توسعه پایدار و ساختمان هوشمند
https://sdsb.buqaen.ac.ir

جلد ۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳

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

مجتبی سلطانی نژاد*[۱]، حمید مرتضی پور[۱]، کاظم جعفری نعیمی[۱]، مجتبی بهمنی[۲]

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه شهید باهنرکرمان - کرمان - ایران
۲- گروه اقتصاد - دانشکده اقتصاد - دانشگاه شهید باهنرکرمان - کرمان - ایران

**چکیده:**

کشت و تولید گل‌خانه‌ای علی‌رغم کاهش مصرف آب و سودآوری بالایی که دارد، به علت وجود آب و هوای گرم و خشک ایران تقا ضای 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 خورشیدی برای خنک‌سازی یک گل‌خانه به مساحت ۱۰ مترمربع در نرم‌افزار ترنسیس شبیه سازی 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 کیلوات ساعت است. سامانه سرمایشی پیشنهادی قادر به تولید ۱/۵ کیلووات ساعت بار سرمایشی بود و سهم خنک‌سازی آن برای سرمایش گل‌خانه به‌طور میانگین سالانه۲۷/۳ در صد محاسبه و برآورد گردید. به ازای هر مترمربع گل‌خانه در یک دوره ۶ماهه بیش از ۲۸۵ کیلووات ساعت صرفه‌جویی در مصرف برق به‌وجود آمد و از تولید و انتشار ۱۸۸/۳ کیلوگرم انواع آلاینده جلوگیری شد. هزینه های کاهش یافته در نتیجه بهره‌مندی از این سامانه دوره‌ی بازگشت سرمایه‌ی تجهیز گل‌خانه به سامانه‌ی پیشنهادی را به ۳/۷ سال رساند. همچنین نتایج شبیه‌سازی بیان‌گر عمل‌کرد بهتر سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس شونده در شهرهایی با رطوبت نسبی کم مانند یزد و کرمان بود.

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

**واژه‌های کلیدی:**

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

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

Journal of Sustainable Development and Smart Building, vol. ۱, no. ۱
Digital Object Identifier https://doi.org/۱۰,۲۲۰۳٤/sdsb.۱,۱,۹

THIS WORK IS LICENSED UNDER CC BY-NC 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
© 2024 BOZORGMEHR UNIVERSITY OF QAENAT, IRAN

## 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 گل-خانه‌ای منجر به کاهش مصرف آب مصرفی برای رشد و نمو گیاه و محصول می‌شود اما به دلیل آب و هوای گرم و خشک ایران گل‌خانه ها 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 تا۸۵ درصد از هزینه‌ها در یک گل‌خانه به تهویه هوا مربوط می‌شود[۳][۴].

بخش های مرکزی ایران به دلیل دور بودن از منابع آب های 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 می باشد. در فصل گرم، محدوده دمای حباب خشک حدود ۴۹-۴۳ درجه سلسیوس است. در حالی که دمای مطلوب برای شرایط کشت گل خانه ای ۲۴-۲۵ درجه سلسیوس می باشد[۵]. دمای بالا در طول ماه های تابستان تقاضای انرژی برای سامانه های خنک کننده را افزایش می دهد و افزایش مصرف انرژی منجر به تولید و انتشار بیشتر آلاینده های هوا و گازهای گل خانه ای می شود [۶]. رشد تقاضای انرژی نقش کلیدی در روند افزایشی انتشار آلاینده های 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 آلاینده ها نسبت به سال ۲۰۱۵، ۳/۵ درصد رشد داشت[۷]. از این رو استفاده از روش های تهویه مطبوع و خنک سازی بهینه و کم مصرف که از تولید و انتشار آلاینده های 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 می شود [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 می‌کنند.

خنک‌کننده تبخیری با فناوری ساده از قرن‌ها پیش تاکنون به شکل‌های مختلف مانند بادگیرهای سنتی، کولرهای آبی، ایرواشرها و ... هوای خنک مورد نیاز را تأمین‌کرده‌است 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 سامانه-های تبخیری می‌باشند، انجام می‌شود. این سامانه‌ها از باد بزن‌های مکنده و یا دمند هوا که در یک سمت و پدهای سلولزی که در سمت دیگر گل‌خانه نصب می‌شوند تشکیل شده‌اند. عمل‌کرد این سامانه‌ها بدین شکل است که با مکش فن‌ها و جریان هوا قطرات آب پمپاژ شده بر روی پدها به هوا وارد می‌شوند و این ذرات برای بخار شدن گرمای هوا را جذب کرده و در نتیجه باعث خنک شدن جریان هوامی‌شوند شد[۱۰].

در خصوص کارایی سامانه‌ی سرمایشی فن و پد مطالعات زیادی انجام شده‌است. 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 سامانه‌ی 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 سامانه‌ی 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، در 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 گرفته‌بود توسط کیتاس و همکاران [۱۲] مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، موفق شدند دمای گل‌خانه را در حدود ۱۰ درجه سلسیوس خنک‌تر از محیط بیرون با کارایی ۸۰ درصد حفظ کنند.

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 ساختمان ها برافراشته شده‌اند. بادگیرها به طور معمول در اکثر مناطق گرم و خشک یا مرطوب ساخته می‌شوند [۱۳][۱۴]. بادگیر به عنوان یک سامانه‌ی 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 می‌شوند. 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 کرده‌است در نظر گرفته می‌شود [۱۶][۱۷]. تحقیقی که بر روی عمل‌کرد یک بادگیر با سامانه‌ی پاشش آب بر بالای آن در مناطق کویری توسط کلانتر [۱۸] به صورت تجربی و عددی انجام شد، نشان دهنده‌ی 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. پشتیری 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 نشان‌داد که اگرچه سامانه‌ی 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 شده‌است. اما هنوز یک مطالعه جامع و کاربردی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی جهت استفاده از سامانه‌های سرمایش تبخیری به‌خصوص بادگیرهایی که به سامانه‌ی تبخیری مجهز شده‌باشند و برای خنک‌سازی گل‌خانه‌های مناطق گرم و کویری ایران استفاده شوند، انجام نشده‌است. لذا در این تحقیق سامانه‌ی 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 گرفته‌شد 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 شبیه سازی سامانه ی سرمایشی مورد نظر و بررسی کارایی آن از مدل گل خانه‌ای 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 ی سرمایش تبخیری فن و پد برای سرمایش این

گل خانه استفاده کردند. نتایج نشان داد سامانه ی فن و پد استفاده شده توانست در بازه ای از زمان آزمایش، دمای گل خانه را تا ۲۰/۶ درجه سلسیوس خنک کند. برای شبیه سازی، ابعاد این گلخانه ۵ متر طول، ۲ متر عرض، با ارتفاع کمینه ۱/۵ متر در جنوب و بیشینه ۲/۷۵ متر در شمال در نظر گرفته شد. ساختار گل خانه از یک قاب فولادی (لوله مستطیلی با سطح مقطع ۴×۴ سانتی متر) تشکیل شده که با ورق پلی کربنات شفاف به ضخامت ۱۰ میلی متر( دو لایه ۲ میلی متری از پلی‌کربنات و یک لایه ۶ میلی متری از هوا مابین دولایه پلی کربنات) پوشانده شده بود. گل خانه از سمت شمال در مجاورت یک ساختمان با مصالح آجری قرار داشت ( شکل شماره ۱). از این رو در محاسبات انتقال حرارات، داده های دیوار شمالی گل خانه برابر دیوار ساختمان آجری در نظر گرفته شد. در (جدول شماره ۱) مشخصات و اطلاعات استفاده شده برای گل خانه درج شده است.

شکل ۱: تصویر گلخانه مدل شده در نرم افزار

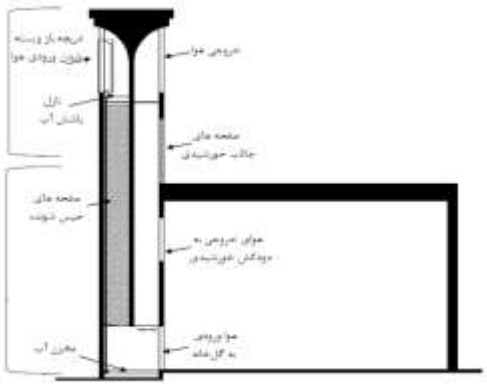
**جدول ۱: مشخصات و اطلاعات فنی ساختمان گلخانه استفاده شده در تحقیق**

| | مساحت | ضخامت | ضریب هدایت حرارتی (kJ/hr.m2.K) | ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kg).K | چگالی (kg/m۳) |
|---|---|---|---|---|---|
| دیوار جنوبی | ۷/۵ | /۰۱ ۰ | ۰/۹۴ | ۱/۰۱۲ | ۱/۲۲۵ |
| دیوار شمالی | ۱/۷۵ ۳ | ۰/۳ | ۳/۲ | ۸/۳ | ۱۵۰۰ |
| دیوارهای جانبی | ۴/۲۵ ۲* | /۰۱ ۰ | ۰/۹۴ | ۱/۰۱۲ | ۱/۲۲۵ |
| سقف | ۱۱/۸ | /۰۱ ۰ | ۰/۹۴ | ۱/۰۱۲ | ۱/۲۲۵ |
| کف* | ۱۰ | – | – | – | – |

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

-سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده

این مطالعه با شبیه سازی یک بادگیر با سطح مقطع مربعی که به همراه یک سامانه پد و فن بار سرمایشی گل خانه را تأمین می کند، انجام شد. عمل کرد بادگیر طراحی شده، قبل تر مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است [۲۰]. دستگاه در نظر گرفته شده یک بادگیر مجهز به دو قسمت خنک کننده تبخیری (تیغه های خیس شده و پدهای بازکن قابل تنظیم) می باشد 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 ی پیشنهادی را نشان می دهد.



**شکل ۲: اجزای سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده[۲۰]**

نمونه دارای ارتفاع ۲/۵ متر، مقطع ۰/۴۰ × ۰/۲۰ متر، شامل مجرای ورودی و مجرای خروج هوا (دودکش خورشیدی)، با دهانه های هوا ۰/۴۰ متر بالاتر از دستگاه بود. دیوارها از یک صفحه پلی کربنات به ضخامت ۶ میلی متر ساخته شده اند که سطوح بیرونی آن توسط ورقه آلومینیومی براق پوشیده شده است تا جذب تابش خورشیدی به حداقل برسد. در داخل مجرای ورودی، یک بخش تیغه ای 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 سانتی متر که به صورت پد ساخته شده بود در دهانه ورودی هوا نصب شد. برای پاشیدن آب بر روی پد و تیغه ها از یک لوله باریک استفاده می شود. 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 می کند و برای بهبود تهویه هوا یک دریچه به ابعاد ۰/۲ * ۰/۲ متر در طرف مقابل جای گیری سامانه نصب شد. در صورت وجود سرعت باد مطلوب، بادگیر به عنوان یک تهویه عمل می کند که در آن هوای تازه وارد ساختمان شده و هوای گرم و آلوده بر اساس فشار باد تخلیه می شود. در واقع، سرعت باد، غالب ترین 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 می کند. نازل های آب که در قسمت بالای پد و قسمت تیغه ها نصب شده اند برای خیس کردن پد ها و افزایش اثر شناوری استفاده می شوند. این عمل منجر به کاهش دما و افزایش چگالی هوا شده که حرکت رو به پایین هوای تازه از طریق سامانه را ممکن می سازد.

### ۳-۳- نرم افزار

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 بدست می‌آید [۲۴].

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

در این رابطه $\eta$ بازده‌ی خنک کننده ی تبخیری ، Ta و Twb به ترتیب دمای حباب خشک و تر هوای محیط (C°) هستند و Tt دمای هوا را بعد از عبور از پدها (C°) مشخص می کند. بازده پد به ضخامت لایه آن(dp) بر حسب سانتی متر و سرعت هوای عبور از پد ($v_i$) بر حسب متر بر ثانیه بستگی دارد که با توجه به معادله های ۲ تا ۴ قابل محاسبه است[۲۴].

$$\eta = \mathbf{f}(v_i) + \mathbf{L}(d_p) \quad (۲)$$

$$\mathbf{f}(v_i) = -0.02325 v_i + 0.899$$

$vi < ۱$ m/s

$$\mathbf{f}(v_i) = -0.04525 {v_i}^4 + 0.26 {v_i}^3 - 0.635 {v_i}^2 + 0.57774 v_i + 0.714 \quad (۳)$$

$vi < ۱$ m/s

$$L(d_p) = \left[0.04631 - 1.444 * 10 - 3 d_p\right] \ln \frac{d_p}{2.5} \quad (۴)$$

$$\omega_t = \frac{C_p T_a + (\omega hg)_a - C_p T_t}{(hg)_t} \quad (۵)$$

که در آن $C\rho$ گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم کلوین)، $\omega$ نسبت رطوبت هوا (کیلوگرم رطوبت بر کیلوگرم هوا) و $hg$ 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].

$$m_v = h_D A_m (w_c - w_a) \quad (۶)$$

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].

$$h_D = \frac{h_i}{C_p} \quad (۷)$$

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

$$h_i = ۲.۸ + ۳ v_i \quad (۸)$$

که در آن $vi$ برای تهویه مناسب گل خانه در اقلیم گرم و خشک به پیشنهاد جکسون و همکاران[۲۶] با توجه به سطح دهانه ی 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.

$$Q_c = m_a C_p (\Delta T) \qquad (۹)$$

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

## ۴- شبیه سازی

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

### ۴-۱- داده های آب و هوایی

برای داده های آب و هوایی می توان از کتابخانه استاندارد نرم افزار استفاده کرد. کتابخانه استاندارد شامل حدود ۱۵۰ مدل مختلف از پمپ ها، تجهیزات تهویه مطبوع، تبدیل های حرارتی، رطوبت گیر ها، توربین های بادی، فن ها، شیرآلات، پردازش کننده های اطلاعات مربوط به آب و هوا، تجهیزات مربوط به سامانه های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع است. برای انتخاب مناطق جغرافیایی که به صورت پیش فرض اطلاعات آن ها در کتاب خانه نرم افزار نیست هم می توان اطلاعات مورد نیاز را دریافت و به نرم افزار ترنسیس الحاق کرد.

### ۴-۲- مدل ساختمان گل خانه 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) به‌وسیله نرم‌افزار اسکچ‌آپ (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 ی سرمایشی برای خنک سازی گل خانه در نظر گرفته شد. نخست سامانه ی سرمایشی پیش‌فرض نرم افزار است که در قسمت تنظیمات ساختمان(Edit Building) تحت نام خنک کننده (Cooling) برای خنک سازی گل خانه اعمال شد. در قسمت دوم سامانه ی سرمایشی پیشنهادی به کمک کامپانت های موجود در کتابخانه و همچنین ورود معادله های حرارتی سامانه از قسمت معادله ها (Equation) در نرم افزار شبیه سازی، و بار برودتی آن به فضای گل خانه اضافه گردید. با اضافه شدن بار برودتی سامانه ی مدنظر مقداری از بار سرمایشی سامانه ی خنک کننده اول کاسته شد. با کاهش کار سامانه ی پیش فرض که می تواند یک سامانه فن و پد یا کولر آبی و یا حتی یک سامانه سیکل تبریدی باشد، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده های ناشی از تولید انرژی رخ می دهد.

## ۵- تحلیل زیست محیطی

در ازای تولید و انتقال هر کیلوات ساعت برق، آلاینده‌های زیست-محیطی تولید و در جو زمین منتشر می‌شوند. (جدول شماره ۳) مقدار متوسط آلاینده‌های منتشر شده برای تولید هر کیلووات ساعت برق در سال‌های اخیر ایران را نشان می‌دهد [۲۷]. تأمین بخشی از بار سرمایشی گل‌خانه به‌وسیله‌ی سامانه‌ی پیشنهادی منجر به کاهش فعالیت سامانه‌ی 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 سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده محاسبه و برآورد گردید.

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

| SPM | CH | CO | CO2 | SOx | NOx |
|---|---|---|---|---|---|
| ۰/۰۸۸ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۰۱ | ۵۹۸/۳ | ۰/۹۰۶ | ۰/۹۰۶ |

لازم به ذکر است با توجه به تلفات انرژی از نیروگاه‌ها تا مصرف-کننده(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 اندازه-گیری دسته‌بندی می‌گردد. علت چالش‌برانگیز بودن محاسبه هزینه کربن پیچیدگی فرآیند 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].

**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 |

**۶-۳- 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 باتوجه به هزینه انجام تعبیه سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس-شونده، صرفه‌جویی‌های انجام شده و همچنین کاهش ارزش سرمایه، دوره بازگشت سرمایه پروژه ارزیابی گردد. این امر با استفاده از رابطه ۱۰ قابل تحقق است.

$$\text{DPP} = \frac{ln\left(۱ - \frac{\text{مقدار سرمایه گذاری} * \text{نرخ تنزل}}{\text{جریان نقدی هر سال}}\right)}{ln(\text{نرخ تنزیل} + ۱)} \quad (۱۰)$$

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

۶-۳- ۱- هزینه ساخت و اجرای سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده

هزینه ساخت دستگاه مورد نظر بر اساس نرخ کالا درتابستان ۱۴۰۱، ۸۷،۵۰۰،۰۰۰ ریال برآورد گردید. این سامانه برای یک گل خانه به مساحت ۱۰ مترمربع در نظر گرفته شده است. لذا برای گسترش و تعمیم هزینه برای مجموعه های بزرگ تر می توان از هزینه ساخت به ازای هر متر مربع بهره یافت.

۷- نتایج و بحث

ابتدا عمل شبیه سازی برای شهر کرمان انجام شد. پارامتر های اولیه و نتایج حاصل از شبیه سازی از قبیل دمای محیط، دمای گل خانه با و بدون سامانه ی سرمایشی، توان مورد نیاز سامانه ی سرمایشی اولیه در حالت عادی و پس از اضافه شدن سامانه ی خنک کننده ی تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده، رطوبت نسبی هوا، شدت تابش و ... به صورت عددی و گرافیکی در بازه های 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 میانگین گیری داده ها در طول ماه به ازای هر ساعت به دست آمد. سپس با توجه به داده های موجود نتایج حاصل از کاهش مصرف انرژی، شامل: کاهش برق مصرفی سامانه سرمایشی، کاهش تولید و انتشار آلاینده های زیست محیطی و همچنین کاهش هزینه های ناشی از این موارد به ازای هر مترمربع گل خانه بررسی و محاسبه شد. بعد از محاسبه هزینه های کاهش یافته و مقایسه آن با هزینه ساخت دستگاه پیشنهادی برای طرح، دوره بازگشت سرمایه محاسبه گردید.

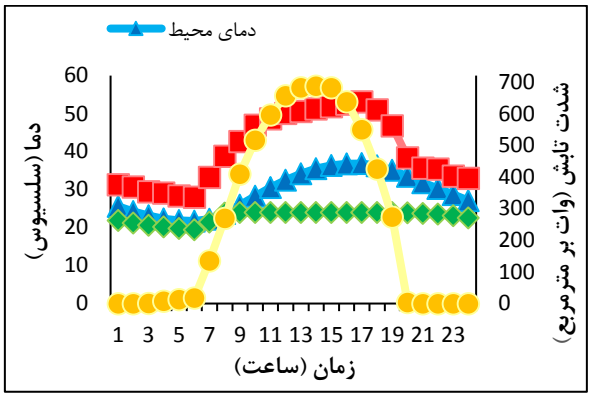
در گام دوم با کمک شبیه سازی عمل کرد سامانه در چند شهر مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفت.

### ۷-۱- شرایط محیطی و دمای گل‌خانه

نتایج اولیه شبیه سازی نشان داد دمای داخلی گل خانه بدون وجود سامانه های سرمایشی و تحت تاثیر عوامل گل خانه ای و تابش و گذر نور خورشید از جداره های شفاف گل خانه در طول روز، به طور معمول بین ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس و در برخی مواقع از ماه های خرداد و تیر تا ۱۸ درجه سلسیوس از دمای محیط بیشتر خواهد شد (شکل شماره ۳).

بیش ترین دمای مشاهده شده در شبیه سازی گل خانه، ۵۳ درجه سلسیوس در خرداد و تیر ماه بود در حالی که دمای متناظر محیط بین ۳۵ تا ۳۷ درجه سلسیوس بود شکل ۳ نشان دهنده تغییرات دماهای محیط و داخل گل خانه و تغییرات شدت تابش خورشید در یک روز از مرداد است. در تحقیقی که بر روی همین گل خانه انجام شد، نتایج بررسی به ۲ شیوه تجربی و تئوری دمای داخل گل خانه را در گرم ترین شرایط ۵۳ و ۴۷ درجه سلسیوس نشان داد . [۲۱].

سامانه ی سرمایشی ترکیبی در نظر گرفته شده برای سرمایش گل خانه توانایی خنک نگه داشتن دمای داخلی را تا ۱۳ درجه سلسیوس خنک تر از دمای محیط بیرون در گرم ترین ساعت های ظهر تابستان که میانگین بیشینه دما به ۳۷ درجه سلسیوس می رسد را دارد که در مقایسه با سامانه ی فن و پد استفاده شده به وسیله ی کیتاس و همکاران خنک سازی بیش تری انجام داده است. در این تحقیق سامانه فن و پد توانسته بود دمای داخل گل خانه را ۱۰ درجه سلسیوس خنک تر از دمای محیط بیرون نگه دارد [۱۲] .در شبیه سازی کانال خنک کننده تبخیری اقتداری و همکارانش برای سرمایش ساختمان هم عمل کرد بالاتری وجود نداشت. سامانه آن ها توانست دمای هوا را به طور متوسط ۱۰ درجه سلسیوس کاهش دهد.



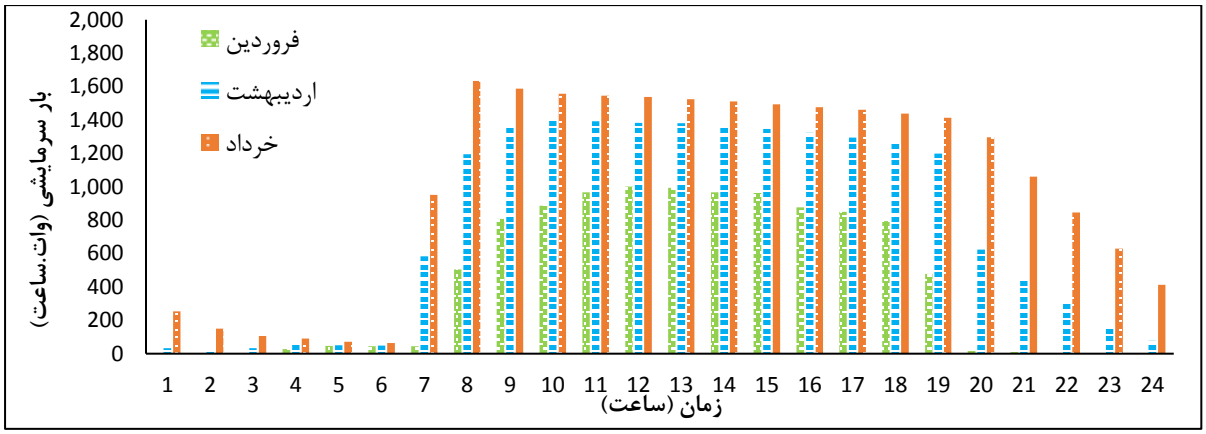

**شکل ۳: شرایط محیطی و دمای گلخانه در ماه تیر**

### ۷-۲- بار سرمایشی مورد نیاز گل‌خانه

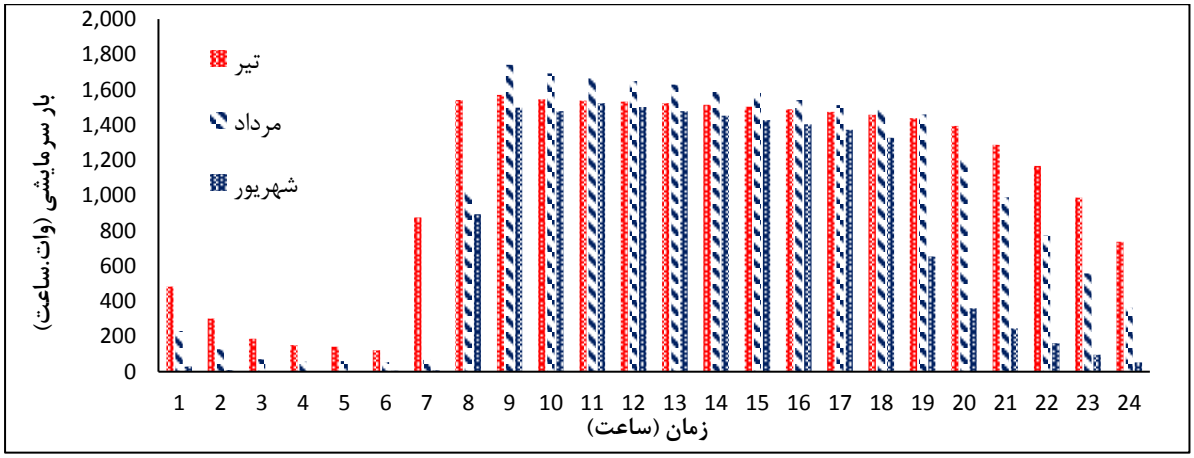
با اعمال پارامترهای اولیه‌ی شبیه‌سازی در بازه‌های زمانی مشخص، بار سرمایشی مورد نیاز گل‌خانه برای خنک‌سازی تا محدوده دمایی ۲۴ درجه سلسیوس که دمای مطلوب کشت صیفی‌جات گل‌خانه‌ای می‌باشد، به صورت ماهیانه و در بازه‌های زمانی یک ساعته در طول روزمحاسبه و برآورد گردید. با توجه به افزایش دمای داخلی گل‌خانه تا ۵۳ درجه سلسیوس، حداکثر بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک‌سازی گل‌خانه از محاسبات نرم-افزار شبیه‌ساز ۹/۵ کیلوات ساعت برآورد شد.

### ۷-۳- بار سرمایشی سامانه‌ی تبخیری مجهز به ستون-های خیس‌شونده

با تعبیه و مدل سازی سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده و اضافه کردن آن شبیه سازی انجام شده، نتایج نشان داد این سامانه قادر به تولید ۱/۵ کیلووات ساعت بار سرمایشی می باشد. مقدار محاسبه شده، توان تأمین بار سرمایشی مورد نیاز گل خانه را در ابتدا و انتهای ساعات شبانه روز به طور کامل دارد، اما با افزایش شدت تابش در طول روز و بالا رفتن دمای گل خانه و محیط سهم این سامانه در خنک سازی گل خانه کاهش می یابد. (شکل های ۴-الف و ۴-ب )بار سرمایشی ایجاد شده به وسیله ی سامانه مد نظر را در ماه های بهار و تابستان به صورت میانگینی از ساعات شبانه روز برای هر ماه نشان می دهد. عدم تأمین بار سرمایشی حداکثری تا سقف ۱/۵ کیلووات ساعت به وسیله ی سامانه ی مورد برسی به علت عدم نیاز گل خانه به بار سرمایشی بیشتر در این ساعات می باشد و بار سرمایشی نشان داده شده در این محدوده زمانی برابر با بار سرمایش مورد نیاز گل خانه بوده و در محدوده ی زمانی ای که بار سرمایشی مورد نیاز گل خانه بیش از توان تأمین سرما به وسیله ی سامانه سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده می شود سامانه سرمایشی مرسوم شروع به تأمین بار سرمایشی می کند.



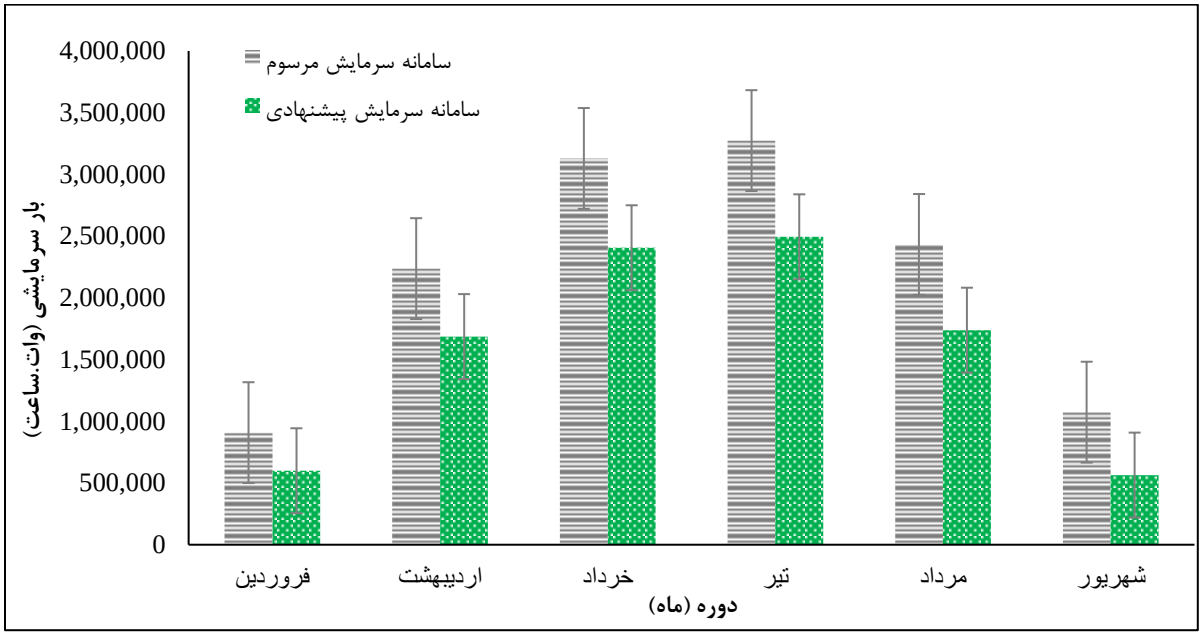

**شکل ۴-الف: بار سرمایشی ایجاد شده به‌وسیله‌ی سامانه‌ی تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در بهار**




**شکل ۴-ب: بار سرمایشی ایجاد شده به‌وسیله‌ی سامانه‌ی تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در تابستان**

## ۷-۴- مصرف ماهیانه انرژی

مصرف ماهیانه انرژی مورد نیاز برای خنک‌سازی گل‌خانه در دو حالت، مدل و شبیه‌سازی شد. در حالت اول یک سامانه‌ی سرمایشی مرسوم (فن و پد) عمل خنک‌سازی را انجام می‌دهد، بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک‌سازی گل‌خانه در این حالت برای ماه‌های 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 سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس-شونده که مصرف انرژی خیلی کمتری (۳۰ وات در مقابل ۱۱۰۰ وات) نسب به سامانه‌های سرمایشی مرسوم دارد به خنک‌سازی گل‌خانه کمک می‌کند و منجر به کاهش مصرف انرژی نهایی برای خنک‌سازی گل‌خانه می‌شود. در این حالت بار سرمایشی مورد نیاز برای خنک‌سازی گل‌خانه از فروردین تا شهریور به ترتیب ۵۹۹، ۱۶۸۶، ۲۴۰۶، ۲۴۹۰، ۱۷۳۸ و ۵۶۴ کیلووات ساعت به وسیله‌ی نرم‌افزار محاسبه و برآورد شد. نتایج آزمون T مستقل برای میانگین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان داد بار سرمایشی مورد نیاز در حالت اول (۳۶/۸ ± ۲۲۸۱/۶) بیش‌تر از بار سرمایشی در حالت دوم (۳۱/۱ ± ۱۵۸۳/۸ ) است، $t(۳۷۰) = ۱۲/۳۷۴$، $P < ۰/۰۰۱$. (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 سامانه‌ی سرمایشی تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده را نشان می‌دهد.

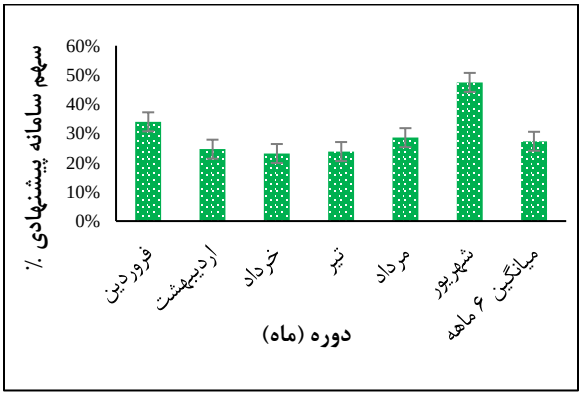



**شکل ۵: انرژی ماهیانه مورد نیاز برای سرمایش گل‌خانه به‌وسیله سامانه‌های سرمایشی مرسوم در مقایسه با انرژی مورد نیاز برای سرمایش گل‌خانه در هنگام تعبیه سامانه‌ی سرمایش پیشنهادی**

### ۷-۵- سهم سامانه‌ی تبخیری مجهز به ستون‌های خیس-شونده در تأمین انرژی گل‌خانه

با توجه به کاهش مصرف انرژی در سامانه ی سرمایشی مرسوم، می توان سهم سامانه ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده را در خنک سازی گل خانه مطابق (شکل شماره ۶) نشان داد، که به ترتیب از فروردین تا شهریورماه برابر با ۳۴، ۲۵، ۲۳، ۲۴، ۲۹ و ۴۷ درصد می باشد. بیشترین سهم خنک سازی سامانه مذکور در شهریور ماه ۴۷ درصد و کمترین آن مربوط به مردادماه ۲۳ درصد بود. سهم سامانه مد نظر برای خنک سازی به طور میانگین برای۶ ماه مورد ارزیابی ۲۷/۳ درصد محاسبه و برآورد شد که در مقایسه با سامانه ی ذخیره سازی انرژی حرارتی-آبی که توسط پاکسوی و بیهان مورد بررسی قرارگرفته بود، عمل کرد بهتری از خود نشان داد. سامانه ی ذخیره ساز انرژی حرارتی توانسته بود با ذخیره انرژی گل خانه، مصرف انرژی را به

مقدار ۲۰ تا ۳۰درصد کاهش دهد[۳۰] .در پژوهش دیگری هم بر روی ادغام یک سامانه ی تجدیدپذیر خورشیدی با سامانه ی سوخت مرسوم به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی مورد نیاز یک استخر شنا در شهر کرمان با نرم افزارTRANSYS انجام شد، نتایج بیان گر صرفه جویی ۲۴ تا ۳۰درصد بود.




**شکل ۶: سهم سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده در خنک‌سازی گل‌خانه**

### ۷-۶- کاهش مصرف برق

انرژی مصرف شده در سامانه ی سرمایش مرسوم برای تولید بار سرمایشی مورد نیاز گل خانه به وسیله ی برق تأمین می شود، از این رو کاهش مصرف انرژی کاهش مصرف برق را در پی دارد. بیش ترن مقدار صرفه جویی در مصرف برق مربوط به تیرماه با ۶۲/۳ کیلووات ساعت به ازای هرمترمربع مساحت گل خانه و کمترین مقدار آن مربوط به فروردین ماه با ۲۴/۷ کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع گل خانه می باشد. مجموع صرفه جویی انجام شده به ازای هر مترمربع گل خانه در یک دوره بهره وری ۶ ماهه بیش از ۲۸۵ کیلووات ساعت محاسبه شد.

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

| دوره | SPM | CH | CO | CO2 | SOx | NOx | مجموع آلاینده‌ها (گرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| فروردین | ۲/٤ | ۰/۷ | ۰/۰۳ | ۱٦۲۳٤/۱ | ۲٤/٦ | ۲٤/٦ | ۱٦۲۸٦/٤ |
| اردیبهشت | ٤/۳ | ۱/۲ | ۰/۰٥ | ۲۸۹۷٤/۹ | ٤۳/۹ | ٤۳/۹ | ۲۹۰٦۸/۱ |
| خرداد | ٥/٦ | ۱/٥ | ۰/۰٦ | ۳۸۰۷٤/۸ | ٥۷/۷ | ٥۷/۷ | ۳۸۱۹۷/۳ |
| تیر | ٦/۰ | ۱/٦ | ۰/۰۷ | ٤۱۰۰۳/۰ | ٦۲/۱ | ٦۲/۱ | ٤۱۱۳٤/۹ |
| مرداد | ٥/٤ | ۱/٥ | ۰/۰٦ | ۳٦٥٥۲/۲ | ٥٥/٤ | ٥٥/٤ | ۳٦٦٦۹/۸ |
| شهریور | ۳/۹ | ۱/۱ | ۰/۰٤ | ۲٦۸۲٤/٥ | ٤۰/٦ | ٤۰/٦ | ۲٦۹۱۰/۸ |
| دوره ٦ ماهه | ۲۷/٦ | ۷/٥ | ۰/۳۱ | ۱۸۷٦٦۳/٥ | ۲۸٤/۲ | ۲۸٤/۲ | ۱۸۸۲٦۷/۳ |

### ۷-۷- کاهش انتشار آلاینده‌ها

مقدار آلاینده های زیست محیطی که در اثر کاهش مصرف برق از تولید و انتشار آن ها جلوگیری به عمل آمده است، به ازای هر مترمربع از مساحت گل خانه در (جدول شماره ۴) آورده شده است. این مقادیر برای یک دوره ۶ ماهه بهره وری از گل خانه برای Nox، Sox، Co2، Co، CH و SPM (ذرات معلق در هوا) به ترتیب برابر با ۲۸۴/۲، ۲۸۴/۲، ۱۸۷۶۳۳/۵، ۰/۳۱، ۷/۵ و ۲۷/۶ گرم بر مترمربع می باشد. هر کدام از این آلاینده ها هزینه هایی را به علت انتشار در محیط زیست بسته به نوع، مقدار و تخریب-رسان بودن آن ها دارد. در نهایت مجموع آلاینده هایی که از تولید و انتشار آن ها با بهره مندی از سامانه ی پیشنهادی در یک دوره ۶ ماهه بهره وری به عمل می آید ۱۸۸/۳ کیلوگرم بر مترمربع محاسبه و برآورد شد.

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 شده‌است.

Co2 با توجه به بیش‌ترین مقدار وزنی که در بین آلاینده‌ها را دارد (۹۹/۷درصد)، بیش‌ترین سهم هزینه‌ای را نیز به خود اختصاص می‌دهد (۶۹/۸ درصد). ترکیبات گوگرددار علی‌رغم سهم وزنی یکسانی که با ترکیبات نیتروژن‌دار دارند 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 دارند. 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**

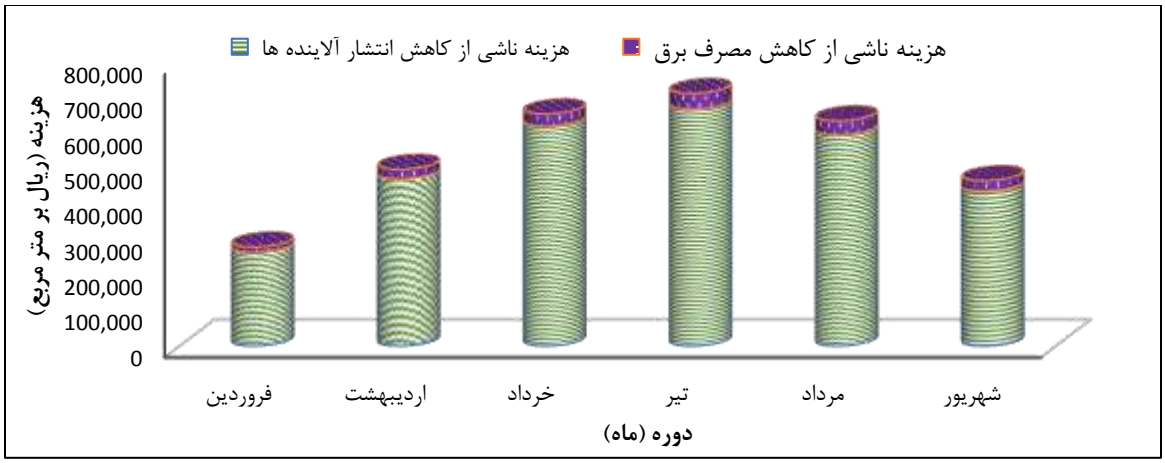
| دوره | SPM | CH | CO | CO2 | SOx | NOx | مجموع آلاینده ها (ریال) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| فروردین | ۱۱،۷۰۵ | ۱۵۶ | ۶ | ۱۸۵،۰۶۹ | ۵۱،۱۳۳ | ۱۶،۸۱۵ | ۲۶۴،۸۸۴ |
| اردیبهشت | ۲۰،۸۹۱ | ۲۷۸ | ۱۰ | ۳۳۰،۳۱۳ | ۹۱،۲۶۳ | ۳۰،۰۱۱ | ۴۷۲،۷۶۷ |
| خرداد | ۲۷،۴۵۲ | ۳۶۶ | ۱۴ | ۴۳۴،۰۵۳ | ۱۱۹،۹۲۵ | ۳۹،۴۳۷ | 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 شماره ۸ ) نتایج حاصل از کاهش هزینه‌ها به صورت ترکیبی از هزینه‌های نهان و آشکار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد حدود ۹۴ درصد از هزینه‌ها مربوط به هزینه‌های نهان و اجتماعی و حدود ۶ درصد از هزینه‌ها مربوط به هزینه‌های آشکار و مشهود است. هزینه نهایی صرفه‌جویی شده در نتیجه بهره‌مندی از سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده برای یک دوره ۶ ماهه بهره‌وری گل‌خانه از فروردین تا شهریور ۳،۲۵۰،۰۰۰ ریال به ازای هر مترمربع مساحت گل‌خانه محاسبه و برآورد گردید.



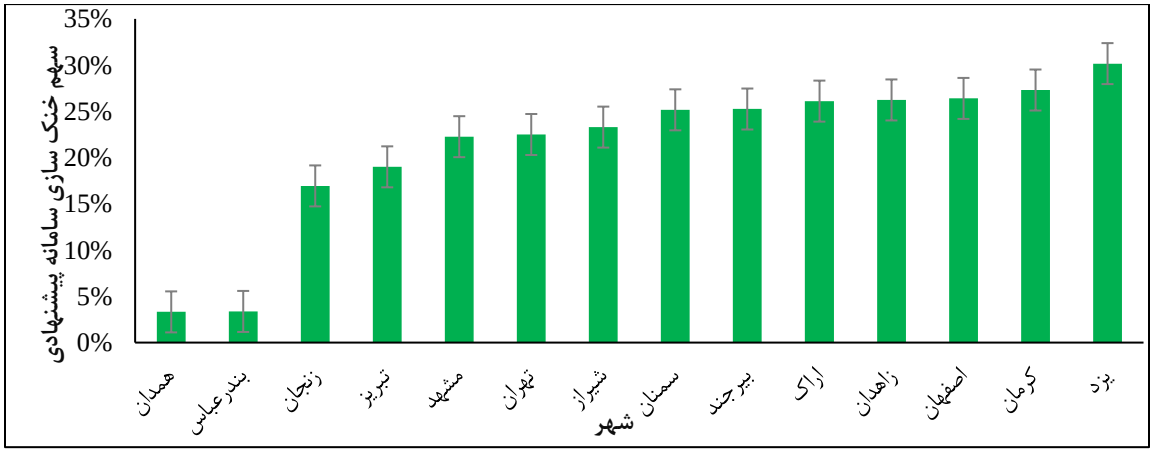

**شکل ۸. هزینه‌های کاهش یافته در اثر استفاده از سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده برای سرمایش یک مترمربع گل‌خانه**

### ۱۱-۷- بازگشت سرمایه

با توجه به هزینه های ساخت سامانه ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون های خیس شونده و تجهیز گل خانه به آن ( ۸،۷۵۰،۰۰۰ ریال برای هر مترمربع) و همچنین صرفه جویی و کاهش هزینه های ناشی از سرمایش گل خانه ( ۳،۲۵۰،۰۰۰ ریال برای هر مترمربع) و شاخص های آماری تابستان ۱۴۰۱، دوره بازگشت سرمایه بهره مندی از سامانه ی 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 که سهم‌خنک‌سازی این سامانه تحت شرایط محیطی مختلف تغییر می‌کند. بالاترین کارایی سامانه در شهرهای یزد و کرمان با ۳۰ و ۲۷/۳ درصد و کم‌ترین آن مربوط به شهرهای همدان و بندرعباس با ۳ درصد سهم در خنک‌سازی هوای داخل گل‌خانه مورد بررسی بود (شکل شماره ۹). این عمل‌کرد تحت تاثیر مقادیر رطوبت نسبی قرار داشت. نتایج نشان‌داد سامانه در شهرهایی که رطوبت نسبی هوای کمتری دارند عمل‌کرد بهتری در خنک‌سازی دارد، این امر به این علت است که هوای عبوری از سامانه این امکان را دارد که رطوبت بیشتری از ستون‌های خیس دریافت کند و عمل خنک‌سازی بهتر انجام شود ولی در شهرهایی با رطوبت نسبی بالا، نقش اثر تبخیری در خنک‌سازی به علت عدم امکان جذب رطوبت کاهش می‌یابد.




**شکل ۹: سهم خنک‌سازی سامانه‌ی سرمایش تبخیری مجهز به ستون‌های خیس‌شونده برای سرمایش گل‌خانه در شهرهای مختلف ایران**

منابع

[۱] محمود امید، و اردشیر شفایی، "کنترل کامپیوتری شرایط محیطی گلخانه: قسمت اول- طراحی و پیاده سازی سیستم،" مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، vol. ٦، no. ٢٣، pp. ١–٢٠، ١٣٨٤، [Online]. Available: https://sid.ir/paper/٢٨٢٦١/fa

[٢] A. Al-Nasser and N. R. Bhat, "Protected agriculture in the State of Kuwait," Jan. ١٩٩٨.

[٣] Rorabaugh, P., Jensen, M., & Giacomelli, G. (٢٠٠٢). Introduction to controlled environment agriculture and hydroponics. Control. Environ. Agric. Cent, ١-١٣٠.

[٤] A. S. Anifantis, A. Colantoni, and S. Pascuzzi, "Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating," Renewable Energy, vol. ١٠٣, pp. ١١٥–١٢٧, Apr. ٢٠١٧, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.renene.٢٠١٦,١١,٠٣١.

[٥] د. مؤمنی and م. رحمتی, "ارزیابی اثرات کنترل دما و رطوبت در تولید خیار گلخانه ای در منطقه جیرفت و کهنوج," ماشین های کشاورزی, vol. ٢, no. ١, pp. -, ٢٠١٢, doi: ١٠,٢٢٠٦٧/jam.v٢i١,١٤٢٩٢.

[٦] Andrea Lee Wilkins, "Retrofitting existing commercial buildings in the desert southwest to be energy efficient," Jan. ٢٠١٠, doi: https://doi.org/١٠,٣٤٩١٧/١٥٦٣٧٧٩.

[٧] بی نام(١٤٠٠).ترازنامه انرژی ایران، دفتر برنامه ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی، معاونت برق و انرژی، ترازنامه انرژی سال ١٣٩٨.

[٨] Palmer, J. D., & PE, C. (٢٠٠٢). Evaporative cooling design guidelines manual. JD Palmer, PE, CEM– United States Department of Energy.

[٩] P. M. Cuce and S. Riffat, "A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. ٥٤, pp. ١٢٤٠–١٢٤٩, Feb. ٢٠١٦, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.rser.٢٠١٥,١٠,٠٦٦.

[١٠] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications," Solar Energy, vol. ٨١, no. ١٢, pp. ١٤٤٧–١٤٥٩, Dec. ٢٠٠٧, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.solener.٢٠٠٧,٠٣,٠٠٤.

[١١] ص. صادقی, ق. زارعی and, س. ن. ا. مرتضوی, "ارزیابی کارایی سیستم سرمایش فن و پد گلخانه ای در منطقه محلات," ١٣٩٢ .

[١٢] C. Kittas, Th. Bartzanas, and A. Jaffrin, "GREENHOUSE EVAPORATIVE COOLING: MEASUREMENT AND DATA ANALYSIS," Acta Horticulturae, no. ٥٣٤, pp. ٦٧–٧٤, Aug. ٢٠٠٠, doi: https://doi.org/١٠,١٧٦٦٠/actahortic.٢٠٠٠,٥٣٤,٦.

[١٣] Mahnaz Mahmoudi Zarandi (Qazvin Islamic Azad University), "Analysis on Iranian Wind Catcher and Its Effect on Natural Ventilation as a Solution towards Sustainable Architecture(Case Study: Yazd)", Jun. ٢٠٠٩, doi: ١٠,٥٢٨١/zenodo.١٠٧٧٦٤٩.

[١٤] M. Taleghani, Kamyar Tolou Behboud, and S. Heidari, "ENERGY EFFICIENT ARCHITECTURAL DESIGN STRATEGIES IN HOT-DRY AREA OF IRAN: KASHAN," vol. ١٥, no. ٢, pp. ٨٥–٩١, Jan. ٢٠١٠.

[١٥] Pyrnia, M. K. (١٩٨١). Acquaintance with Iran Islamic Architecture. Tehran: Tehran University.

[١٦] Dehnavi, M., Ghadiri, M. H., Mohammadi, H., & Ghadiri, M. H. (٢٠١٢). Study of wind catchers with square plan: influence of physical parameters. Int J Modern Engineering Resarch, ٢(١), ٥٥٩-٦٤.

[١٧] S. Khani, M. Bahadori, A. Dehghani-Sanij, and A. Nourbakhsh, "Performance Evaluation of a Modular Design of Wind Tower with Wetted Surfaces," Energies, vol. ١٠, no. ٧, p. ٨٤٥, Jun. ٢٠١٧, doi: https://doi.org/١٠,٣٣٩٠/en١٠٠٧٠٨٤٥.

[١٨] V. Kalantar, "Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region," Renewable Energy, vol. ٣٤, no. ١, pp. ٢٤٦–٢٥٤, Jan. ٢٠٠٩, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.renene.٢٠٠٨,٠٣,٠٠٧.

[١٩] A. H. Poshtiri and 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. ١٤٨, pp. ٤٥٢–٤٦٦, Apr. ٢٠١٧, doi: https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jclepro.٢٠١٧,٠١,١٦٠.

[٢٠] Noroozi, A & VenerisY.J. (٢٠١٨)Thermal Assessment of a Novel Combine Evaporative Cooling Wind Catcher, Energies, vol. ١١, no. ٢, p. ٤٤٢, Feb. ٢٠١٨, doi: https://doi.org/١٠,٣٣٩٠/en١١٠٢٠٤٤٢.

[٢١] M. H. SHOJAEİ, H. MORTEZAPOUR, K. JAFARİNAEİMİ, and M. M. MAHARLOOEİ, "AN ESTIMATION METHOD FOR GREENHOUSE TEMPERATURE UNDER THE INFLUENCE OF EVAPORATIVE COOLING SYSTEM," Journal of Thermal Engineering, pp. ٩١٨–٩٣٣, May ٢٠٢١, doi: https://doi.org/١٠,١٨١٨٦/thermal.٩٣٠٩٠٧.

[٢٢] Bahadori, M. N., Dehghani-Sanij, A., & Sayigh, A. (٢٠١٦). Wind Towers. Springer International Pu.

[٢٣] K. Yavarinasab and E. A. Mirkhalili, "Investigation the wind catchers of residential houses in Yazd Province , Iran," ٢٠١٣.

[٢٤] Ghariblou, M. (١٩٩١). Assessment of the Empirical relations for the pressure and dry temperature drops in water coolers (Doctoral dissertation, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology).

[٢٥] Handbook, A. S. H. R. A. E. (٢٠٠٥). American Society of Heating. Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

[٢٦] Jackson, H. A., & Darby, D. E. (٢٠٠٠). Greenhouse ventilation. Canada Plan Service. M-٦٧٠٤, ٩.

[٢٧] بی نام(١٣٩٧). آمار صنعت برق ایران، شرکت مادر تخصصی توانیر، معاونت تحقیقات و منابع انسانی.

[۲۸] غلامرضا هروی, میلاد رستمی and ,مریم شکاری, "ارزیابی اثرات اقتصادی و زیستمحیطی سیستمهای مدیریت هوشمند سرمایش و گرمایش در ساختمان: مطالعهی موردی ساختمان اداری در شهر تهران," نشریه مهندسی عمران امیرکبیر , vol. ۵۳, no. ۲, pp. ۶۰۷–۶۲۶, Apr. ۲۰۲۱, doi: https://doi.org/۱۰,۲۲۰۶۰/ceej.۲۰۲۰,۱۶۳۶۱,۶۲۰۰.

[۲۹] فرهاد خداداد کاشی, مهدی اکابری تفتی, یگانه موسوی جهرمی and ,علی اکبر خسروی نژاد, "محاسبه هزینه اجتماعی انتشار دیاکسیدکربن به تفکیک استانهای مختلف در ایران," مجله پژوهش های برنامه ریزی و سیاستگذاری انرژی, vol. ۲, no. ۲, pp. ۷۷–۱۱۰, Jun. ۲۰۱۶.

[۳۰] H. Ö. Paksoy and B. Beyhan, "Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology," Advances in Thermal Energy Storage Systems, pp. ۵۳۳–۵۴۸, ۲۰۱۵, doi: https://doi.org/۱۰,۱۵۳۳/۹۷۸۱۷۸۲۴۲۰۹۶۵,۴,۵۳۳.