هزینه ناشی از انتشار هر کدام از گازهای گلخانه‌ای بر اساس مطالعات قبلی و نرخ ارز خردادماه سال ۱۴۰۱ در (جدول شماره ۳) آورده شده‌است [۲۹].

از پمپ‌ها، تجهیزات تهویه مطبوع، تبدیل‌های حرارتی، رطوبت-گیرها، توربین‌های بادی، فن‌ها، شیرآلات، پردازش‌کننده‌های اطلاعات مربوط به آب و هوا، تجهیزات مربوط به سامانه‌های گرمایش و تهویه مطبوع است. برای انتخاب مناطق جغرافیایی که به صورت پیش فرض، اطلاعات آن‌ها در کتاب خانه نرم افزار نیست هم می‌توان اطلاعات مورد نیاز را دریافت و به نرم‌افزار ترنسیس الحاق کرد.

۴-۲. مدل ساختمان گلخانه و بار سرمایشی آن

برای مدل کردن ساختمان گلخانه و رفتار حرارتی آن، ابتدا طرح ۳ بعدی ساختمان گلخانه مطابق با نمونه اصلی (شکل شماره ۱) به-وسیله نرم‌افزار اسکچ آپ (Sketch Up) رسم و به نرم‌افزار ترنسیس الحاق گردید. بر اساس (جدول شماره ۱) جنس مصالح، ضخامت، مشخصات حرارتی قسمت‌های مختلف ساختمان گلخانه به نرم‌افزار داده شد (جدول شماره ۱). همچنین امکان تنظیم و ورود اطلاعات بار سرمایشی، بار گرمایشی، تهویه هوا، شرایط آسایش، تلفات حرارتی و ... وجود دارد.

۴-۳. مدل سرمایشی

دو سامانه سرمایشی برای خنک‌سازی گلخانه در نظر گرفته شد؛ نخست سامانه سرمایشی پیش‌فرض نرم‌افزار است که در قسمت تنظیمات ساختمان (Edit Building) با نام خنک‌کننده (Cooling) برای خنک‌سازی گلخانه اعمال شد. در قسمت دوم، سامانه سرمایشی پیشنهادی به کمک کامپاننت‌های موجود در کتابخانه و همچنین ورود معادله‌های حرارتی سامانه از قسمت معادله‌ها (Equation) در نرم‌افزار شبیه‌سازی، و بار برودتی آن به فضای گلخانه اضافه گردید. با اضافه‌شدن بار برودتی سامانه مدنظر، مقداری از بار سرمایشی سامانه خنک‌کننده اول کاسته شد. با کاهش کار سامانه پیش فرض که می‌تواند یک سامانه فن و پد یا کولر آبی و یا حتی یک سامانه سیکل تبریدی باشد، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید انرژی رخ می‌دهد.

۵. تحلیل زیست‌محیطی

در ازای تولید و انتقال هر کیلووات ساعت برق، آلاینده‌های زیست-محیطی تولید و در جو زمین منتشر می‌شود. جدول شماره ۳ مقدار متوسط آلاینده‌های منتشر شده برای تولید هر کیلووات ساعت برق

جدول ۳: هزینه‌های اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای واحد انتشار آلاینده-سال ۱۴۰۱ (ریال بر کیلوگرم)

نوع آلاینده	NO _x	SO _x	CO _۲	CO	CH	SPM
هزینه انتشار سال ۱۴۰۱	۶۸۴,۰۰۰	۲,۰۸۰,۰۰۰	۱۱,۴۰۰	۲۱۳,۷۵۰	۲۳۹,۴۰۰	۴,۹۰۲,۰۰۰

۲-۶. بازگشت سرمایه

در نهایت، پس از ارزیابی آثار اقتصادی ناشی از کاهش میزان مصرف انرژی و همچنین هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، مناسب خواهد بود تا با توجه به هزینه انجام تعبیه سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده، صرفه-جویی‌های انجام شده و همچنین کاهش ارزش سرمایه، دوره بازگشت سرمایه پروژه ارزیابی گردد. این امر با استفاده از رابطه ۱۰ قابل تحقق است.

$$DPP = \frac{\ln \left(1 - \frac{\text{مقدار سرمایه گذاری} * \text{نرخ تنزیل}}{\text{جریان نقدی هر سال}} \right)}{\ln(1 + \text{نرخ تنزیل})} \quad (10)$$

که در آن DPP دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده، نرخ تنزیل سالیانه در ایران حدود ۱۰ الی ۱۶ درصد و جریان نقدی هر سال همان صرفه‌جویی یا کاهش هزینه انجام شده می‌باشد.

۲-۶-۱. هزینه ساخت و اجرای سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده

هزینه ساخت دستگاه مورد نظر بر اساس نرخ کالا در تابستان ۱۴۰۱، ۸۷,۵۰۰,۰۰۰ ریال برآورد گردید. این سامانه برای یک گلخانه به مساحت ۱۰ مترمربع در نظر گرفته شده است. لذا برای گسترش و تعمیم هزینه برای مجموعه‌های بزرگ‌تر می‌توان از هزینه ساخت به ازای هر متر مربع بهره یافت.

۷. نتایج و بحث

ابتدا عمل شبیه‌سازی برای شهر کرمان انجام شد. پارامترهای اولیه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی از قبیل دمای محیط، دمای گلخانه با و بدون سامانه سرمایشی، توان مورد نیاز سامانه سرمایشی اولیه در حالت عادی و پس از اضافه شدن سامانه خنک‌کننده تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده، رطوبت نسبی هوا، شدت تابش و ... به

صورت عددی و گرافیکی در بازه‌های زمانی یک ساعته از ابتدای فروردین ماه تا انتهای شهریور استخراج و تحلیل شدند. نتایج این بخش در قالب یک روز برای هر ماه از دوره بررسی نشان داده شد. اطلاعات روز در نظر گرفته شده از میانگین‌گیری داده‌ها در طول ماه به ازای هر ساعت به دست آمد. سپس با توجه به داده‌های موجود، نتایج حاصل از کاهش مصرف انرژی، شامل: کاهش برق مصرفی سامانه سرمایشی، کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و همچنین کاهش هزینه‌های ناشی از این موارد به ازای هر مترمربع گلخانه بررسی و محاسبه شد. بعد از محاسبه هزینه‌های کاهش یافته و مقایسه آن با هزینه ساخت دستگاه پیشنهادی برای طرح، دوره بازگشت سرمایه محاسبه گردید. در گام دوم با کمک شبیه‌سازی، عملکرد سامانه در چند شهر مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفت.

۷-۱. شرایط محیطی و دمای گلخانه

نتایج اولیه شبیه‌سازی نشان داد دمای داخلی گلخانه بدون وجود سامانه‌های سرمایشی و تحت تأثیر عوامل گلخانه‌ای و تابش و گذر نور خورشید از جداره‌های شفاف گلخانه در طول روز، به طور معمول بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس و در برخی مواقع از ماه‌های خرداد و تیر تا ۱۸ درجه سلسیوس از دمای محیط بیشتر خواهد شد (شکل شماره ۳).

بیش‌ترین دمای مشاهده شده در شبیه‌سازی گلخانه، ۵۳ درجه سلسیوس در خرداد و تیرماه بود، در حالی که دمای متناظر محیط بین ۳۵ تا ۳۷ درجه سلسیوس بود. شکل ۳ نشان‌دهنده تغییرات دمای محیط و داخل گلخانه و تغییرات شدت تابش خورشید در یک روز از مرداد است. در تحقیقی که بر روی همین گلخانه انجام شد، نتایج بررسی به دو شیوه تجربی و تئوری، دمای داخل گلخانه را در گرم‌ترین شرایط ۵۳ و ۴۷ درجه سلسیوس نشان داد [۲۱].

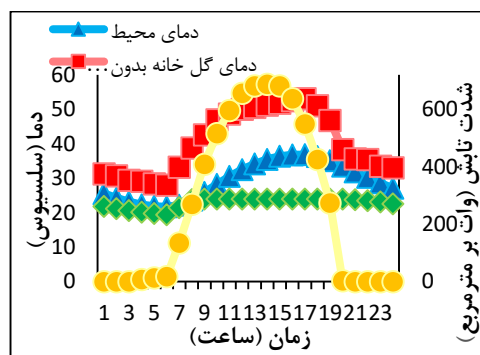
سامانه سرمایشی ترکیبی در نظر گرفته شده برای سرمایش گلخانه، توانایی خنک نگه داشتن دمای داخلی را تا ۱۳ درجه سلسیوس خنک‌تر از دمای محیط بیرون در گرم‌ترین ساعت‌های ظهر تابستان

محاسبه و برآورد گردید. با توجه به افزایش دمای داخلی گلخانه تا ۵۳ درجه سلسیوس، حداکثر بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک‌سازی گلخانه از محاسبات نرم‌افزار شبیه‌ساز ۹/۵ کیلووات ساعت برآورد شد.

۷-۳. بار سرمایشی سامانه تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده

با تعبیه و مدل‌سازی سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده و اضافه کردن آن، شبیه‌سازی انجام شده. نتایج نشان داد این سامانه قادر به تولید ۱/۵ کیلووات ساعت بار سرمایشی می‌باشد. مقدار محاسبه شده، توان تأمین بار سرمایشی مورد نیاز گلخانه را در ابتدا و انتهای ساعات شبانه‌روز به طور کامل دارد، اما با افزایش شدت تابش در طول روز و بالا رفتن دمای گلخانه و محیط، سهم این سامانه در خنک‌سازی گلخانه کاهش می‌یابد. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، بار سرمایشی ایجاد شده به وسیله سامانه مدنظر در ماه‌های بهار و تابستان به صورت میانگینی از ساعات شبانه روز برای هر ماه را نشان می‌دهد. عدم تأمین بار سرمایشی حداکثری تا سقف ۱/۵ کیلووات ساعت به وسیله سامانه مورد بررسی به علت عدم نیاز گلخانه به بار سرمایشی بیشتر در این ساعات می‌باشد و بار سرمایشی نشان داده شده در این محدوده زمانی، برابر با بار سرمایش مورد نیاز گلخانه بوده و در محدوده زمانی‌ای که بار سرمایشی مورد نیاز گلخانه بیش از توان تأمین سرما به وسیله سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده می‌شود، سامانه سرمایشی مرسوم شروع به تأمین بار سرمایشی می‌کند.

که میانگین بیشینه دما به ۳۷ درجه سلسیوس می‌رسد را دارد که در مقایسه با سامانه فن و پد استفاده شده به وسیله کیتاس و همکاران، خنک‌سازی بیش‌تری انجام داده است. در این تحقیق، سامانه فن و پد توانسته بود دمای داخل گلخانه را ۱۰ درجه سلسیوس خنک‌تر از دمای محیط بیرون نگه دارد [۱۲]. در شبیه‌سازی کانال خنک‌کننده تبخیری، اقتداری و همکاری‌ها برای سرمایش ساختمان هم عملکرد بالاتری وجود نداشت. سامانه آن‌ها توانست دمای هوا را به طور متوسط ۱۰ درجه سلسیوس کاهش دهد.

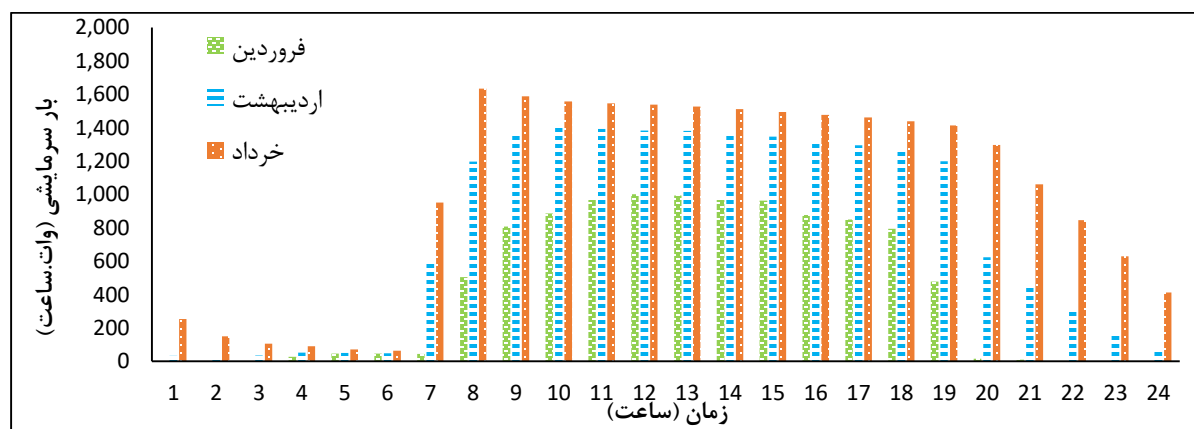


شکل ۳: شرایط محیطی و دمای گلخانه

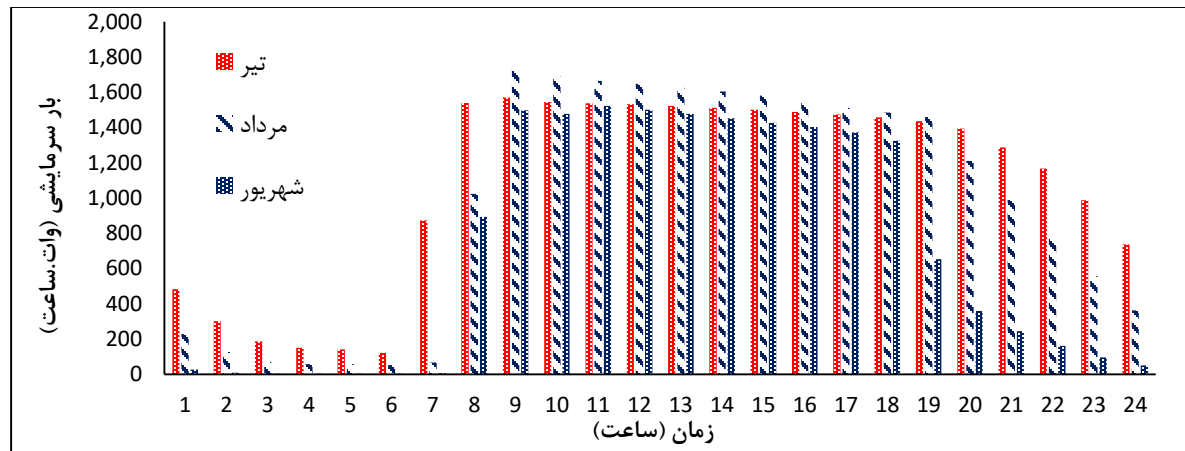
در ماه تیر.

۷-۲. بار سرمایشی مورد نیاز گلخانه

با اعمال پارامترهای اولیه شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مشخص، بار سرمایشی مورد نیاز گلخانه برای خنک‌سازی تا محدوده دمایی ۲۴ درجه سلسیوس که دمای مطلوب کشت صیفی‌جات گلخانه‌ای می‌باشد، به صورت ماهیانه و در بازه‌های زمانی یک ساعته در طول روز،



شکل ۴ (الف): بار سرمایشی ایجاد شده به وسیله سامانه تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در بهار.

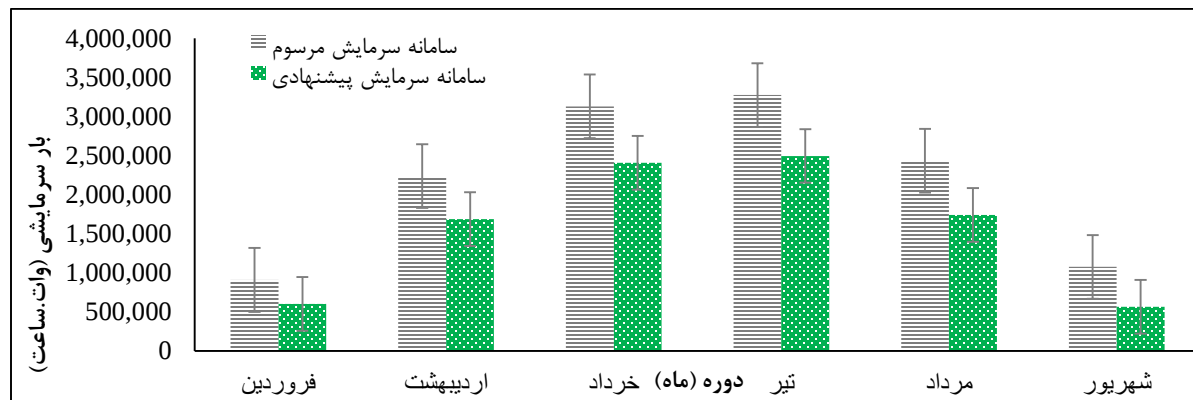


شکل ۴ (ب): بار سرمایشی ایجاد شده به وسیله سامانه تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده در تابستان.

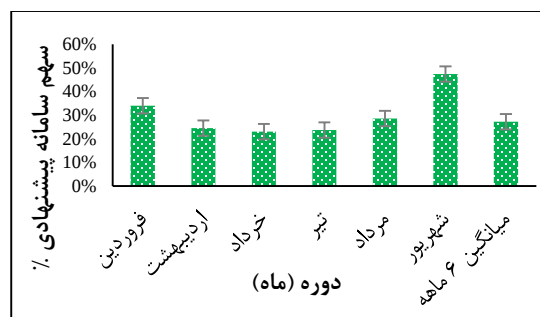
۴-۷. مصرف ماهیانه انرژی

نهایی برای خنک سازی گلخانه می شود. در این حالت، بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک سازی گلخانه از فروردین تا شهریور به ترتیب ۵۹۹، ۱۶۸۶، ۲۴۰۶، ۲۴۹۰، ۱۷۳۸ و ۵۶۴ کیلووات ساعت به وسیله نرم افزار محاسبه و برآورد شد. نتایج آزمون T مستقل برای میانگین داده های حاصل از شبیه سازی نشان داد بار سرمایشی مورد نیاز در حالت اول ($2281/6 \pm 36/8$) بیش تر از بار سرمایشی در حالت دوم ($31/1 \pm$) است، $t(370) = 12/374$ ، $P > 0/001$ (شکل شماره ۵) انرژی مورد نیاز ماهیانه برای سرمایش گلخانه با سامانه های سرمایشی مرسوم در مقایسه با انرژی مورد نیاز برای سرمایش گلخانه در هنگام تعبیه سامانه سرمایشی تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده را نشان می دهد.

مصرف ماهیانه انرژی مورد نیاز برای خنک سازی گلخانه در دو حالت، مدل و شبیه سازی شد. در حالت اول، یک سامانه سرمایشی مرسوم (فن و پد) عمل خنک سازی را انجام می دهد، بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک سازی گلخانه در این حالت برای ماه های مورد ارزیابی (فروردین تا شهریور) به ترتیب برابر با ۹۰۸، ۲۲۳۷، ۳۱۲۹، ۳۲۷۴، ۲۴۳۲ و ۱۰۷۴ کیلووات ساعت محاسبه و برآورد شد. برای حالت دوم، سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده که مصرف انرژی خیلی کمتری (۳۰ وات در مقابل ۱۱۰۰ وات) نسب به سامانه های سرمایشی مرسوم دارد، به خنک سازی گلخانه کمک می کند و منجر به کاهش مصرف انرژی



شکل ۵: انرژی ماهیانه مورد نیاز برای سرمایش گلخانه به وسیله سامانه های سرمایشی مرسوم در مقایسه با انرژی مورد نیاز برای سرمایش گلخانه در هنگام تعبیه سامانه سرمایش پیشنهادی.



شکل ۶: سهم سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در خنک‌سازی گلخانه.

۶-۷. کاهش مصرف برق

انرژی مصرف شده در سامانه سرمایش مرسوم برای تولید بار سرمایشی مورد نیاز گلخانه به وسیله برق تأمین می‌شود، از این رو، کاهش مصرف انرژی، کاهش مصرف برق را در پی دارد. بیش‌ترین مقدار صرفه‌جویی در مصرف برق، مربوط به تیرماه با $62/3$ کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع مساحت گلخانه و کم‌ترین مقدار آن مربوط به فروردین ماه با $24/7$ کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع گلخانه می‌باشد. مجموع صرفه‌جویی انجام شده به ازای هر مترمربع گلخانه در یک دوره بهره‌وری ۶ ماهه بیش از 285 کیلووات ساعت محاسبه شد.

۵-۷. سهم سامانه تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در تأمین انرژی گلخانه

با توجه به کاهش مصرف انرژی در سامانه سرمایشی مرسوم، می‌توان سهم سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده را در خنک‌سازی گلخانه مطابق (شکل شماره ۶) نشان داد، که به ترتیب از فروردین تا شهریورماه برابر با $25, 23, 24, 29$ و 47 درصد می‌باشد. بیش‌ترین سهم خنک‌سازی سامانه مذکور در شهریور ماه 47 درصد و کمترین آن مربوط به مردادماه 23 درصد بود. سهم سامانه مدنظر برای خنک‌سازی به طور میانگین برای ۶ ماه مورد ارزیابی $27/3$ درصد محاسبه و برآورد شد که در مقایسه با سامانه ی ذخیره ساز انرژی حرارتی توانسته بود با ذخیره انرژی گل خانه، مصرف انرژی را به مقدار 20 تا 30 درصد کاهش دهد [۳۰]. در پژوهش دیگری هم بر روی ادغام یک سامانه تجدیدپذیر خورشیدی با سامانه سوخت مرسوم به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز یک استخر شنا در شهر کرمان با نرم افزار TRANSYS انجام شد، نتایج بیانگر صرفه جویی 24 تا 30 درصد بود.

جدول ۴: کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در اثر کاهش مصرف برق سامانه سرمایشی مرسوم به ازای هر مترمربع گلخانه

دوره	SPM	CH	CO	CO ₂	SOx	NOx	مجموع آلاینده‌ها (گرم)
فروردین	۲/۴	۰/۷	۰/۰۳	۱۶۲۳۴/۱	۲۴/۶	۲۴/۶	۱۶۲۸۶/۴
اردیبهشت	۴/۳	۱/۲	۰/۰۵	۲۸۹۷۴/۹	۴۳/۹	۴۳/۹	۲۹۰۶۸/۱
خرداد	۵/۶	۱/۵	۰/۰۶	۳۸۰۷۴/۸	۵۷/۷	۵۷/۷	۳۸۱۹۷/۳
تیر	۶/۰	۱/۶	۰/۰۷	۴۱۰۰۳/۰	۶۲/۱	۶۲/۱	۴۱۱۳۴/۹
مرداد	۵/۴	۱/۵	۰/۰۶	۳۶۵۵۲/۲	۵۵/۴	۵۵/۴	۳۶۶۶۹/۸
شهریور	۳/۹	۱/۱	۰/۰۴	۲۶۸۲۴/۵	۴۰/۶	۴۰/۶	۲۶۹۱۰/۸
دوره ۶ ماهه	۲۷/۶	۷/۵	۰/۳۱	۱۸۷۶۶۳/۵	۲۸۴/۲	۲۸۴/۲	۱۸۸۲۶۷/۳

۷-۷. کاهش انتشار آلاینده‌ها

$187633/5$ ، $31/0$ و $7/5$ گرم بر مترمربع می‌باشد. هر کدام از این آلاینده‌ها هزینه‌هایی را به علت انتشار در محیط زیست بسته به نوع، مقدار و تخریب‌رسان بودن آن‌ها دارد. در نهایت، مجموع آلاینده‌هایی که از تولید و انتشار آن‌ها با بهره‌مندی از سامانه پیشنهادی در یک دوره ۶ ماهه بهره‌وری به عمل می‌آید $188/3$ کیلوگرم بر مترمربع محاسبه و برآورد شد.

مقدار آلاینده‌های زیست‌محیطی که در اثر کاهش مصرف برق از تولید و انتشار آن‌ها جلوگیری به عمل آمده است، به ازای هر مترمربع از مساحت گلخانه در جدول شماره ۴ آورده شده است. این مقادیر برای یک دوره ۶ ماهه بهره‌وری از گلخانه برای CH, CO, CO_2, SOx, NOx و SPM (ذرات معلق در هوا) به ترتیب برابر با $284/2, 284/2, 284/2, 284/2, 284/2$ و $284/2$ است.

۷-۸. کاهش هزینه ناشی از عدم انتشار آلاینده‌ها

هزینه‌های کاهش یافته به علت کاهش انتشار آلاینده‌های زیست-محیطی به ازای هر مترمربع گلخانه در جدول ۵ محاسبه و درج شده است. Co2 با توجه به بیش‌ترین مقدار وزنی که در بین آلاینده‌ها دارد (۹۹/۷ درصد)، بیش‌ترین سهم هزینه‌ای را نیز به خود اختصاص می‌دهد (۶۹/۸ درصد). ترکیبات گوگرددار علی‌رغم سهم وزنی یکسانی که با

ترکیبات نیتروژن‌دار دارد، اما هزینه‌ای بیش از ۳ برابر را در بر می‌گیرد. ذرات معلق در هوا نیز از لحاظ وزنی ۱۰ درصد ترکیبات نیتروژن است اما از لحاظ هزینه‌ها وزن یکسانی دارد. در نهایت، هزینه‌های کاهش یافته در اثر کاهش تولید و انتشار آلاینده‌ها به ازای هر مترمربع مساحت گلخانه حدود ۳,۰۶۰,۰۰۰ ریال (تابستان ۱۴۰۱) محاسبه و برآورد شد.

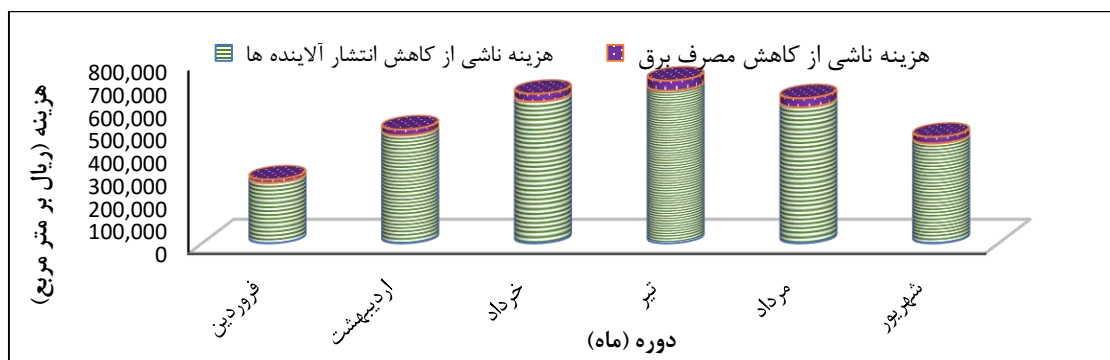
جدول ۵: کاهش هزینه‌های ناشی از عدم انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به ازای هر مترمربع گلخانه

دوره	SPM	CH	CO	CO2	SOx	NOx	مجموع آلاینده‌ها (ریال)
فروردین	۱۱,۷۰۵	۱۵۶	۶	۱۸۵,۰۶۹	۵۱,۱۳۳	۱۶,۸۱۵	۲۶۴,۸۸۴
اردیبهشت	۲۰,۸۹۱	۲۷۸	۱۰	۳۳۰,۳۱۳	۹۱,۲۶۳	۳۰,۰۱۱	۴۷۲,۷۶۷
خرداد	۲۷,۴۵۲	۳۶۶	۱۴	۴۳۴,۰۵۳	۱۱۹,۹۲۵	۳۹,۴۳۷	۶۲۱,۲۴۶
تیر	۳۹,۵۶۳	۳۹۴	۱۵	۴۶۷,۴۳۴	۱۲۹,۱۴۸	۴۲,۴۷۰	۶۶۹,۰۲۴
مرداد	۲۶,۳۵۴	۳۵۱	۱۳	۴۱۶,۶۹۵	۱۱۵,۱۲۹	۳۷,۸۶۰	۵۹۶,۴۰۳
شهریور	۱۹,۳۴۱	۲۵۸	۱۰	۳۰۵,۷۹۹	۸۴,۴۹۰	۲۷,۷۸۴	۴۳۷,۶۸۰
دوره ۶ ماهه	۱۳۵,۳۰۶	۱,۸۰۲	۶۷	۲,۱۳۹,۳۶۴	۵۹۱,۰۸۸	۱۹۴,۳۷۷	۳,۰۶۲,۰۰۴

۷-۹. کاهش هزینه ناشی از صرفه‌جویی در مصرف برق

علاوه بر هزینه‌هایی که به علت کاهش تولید و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی کاهش می‌یابند، کاهش برق مصرفی نیز منجر به صرفه‌جویی و کاهش در هزینه‌ها می‌شود. با توجه به جدول شماره ۴ در خصوص آخرین تعرفه برق ابلاغ شده، هزینه مصرف برق برای یک دوره بهره‌وری ۶ ماهه از فروردین تا شهریور به ازای هر مترمربع مساحت گلخانه ۱۸۸,۵۵۳ ریال کاهش خواهد یافت.

۷-۱۰. هزینه‌های کاهش یافته



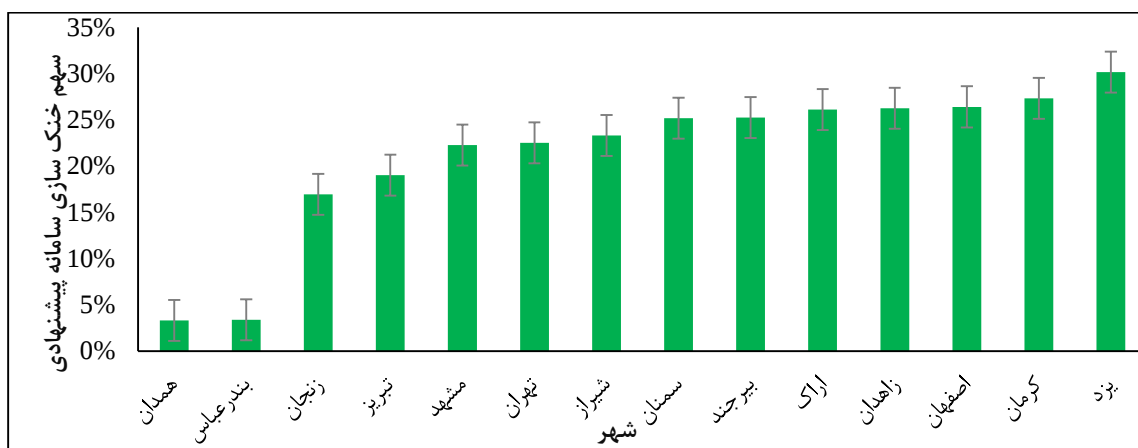
شکل ۷: هزینه‌های کاهش یافته در اثر استفاده از سامانه سرمایه‌گذاری تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده برای سرمایه‌گذاری یک مترمربع گلخانه.

۱۱-۷. بازگشت سرمایه

با توجه به هزینه‌های ساخت سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده و تجهیز گلخانه به آن (۸,۷۵۰,۰۰۰ ریال برای هر مترمربع) و همچنین صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌های ناشی از سرمایش گلخانه (۳,۲۵۰,۰۰۰ ریال برای هر مترمربع) و شاخص‌های آماری تابستان ۱۴۰۱، دوره بازگشت سرمایه بهره‌مندی از سامانه پیشنهادی ۳/۷ سال برآورد گردید.

۱۲-۷. کارایی سامانه در سایر شهرها

بررسی نتایج شبیه‌سازی عملکرد سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در چند شهر دیگر و مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد



شکل ۸: سهم خنک‌سازی سامان Z، سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده برای سرمایش گلخانه در شهرهای مختلف ایران.

منابع

[۵]. د. مؤمنی، م. رحمتی، "ارزیابی اثرات کنترل دما و رطوبت در تولید خیار گلخانه ای در منطقه جیرفت و کهنوج"، ماشین‌های کشاورزی، دوره ۲، شماره ۱، ۲۰۱۲، doi: 10.22067/jam.v2i1.14292.

[6]. A. Lee Wilkins, "Retrofitting existing commercial buildings in the desert southwest to be energy efficient," Jan, 2010, doi: https://doi.org/10.34917/1563779.

[۷]. بی‌نا، "ترازنامه انرژی ایران، دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی"، معاونت برق و انرژی، ترازنامه انرژی، ۱۳۹۸.

[8]. J. D. Palmer, C. PE, "Evaporative cooling design guidelines manual," JD Palmer, PE, CEM—United States Department of Energy, 2002.

[9]. P. M. Cuce, S. Riffat, "A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 54, pp. 1240–1249, Feb, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.066.

[۱]. م. امید، ا. شفاپی، "کنترل کامپیوتری شرایط محیطی گلخانه: قسمت اول- طراحی و پیاده‌سازی سیستم"، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، دوره ۶، شماره ۲۳، ص. ۱-۲۰، ۱۳۸۴.

[2]. A. Al-Nasser, N. R. Bhat, "Protected agriculture in the State of Kuwait," Jan. 1998.

[3]. P. Rorabaugh, M. Jensen, G. Giacomelli, "Introduction to controlled environment agriculture and hydroponics," Control. Environ. Agric, Cent, pp. 1-130, 2002.

[4]. A. S. Anifantis, A. Colantoni, S. Pascuzzi, "Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating," Renewable Energy, vol. 103, pp. 115–127, Apr, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.031.

- [22].M. N. Bahadori, A. Dehghani-Sanij, A. Sayigh, "Wind Towers. Springer International Pu," 2016.
- [23].K. Yavarinasab, E. A. Mirkhalili, "Investigation the wind catchers of residential houses in Yazd Province , Iran," 2013.
- [24].M. Ghariblou, "Assessment of the Empirical relations for the pressure and drytemperature drops in water coolers (Doctoral dissertation, School of Mechanical Engineering," Sharif University of Technology), 1991.
- [25].A. Handbook, "American Society of Heating. Refrigerating and Air Conditioning Engineers," Atlanta, 2005.
- [26].H. A. Jackson, D. E. Darby, "Greenhouse ventilation. Canada Plan Service," M-6704, 9, 2000.
- [۲۷]. بی‌نا، "آمار صنعت برق ایران، شرکت مادر تخصصی توانیر"، معاونت تحقیقات و منابع انسانی، ۱۳۹۷.
- [۲۸]. غ. هروی، م. رستمی، م. شکاری، "ارزیابی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های مدیریت هوشمند سرمایش و گرمایش در ساختمان: مطالعه موردی ساختمان اداری در شهر تهران"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۲، ص. ۶۰۷-۶۲۶. ۲۰۲۰. doi: <https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16361.6200>.
- [۲۹]. ف. خداداد کاشی، م. اکابری تفتی، ی. موسوی جهرمی، ع. خسروی‌نژاد، "محاسبه هزینه اجتماعی انتشار دیاکسیدکربن به تفکیک استان‌های مختلف در ایران"، مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، دوره ۲، شماره ۲، ص. ۷۷-۱۱۰، ۲۰۱۶.
- [30].H. Ö. Paksoy, B. Beyhan, "Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology," *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, pp. 533-548, 2015. doi: <https://doi.org/10.1533/9781782420965.4.533>.
- [10].V. P. Sethi, S. K. Sharma, "Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications," *Solar Energy*, vol. 81, no. 12, pp. 1447-1459, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.004>.
- [۱۱]. ص. صادقی، ق. زارعی، س. ن. ا. مرتضوی، "ارزیابی کارایی سیستم سرمایش فن و پد گلخانه‌ای در منطقه محلات"، ۱۳۹۲.
- [12].C. Kittas, Th. Bartzanas, A. Jaffrin, "GREENHOUSE EVAPORATIVE COOLING: MEASUREMENT AND DATA ANALYSIS," *Acta Horticulturae*, no. 534, pp. 67-74, 2000, doi: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2000.534.6>.
- [13].M. Mahmoudi Zarandi, "Analysis on Iranian Wind Catcher and Its Effect on Natural Ventilation as a Solution towards Sustainable Architecture(Case Study: Yazd)," 2009, doi: 10.5281/zenodo.1077649.
- [14].M. Taleghani, Kamyar Tolou Behboud, S. Heidari, "ENERGY EFFICIENT ARCHITECTURAL DESIGN STRATEGIES IN HOT-DRY AREA OF IRAN: KASHAN," vol. 15, no. 2, pp. 85-91, 2010.
- [15].M. K. Pymnia, "Acquaintance with Iran Islamic Architecture," Tehran: Tehran University, 1981.
- [16].M. Dehnavi, M. H. Ghadiri, H. Mohammadi, M. H. Ghadiri, "Study of wind catchers with square plan: influence of physical parameters," *Int J Modern Engineering Resarch*, Vol. 2, no. 1, pp. 59-64, 2012.
- [17].S. Khani, M. Bahadori, A. Dehghani-Sanij, and A. Nourbakhsh, "Performance Evaluation of a Modular Design of Wind Tower with Wetted Surfaces," *Energies*, vol. 10, no. 7, pp. 845, 2017. doi: <https://doi.org/10.3390/en10070845>.
- [18].V. Kalantar, "Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 246-254, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.007>.
- [19].A. H. Poshtiri, S. M. Mohabbati, "Performance analysis of wind catcher integrated with shower cooling system to meet thermal comfort conditions in buildings," *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 452-466, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.160>.
- [20].A. Noroozi, J. VenerisY, "Thermal Assessment of a Novel Combine Evaporative Cooling Wind Catcher," *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 442, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/en11020442>.
- [21].M. H. Shojaei, H. Mortezaipoor, K. Jafarinaeimi, M. M. Maharlooei, "AN ESTIMATION METHOD FOR GREENHOUSE TEMPERATURE UNDER THE INFLUENCE OF EVAPORATIVE COOLING SYSTEM," *Journal of Thermal Engineering*, pp. 918-933, 2021. doi: <https://doi.org/10.18186/thermal.930907>.

Study of using an evaporative cooling system with wetted columns for greenhouse in Iran

Mojtaba Soltaninejad^{1*}, Hamid Mortezapour², Kazem Jafari Naeimi³.

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Department of Biosystems Engineering - Faculty of Engineering - Bozorgmehr University of Qaenat - Qaen- Iran.

3- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Abstract

Greenhouse cultivation and production, despite the reduction of water consumption and high profitability, due to the hot and dry climate of Iran, the energy demand for cooling systems increases. The choice of cooling systems directly affects the amount of energy consumed and the emission of polluting gases. With the aim of reducing energy consumption required for cooling greenhouses, an evaporative cooling system equipped with wetting columns modeled wind tower and solar chimneys was simulated in TRNSYS software for a greenhouse with area of 10 m² and thermal behavior, environmental effects and its economic results were investigated for a period of 6 months in spring and summer. The results show that the cooling load required for cooling the greenhouse in the hottest days of the year is 9.5 kWh. The proposed cooling system was capable of producing 1.5 kWh of cooling load and its cooling share for cooling the greenhouse was calculated and estimated at an average of 27.3%. For each square meter of the greenhouse, in a 6-month period, more than 285 kWh were saved in electricity consumption and the production and release of 188.3 kg of pollutants was prevented. The reduced costs as a result of benefiting from this system brought the investment return period of equipping the greenhouse with the proposed system to 3.7 years. Also, the simulation results showed the better performance of the evaporative cooling system equipped with wetting columns in cities with low relative humidity such as Yazd and Kerman.

Keywords: Evaporative cooling; CO₂ emission; Payback period.