



# Simulation-Based Evaluation of a Wall-Mounted Solar Chimney for Seasonal HVAC Support and Energy Efficiency in Greenhouses: A Case Study in Ahvaz, Iran

Seyed Majid Sajadiye<sup>1✉</sup> | Ayad Saberian<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [m.sajadiye@scu.ac.ir](mailto:m.sajadiye@scu.ac.ir)
2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [a.saberian@scu.ac.ir](mailto:a.saberian@scu.ac.ir)

## Article Info

Article type: Research Article

### Article history:

Received: Jan. 9, 2025

Revised: Feb. 14, 2025

Accepted: March. 4, 2025

Published online: Autumn 2024

### Keywords:

*Computational Fluid Dynamics (CFD), Energy-Efficient Greenhouse Systems, Greenhouse Climate Control, Solar Chimney for HVAC, Sustainable Greenhouse Operations*

## ABSTRACT

This study evaluates the seasonal performance of a wall-integrated solar chimney combined with an HVAC system for greenhouse climate control in Ahvaz. Using validated computational fluid dynamics (CFD) models, the system's cooling, ventilation, and heating performance was analyzed over a nine-month period, considering temperature variations, solar radiation, and thermal equipment in a double-pitched roof greenhouse with dimensions of 12×20 m<sup>2</sup> and a ridge height of 6 m. Results indicated that during hot months, the system reduced indoor temperatures by 13–17°C. However, its cooling efficiency (0.56 vs. 0.62), air exchange rate (3.82 ACH vs. 9.01 ACH), and temperature uniformity index (0.73 vs. 0.82) were lower than those of the conventional fan-pad system. Nonetheless, eliminating fan shaft power resulted in significant energy savings. In cold months, the system increased indoor temperatures by 6.24°C and improved the temperature uniformity index from 0.74 to 0.89, although its heating efficiency (0.43) was lower than expected. These findings suggest that the system, particularly in heating periods, offers a sustainable alternative to conventional systems by enhancing climate control while reducing energy consumption. Design optimizations, such as incorporating thermal curtains and temporary ceiling structures during colder months, could further improve its performance.

Cite this article: Sajadiye, S. M., Saberian, A., (2024) Simulation-Based Evaluation of a Wall-Mounted Solar Chimney for Seasonal HVAC Support and Energy Efficiency in Greenhouses: A Case Study in Ahvaz, Iran, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (3), 87-108. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388520.665581>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388520.665581>





## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Greenhouses play a pivotal role in sustainable agriculture, providing controlled environments for crop production regardless of external climatic conditions. However, climate control in greenhouses, particularly in regions with extreme temperatures, often demands significant energy resources. This study investigates the performance of a solar chimney-assisted HVAC system for a greenhouse located in Ahvaz, Iran, comparing it with a conventional HVAC system. By harnessing buoyancy-driven natural ventilation, the solar chimney aims to reduce reliance on mechanical components, thereby minimizing energy consumption and operational costs. Through computational fluid dynamics (CFD) modeling, the research explores the system's effectiveness in maintaining optimal thermal conditions across varying seasonal climates.

### Materials and Methods

The study employed validated CFD models to simulate the thermal dynamics of a solar chimney-assisted HVAC system in a greenhouse. Key parameters included greenhouse thermal properties, HVAC configurations, and fluctuating solar heat loads influenced by local weather conditions. Performance metrics such as air exchange rates (*ACH*), temperature uniformity index (*TUI*), indoor and canopy temperatures, and HVAC efficiency analyzed over a 9-month period. The greenhouse was divided into cooling (May to September) and heating (November to February) phases to assess system efficiency under diverse climatic scenarios. System components, including a solar chimney, wet pad, and fans, were modeled to evaluate airflow patterns, temperature distribution, and energy efficiency.

### Results and Discussion

The solar chimney-assisted system demonstrated notable energy savings by eliminating the need for mechanical fan power, albeit with some cooling limitations in extreme heat. During cooling months, the system achieved an average temperature reduction of 13–17°C, keeping canopy temperatures within acceptable limits. However, its cooling efficiency ( $\eta_c$ ) was slightly lower (0.56) compared to the conventional system (0.62). Despite reduced *ACH* (3.82 vs. 9.01) and *TUI* (0.73 vs. 0.82), the solar chimney's passive ventilation showed potential for further optimization. For heating, the solar chimney raised indoor temperatures by an average of 6.24°C, though its heating efficiency ( $\eta_h$ ) was modest (0.43) due to rapid thermal equilibrium and heat loss to the cold ceiling. Proposed improvements, such as thermal curtains or temporary lower ceilings, could mitigate heat transfer and enhance system performance. Notably, the system maintained a more consistent canopy temperature (27.01°C, *TUI*: 0.92) compared to the conventional system's unheated state (25.37°C, *TUI*: 0.75). The solar collector's thermal efficiency was low (0.13 in summer, 0.09 in winter), reflecting its design's prioritization of ventilation over heat capture.

### Conclusion

The solar chimney-assisted HVAC system presents a sustainable solution for greenhouse climate control by significantly reducing energy consumption while maintaining conditions suitable for crop growth. However, its cooling capacity under extreme heat and heating efficiency in colder months require further improvement. Future research should focus on optimizing chimney height and wet pad airflow, integrating hybrid cooling strategies, and conducting comprehensive economic assessments to determine long-term feasibility. Given that these findings are specific to the climatic conditions of Ahvaz, further investigations across diverse climates and greenhouse configurations are necessary to assess the system's adaptability. With continued refinement and scalability, solar chimney-assisted systems have the potential to transform energy-efficient agriculture, particularly in arid and energy-limited regions.

### Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

### Data Availability Statement

Not applicable

### Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

### Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

## ارزیابی مبتنی بر شبیه‌سازی یک دودکش خورشیدی نصب‌شده روی دیوار برای پشتیبانی فصلی سامانه‌های تهویه مطبوع و بهره‌وری انرژی در گلخانه‌ها: مطالعه موردی در اهواز، ایران

سید مجید سجادیه<sup>۱</sup> | عیاد صابریان<sup>۲</sup><sup>۱</sup>. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [m.sajadiye@scu.ac.ir](mailto:m.sajadiye@scu.ac.ir)<sup>۲</sup>. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [a.saberian@scu.ac.ir](mailto:a.saberian@scu.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۴

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۳

#### واژه‌های کلیدی:

دودکش خورشیدی برای سامانه

تهویه مطبوع،

دینامیک سیالات محاسباتی،

سامانه‌های گلخانه‌ای کم‌مصرف

انرژی،

عملیات پایدار گلخانه‌ای،

کنترل اقلیم گلخانه.

این پژوهش عملکرد فصلی دودکش خورشیدی دیواری یکپارچه با سامانه تهویه مطبوع برای کنترل اقلیم گلخانه در اهواز را ارزیابی می‌کند. با استفاده از مدل‌های معتبر دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد سرمایشی، تهویه‌ای و گرمایشی سامانه در یک دوره ۹ ماهه و با در نظر گرفتن تغییرات دما، تابش خورشیدی و تجهیزات حرارتی یک گلخانه سقف شیروانی دوتایی با ابعاد ۲۰×۱۲ مترمربع و ارتفاع تاج ۶ متر، تحلیل شد. نتایج نشان داد که در ماه‌های گرم سال، این سامانه دماهای داخلی را ۱۳ تا ۱۷ درجه سلسیوس کاهش داد، اما بازده سرمایشی (۰/۵۶ در برابر ۰/۶۲)، نرخ تعویض ساعتی هوا (۳/۸۲ در برابر ۹/۰۱) و شاخص یکنواختی دما (۰/۷۳ در برابر ۰/۸۲) آن در مقایسه با سامانه متعارف فن-پد کمتر بود. با این حال، حذف توان محوری فن منجر به صرفه‌جویی قابل توجه انرژی شد. همچنین در ماه‌های سرد سال، دما را به میزان ۶/۲۴ درجه سلسیوس افزایش داد و شاخص یکنواختی دما را از ۰/۷۴ به ۰/۸۹ ارتقا داد، هرچند بازده گرمایشی آن ۰/۴۳ و کمتر از انتظار بود. این نتایج نشان می‌دهد که این سامانه، به ویژه در دوره‌های گرمایشی می‌تواند با صرفه‌جویی در انرژی و ارائه کنترل اقلیم مؤثر، جایگزینی پایدار برای سامانه‌های متداول باشد. بهینه‌سازی طراحی، مانند استفاده از پرده‌های حرارتی و سقف‌های موقت در ماه‌های سرد، می‌تواند عملکرد آن را بیشتر بهبود دهد.

استناد: سجادیه؛ سیدمجید، صابریان؛ عیاد، (۱۴۰۳) ارزیابی مبتنی بر شبیه‌سازی یک دودکش خورشیدی نصب‌شده روی دیوار برای پشتیبانی فصلی سامانه‌های تهویه مطبوع و بهره‌وری انرژی در گلخانه‌ها: مطالعه موردی در اهواز، ایران، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۵ (۳)، ۸۷-۱۰۸.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388520.665581>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388520.665581>

## مقدمه

در شرایط اقلیمی سخت مناطق بیابانی، ایجاد و حفظ ریزاقلیم مناسب برای کشاورزی گلخانه‌ای به استراتژی‌های مؤثر در سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع<sup>۱</sup> نیازمند است. سامانه‌های متداول تهویه مطبوع به دلیل مصرف بالای انرژی، نه تنها از نظر هزینه بلکه از نظر اثرات زیست‌محیطی چالش برانگیز هستند. با این حال، سامانه‌های تهویه مطبوع ترکیب شده با دودکش خورشیدی<sup>۲</sup> به عنوان جایگزینی پایدار و کارآمد معرفی شده‌اند. این سامانه‌ها از انرژی خورشیدی موجود در محیط‌های بیابانی بهره می‌گیرند تا با بهبود جریان هوا و انتقال حرارت، هزینه‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. اهمیت این نوآوری با توجه به پیش‌بینی افزایش بیش از ۸۰ درصدی نیاز انرژی در بخش تولید غذا تا سال ۲۰۵۰ (Ferroukhi et al., 2015) برجسته‌تر می‌شود. علاوه بر چالش‌های انرژی، تغییرات اقلیمی، اثرات منفی مضاعفی بر کشاورزی مناطق بیابانی داشته‌اند. افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، و وقوع مکرر رویدادهای شدید آب‌وهوایی از پیامدهای اصلی این تغییرات هستند که پایداری تولیدات کشاورزی را به مخاطره انداخته‌اند. این فشارها نه تنها تأمین غذای محلی، بلکه زنجیره تأمین جهانی غذا را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند و انتظار می‌رود که در آینده تشدید شوند (Fotiou et al., 2015). بنابراین، استفاده از سامانه‌های تهویه مطبوع خورشیدی می‌تواند راه‌حلی کلیدی برای مقابله با این چالش‌ها و تضمین پایداری در کشاورزی گلخانه‌ای در مناطق خشک باشد. در حالی که انرژی خورشیدی مزایای قابل توجهی مانند کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی ارائه می‌دهد، محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی در شب و وابستگی به شرایط آب‌وهوایی، کاربرد گسترده آن را با چالش‌هایی مواجه می‌سازد. سامانه‌های تهویه مطبوع خورشیدی رویکردی عملی و پایدار برای کاهش مصرف انرژی هستند، اما ارزیابی دقیق کارایی و توانایی این سامانه‌ها برای اطمینان از پاسخگویی به نیازهای گرمایش، سرمایش و تهویه ضروری است (Abdallah et al., 2013; F. Cheng et al., 2023; Krüger et al., 2013; Ruiz et al., 2005). ترکیب دودکش خورشیدی با اجزای حرارتی دیگر مانند سامانه سرمایش تبخیری می‌تواند قابلیت اطمینان سامانه را افزایش دهد و مشکلات ناشی از دسترسی ناپیوسته به انرژی خورشیدی را برطرف سازد. یکی از روش‌های کاربرد انرژی خورشیدی در فرآیند تهویه مطبوع گلخانه‌ها، استفاده از دودکش خورشیدی نصب‌شده روی دیوار گلخانه است. این دودکش که به عنوان "دودکش خورشیدی دیواری"<sup>۳</sup> شناخته می‌شود، بخشی از سامانه‌های تهویه طبیعی است که با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، جریان هوای داخلی سازه را بهبود می‌بخشد. این سامانه شامل محفظه‌ای عمودی از مواد با ضریب جذب حرارتی بالا است که با تابش خورشید، هوا را گرم کرده و جریان هوای گرم به سمت بالا را تحریک می‌کند. این فرآیند، جریان هوای طبیعی ایجاد کرده و موجب تهویه، سرمایش یا گرمایش سازه می‌شود. در گلخانه‌ها، این دودکش‌ها برای یکنواختی دما و رطوبت، جلوگیری از میعان روی سطوح، و بهبود توزیع هوا در میان گیاهان کاربرد دارند. از مزایای آن می‌توان به کاهش نیاز به سامانه‌های تهویه مکانیکی و کاهش مصرف انرژی، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، اشاره کرد. این فناوری نسبت به دودکش‌های خورشیدی سقفی، مزایایی مانند بهینه‌سازی فضای نورگیر و تهویه طبیعی یکنواخت‌تر را فراهم می‌آورد. برای ارزیابی سامانه‌های کنترل اقلیم گلخانه‌ای، بررسی جامع و دقیق مجموعه‌ای از پارامترها، ضروری است تا کارایی آن‌ها به‌درستی سنجیده شود. جریان هوا در داخل گلخانه نقش حیاتی در توزیع دما، رطوبت و دی‌اکسیدکربن ایفا می‌کند و به طور مستقیم بر رشد گیاهان و پایداری ریزاقلیم تأثیر می‌گذارد. یکی از شاخص‌های کلیدی در این زمینه، نرخ تعویض ساعتی هوا<sup>۴</sup> (ACH) است که کارایی تهویه را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که هوای تازه به مقدار کافی برای حفظ شرایط رشد مطلوب در گردش باشد. علاوه بر آن، شاخص یکنواختی دما<sup>۵</sup> (TUI) معیاری کمی برای ارزیابی یکنواختی دما در سراسر گلخانه ارائه می‌دهد و به جلوگیری از نقاط گرم یا سرد محلی که ممکن است به رشد نامتعادل گیاهان منجر شود، کمک می‌کند. همچنین، پایش دمای سطح سایبان (تاج) گیاهی<sup>۶</sup> به دلیل تأثیر مستقیم آن بر نرخ فتوسنتز و تعرق، اهمیت ویژه‌ای دارد و به عنوان شاخص اولیه سلامت گیاه عمل می‌کند. از سوی دیگر، ارزیابی عملکرد سامانه‌های سرمایش، گرمایش و تهویه از منظر کارایی انرژی الزامی است تا اطمینان حاصل شود که محیط گلخانه‌ای به‌طور بهینه کنترل می‌شود، هزینه‌های عملیاتی کاهش می‌یابد و بازده محصول افزایش می‌یابد. این پارامترها در کنار یکدیگر، درکی جامع از نحوه کنترل اقلیم در گلخانه فراهم می‌کنند و امکان بهینه‌سازی شرایط محیطی برای افزایش بهره‌وری کشاورزی را میسر می‌سازند. با وجود فراوانی منابع انرژی خورشیدی در اقلیم‌های گرم و بیابانی، پتانسیل استفاده از دودکش‌های خورشیدی به عنوان ابزاری برای تهویه

1. Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)
2. Solar chimney
3. Wall-mounted solar chimney
4. Air Changes per Hour (ACH)
5. Temperature Uniformity Index (TUI)
6. Gnapy plane



بررسی‌های مرتبط با گلخانه‌ها، دقت و قابلیت اعتماد این شبیه‌سازی‌ها را تأیید کرده‌اند (Chen et al., 2014; X. Cheng et al., 2021; Ghosal et al., 2004; Khaoua et al., 2006; R. Kim et al., 2021b, 2021a; Sethi, 2009; Tong et al., 2019).

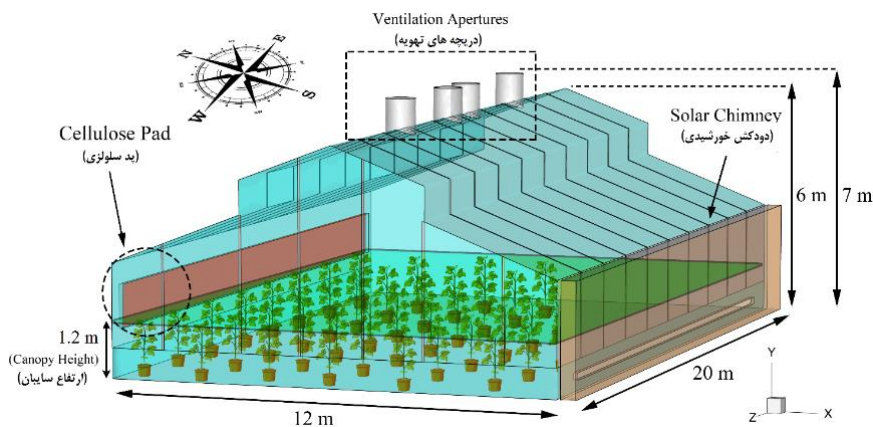
## روشن‌شناسی پژوهش

اهواز، دارای چهار فصل متمایز با آب‌وهوای بیابانی است که شامل تابستان‌های بسیار گرم، زمستان‌های معتدل و دوره‌های کوتاه گذار در بهار و پاییز می‌شود (Weather Spark, 2023). در یک گلخانه معمولی در اهواز، مدیریت حرارتی مؤثر به دلیل دماهای شدید و شرایط خشک منطقه بسیار ضروری است. برای اطمینان از رشد بهینه گیاهان، تهویه طبیعی از طریق دریچه‌های تهویه برای خارج کردن هوای گرم و ارتقای تهویه متقابل اهمیت دارد. علاوه بر این، تهویه مکانیکی با استفاده از فن‌های خروجی<sup>۱</sup> و گردش به حفظ دما و رطوبت یکنواخت کمک می‌کند. روش‌های خنک‌سازی تبخیری مانند پدهای مرطوب و سامانه‌های مه‌پاش نیز دمای داخلی را کاهش می‌دهند. استفاده از عایق‌های حرارتی مانند پنل‌های دولایه و پرده‌های حرارتی به تثبیت دما کمک کرده و کنترل رطوبت از طریق دستگاه‌های رطوبت‌ساز و تکنیک‌های حفظ رطوبت، رطوبت مناسب هوا و خاک را تأمین می‌کند. این استراتژی‌ها یکپارچه به‌طور مؤثر شرایط سخت آب‌وهوایی اهواز را مدیریت کرده و امکان بهره‌برداری از گلخانه را در طول سال فراهم می‌سازند. در این مطالعه، نویسندگان استراتژی‌های تهویه مطبوع متداول را متناسب با دوره‌های فصلی خاص پیشنهاد و اجرا کرده‌اند. این استراتژی‌ها شامل خنک‌سازی با فن -پد از ۲۰ می تا ۱۲ اکتبر (۳۰ اردیبهشت تا ۲۰ مهر)، و گرمایش طبیعی خورشیدی از ۲۳ نوامبر تا ۴ مارس (۲ آذر تا ۱۳ اسفند) می‌باشند. با توجه به شرایط آب و هوایی اهواز، می‌توان از دودکش خورشیدی برای ایجاد جریان هوا در داخل گلخانه بهره گرفت. در فصل‌های گرم که معمولاً از روش فن -پد استفاده می‌شود، دودکش خورشیدی می‌تواند جایگزین فن‌ها برای هدایت هوا از میان پدهای مرطوب شود و مصرف انرژی را کاهش دهد. در فصل‌های خنک‌تر، زمانی که دمای محیط به اندازه کافی پایین است، دودکش خورشیدی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای تهویه طبیعی عمل کند. علاوه بر این، در فصل‌های سرد، دودکش خورشیدی می‌تواند در یک سامانه حلقه بسته برای تقویت گرمایش به کار گرفته شود. معیارهای ارزیابی عملکرد شامل کاهش دما در فصل‌های گرم، کارایی تهویه در فصل‌های خنک، و اثربخشی گرمایش در فصل‌های سرد می‌باشد. علاوه بر این، یکنواختی دما و مصرف کلی انرژی نیز مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. دمای محیط که تحت تأثیر شرایط اقلیمی منطقه قرار دارد و تابش خورشیدی که به موقعیت جغرافیایی، تاریخ تقویمی، زمان روز و فاکتور آفتابی وابسته است، تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت در داخل گلخانه و اجزای حرارتی آن دارد. افزون بر این، اجزای سامانه تهویه مطبوع استفاده‌شده در طول فصل‌ها متفاوت هستند. از این رو، وجود شرایط مرزی متغیر و توابع کنترل دما مدل‌سازی‌های متمایزی برای گلخانه در هر ماه از سال را ضروری می‌سازد. برای مقایسه با روش‌های متداول تهویه مطبوع در دوره‌های مشابه، مجموعاً ۱۸ شبیه‌سازی مورد نیاز است. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از هندسه مدل ثابت و تغییر شرایط مرزی و اجزای تهویه مطبوع انجام شده است. بخش‌های بعدی به توضیح هندسه مدل، شرایط مرزی، معادلات حاکم، روش‌های حل عددی و همچنین روش‌های ارزیابی و مقایسه عملکرد هر سامانه تهویه مطبوع خواهند پرداخت.

## هندسه، شبکه‌بندی و ویژگی‌های مواد مدل

گلخانه مورد بررسی در این مطالعه دارای سقف شیروانی دوتایی با ابعاد  $20 \times 12$  مترمربع و ارتفاع تاج ۶ متر است (شکل ۱). این گلخانه در مجموعه‌ای در دانشگاه شهید چمران اهواز، واقع شده است (عرض جغرافیایی:  $31,3059^\circ$  شمالی، طول جغرافیایی:  $48,6582^\circ$  شرقی، ارتفاع: ۱۴ متر از سطح دریا) و جهت‌گیری آن شمال غربی-جنوب شرقی است (شکل ۳). این گلخانه دارای دو فن خروجی در دیوار جنوب غربی و یک پد خنک‌کننده در تمام طول دیوار شمال شرقی است که آب با دبی  $1/5$  لیتر بر ثانیه روی پد پاشیده می‌شود. در فصل‌های گرم، هوای گرم و ساکن نزدیک سقف که کمتر تحت تأثیر جریان هوای تولیدشده توسط فن قرار می‌گیرد، از طریق چهار دریچه تهویه نصب‌شده روی سقف گلخانه تخلیه می‌شود. به‌عنوان پوشش نیمه‌شفاف برای دیوارهای جانبی و سقف، از ورق پلی‌کربنات شفاف دوجداره با ضخامت یک سانتی‌متر استفاده شد. مشخصات دقیق سامانه خنک‌کننده تبخیری فن -پد در جدول ۱ ارائه شده است. دودکش خورشیدی می‌تواند روی سقف (Abdeen et al., 2019; Arce et al., 2009)، یا دیوارهای ساختمان نصب شود (Arce et al., 2009). با امکان اعمال گرمایش در طول دیواره طولی (Asadi et al., 2016)، یا فقط در ابتدا و انتهای آن (Yusoff et al., 2010) برای جذب بهینه تابش خورشیدی. در گلخانه‌ها، طراحی کارآمد از نظر فضایی برای تأمین نور کافی جهت رشد گیاهان ضروری است. علاوه بر این، تهویه غیر یکنواخت در

گلخانه‌های بزرگ می‌توانند یکنواختی دما و رطوبت را مختل کرده و منجر به ایجاد میعان و گسترش قارچ‌ها و عوامل بیماری‌زا شود. با توجه به این عوامل، دودکش خورشیدی دیواری با ارتفاع محدود و موازی با طول گلخانه، از نظر تأمین نور و حفظ یکنواختی محیطی، نسبت به سامانه‌های نصب‌شده روی سقف مزیت دارد. در این مطالعه، یک دودکش خورشیدی به طول ۲۰ متر (طول گلخانه) و ارتفاع ۲/۷ متر روی دیوار جنوبی گلخانه شبیه‌سازی شد. فاصله بین دیواره جذب‌کننده و شیشه بیرونی دودکش برابر ۰/۴ متر در نظر گرفته شد (شکل ۱). دودکش خورشیدی دیواری از یک جمع‌کننده حرارتی عمودی و کانال‌های هوا تشکیل شده است. جمع‌کننده خورشیدی عمودی از یک قاب چوبی عایق حرارتی با چگالی متوسط به ابعاد ۲/۷×۲۰ متر تشکیل شده است که حاوی یک صفحه فولادی سیاه‌رنگ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر به‌عنوان جذب‌کننده و شیشه شفاف با ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان پوشش است. مشخصات حرارتی و اپتیکی سازه گلخانه، سامانه خنک‌کننده و دودکش خورشیدی در جدول ۲ ارائه شده است. هندسه مدل و شبکه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent 19.3 انجام شد. کیفیت شبکه از طریق تحلیل کجی و نسبت ابعادی سلول‌ها بررسی شد. با توجه به وابستگی مدل‌های آشفتگی رینولدز (استفاده‌شده در این مطالعه) به معیار  $y^+$ ، شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره‌ها برای اطمینان از رعایت بازه  $200 < y^+ < 20$  اصلاح شد (Mohammadi & Pironneau, 1994). پس از ارزیابی چهار وضوح مختلف شبکه و در نظر گرفتن زمان محاسبات، یک مش چهاروجهی تولید شد. برای تحلیل استقلال شبکه، از برون‌یابی ریچاردسون (Roache, 1998)، استفاده شد تا همگرایی مکانی در شبیه‌سازی‌ها تضمین شود. یک صفحه عمودی که مرکز فن را قطع می‌کند برای دستیابی به نتایج حالت پایدار بررسی شد. در ابتدا، شبکه شامل حدود ۲۰۰،۰۰۰ سلول بود که پس از پنج مرحله اصلاح به حدود ۳،۲۰۰،۰۰۰ سلول افزایش یافت. داده‌های سرعت جریان هوا از سطح سوم اصلاح (حدود ۱،۶۰۰،۰۰۰ سلول) دقت قابل قبولی در مقایسه با سطح چهارم (۳،۲۰۰،۰۰۰ سلول) نشان دادند. برون‌یابی ریچاردسون خطای ۲/۴۸ درصدی (در محاسبه متوسط سرعت جریان هوا) برای سطح چهارم شبکه را نشان داد و بهبود دقت در سطح پنجم (۶،۴۰۰،۰۰۰ سلول) حداقل بود. بنابراین، شبکه‌ای با اندازه تقریبی ۱،۶۰۰،۰۰۰ سلول برای این مطالعه کافی تشخیص داده شد، زیرا نتایج از بهبود بیشتر شبکه مستقل بودند.



شکل ۱. گلخانه با سقف شیروانی مجهز به دودکش خورشیدی رو به جنوب غرب، پد سلولزی در طرف مقابل و دریچه‌های تهویه سقف

جدول ۱. مشخصات سامانه سرمایش تبخیری فن-پد به کار گرفته شده

فن	پد
قطر (متر)	۰/۸
تعداد پروانه‌ها	۶
توان الکتریکی (کیلووات)	۰/۸۰۲
بازده توان	۴۶٪/۳
	نوع
	ابعاد (متر مکعب)
	جنس
	نرخ جریان آب (لیتر بر ثانیه)
	ضخامت ورق (متر)
	طول موجدار (متر)
	عرض موجدار (متر)
	تخلخل

1. Collector
2. Skewness and aspect ratio
3. Length of undulation
4. Width of undulation

جدول ۲. خواص حرارتی و اپتیکی مواد به کار رفته در سازه گلخانه و دودکش خورشیدی

سازه گلخانه			سازه دودکش خورشیدی				ورق صیقلی فولادی	ورق فولاد گالوانیزه	ویژگی‌ها
ورق پلی‌کربنات	فولاد	بتن	خاک	شیشه	چوب	پشم شیشه			
اپتیکی									
۰/۱	۰/۳۵	۰/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲۵	ضریب جذب	
۰/۰۸	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۰/۰۱	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۲	ضریب پراکندگی	
۱/۵۵	۲/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۵۲	۱/۴	۱/۱	۲/۵	ضریب شکست	
۰/۹۲	۰/۱۸	۰/۸۵	۰/۹	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۰۵	ضریب گسیل	
۰/۰۶	۰/۳۵	۰/۴	۰/۳	۰/۰۸	۰/۳	۰/۱۵	۰/۹۵	ضریب بازتاب	
۰/۸	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰/۳	۰/۸	۰	ضریب عبور	
حرارتی									
۱۱۶۰	۴۹۰	۸۸۰	۱۴۸۰	۸۴۰	۱۷۰۰	۱۰۰۰	۴۵۰	ظرفیت حرارتی ویژه (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	
۰/۲	۴۵	۱	۰/۵	۱/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۸	۱۶/۲	رسانایی حرارتی (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	

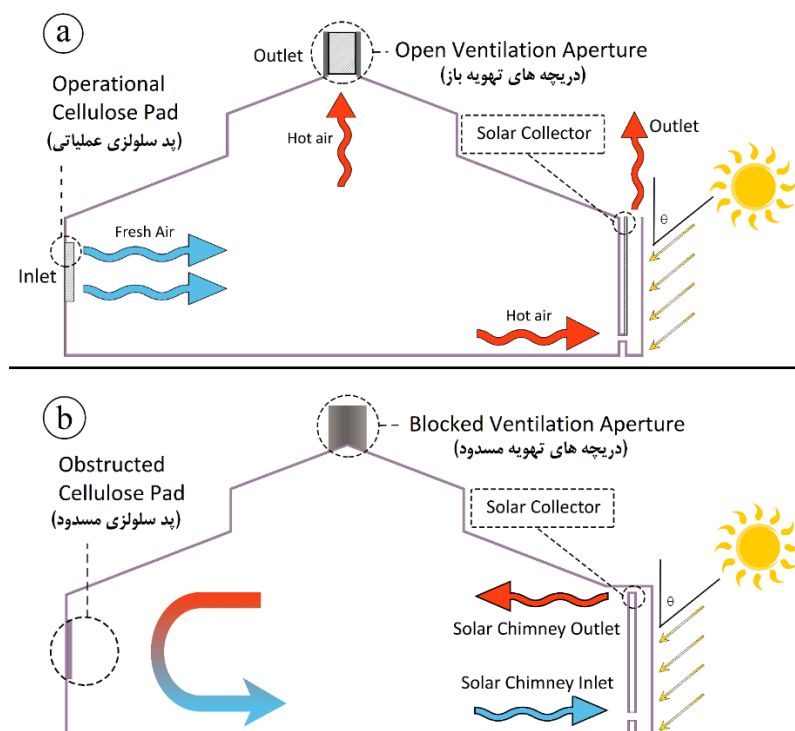
### شرایط مرزی مدل‌ها

همانطور که پیشتر اشاره شد، اهواز، دارای آب‌وهوای بیابانی با چهار فصل متمایز است که شامل تابستان‌های بسیار گرم، زمستان‌های معتدل، و دوره‌های گذار در بهار و پاییز می‌شود. دمای محیط، تابش خورشیدی وارده، نوع عملگر حرارتی، و استفاده از دودکش خورشیدی به‌عنوان یک عملگر کمکی در حالت مدار بسته یا باز (شکل ۲) به‌طور مشترک ۱۸ شرایط مرزی و پیکربندی متفاوت برای اجزای سامانه تهویه مطبوع ایجاد می‌کنند. این پیکربندی‌ها، که در جدول ۳ شرح داده شده‌اند، ۹ ماه سال را پوشش می‌دهند. در خلال سه ماه باقی مانده سال، گلخانه‌ها در اهواز نیاز به سامانه گرمایشی یا سرمایشی ندارند. داده‌های اقلیمی مورد استفاده، از سری زمانی دمای سال ۲۰۲۴ اهواز، ثبت شده در زمان ظهر خورشیدی استخراج شده‌اند (Weather and Climate, 2024). تابش خورشیدی وارده با استفاده از زیرمدل جهات گسسته<sup>۱</sup> (DO) در مدل اعمال شده است. این زیرمدل به‌طور خودکار تابش خورشیدی وارده را که به عرض جغرافیایی (۳۱٫۳۰۵۹° شمالی)، طول جغرافیایی (۴۸٫۶۵۸۲° شرقی)، تاریخ تقویمی (۱۳:۱۲ ظهر به‌عنوان ظهر خورشیدی)، زمان محلی و عامل آفتابی منطقه وابسته است، محاسبه و به‌عنوان شرایط مرزی در مدل اعمال می‌کند. این روش به‌طور دقیق ویژگی‌های تابشی طیفی محفظه نیمه‌شفاف گلخانه، شامل سقف و دیواره‌های جانبی، را ثبت می‌کند. این رویکرد با آزمایش‌های فیزیکی انجام شده توسط مونتررو و همکاران (Montero et al., 2005)، کیم و همکاران (K. Kim et al., 2008)، و بورت و همکاران (Bournet et al., 2007)، و همچنین نویسندگان همین مطالعه در همین گلخانه (Saberian & Sajadiye, 2019, 2020)، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. شرح دقیق معادله انتقال تابش در چارچوب معادلات حاکم در بخش بعدی ارائه شده است.

جدول ۳. شرایط مرزی و پیکربندی اجزای سامانه تهویه مطبوع برای ۱۸ سناریوی شبیه‌سازی

تهویه مطبوع اجزای سامانه						ماه	دمای متوسط محیط (°C)	رطوبت نسبی (%)	شرایط حرارتی	وضعیت پد سلولزی	مرسوم	
با کمک دودکش خورشیدی		دریچه‌های تهویه		شماره	فن تخلیه							
شماره	دودکش خورشیدی	دریچه‌های تهویه	شماره	فن تخلیه	وضعیت پد سلولزی	شرایط حرارتی	رطوبت نسبی (%)	دمای متوسط محیط (°C)	ماه			
۱	حلقه بسته	مسدود	۲	مسدود و غیرفعال	مسدود	گرمایش	۴۶/۰۷	۲۰/۷۵	ژانویه (دی)			
۳	حلقه بسته	مسدود	۴	مسدود و غیرفعال	مسدود	گرمایش	۴۰/۰۷	۲۳/۳۵	فوریه (بهمن)			
۵	حلقه باز	باز	۶	عملیاتی	مرطوب و عملیاتی	سرمایش	۱۵/۹	۴۳/۱۲	مه (اردیبهشت)			
۷	حلقه باز	باز	۸	عملیاتی	مرطوب و عملیاتی	سرمایش	۹/۲۱	۴۸/۹۲	ژوئن (خرداد)			
۹	حلقه باز	باز	۱۰	عملیاتی	مرطوب و عملیاتی	سرمایش	۱۰/۶۶	۵۱/۴	ژوئیه (تیر)			
۱۱	حلقه باز	باز	۱۲	عملیاتی	مرطوب و عملیاتی	سرمایش	۱۱/۹۴	۵۰/۸۶	اوت (مرداد)			
۱۳	حلقه باز	باز	۱۴	عملیاتی	مرطوب و عملیاتی	سرمایش	۱۳/۰۲	۴۶/۷۹	سپتامبر (شهریور)			
۱۵	حلقه بسته	مسدود	۱۶	مسدود و غیرفعال	مسدود	گرمایش	۳۷/۳۶	۲۸/۴۱	نوامبر (آبان)			
۱۷	حلقه بسته	مسدود	۱۸	مسدود و غیرفعال	مسدود	گرمایش	۴۴/۸	۲۲/۲۱	دسامبر (آذر)			





شکل ۲. نمایش شماتیک یک گلخانه مجهز به دودکش خورشیدی در حالت مدار باز برای خنک‌سازی و تهویه (a) و حالت مدار بسته برای گرمایش (b)

### معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی الگوهای جریان هوا و انتقال حرارت در محیط گلخانه، از یک مدل سه‌بعدی CFD استفاده شد. معادلات حاکم شامل بقای جرم، مومنتوم و انرژی (Saberian & Sajadiye, 2019) به صورت عددی و بر اساس روش‌شناسی ارائه‌شده توسط چانگ (Chung, 2002) حل شدند. با توجه به کارایی محاسباتی و عملکرد رضایت‌بخش مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد که در مطالعات قبلی مربوط به محیط‌های گلخانه‌ای نشان داده شده است (Ali et al., 2014; Bartzanas et al., 2004; WANG et al., 2013)، و همچنین اعتبارسنجی آن در مقایسه با مدل تنش رینولدز در تحلیل‌های تطبیقی انجام‌شده در محیط گلخانه، این مدل برای معادلات آشفتگی انتخاب شد (Shklyar & Arbel, 2004). برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شناوری که به دلیل تغییرات دمایی ایجاد می‌شود، از تقریب بوسینسک استفاده شد. این روش در مقایسه با فرمول‌بندی‌های کاملاً هم‌بسته چگالی-دما، همگرایی محاسباتی را تسریع می‌کند. مدل بوسینسک فرض می‌کند که چگالی سیال ثابت است، به جز در جمله شناوری در معادله مومنتوم، که در آن تغییرات چگالی به عنوان عاملی تأثیرگذار بر رفتار سیال تحت گرانش در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی تابش خورشیدی، از زیرمدل DO استفاده شد که در رابطه ۱ ارائه شده است. چارچوب شبیه‌سازی شامل مجموعه‌ای جامع از پارامترهای ورودی است که شامل مختصات جغرافیایی، زمان هماهنگ جهانی (UTC)، و زاویه آزیموت، زمان محلی می‌شود. این مدل، انتقال طیفی، جذب و پراکندگی تابش خورشیدی توسط اجزای گلخانه را با تأکید ویژه بر ویژگی‌های اپتیکی پوشش‌های نیمه‌شفاف دیواره‌ها، همان‌گونه که پیشتر در جدول ۲ شرح داده شد، کمی‌سازی کرد. برای شبیه‌سازی پد خنک‌کننده نصب‌شده بر روی دیوار شمالی گلخانه، از روش مدل‌سازی محیط متخلخل استفاده شد. برای بازنمایی دقیق تأثیر فن و پد بر سامانه، جمله‌های منبع مومنتوم و انرژی در معادلات حاکم بر جریان سیال و انرژی ادغام شدند. با توجه به شرایط اشباع محیط متخلخل، فرض تعادل حرارتی موضعی بین هوا و پد خنک‌کننده، که توسط ناکایاما و کاواهارا (Nakayama & Kuwahara, 2005)، تأیید شده است، اتخاذ شد. بر این اساس، ترم منبع انرژی در معادله انرژی محیط متخلخل به صورت رابطه ۲ فرموله شد. مدل فن بر اساس منحنی عملکرد ارائه‌شده توسط سازنده تنظیم شد (Saberian & Sajadiye, 2020). جمله اتلاف مومنتوم در پد خنک‌کننده متخلخل با استفاده از معادله داریسی-فورس‌هایمر،

1. Reynolds Stress Model
2. Boussinesq approximation
3. Azimuth angle

همان‌گونه که در (Franco et al., 2014) تشریح شده است (رابطه ۳)، مدل‌سازی شد. در این رابطه ضرایب نفوذپذیری و مقاومت اینرسی در پد سلولزی، که به ترتیب با  $\alpha$  و  $C_2$  نشان داده می‌شوند، به مقادیر  $10^{-7} \times 2/5$  مترمربع و  $150$  بر روی متر، مطابق داده‌های ارائه‌شده توسط تأمین‌کننده اختصاص داده شدند.

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$S_h^c = - \frac{h_h A_h (T_a - T_{wb})}{V_h} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

### روش‌های عددی گسسته و فرآیندهای حل

معادلات حاکم بر مومنتوم و آشفتگی با استفاده از روش آپویند مرتبه دوم گسسته‌سازی شدند. کوپلینگ فشار-سرعت به صورت ضمنی و از طریق الگوریتم SIMPLEC مدیریت شد. شبیه‌سازی‌های حالت پایا تحت شرایط محیطی گلخانه انجام شد. آستانه همگرایی برای انرژی  $10^{-6}$  و برای پیوستگی، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی  $10^{-4}$  تعیین شد. برای رعایت اصول توابع دیواره استاندارد مطابق با (Mohammadi & Pironneau, 1994)، مش‌بندی در نزدیکی مرزهای دیواره‌ها برای حفظ مقادیر  $y^+$  در محدوده توصیه‌شده  $20$  تا  $200$  اصلاح شد. استقلال شبکه از طریق یک فرآیند سیستماتیک اصلاح شبکه تأیید شد که در نهایت منجر به مشی با حدود  $1/6$  میلیون سلول شد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent 19.3 انجام شد و پردازش داده‌ها با نرم‌افزار Tecplot 2021 R2 صورت گرفت. منابع محاسباتی شامل یک پردازنده Intel Core i7-4710HQ با  $16$  گیگابایت رم بود که برای هر شبیه‌سازی حدود  $36$  ساعت پردازش CPU نیاز داشت.

### اعتبارسنجی مدل CFD

ارزیابی و تعیین اعتبار شبیه‌سازی‌ها در شرایط محیطی گلخانه برای بهبود کارایی عملیاتی ضروری است. به همین منظور، دو مطالعه جامع توسط همین نویسندگان در همین گلخانه برای اعتبارسنجی مدل CFD در پیش‌بینی دما، سرعت جریان هوا و تابش خورشیدی انجام شد. مطالعه اول، که از  $10$  تا  $15$  ژوئیه (۱۹ تا ۲۴ تیر) انجام شد، عملکرد مدل در شبیه‌سازی دما و تابش خورشیدی را ارزیابی کرد (Saberian & Sajadiye, 2019). در این مطالعه، دما در  $155$  نقطه با استفاده از حسگرهای حرارتی و تابش جهانی با یک پیرانومتر اندازه‌گیری شد. داده‌ها سه بار در روز جمع‌آوری شدند و پیش‌بینی‌های مدل از طریق تحلیل رگرسیون و محاسبه خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ارزیابی شد. مطالعه دوم دامنه اعتبارسنجی را گسترش داد و شامل اندازه‌گیری سرعت جریان هوا با سامانه خنک‌کننده فعال بود. داده‌ها در  $80$  نقطه نزدیک به فن با استفاده از یک بادسنج تیغه‌ای و حسگرهای حرارتی جمع‌آوری شدند (Saberian & Sajadiye, 2020). روش‌های آماری مشابهی برای مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های تجربی استفاده شد. نتایج هر دو مطالعه، اثربخشی مدل CFD در پیش‌بینی شرایط محیطی گلخانه را تأیید کردند. مطالعه اول با ضرایب همبستگی  $0.78$  تا  $0.89$  و مقادیر RMSE بین  $1/88$  تا  $3/03$  درجه سلسیوس همبستگی قوی بین دماهای شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده را نشان داد. شبیه‌سازی تابش خورشیدی نیز با ضریب همبستگی  $0.99$  و RMSE برابر با  $75/58 \text{ W/m}^2$  انطباق بسیار خوب با نتایج داده‌های آزمایشگاهی را نشان داد. مطالعه دوم یافته‌های فوق را تأیید کرد و ضریب همبستگی  $0.98$  برای سرعت جریان هوا و RMSE برابر با  $0.4$  متربرثانیه و RMSE دما برابر با  $2/2$  درجه سلسیوس را نشان داد. پیش‌بینی‌های تابش خورشیدی نیز با نتایج مطالعه اول سازگار بود. این نتایج به‌طور کلی، توانایی مدل را در شبیه‌سازی دقیق تعاملات جریان هوا، توزیع دما و تابش خورشیدی در گلخانه تأیید می‌کنند و استفاده از این مدل را به‌جای انجام آزمایش‌های فیزیکی بیشتر توجیه می‌کنند.

### ارزیابی عملکرد حرارتی

این بخش به تحلیل جامع عملکرد حرارتی گلخانه در مراحل مختلف عملیاتی می‌پردازد. ارزیابی شامل جنبه‌های کلیدی نظیر خنک‌سازی، تهویه و گرمایش است. زیربخش‌های زیر روش‌شناسی‌های به‌کاررفته برای ارزیابی اثربخشی هر یک از استراتژی‌های مدیریت حرارتی را شرح می‌دهند.

### بازده خنک‌سازی تبخیری در ماه‌های گرم سال

در ماه‌های گرم سال، استفاده از سامانه‌های فن-پد برای خنک‌سازی گلخانه‌ها در اهواز رایج است. جایگزینی فن با دودکش خورشیدی نیز می‌تواند نیروی لازم برای حرکت هوا از طریق پد مرطوب را فراهم کند. برای ارزیابی اثربخشی این سامانه در تأمین جریان هوای کافی و انتقال حرارت از طریق پد مرطوب، پارامترهایی نظیر بازده خنک‌سازی تعریف می‌شوند. بازده سامانه خنک‌سازی تبخیری می‌تواند به صورت کمی از طریق بازده تبرید ( $\eta_c$ )، توسط رابطه ۴ ارزیابی شود (El-Dessouky et al., 1996; Franco et al., 2014). در این رابطه،  $T_o$  و  $T_i$  به ترتیب دماهای هوا در ورودی و خروجی پد مرطوب را نشان می‌دهند، در حالی که  $T_w$  دمای حباب تر در خروجی پد است که تحت تأثیر دمای داخلی و رطوبت نسبی قرار دارد. با نرمال‌سازی صورت و مخرج در رابطه فوق، نسبت به  $T_i$  و سپس بازآرایی معادله، رابطه‌ای خطی به دست می‌آید. نمودار نسبت بدون بُعد  $To/T_i$  در برابر  $T_w/T_i$  یک خط مستقیم با شیب مشخص ایجاد خواهد کرد که شیب آن برابر با  $\eta_c$  خواهد بود.

$$\eta_c = \frac{(T_i - T_o)}{(T_i - T_w)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\frac{T_o}{T_i} = (1 - \eta_c) + \eta_c \frac{T_w}{T_i} \quad \text{رابطه ۵}$$

کاهش توان محوری فن به دلیل حذف فن‌ها از سامانه طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. در این فرمول،  $H$  نشان‌دهنده فشار استاتیکی،  $\dot{m}_{out}$  نرخ جریان جرمی فن‌ها،  $\eta_f$  بازده فن، و  $\rho$  چگالی هوا است.

$$P_{fan} = \frac{H \dot{m}_{out}}{\rho \eta_f} \quad \text{رابطه ۶}$$

علاوه بر مشاهده و ثبت دما، ACH در طول ۹ ماه نیز محاسبه و ارزیابی شد تا بازده کلی تهویه تحلیل شود. این محاسبه، شامل نرخ خروج جرمی هوا  $\dot{m}$  از گلخانه است (رابطه ۷). شاخص یکنواختی دما ( $TUI$ ) برای تحلیل عمیق‌تر کارایی سامانه تهویه و در سطح سایبان گیاهان محاسبه و ارزیابی شد. این شاخص به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود که در آن  $T_i$  دما در هر نقطه اندازه‌گیری،  $T_{avg}$  دمای میانگین،  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به ترتیب دماهای حداکثر و حداقل هستند.

$$ACH = \frac{\dot{m} \times 3600}{\rho V_{vol}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$TUI = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n (T_i - T_{ave})}{n(T_{max} - T_{min})} \quad \text{رابطه ۸}$$

### بازده سامانه گرمایش در ماه‌های سرد سال

در شرایط عادی طی ماه‌های سرد در اهواز، گرمایش فقط در شب برای حفظ دمای مناسب گلخانه مورد نیاز است، زیرا تابش خورشیدی در طول روز دمای هوای داخل را از محدوده ۲۰ تا ۲۸ به محدوده ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس می‌رساند. این محدوده دمایی معمولاً برای رشد بیشتر گیاهان مناسب است. با این حال، امکان افزایش بیشتر دما در طول روز می‌تواند فرصت‌هایی برای کشت گونه‌های گیاهی متنوع‌تر فراهم کند. استفاده از دودکش خورشیدی در حالت حلقه بسته روشی مکمل و اصلاحی برای افزایش دما در ماه‌های سرد است. بازده سامانه گرمایش از طریق رابطه ۹ ارزیابی شد. در این رابطه  $T_s$  دمای سطح سایبان گیاهان در هنگام عملکرد سامانه دودکش خورشیدی،  $T_{so}$  دمای خروجی دودکش خورشیدی،  $T_a$  دمای محیط بیرون گلخانه است.

$$\eta_h = \frac{T_s - T_a}{T_{so} - T_a} \quad \text{رابطه ۹}$$

### ارزیابی توان برودتی و حرارتی سامانه‌ها

معادلات زیر به طور جامع نرخ جریان جرمی و اختلاف دما را در سناریوهای مختلف خنک‌سازی و گرمایش گلخانه برای تعیین توان حرارتی بررسی می‌کنند. این تحلیل شامل استفاده از سامانه‌های متعارف تهویه مطبوع و سامانه‌های تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی در کاربردهای حلقه باز و بسته می‌باشد. توان برودتی در یک سامانه خنک‌سازی با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود که نرخ جریان جرمی و دماهای ورودی و خروجی گلخانه را در نظر می‌گیرد. در این معادله،  $\dot{m}_{in}$  نرخ جریان جرمی و  $T_i$  دمای ورودی به گلخانه از طریق پد مرطوب و  $T_o$  دمای خروجی از طریق فن‌های گلخانه است. در سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی حلقه بسته که در ماه‌های

سرد سال استفاده می‌شود، توان حرارتی برای گرمایش با استفاده از نرخ جریان هوای داخل دودکش خورشیدی  $\dot{m}_s$  و دماهای ورودی  $T_{so}$  و خروجی آن  $T_{si}$  مطابق رابطه ۱۱ محاسبه می‌گردد. بازده حرارتی جمع‌کننده دودکش خورشیدی  $\eta_{col}$  بر اساس استاندارد تدوین شده توسط انجمن گرمایش و تهویه و تبرید آمریکا<sup>۱</sup> (American Society of Heating & Engineers, 1978)، و مطابق رابطه ۱۲، تعیین شد. این بازده که با نشان داده می‌شود. در این معادله،  $T_{so}$  و  $T_{si}$  به ترتیب دماهای ورودی و خروجی هوای دودکش خورشیدی،  $I_G$  تابش خورشیدی و  $\dot{m}_s$  نرخ جریان هوای داخل دودکش خورشیدی را نشان می‌دهند.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{in} C_p (T_i - T_o) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

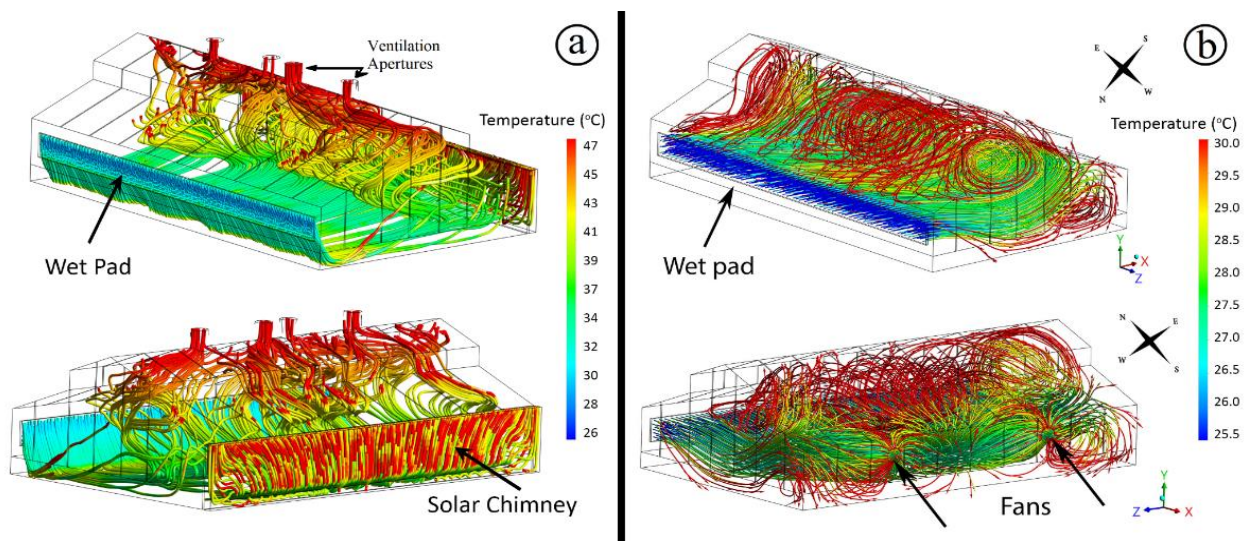
$$\dot{Q} = \dot{m}_s C_p (T_{so} - T_{si}) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m}_s C_p (T_{so} - T_{si})}{I_G A} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

## یافته های پژوهش و بحث

### ارزیابی عملکرد خنک‌سازی در ماه‌های گرم سال

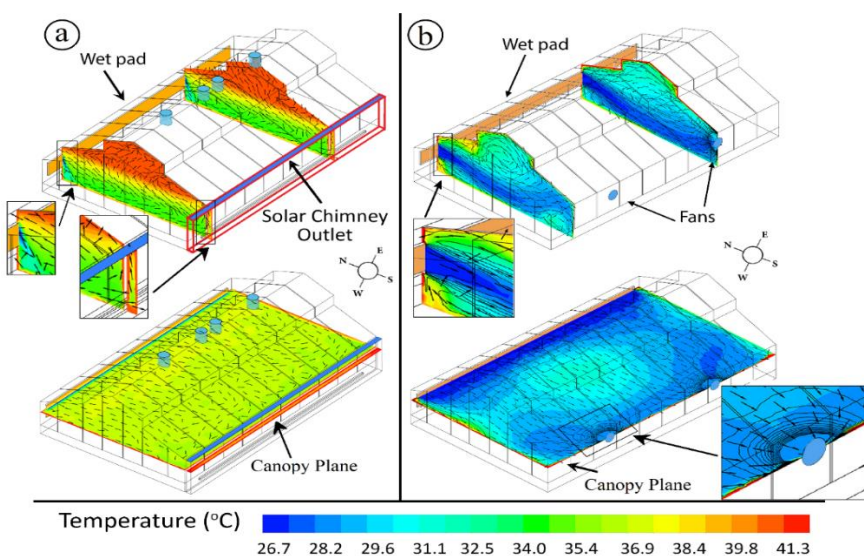
توزیع دمای هوا در مسیر جریان داخل گلخانه در نیمروز خورشیدی برای سامانه‌های متعارف فن-پد و سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در مدل، عملکرد حرارتی اجزایی نظیر پد مرطوب، فن، دودکش خورشیدی و دریچه‌های تهویه در نیمروز خورشیدی ۱۶ جولای (۲۵ تیر) را به‌دقت نمایش می‌دهد. همچنین این مدل الگوهای مختلف گردش هوا در داخل گلخانه، به‌ویژه الگوهای متاثر از دودکش خورشیدی و دریچه‌های تهویه را در مقایسه با سامانه پد-فن متعارف نشان می‌دهد. در سامانه‌های تهویه مطبوع متعارف، هوا از طریق پد مرطوب توسط فن‌های خروجی به داخل مکیده می‌شود، خنک شده، سپس توسط هوای گرم گلخانه و تابش خورشید گرم می‌شود و در نهایت از طریق فن‌ها خارج می‌گردد. جایگزینی فن با دودکش خورشیدی منجر به جریان هوای ضعیف‌تر از طریق پد مرطوب می‌شود که انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. این جریان آرام با هوای گلخانه به حداقل ممکن مخلوط شده و در ارتفاع پایین گیاه دمایی بسیار یکنواخت ایجاد می‌کند. هوای با حرکت آهسته به‌تدریج گرم شده و در نهایت از خروجی دودکش خورشیدی خارج می‌شود. این الگوی جریان آرام به‌طور مؤثری گلخانه را به دو ناحیه تقسیم می‌کند: زیر ارتفاع پایین گیاه، جایی که جریان هوای خنک و آرام غالب است، و بالای این ارتفاع، جایی که هوا عمدتاً ساکن و تحت تاثیر نیروهای شناوری است. در نتیجه، جریان ضعیفی به سمت دریچه‌های تهویه حرکت می‌کند که به‌دلیل تابش خورشید و گرمای ایجاد شده از صفحات پلی‌اتیلنی سقف، به‌طور قابل توجهی گرم‌تر از دمای میانگین گلخانه می‌شود.



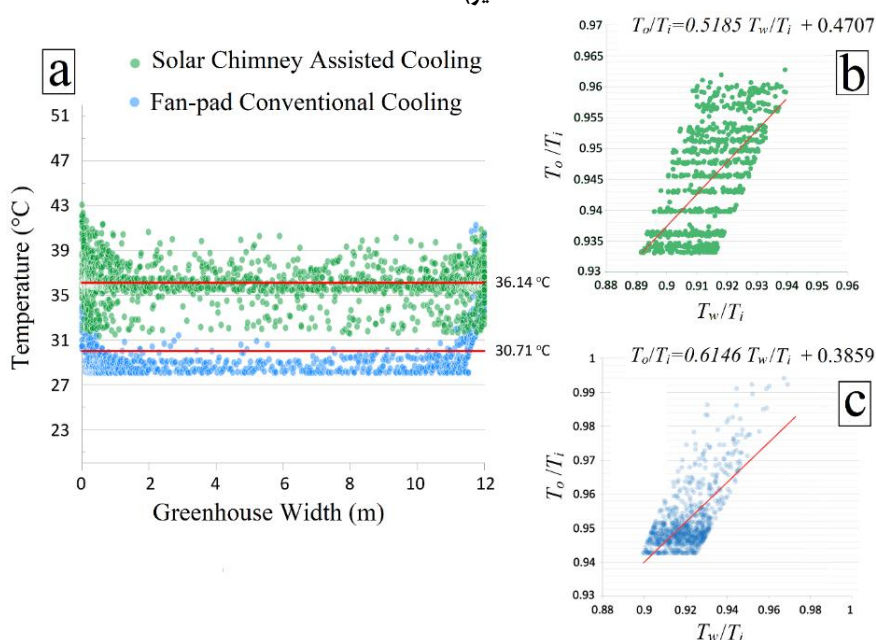
شکل ۳. توزیع دمای هوا در امتداد خطوط جریان درون گلخانه در ظهر خورشیدی ۱۶ جولای (۲۵ تیر)، مقایسه بین (a) سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی و (b) سامانه مرسوم خنک‌کننده تبخیری فن-پد (Saberian & Sajadiye, 2020)

1. American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE)

شکل ۴، الگوهای جریان ناشی از فن‌ها در سامانه متعارف و جریان‌های ضعیف‌تر شکل گرفته توسط دودکش خورشیدی را با استفاده از بردارهای سرعت جریان هوا و کانتورهای دما را در تاریخ ۱۶ جولای (۲۵ تیر) به تفصیل نشان می‌دهد. همچنین، این شکل به تقسیم هوای گلخانه به دو لایه متمایز اشاره دارد. اختلاف دمای هوا در بالای ارتفاع سایبان گیاهی و زیر آن در سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی به حدود ۸ درجه سلسیوس می‌رسد، در حالی که این اختلاف در سامانه متعارف حدود ۳ درجه سلسیوس است. با این حال، یکنواختی دما در ارتفاع سایبان گیاه برای سامانه متعارف بیشتر از سامانه با دودکش خورشیدی است ( $TUI$  برابر  $0.82$  در مقابل  $0.75$ ). شکل ۵، توزیع و میانگین دما در ارتفاع سایبان گیاه در عرض گلخانه (از پد تا فن یا دودکش خورشیدی) را برای هر دو روش خنک‌سازی در تاریخ ۱۶ جولای (۲۵ تیر) نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به تاریخ فوق‌الذکر نشان می‌دهند که اگرچه دمای متوسط گلخانه در سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی ( $36/14$  درجه سلسیوس) نسبت به روش متعارف ( $30/71$  درجه سلسیوس) بالاتر است، اما دمای سطح سایبان گیاه همچنان در محدوده قابل تحمل برای گیاهان باقی می‌ماند.



شکل ۴. کانتورهای دمای هوا و بردارهای سرعت جریان هوا برای (a) سامانه خنک‌کننده با کمک دودکش خورشیدی و (b) سامانه خنک‌کننده تبخیری فن-پد، نمایش داده شده در برش‌های عمودی (بالا) و در سطح سایبان گیاهی (پایین) درون گلخانه در ظهر خورشیدی ۱۶ جولای (۲۵ تیر)



شکل ۵. مقایسه توزیع و میانگین دما در سطح سایبان گیاهی در عرض گلخانه برای هر دو روش خنک‌کننده (a)، و بازده خنک‌کننده پد مرطوب برای هر دو سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی (b) و سامانه مرسوم خنک‌کننده تبخیری فن-پد (c) در ظهر خورشیدی ۱۶ جولای (۲۵ تیر)

جدول ۴ به مقایسه عملکرد دو سامانه حرارتی طی یک دوره پنج‌ماهه خنک‌سازی از ماه مه تا سپتامبر (اردیبهشت تا شهریور) می‌پردازد و شاخص‌های کلیدی مانند دمای داخلی و دمای سطح سایبان گیاه،  $TUI$ ،  $ACH$ ، توان معادل تبرید و بازده تبرید را بررسی می‌کند. همچنین بازده جمع‌کننده دودکش خورشیدی ارزیابی شده و صرفه‌جویی انرژی ناشی از حذف توان محوری فن در سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی برجسته شده است. مطابق داده‌های جدول، تفاوت‌های عملکردی قابل توجهی بین پارامترهای مختلف مشاهده می‌شود. داده‌های ماهانه نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین دماهای محیطی و داخلی است، به طوری که دمای اوج  $51/4$  درجه سلسیوس در ماه ژوئیه (خرداد) با بالاترین دماهای داخلی برای هر دو سامانه مطابقت دارد. به طور متوسط، سامانه دودکش خورشیدی دماهای داخلی بالاتری ( $35/12$  درجه سلسیوس در مقابل  $29/42$  درجه سلسیوس) و  $TUI$  کمتری ( $0/73$  در مقابل  $0/82$ ) نسبت به سامانه متعارف نشان می‌دهد؛ اما دماهای سطح سایبان گیاه در گرم‌ترین ماه‌ها برای هر دو سامانه همچنان در محدوده قابل تحمل باقی می‌مانند. اگرچه توان تبریدی سامانه دودکش خورشیدی به طور قابل توجهی کمتر از سامانه متعارف است ( $5/41$  کیلووات در مقابل  $46/19$  کیلووات)، این سامانه همچنان به کاهش دمایی بین  $13$  تا  $17$  درجه سلسیوس دست می‌یابد. این کاهش به طور قابل توجهی بیشتر از کاهش‌های گزارش شده در آب‌وهوای مشابه توسط عبدالله و همکاران (Abdallah et al., 2013) در مصر و ربانی و همکاران (Rabani et al., 2014) در یزد (ایران) است که به ترتیب کاهش‌های  $10-11/5$  درجه سلسیوس و  $9-14$  درجه سلسیوس را گزارش کرده‌اند. این تفاوت ممکن است ناشی از تفاوت در سامانه تبخیری، پارامترهای طراحی و مقیاس و سایر ویژگی‌های هندسی سامانه باشد. مطالعات مختلف کاهش دما از  $3/5$  تا  $18/6$  درجه سلسیوس را در سامانه‌های خنک‌سازی تبخیری مبتنی بر دودکش خورشیدی گزارش کرده‌اند (Abdallah, 2017; Abdallah et al., 2013, 2014; Ahmadikia et al., 2012; Bouchahm et al., 2011; Kalantar, 2009; Khani et al., 2017; Maerefat & Haghghi, 2010; Moosavi et al., 2020; Spentzou et al., 2017; Swiegers, 2015).

همچنین، جدول ۴، همبستگی معکوسی بین تابش خورشیدی و نرخ جریان جرمی در دودکش خورشیدی نشان می‌دهد که ناشی از دماهای بالاتر محیطی و داخلی است که بر عملکرد جمع‌کننده تاثیر می‌گذارد. افزایش تابش خورشیدی، چگالی هوا را کاهش داده و بر تهویه طبیعی اثر می‌گذارد. سامانه دودکش خورشیدی به  $ACH$  برابر با  $3/82$  دست می‌یابد، در حالی که سامانه متعارف به طور متوسط برابر  $9/01$  است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه سازگار است که برای سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی  $ACH$  در بازه  $2/42$  تا  $4/33$  (Maerefat & Haghghi, 2010) و برای سامانه خنک‌سازی تبخیری مبتنی بر دودکش خورشیدی در بازه  $4/07$  تا  $6/95$  (Abdallah et al., 2013) گزارش کرده‌اند. با این حال، هر دو سامانه نسبت به بازه پیشنهادی ASAE برای ماه‌های تابستان ( $30-60$ ) به طور قابل توجهی عملکرد پایین‌تری دارند (ASAE, 2003). بازده خنک‌سازی ( $\eta_c$ ) نیز با میانگین  $0/62$  و حداکثر  $0/68$  در مقایسه با میانگین  $0/56$  و حداکثر  $0/66$  برای سامانه با کمک دودکش خورشیدی به نفع سامانه متعارف است. اختلاف در نرخ جریان جرمی ( $1/02$  کیلوگرم بر ثانیه برای سامانه دودکش خورشیدی در مقابل  $2/4$  کیلوگرم بر ثانیه برای سامانه فن-پد)، منجر به تفاوت در بازده خنک‌سازی می‌شود. ارزیابی‌های بیشتر از سامانه دودکش خورشیدی نشان‌دهنده بازده جمع‌کننده ( $\eta_{col}$ ) نسبتاً پایین با میانگین  $0/13$  و حداکثر  $0/17$  است، که نشان‌دهنده پتانسیل بهبود طراحی و عملکردی برای افزایش بهره‌وری کلی می‌باشد. سامانه‌های مشابه، بازده جمع‌کننده‌ای برابر با  $0/48$  در گلخانه‌ها گزارش کرده‌اند (Nie et al., 2024). این تفاوت ممکن است به دلیل ارتفاع کم دودکش خورشیدی باشد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ارتفاع یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر عملکرد حرارتی دودکش‌های خورشیدی است (Lee & Strand, 2009; Lomas, 2007). علاوه بر این، دماهای داخلی و خارجی و سایر پارامترهای طراحی و عملکردی به طور کامل با شرایط تحقیقات مشابه هم‌خوانی ندارند. یکی از مزایای قابل توجه روش خنک‌سازی با کمک دودکش خورشیدی، حذف نیاز به توان محوری فن است، که به طور متوسط در سامانه‌های متعارف برابر با  $2/59$  کیلووات است و به کاهش هزینه‌های عملیاتی و انتشار کربن کمک می‌کند. کاهش زمان عملکرد فن به طور تقریبی ۸ ساعت در روز می‌تواند مصرف برق را در ماه‌های گرم حدود ۶۰ درصد کاهش دهد. کاهش توان محور فن ۵۰ درصدی در مطالعه مشابهی در یک منزل مسکونی در توکیو، ژاپن، گزارش شده است (Miyazaki et al., 2006). اگرچه در این مقاله به طور مستقیم به آن پرداخته نشده است، تاثیرات اقتصادی بالقوه و صرفه‌جویی هزینه‌های ناشی از استفاده از تهویه طبیعی نیازمند بررسی دقیق در مطالعات آینده است، به ویژه پس از اثبات توانایی تهویه طبیعی در تطبیق با اقلیم‌هایی شبیه به اهواز. صرفه‌جویی انرژی و هزینه‌های اقتصادی تهویه طبیعی توسط جمهده و همکاران (Jomehadeh et al., 2020) مرور شده است و مطالعه آن توصیه می‌شود. به طور کلی، این یافته‌ها بر اهمیت تنظیم و انطباق هر سامانه با شرایط اقلیمی و نیازهای عملیاتی خاص تاکید دارند. در حالی که سامانه متعارف در حفظ دماهای پایین‌تر و نرخ تغییر هوای بالاتر برتری دارد، سامانه دودکش خورشیدی گزینه‌ای پایدارتر و بالقوه مقرون‌به‌صرفه‌تر ارائه می‌دهد، به ویژه با بهبودهای بیشتر در کارایی دودکش خورشیدی. این نتایج با منابع علمی موجود هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که در حالی که سامانه

دودکش خورشیدی از مزایای پایداری برخوردار است، ممکن است برای دستیابی به ظرفیت خنک‌سازی سامانه‌های متعارف در شرایط اقلیمی شدید به بهینه‌سازی بیشتری نیاز داشته باشد.

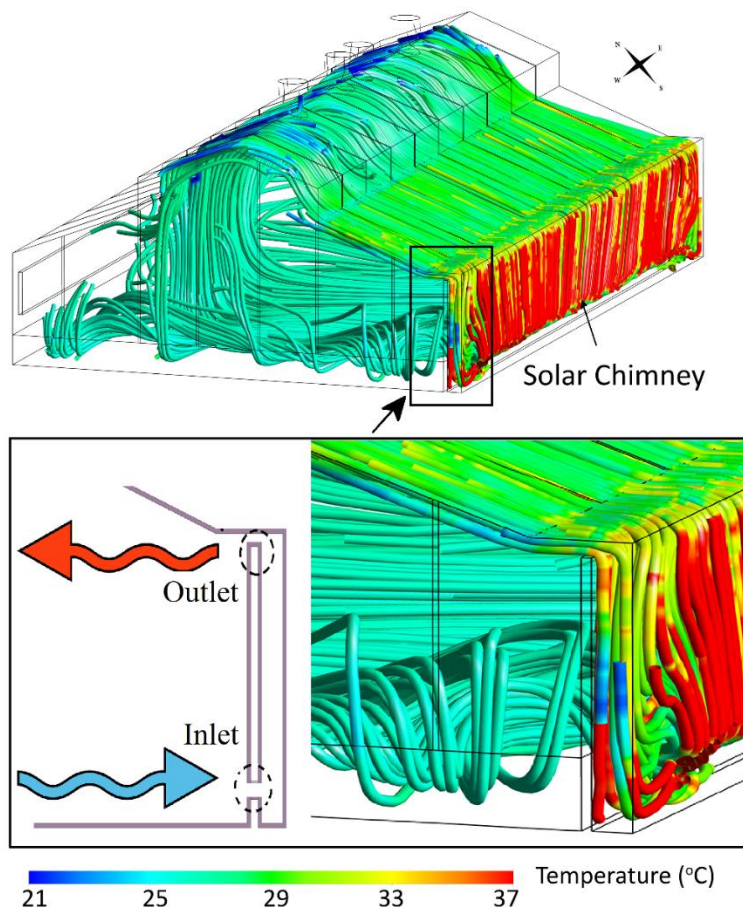
جدول ۴. تحلیل تطبیقی عملکرد سرمایشی در شرایط همراه با دودکش خورشیدی و شرایط سرمایشی مرسوم (فن-پد) در بازه زمانی پنج ماهه

پارامتر	May (اردیبهشت)	Jun (خرداد)	Jul (تیر)	Aug (مرداد)	Sep (شهریور)	میانگین	انحراف معیار
<b>شرایط محیطی</b>							
دما (°C)	۴۳/۱۲	۴۸/۹۲	۵۱/۴	۵۰/۸۶	۴۶/۷۹	۴۸/۲۲	۳/۳۸
رطوبت نسبی (%)	۱۵/۹	۹/۲۱	۱۰/۶۶	۱۱/۹۴	۱۳/۰۲	۱۲/۱۵	۲/۵۴
دمای حباب تر (°C)	۲۳/۱۴	۲۳/۱۷	۲۵/۵	۲۵/۹۵	۲۴/۰۸	۲۴/۳۷	۱/۳
شدت تابش خورشیدی (W/m <sup>2</sup> )	۸۳۲/۵۱	۹۳۳/۷۶	۹۰۰/۰۱	۸۳۲/۵۱	۷۴۲/۵۱	۸۴۸/۲۶	۷۳/۶
<b>خنک‌سازی با دودکش خورشیدی</b>							
<b>شاخص‌های حرارتی</b>							
دمای داخل (°C)	۳۲/۰۴	۳۶/۱۲	۳۸/۳۵	۳۷/۴۱	۳۱/۶۶	۳۵/۱۲	۳/۰۹
دمای سطح گیاه (°C)	۲۹/۷۷	۳۳/۹۲	۳۶/۱۴	۳۵/۰۸	۲۹/۵۳	۳۲/۸۹	۳/۰۶
شاخص یکنواختی دما (TUI)	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۰۹
دمای در خروجی دودکش خورشیدی (°C)	۳۸/۰۵	۴۴/۳۲	۴۸/۹۳	۴۷/۲۳	۴۱/۶۹	۴۴/۰۴	۴/۳۵
دمای در خروجی دریچه‌های تهویه سقفی (°C)	۴۹/۰۱	۵۵/۸۶	۵۹/۵	۵۸/۹	۵۳/۲۴	۵۵/۳	۴/۳۲
<b>شاخص‌های جریان هوا</b>							
دبی جرمی در خروجی دودکش خورشیدی (kg/s)	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۰۶
دبی جرمی در خروجی دریچه‌های تهویه (kg/s)	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۴	۰/۴۳	۰/۳۶	۰/۰۶
<b>شاخص‌های توان و بازده</b>							
تعویض هوای گلخانه در یک ساعت (ACH)	۳/۸۹	۴/۰۴	۳/۲۶	۳/۷۸	۴/۱۱	۳/۸۲	۰/۳۴
بازده تبرید	۰/۵۸	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۵۶	۰/۰۶
بازده جمع‌کننده	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۰۳
توان معادل تبرید (kW)	۵/۵۹	۵/۸۹	۳/۸۳	۵/۴۹	۶/۲۴	۵/۴۱	۰/۹۳
<b>خنک‌سازی متعارف فن-پد</b>							
<b>شاخص‌های حرارتی</b>							
دمای داخل (°C)	۲۶/۰۸	۳۰/۳۶	۳۱/۲۹	۳۰/۱۱	۲۹/۲۶	۲۹/۴۲	۲/۰
دمای سطح گیاه (°C)	۲۵/۴۴	۳۰/۰۲	۳۰/۷۱	۲۹/۸۵	۲۸/۷۶	۲۸/۹۶	۲/۰۹
شاخص یکنواختی دما (TUI)	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۸۲	۰/۰۵
دمای در خروجی فن (°C)	۲۵/۸	۳۰/۲	۳۱	۳۰/۰۱	۲۹/۰۷	۲۹/۲۲	۲/۰۳
<b>شاخص‌های جریان هوا</b>							
دبی جرمی فن (kg/s)	۲/۴۴	۲/۴۶	۲/۴۱	۲/۳۸	۲/۳۲	۲/۴	۰/۰۵
<b>شاخص‌های توان و بازده</b>							
تعویض هوای گلخانه در یک ساعت (ACH)	۹/۱۵	۹/۳۳	۹/۰۴	۸/۹۳	۸/۷	۹/۰۱	۰/۲۱
بازده تبرید	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۰۴
توان معادل تبرید (kW)	۴۲/۷۷	۴۶/۶	۳۹/۷۵	۵۰/۲۲	۴۱/۶	۴۶/۱۶	۳/۳۹
توان مکانیکی محور فن (kW)	۲/۶۳	۲/۶۶	۲/۶	۲/۵۷	۲/۵۱	۲/۵۹	۰/۰۶

#### ارزیابی عملکرد گرمایشی در ماه‌های سرد سال

در شرایط عادی در ماه‌های سرد در اهواز، تابش خورشید در طول روز، دمای هوای داخل گلخانه را از محدوده ۲۰ تا ۲۸ درجه به محدوده ۲۵ تا ۳۲ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد. این محدوده دمایی به طور کلی برای رشد اکثر گیاهان قابل قبول است. با این حال، امکان

افزایش بیشتر دما در طول روز می‌تواند فرصت‌هایی برای کشت گونه‌های متنوع‌تری از گیاهان فراهم کند. استفاده از دودکش خورشیدی در یک چرخه بسته، روشی تکمیلی و اصلاحی برای افزایش دما در ماه‌های خنک از نوامبر (آبان) تا فوریه (بهمن) است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، عملکرد دودکش خورشیدی در ظهر خورشیدی ۱۶ فوریه (۲۸ بهمن) توسط مدل شبیه‌سازی شده است. به دلیل شناوری جریان هوای گرم‌شده در داخل دودکش خورشیدی، هوا به سمت بالا حرکت کرده و از طریق خروجی دودکش وارد گلخانه می‌شود. این جریان هوای گرم، که نزدیک به سقف قرار دارد و تحت تأثیر شناوری است، در امتداد دیوار سقفی گلخانه حرکت کرده و به سرعت به تعادل حرارتی می‌رسد. سپس از سقف جدا شده و به سمت گیاهان پایین می‌آید و در نهایت دوباره به ورودی دودکش خورشیدی بازمی‌گردد. این چرخه بسته انتظار می‌رود به تدریج گلخانه را گرم کند. با این حال، نقص‌های طراحی باعث شده‌اند که میانگین دمای داخل گلخانه تقریباً ۲/۸ درجه سلسیوس افزایش یابد. با این وجود، همان‌طور که در شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، دمای سطح سایبان گیاهان حدود ۱/۷۴ درجه سلسیوس گرم‌تر و یکنواخت‌تر ( $TUI$  برابر با ۰/۸۹ در مقابل ۰/۷۴) از سناریوی بدون استفاده از دودکش خورشیدی است.

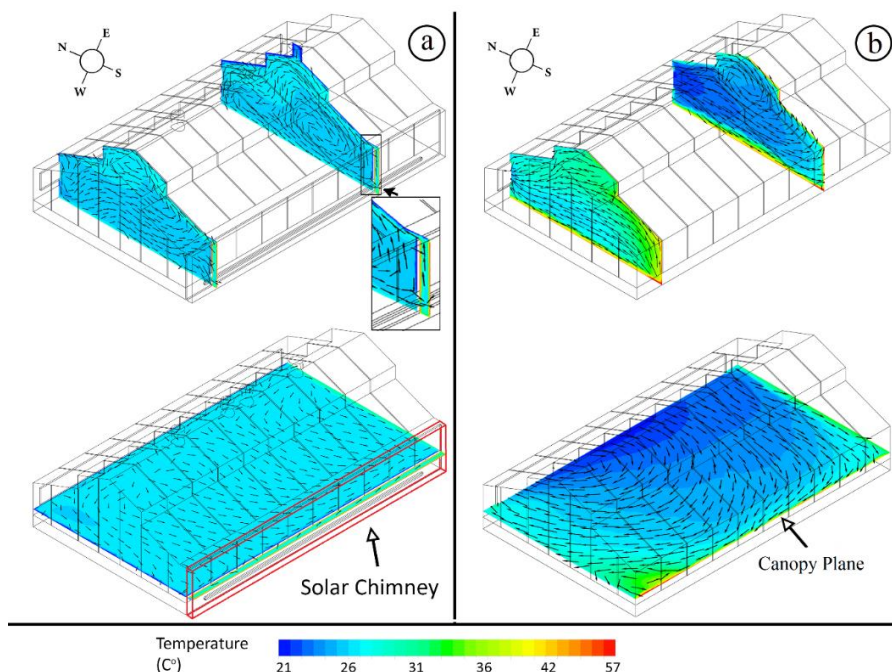


شکل ۶. توزیع دمای هوا در امتداد خطوط جریان درون گلخانه در ظهر خورشیدی ۱۶ فوریه (۲۸ بهمن)

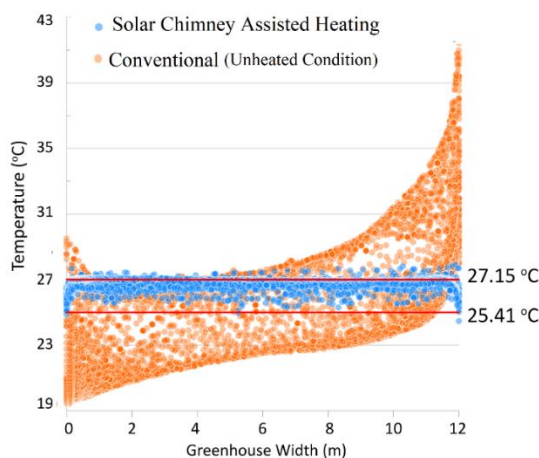
اطلاعات جامع درباره عملکرد گرمایشی دودکش خورشیدی و شرایط بدون گرمایش در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد، گرمایش با کمک دودکش خورشیدی دارای میانگین بازده گرمایشی ماهانه ۰/۴۳ می‌باشد. میانگین دمای داخلی گلخانه در حالت استفاده از دودکش خورشیدی ۲۹/۹۲ درجه سلسیوس ثبت شد که از دمای ۲۷/۳۱ درجه سلسیوس در روش سنتی بدون گرمایش، بیشتر است. به‌طور مشابه، دماهای سطح سایبان گیاهان نیز این روند را تأیید می‌کنند. بطور میانگین ۲۷/۰۱ درجه سلسیوس و  $TUI$  برابر با ۰/۹۲ برای سامانه گرمایش با دودکش خورشیدی و ۲۵/۳۷ درجه سلسیوس و  $TUI$  برابر با ۰/۷۵ برای شرایط بدون گرمایش را ثبت گردید. سامانه گرمایش با کمک دودکش خورشیدی توانست دمای داخلی گلخانه را به‌طور میانگین ۶/۲۴ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط بیرونی افزایش دهد. این یافته کمتر از نتایج گزارش‌شده توسط حقیقی و معرفت (Haghighi & Maerefat, 2014) در رشت (ایران) است، جایی که افزایش دمای داخلی حدود ۱۳ تا ۱۶ درجه سلسیوس مشاهده شد، زمانی که دمای محیط بیرون حدود ۱۵ درجه



سلسیوس و شدت تابش خورشیدی بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ وات بر متر مربع بود (محدوده‌ای مشابه با مطالعه حاضر). این اختلاف می‌تواند ناشی از هندسه متفاوت، دمای محیط نسبتاً پایین‌تر (۱۵ درجه سلسیوس در مقابل ۲۵-۳۰ درجه سلسیوس) و الگوی جریان هوای متفاوت در داخل سازه باشد. الگوی جریان هوای مشاهده‌شده در گلخانه، که تحت تأثیر دودکش خورشیدی است، می‌تواند تأثیر بیشتری بر دمای ارتفاع سایبان گیاهان داشته باشد. استفاده از مکانیزم‌هایی مانند پرده حرارتی، سقف‌های موقت کوتاه‌آ یا صفحه‌های صرفه‌جویی انرژی،<sup>۳</sup> برای جلوگیری از تماس جریان هوای گرم داخل گلخانه با سقف سرد آن و کاهش انتقال سریع گرما، می‌تواند به طور مؤثری به گرمایش گلخانه کمک کند. اجرای سقف‌های موقت کوتاه‌تر در فصل‌های سرد با استفاده از این سامانه‌ها توصیه می‌شود تا هوای نزدیک به سقف سرد گلخانه را ایزوله کرده و از تماس مستقیم هوای گرم با آن جلوگیری شود.



شکل ۷. کانتورهای دمای هوا و بردارهای سرعت جریان هوا برای (a) سامانه گرمایش با کمک دودکش خورشیدی و (b) شرایط مرسوم بدون گرمایش، نمایش داده شده در برش‌های عمودی (بالا) و در سطح سایبان گیاهی (پایین) درون گلخانه در ظهر خورشیدی ۱۶ فوریه (۲۸ بهمن)



شکل ۸. دما در سطح سایبان گیاهی در عرض گلخانه با استفاده از سامانه با کمک دودکش خورشیدی و شرایط مرسوم بدون گرمایش در ظهر خورشیدی ۱۶ فوریه (۲۸ بهمن)

1. Thermal curtain systems
2. Day ceiling systems
3. Energy-saving screens

جدول ۵. تحلیل تطبیقی عملکرد گرمایش در شرایط همراه با دودکش خورشیدی و شرایط متعارف (بدون سامانه گرمایش و تنها متاثر گرمایش طبیعی خورشیدی) در بازه زمانی چهارماهه

پارامتر	NOV (آبان)	DEC (آذر)	JAN (دی)	FEB (بهمن)	میانگین	انحراف معیار
<b>شرایط محیطی</b>						
دما (°C)	۲۸/۴۱	۲۲/۲۱	۲۰/۷۵	۲۳/۳۵	۲۳/۶۸	۳/۳۳
رطوبت نسبی (%)	۳۷/۳۶	۴۸/۸	۴۶/۰۷	۴۰/۰۷	۴۲/۰۸	۴/۰۷
دمای حباب تر (°C)	۱۸/۶۶	۱۴/۸۴	۱۳/۸	۱۵/۰۵	۱۵/۵۹	۲/۱۲
شدت تابش خورشیدی (W/m <sup>2</sup> )	۴۱۶/۲۵	۳۴۸/۷۵	۳۸۲/۵	۴۹۵	۴۱۰/۶۳	۶۲/۶۴
<b>گرمایش با دودکش خورشیدی</b>						
<b>شاخص های حرارتی</b>						
دمای داخل (°C)	۳۴/۶	۲۸/۳۳	۲۶/۸۴	۲۹/۹	۲۹/۹۲	۳/۳۶
دمای سطح گیاه (°C)	۳۱/۵۵	۲۵/۱۸	۲۴/۱۴	۲۷/۲۵	۲۷/۰۱	۳/۲۸
شاخص یکنواختی دما (TUI)	۰/۹۵	۰/۹	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۰۳
دمای در خروجی دودکش خورشیدی (°C)	۳۶/۱	۲۸/۹۹	۲۸/۱۶	۳۲/۸۸	۳۱/۵۳	۳/۶۷
دمای در ورودی دودکش خورشیدی (°C)	۳۰/۷۱	۲۴/۴۵	۲۳/۴	۲۶/۶۶	۲۶/۳۱	۳/۲۴
<b>شاخص های جریان هوا</b>						
دبی جرمی در خروجی دودکش خورشیدی (kg/s)	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۰۵
<b>شاخص های توان و بازده</b>						
بازده گرمایش	۰/۴۱	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۴	۰/۴۳	۰/۰۳
بازده جمع کننده	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۲
توان معادل گرمایش (kW)	۱/۳۱	۰/۸۳	۱/۰۱	۱/۸۳	۱/۲۴	۰/۴۴
<b>گرمایش مرسوم مبتنی بر گرمایش طبیعی در معرض خورشید (بدون سامانه گرمایشی)</b>						
<b>شاخص های حرارتی</b>						
دمای داخل (°C)	۳۲/۰۱	۲۵/۸۲	۲۴/۳۲	۲۷/۱	۲۷/۳۱	۳/۳۳
دمای سطح گیاه (°C)	۲۹/۹۸	۲۲/۶۵	۲۲/۴۴	۲۵/۴۱	۲۵/۳۷	۳/۳۱
شاخص یکنواختی دما (TUI)	۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۰۳

## نتیجه گیری و پیشنهادها

این پژوهش به بررسی عملکرد سامانه تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی در مقایسه با سامانه متداول در یک گلخانه واقع در اهواز پرداخته است. ارزیابی کارایی سامانه شامل تحلیل دمای داخلی و سطح سایبان گیاهان، نرخ تبادل هوا، یکنواختی دما، توان برودتی و حرارتی، و بازده کلی تهویه مطبوع است. با حذف نیاز به فن های مکانیکی از طریق تهویه طبیعی مبتنی بر نیروی شناوری، سامانه دودکش خورشیدی به کاهش مصرف انرژی و هزینه های عملیاتی منجر شده است. این مطالعه از مدل های تأیید شده دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه سازی ویژگی های حرارتی گلخانه، پارامترهای تهویه و تغییرات بار حرارتی ناشی از دمای خارجی و تابش خورشیدی طی یک دوره ۹ ماهه استفاده کرده است. عملکرد سامانه در ماه های سرمایشی (اردیبهشت تا شهریور) و گرمایشی (آبان تا بهمن)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که با وجود محدودیت های سرمایشی در گرمای شدید، حذف توان محور فن موجب صرفه جویی قابل توجهی در انرژی شده است. در بررسی ظرفیت سرمایشی، سامانه با کمک دودکش خورشیدی، نرخ های تبادل هوای پایین تر (۳/۸۲) در مقایسه با سامانه متداول (۹/۰۱) و یکنواختی دمای کمتر ( $TUI=0.73$  در برابر ۰/۸۲) همراه با دمای داخلی بالاتری (۳۵/۱۲) در برابر ۲۹/۴۲ درجه سلسیوس) در مقایسه با سامانه فن-پد متداول مشاهده شد. همچنین، بازده سرمایشی  $\eta_c$  سامانه دودکش خورشیدی (۰/۵۶) در مقایسه با سامانه متداول (۰/۶۲) کمتر بود. با این حال، این سامانه کاهش دمای ۱۳ تا ۱۷ درجه سلسیوس را ایجاد کرده و دمای سطح سایبان گیاهان را در محدوده مطلوب حفظ کرده است. در بخش گرمایش، سامانه دودکش خورشیدی میانگین افزایش دمای ۶/۲۴ درجه سلسیوس

را فراهم کرد که کمتر از حد انتظار براساس مطالعات مقایسه‌ای بود. بازده گرمایشی پایین‌تر (میانگین ۰/۴۳) به الگوهای خاص جریان هوا و تبادل سریع حرارت نسبت داده شد. راهکارهایی مانند پرده‌های حرارتی، سقف‌های موقت یا صفحات صرفه‌جویی انرژی می‌توانند به کاهش انتقال حرارت و بهبود نگهداشت دما کمک کنند. دمای سطح سایبان گیاهان در این سامانه نه تنها بالاتر بلکه یکنواخت‌تر بود (میانگین ۲۷/۰۱ درجه سلسیوس با شاخص یکنواختی دمای ۰/۹۲، در مقایسه با شرایط بدون گرمایش سامانه متداول که میانگین ۲۵/۳۷ درجه سلسیوس با شاخص یکنواختی دمای ۰/۷۵ را نشان می‌دهد).

عملکرد جذب کننده خورشیدی دیواری نیز در طول سال بررسی شد و مقادیر بازده حرارتی آن ۰/۱۳ در ماه‌های گرم و ۰/۰۹ در ماه‌های سرد گزارش شد. این مقادیر به طراحی خاص دودکش خورشیدی نسبت داده شد، اما نقش کلکتور در بهبود تهویه همچنان قابل توجه بود. تغییراتی مانند افزایش ارتفاع یا تنظیم زاویه دودکش می‌تواند کارایی سامانه را افزایش دهد، هرچند چالش‌هایی مانند سایه‌اندازی داخلی باید در طراحی لحاظ شوند. تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر ارتفاع دودکش و بهبود جریان هوا از طریق پد مرطوب تمرکز کنند. راهکارهای ترکیبی، شامل ادغام دودکش خورشیدی با روش‌های دیگر سرمایش فعال یا غیرفعال، می‌توانند به ویژه در اقلیم‌های شدید کارایی بیشتری داشته باشند. همچنین، انجام تحلیل‌های اقتصادی جامع برای بررسی پایداری مالی و صرفه‌جویی بلندمدت، به ویژه با کاهش توان محوری فن، ضروری است. اگرچه نتایج این پژوهش بینش‌های مهمی در زمینه تهویه گلخانه‌ای با دودکش خورشیدی ارائه می‌دهد، تعمیم آن‌ها به سایر اقلیم‌ها باید با احتیاط انجام شود. مطالعات گسترده‌تر، شامل اقلیم‌های مختلف و طراحی‌های متنوع گلخانه‌ای، درک جامعی از مزایا و محدودیت‌های این فناوری فراهم خواهد کرد. این یافته‌ها پیامدهای مهمی برای بهره‌وری انرژی و پایداری در کشاورزی گلخانه‌ای دارند و با کاهش مصرف انرژی تا ۶۰ درصد، سامانه‌های ترکیبی مبتنی بر دودکش خورشیدی گزینه‌ای جذاب برای مناطق با محدودیت منابع انرژی محسوب می‌شوند.

## REFERENCES

- Abdallah, A. S. H. (2017). Occupant comfort and indoor temperature reduction by using passive air conditioning system with solar chimney concept in hot arid climate. *Procedia Eng*, 205, 1100–1107.
- Abdallah, A. S. H., Hiroshi, Y., Goto, T., Enteria, N., Radwan, M. M., & Eid, M. A. (2014). Parametric investigation of solar chimney with new cooling tower integrated in a single room for New Assiut city, Egypt climate. *Int J Energy Environ Eng*, 5(92).
- Abdallah, A. S. H., Yoshino, H., Goto, T., Enteria, N., Radwan, M. M., & Eid, M. A. (2013). Integration of evaporative cooling technique with solar chimney to improve indoor thermal environment in the New Assiut City, Egypt. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 1–15.
- Abdeen, A., Serageldin, A. A., Ibrahim, M. G. E., El-Zafarany, A., Ookawara, S., & Murata, R. (2019). Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Sol Energy*, 180, 524–536.
- Ahmadikia, H., Moradi, A., & Hojjati, M. (2012). Performance analysis of a wind-catcher with water spray. *Int J Green Energy*, 9(2), 160–173.
- Ali, H. B., Bournet, P.-E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosyst. Eng*, 127, 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>.
- American Society of Heating, R., & Engineers, A.-C. (1978). *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. ASHRAE. <https://books.google.com/books?id=ybIPAAAAMAAJ>
- Arce, J., Jiménez, M. J., Guzmán, J. D., Heras, M. R., Alvarez, G., & Xamán, J. (2009). Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy*, 34(12), 2928–2934. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.026>
- Asadi, S., Fakhari, M., Fayaz, R., & Mahdavi Parsa, A. (2016). The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. *Energy Build*, 123, 71–78.
- ASAE. (2003). EP406.4: Heating, Ventilating, and Cooling Greenhouses. ASAE, St. Joseph, MI, p. 10.
- Bartzanas, T., Boulard, T., & Kittas, C. (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosyst. Eng*, 88, 479–490. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006>.
- Bouchahm, Y., Bourbia, F., & Belhamri, A. (2011). Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. *Renew Energy*, 36(3), 898–906.
- Bournet, P. E., Khaoua, S. A. O., Boulard, T., Migeon, C., & Chassériaux, G. (2007). Effect of roof and side opening combinations on the ventilation of a greenhouse using computer simulation. *Trans. ASABE*, 50, 201–212.



- Chen, J., Cai, Y., Xu, F., Hu, H., & Ai, Q. (2014). Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/712740>
- Cheng, F., Li, Y., Wu, Y., Cheng, Y., & Lin, Z. (2023). Experimental study of air distribution and heating performances of deflection ventilation. *Energy Build*, 282, 112800. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112800>.
- Cheng, X., Li, D., Shao, L., & Ren, Z. (2021). A virtual sensor simulation system of a flower greenhouse coupled with a new temperature microclimate model using three-dimensional CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181(July 2020), 105934. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105934>
- Chung, T. (2002). *Computational fluid dynamics*. Cambridge university press.
- Das, P., & Velayudhan Parvathy, C. (2022). A critical review on solar chimney power plant technology: Influence of environment and geometrical parameters, barriers for commercialization, opportunities, and carbon emission mitigation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), 69367–69387. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22623-7>
- El-Dessouky, H. T. A., Al-Haddad, A. A., & Al-Juwayhel, F. I. (1996). Thermal and hydraulic performance of a modified two-stage evaporative cooler. *Renewable Energy*, 7(2), 165–176. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00124-7](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00124-7)
- Etheridge, D. (2011). *Natural ventilation of buildings: Theory, measurement and design*. John Wiley & Sons.
- Ferroukhi, R., Nagpal, D., Lopez-Peña, A., Hodges, T., Mohtar, R. H., Daher, B., Mohtar, S., & Keulertz, M. (2015). Renewable energy in the water, energy & food nexus. *IRENA*, Abu Dhabi, 1–125.
- Fotiou, S., Akenji, L., Bengtsson, M., Schandl, H., Salem, J., Briggs, E., Chiu, A., Mohanty, B., Tabucanon, M., Fadeeva, Z., Daconto, G., Mathews, C., Metternicht, G., Sang-Arun, J., & Srisakulchairak, T. (2015). *Sustainable Consumption and Production: A Handbook for Policy Makers*.
- Franco, A., Valera, D. L., & Peña, A. (2014). Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: Cooling boxes versus cellulose pads. *Energies*, 7(3), 1427–1447. <https://doi.org/10.3390/en7031427>
- Ghosal, M. K., Tiwari, G. N., & Srivastava, N. S. L. (2004). Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: An experimental validation. *Energy and Buildings*, 36(3), 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.006>
- Haghighi, A. P., & Maerefat, M. (2014). Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days using solar chimney. *Sustainable Cities and Society*, 10, 72–79.
- Hosien, M. A., & Selim, S. M. (2017). Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation. *Energy Build*, 138, 355–367.
- Jiménez-Xamán, C., Xamán, J., Gijón-Rivera, M., Zavala-Guillén, I., Noh-Pat, F., & Simá, E. (2020). Assessing the thermal performance of a rooftop solar chimney attached to a single room. *Journal of Building Engineering*, 31, 101380.
- Jomehadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy Build*, 226(110396).
- Kalantar, V. (2009). Numerical simulation of cooling performance of wind tower (BaudGeer) in hot and arid region. *Renew Energy*, 34(1), 246–254.
- Khanal, R., & Lei, C. (2011). Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43(8), 1811–1819.
- Khani, S. M. R., Bahadori, M. N., & Dehghani-Sanij, A. R. (2017). Experimental investigation of a modular wind tower in hot and dry regions. *Energy Sustain Dev*, 39, 21–28.
- Khaoua, S. A. O., Bournet, P. E., Migeon, C., Boulard, T., & Chassériaux, G. (2006). Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 95(1), 83–98.
- Kim, K., Yoon, J.-Y., Kwon, H.-J., Han, J.-H., Son, J. E., Nam, S.-W., Giacomelli, G. A., & Lee, I.-B. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosyst. Eng*, 100, 245–255.
- Kim, R., Kim, J., Lee, I., Yeo, U., Lee, S., & Decano-Valentin, C. (2021a). Development of three-dimensional visualisation technology of the aerodynamic environment in a greenhouse using CFD and VR technology, part 1: Development of VR a database using CFD. *Biosystems Engineering*, 207, 33–58.
- Kim, R., Kim, J., Lee, I., Yeo, U., Lee, S., & Decano-Valentin, C. (2021b). Development of three-dimensional visualisation technology of the aerodynamic environment in a greenhouse using CFD and VR technology, Part 2: Development of an educational VR simulator. *Biosystems Engineering*, 207, 12–32.

- Kong, J., Niu, J., & Lei, C. (2020). A CFD based approach for determining the optimum inclination angle of a roof-top solar chimney for building ventilation. *Sol. Energy*, 198, 555–569.
- Krüger, E., Suzuki, E., & Matoski, A. (2013). Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy Build*, 66, 364–372.
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2009). Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy Build*, 41, 615–621.
- Lomas, K. J. (2007). Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. *Energy Build*, 39, 166–181.
- Maerefat, M., & Haghighi, A. P. (2010). Natural cooling of stand-alone houses using solar chimney and evaporative cooling cavity. *Renew Energy*, 35(9), 2040–2052.
- Mathur, J., Mathur, S., & Anupma. (2006). Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy Build*, 38, 1156–1163.
- Miyazaki, T., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2006). The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate. *Renewable Energy*, 31(7), 987–1010.
- Mohammadi, B., & Pironneau, O. (1994). Analisis of the K-Epsilon turbulence model. John Wiley and Sons.
- Montero, J. I., Munoz, P., Anton, A., & Iglesias, N. (2005). Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Horti*, 691, 403.
- Moosavi, L., Zandi, M., Bidi, M., Behroozzade, E., & Kazemi, I. (2020). New design for solar chimney with integrated windcatcher for space cooling and ventilation. *Build Environ*, 181(106785).
- Nakayama, A., & Kuwahara, F. (2005). Algebraic model for thermal dispersion heat flux within porous media. *AIChE Journal*, 51(10), 2859–2864.
- Nguyen, Y. Q., & Wells, J. C. (2020). A numerical study on induced flowrate and thermal efficiency of a solar chimney with horizontal absorber surface for ventilation of buildings. *J. Build. Eng*, 28(101050).
- Nie, J., Xu, J., Su, H., Gao, H., Jia, J., & Guo, T. (2024). Optimization of characteristic parameters of rectangular solar chimney adapted to agricultural greenhouses. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 103971.
- Rabani, R., Faghih, A. K., Rabani, M., & Rabani, M. (2014). Numerical simulation of an innovated building cooling system with combination of solar chimney and water spraying system. *Heat and Mass Transfer*, 50(11), 1609–1625.
- Rashid, F. L., Alyasari, H. I., Lafta, M. G., Mahdi, A. J., Al-Obaidi, M. A., Togun, H., Hammoodi, K. A., & Agyekum, E. B. (2025). Current developments, utilization, and effects of phase-change materials integrated with solar chimney: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 105, 114684.
- Roache, P. J. (1998). Verification and validation in computational science and engineering.
- Ruiz, Á., Salmerón, J., González, R., & Álvarez, S. (2005). A calculation model for Trombe walls and its use as a passive cooling. *Proc. Int. Conf. Passiv. Low Energy Cool. Built Environ*, 365–369.
- Saberian, A., & Sajadiye, S. M. (2019). The effect of dynamic solar heat load on the greenhouse microclimate using CFD simulation. *Renewable Energy*, 138, 722–737. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.01.108>
- Saberian, A., & Sajadiye, S. M. (2020). Assessing the variable performance of fan-and-pad cooling in a subtropical desert greenhouse. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115672. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115672>
- Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>
- Shklyar, A., & Arbel, A. (2004). Numerical model of the three-dimensional isothermal flow patterns and mass fluxes in a pitched-roof greenhouse. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 92, 1039–1059.
- Sornek, K., Figaj, R., & Papis-Frączek, K. (2025). Development and tests of the novel configuration of the solar chimney with sensible heat storage. *Applied Thermal Engineering*, 258, 124515.
- Spentzou, E. (Efi), Cook, M., & Emmitt, S. (2017). Modelling natural ventilation for summer thermal comfort in Mediterranean dwellings. *International Journal of Ventilation*, 18, 28–45. <https://doi.org/10.1080/14733315.2017.1302658>
- Swiegers, J. J. (2015). Inlet and outlet shape design of natural circulation building ventilation systems [dissertation. Faculty of Engineering, Stellenbosch University.
- Tong, X., Hong, S.-W., & Zhao, L. (2019). Using CFD simulations to develop an upward airflow displacement ventilation system for manure-belt layer houses to improve the indoor environment. *Biosystems Engineering*, 178, 294–308. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.006>
- Villar-Ramos, M. M., Macias-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Hernandez-Perez, I., Arce, J., & Serrano-



- Arellano, J. (2020). Parametric analysis of the thermal behavior of a single-channel solar chimney. *Sol Energy*, 209, 602–617.
- Wang, H., & Lei, C. (2020). A numerical investigation of combined solar chimney and water wall for building ventilation and thermal comfort. *Build Environ*, 171, 106616.
- WANG, X., LUO, J., & LI, X. (2013). CFD Based Study of Heterogeneous Microclimate in a Typical Chinese Greenhouse in Central China. *J. Integr. Agric*, 12, 914–923. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60309-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60309-3).
- Weather and Climate. (2024). Ahvaz weather and climate. [https://weatherandclimate.com/iran/khuzestan/ahvaz#google\\_vignette](https://weatherandclimate.com/iran/khuzestan/ahvaz#google_vignette)
- Weather Spark. (2023). Ahvaz Past Weather (Iran). <https://weatherspark.com/h/y/104596/2023/Historical-Weather-during-2023-in-Ahvaz-Iran>
- Yusoff, W. F. M., Salleh, E., Adam, N. M., Sapian, A. R., & Sulaiman, M. Y. (2010). Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solar collector and vertical stack. *Build Environ*, 45(10), 2296–2308.