



Comparative Evaluation of Ventilation Capacity, Microclimate Quality, and Crop-Zone Thermal Conditions in Buoyancy-Driven and Wind-Driven Natural Ventilation Systems under Hot-Arid Climatic Conditions of Ahvaz

Seyed Majid Sajadiye¹ | Ayad Saberian²

1. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: 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

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 24, 2026

Revised: July. 25, 2026

Accepted: Aug. 11, 2026

Published online: Autumn 2026

Keywords:

*Computational Fluid Dynamics (CFD),
Greenhouse Microclimate,
Natural Ventilation,
Solar Chimney,
Sustainable Greenhouse.*

ABSTRACT

Natural ventilation is an effective strategy for greenhouse microclimate control and energy conservation. However, its performance is commonly evaluated based on air exchange rate, while its impact on thermal conditions within the crop growth zone remains less explored. This study comparatively evaluated wind-driven natural ventilation and wall-mounted solar chimney-assisted natural ventilation in a greenhouse located in the hot-arid climate of Ahvaz, Iran, using three-dimensional computational fluid dynamics simulations. Analyses were conducted under realistic temperature, solar radiation, and wind conditions during March, April, and October. The wind-driven system achieved a higher ventilation capacity, with an average air exchange rate of 5.36 h^{-1} compared with 1.75 h^{-1} for the solar chimney-assisted system. Despite this, the solar chimney produced a more stable and organized airflow pattern, reducing stagnant zones and air recirculation within the greenhouse. As a result, the average canopy temperature decreased from 38.93 to 36.96 °C, the temperature uniformity index increased from 0.75 to 0.91 , and the canopy cooling effectiveness index improved from 0.14 to 0.54 . The solar chimney also achieved an average thermal efficiency of 6.63% . The findings demonstrate that air exchange rate alone is insufficient for evaluating natural ventilation performance. Greater emphasis should be placed on microclimate quality and thermal conditions within the crop growth zone. Overall, the wall-mounted solar chimney improved airflow organization and thermal performance, highlighting its potential as a passive and sustainable solution for greenhouse climate control in hot-arid regions.

Cite this article: Sajadiye, S. M., Saberian, A., (2026) Comparative Evaluation of Ventilation Capacity, Microclimate Quality, and Crop-Zone Thermal Conditions in Buoyancy-Driven and Wind-Driven Natural Ventilation Systems under Hot-Arid Climatic Conditions of Ahvaz, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (3), 1-24.
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.417256.665653>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.417256.665653>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Natural ventilation is one of the most effective and energy-efficient approaches for greenhouse climate control, playing a key role in regulating temperature, humidity, carbon dioxide concentration, and excess heat accumulation. Among natural ventilation strategies, wind-driven natural ventilation (WDNV) and buoyancy-driven systems have attracted considerable attention because they can reduce dependence on mechanically powered climate-control equipment. In particular, solar chimney-assisted natural ventilation (SCNV) has emerged as a promising passive technology in hot and sunny regions, where solar energy can be utilized to strengthen buoyancy forces and enhance airflow through the greenhouse. Previous studies have generally evaluated greenhouse ventilation performance based on air exchange rate (ACH) or average indoor temperature reduction. Although these indicators provide valuable information regarding ventilation capacity, they do not necessarily reflect the actual microclimatic conditions experienced by crops. A ventilation system with a higher ACH may still create non-uniform airflow distribution, thermal gradients, and localized heat accumulation within the crop zone. Consequently, greenhouse ventilation performance should be assessed not only by airflow quantity but also by airflow organization, temperature distribution, and the thermal conditions surrounding the crop canopy. Despite extensive research on wind-driven ventilation and solar chimney applications, direct comparisons between these two natural ventilation mechanisms under hot-arid climatic conditions remain limited. Furthermore, the relationship between ventilation capacity and crop-zone microclimate quality has not been sufficiently clarified. Therefore, the present study aimed to compare the performance of WDNV and SCNV in a greenhouse located in Ahvaz, Iran, during representative transitional-season conditions. The investigation focused on both aerodynamic and thermal behavior using three-dimensional CFD simulations and evaluated the systems through a set of complementary indicators describing ventilation capacity, thermal performance, energy efficiency, and crop-zone microclimate quality.

Materials and Methods

The study employed validated three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) models to compare wind-driven natural ventilation (WDNV) and solar chimney-assisted natural ventilation (SCNV) in a greenhouse located in Ahvaz, Iran. Simulations were conducted under representative transitional-season conditions corresponding to March, April, and October, using local meteorological data including solar radiation intensity, ambient temperature, prevailing wind speed, and wind direction. The numerical model incorporated greenhouse geometry, crop canopy, porous pad walls characteristics, and the solar chimney structure. In addition to evaluating the external airflow field around the greenhouse complex, detailed analyses were performed on airflow patterns, temperature distributions, thermal stratification, and ventilation pathways inside the greenhouse. Performance evaluation was based on a comprehensive set of indicators. Air exchange rate (ACH) was used to quantify ventilation capacity, while temperature reduction effectiveness (TRE) and canopy temperature were employed to evaluate crop-zone thermal conditions. Temperature Uniformity Index (TUI) was used to assess the homogeneity of temperature distribution within the cultivation zone. Sensible Heat Removal Rate (SHRR) was calculated to determine the ability of each system to remove excess heat from the greenhouse environment. For SCNV, solar collector thermal efficiency was also evaluated to quantify the effectiveness of solar energy utilization in driving buoyancy-induced airflow. The combination of these indicators enabled simultaneous assessment of ventilation performance, greenhouse microclimate quality, thermal behavior, and energy efficiency, providing a more comprehensive evaluation than approaches based solely on air exchange rate.

Results and Discussion

The CFD simulations revealed substantial differences in airflow organization and thermal behavior among the investigated ventilation strategies. Analysis of the external airflow field demonstrated that the prevailing wind interacted strongly with the greenhouse geometry, producing localized pressure variations that influenced ventilation performance. Solar radiation analysis further showed that the solar chimney received significant solar energy throughout the investigated months, providing favorable conditions for buoyancy-driven airflow generation. Qualitative analysis of airflow patterns indicated that the control greenhouse exhibited weak air circulation, extensive stagnation zones, and pronounced thermal gradients. In the WDNV configuration, airflow entered through side openings and exited through roof vents, generating greater air exchange but also producing localized recirculation regions and flow instabilities. In contrast, SCNV created the most organized and directional airflow structure. The solar chimney generated a continuous suction effect that promoted stable airflow from the porous wall toward the chimney outlet, reducing stagnation zones and

improving airflow distribution throughout the greenhouse. One of the most important findings was the development of controlled thermal stratification in the SCNV system. Warm air accumulated near the roof and was continuously removed through the chimney, while cooler air remained in the crop zone. This behavior reduced thermal stress around the plants and improved the overall microclimate despite the lower ventilation rate. Quantitative results confirmed the differences observed in the qualitative analysis. WDNV achieved the highest ventilation capacity, with an average ACH of 5.35 h^{-1} , approximately three times higher than SCNV (1.75 h^{-1}) and nearly 89 times greater than the control greenhouse (0.06 h^{-1}). Similarly, WDNV exhibited the highest sensible heat removal rate, reaching 11.55 kW compared with 3.33 kW for SCNV and 0.41 kW for the control condition. However, higher ventilation capacity did not translate into superior crop-zone thermal conditions. The average canopy temperature in the control greenhouse reached 39.68°C . WDNV reduced this value to 38.94°C , whereas SCNV achieved the lowest canopy temperature of 36.98°C . Likewise, SCNV produced the highest temperature reduction effectiveness ($\text{TRE} = 0.54$), compared with only 0.14 for WDNV. These findings demonstrate that airflow organization and heat-removal pathways can be more important than airflow quantity alone when evaluating greenhouse ventilation performance. Temperature distribution results further highlighted the superiority of SCNV. The Temperature Uniformity Index increased from 0.52 in the control greenhouse to 0.75 under WDNV and reached 0.91 under SCNV. This substantial improvement indicates a more homogeneous thermal environment and a reduced likelihood of localized hot spots that could negatively affect crop growth and productivity.

Seasonal analysis revealed that SCNV performance was strongly influenced by solar radiation availability. ACH increased from 1.48 h^{-1} in October to 1.93 h^{-1} in April, while SHRR increased from 2.85 kW to 3.62 kW during the same period. The solar collector exhibited an average thermal efficiency of 6.63%, ranging between 5.80% and 7.43%. Although this efficiency was relatively modest, it was sufficient to maintain continuous buoyancy-driven ventilation without external energy consumption. Overall, the results clearly indicate that greenhouse ventilation effectiveness cannot be evaluated solely by air exchange rate. The organization of airflow, thermal stratification characteristics, and conditions within the crop growth zone play equally important roles in determining greenhouse microclimate quality.

Conclusion

This study comparatively evaluated wind-driven natural ventilation (WDNV) and solar chimney-assisted natural ventilation (SCNV) in a greenhouse located in the hot-arid climate of Ahvaz during transitional seasons. The results demonstrated that although WDNV provided substantially higher ventilation capacity ($\text{ACH} = 5.35 \text{ h}^{-1}$) than SCNV ($\text{ACH} = 1.75 \text{ h}^{-1}$), a higher air exchange rate did not necessarily result in a superior greenhouse microclimate. The solar chimney system generated a more stable and organized airflow pattern, reduced recirculation and stagnation zones, and promoted controlled thermal stratification. Consequently, SCNV achieved superior crop-zone conditions, reducing canopy temperature to 36.98°C while improving temperature reduction effectiveness (0.54) and temperature uniformity (0.91). These improvements were achieved using only solar-induced buoyancy forces, with an average collector thermal efficiency of 6.63% and no external energy requirement. The findings highlight the importance of evaluating greenhouse ventilation systems using multiple indicators that account for airflow organization, thermal distribution, and crop-zone conditions rather than relying solely on ventilation capacity. Under hot-arid climatic conditions, SCNV appears to be a promising sustainable and low-energy alternative for greenhouse climate control. Future research should focus on optimizing solar chimney geometry, reducing airflow resistance within the chimney channel, and investigating system performance under different wind conditions. The integration of thermal curtains or secondary ceiling systems may further enhance thermal stratification and improve crop-zone cooling. Additionally, incorporating humidity transport, CO_2 distribution, plant physiological responses, and economic assessments would facilitate the practical application of solar chimney technology in commercial greenhouse production.

Funding

This research was financially supported by Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, through a research grant awarded to the authors. The authors gratefully acknowledge the financial support provided by Shahid Chamran University of Ahvaz for conducting this study.

Authorship contribution

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

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this manuscript, the authors used ChatGPT for English language editing,



grammar improvement, and translation refinement. After using this tool, the authors carefully reviewed, revised, and edited all content as necessary and take full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Shahid Chamran University of Ahvaz for its financial support and research grant, which made this study possible. The authors also appreciate the administrative and research support provided by the university throughout the course of this work.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی تطبیقی ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم و شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه در سامانه‌های تهویه طبیعی مبتنی بر شناوری حرارتی و بادمحور تحت اقلیم گرم و خشک اهواز

سید مجید سجادیه^۱ | عیاد صابریان^۲^۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sajadiye@scu.ac.ir^۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a.saberian@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۰	
تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی: تهویه طبیعی، دودکش خورشیدی، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، ریزاقلیم گلخانه، گلخانه پایدار.	تهویه طبیعی یکی از مهم‌ترین راهکارهای کنترل ریزاقلیم ناحیه کشت و کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌ها است، اما ارزیابی عملکرد آن غالباً بر اساس نرخ تعویض هوا انجام می‌شود و تأثیر آن بر شرایط واقعی ناحیه رشد گیاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، عملکرد دو سامانه تهویه طبیعی مبتنی بر باد غالب و تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری در یک گلخانه واقع در اقلیم گرم و خشک اهواز با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شد. تحلیل‌ها برای ماه‌های اسفند، فروردین و مهر و تحت شرایط واقعی دما، تابش خورشیدی و باد منطقه انجام گرفت. نتایج نشان داد سامانه بادمحور با میانگین نرخ تعویض هوا ۵/۳۶ بار در ساعت، ظرفیت تهویه بیشتری نسبت به سامانه مجهز به دودکش خورشیدی با ۱/۷۵ بار در ساعت فراهم می‌کند. با این حال، سامانه مجهز به دودکش خورشیدی با ایجاد جریان جهت‌دار و پایدار، نواحی رکود و بازچرخش هوا را کاهش داده و موجب شکل‌گیری یک لایه‌بندی حرارتی مطلوب در فضای گلخانه شد. در نتیجه، میانگین دمای سایه‌بان گیاهی از ۳۸/۹۳ به ۳۶/۹۶ درجه سلسیوس کاهش یافت، شاخص یکنواختی دما از ۰/۷۵ به ۰/۹۱ و شاخص اثربخشی کاهش دمای ناحیه رشد گیاه از ۰/۱۴ به ۰/۵۴ افزایش پیدا کرد. همچنین بازده حرارتی متوسط دودکش خورشیدی ۶/۶۳ درصد محاسبه شد. یافته‌ها نشان دادند که نرخ تعویض هوا به‌تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی موفقیت سامانه‌های تهویه طبیعی نیست و کیفیت ریزاقلیم ناحیه کشت و شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه باید همزمان مورد توجه قرار گیرند.
استناد: سجادیه؛ سیدمجید، صابریان؛ عیاد، (۱۴۰۵) ارزیابی تطبیقی ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم و شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه در سامانه‌های تهویه طبیعی مبتنی بر شناوری حرارتی و بادمحور تحت اقلیم گرم و خشک اهواز، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۷ (۳)، ۱-۲۴.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.417256.665653	https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.417256.665653



مقدمه

تهویه یکی از مهم‌ترین ابزارهای کنترل ریزاقلیم ناحیه کشت در گلخانه‌هاست و نقش اساسی در تنظیم دما، رطوبت نسبی، غلظت دی‌اکسیدکربن و حذف گرمای اضافی دارد. در این میان، تهویه طبیعی به دلیل مصرف انرژی اندک، هزینه بهره‌برداری پایین و سازگاری با اهداف توسعه پایدار، به‌عنوان رایج‌ترین روش کنترل اقلیم در بسیاری از گلخانه‌ها شناخته می‌شود (Kacira et al., 2004; Von Zabeltitz, 2011). عملکرد این سامانه‌ها بر نیروهای ناشی از باد، شنواری حرارتی یا ترکیبی از هر دو استوار بوده و تحت تأثیر عواملی نظیر سرعت و جهت باد، هندسه گلخانه، ابعاد و موقعیت بازشوها و ویژگی‌های اجزای داخلی قرار دارد (Boulard et al., 1999; M. C. Singh et al., 2022). در سامانه‌های تهویه بادمحور، اختلاف فشار ناشی از باد، نیروی محرکه جابه‌جایی هوا را فراهم می‌کند. اگرچه این سامانه‌ها می‌توانند نرخ‌های بالای تعویض هوا ایجاد کنند، عملکرد آن‌ها به شرایط جوی وابسته بوده و معمولاً توزیع جریان و دما در فضای گلخانه یکنواخت نیست. در مقابل، سامانه‌های مبتنی بر شنواری حرارتی از اختلاف چگالی ناشی از گرمایش هوا برای ایجاد جریان استفاده می‌کنند. یکی از کارآمدترین نمونه‌های این سامانه‌ها، دودکش خورشیدی است که با استفاده از انرژی خورشیدی، جریان شنواری را تقویت کرده و امکان تهویه طبیعی حتی در شرایط باد ضعیف را فراهم می‌سازد (Mathur et al., 2006). به دلیل فراوانی تابش خورشیدی در اقلیم‌های گرم و خشک، این فناوری به‌عنوان یک راهکار غیرفعال و کم‌مصرف مورد توجه قرار گرفته است (Sharon, 2023). با وجود توسعه سامانه‌های تهویه طبیعی، عملکرد آن‌ها در اغلب مطالعات بر اساس شاخص‌هایی مانند نرخ تعویض هوای ساعتی (ACH) یا دمای متوسط گلخانه ارزیابی شده است. اگرچه این شاخص‌ها ظرفیت تهویه را نشان می‌دهند، اما لزوماً بیانگر کیفیت واقعی ریزاقلیم ناحیه رشد گیاه نیستند. در بسیاری از موارد، سامانه‌ای با نرخ تهویه بالاتر به دلیل توزیع نامناسب جریان هوا، شرایط مطلوب‌تری برای رشد گیاه ایجاد نمی‌کند؛ در حالی که سامانه‌ای با ظرفیت تهویه کمتر، می‌تواند با هدایت مناسب جریان و تخلیه مؤثر هوای گرم، ریزاقلیم مطلوب‌تری در ناحیه کشت فراهم سازد (Boulard & Wang, 2000). از این رو، شاخص‌هایی مانند یکنواختی دما، دمای تراز سایه‌بان گیاهی و نرخ دفع گرمای محسوس، تصویر جامع‌تری از عملکرد واقعی سامانه‌های تهویه ارائه می‌کنند.

به دلیل پیچیدگی برهم‌کنش هم‌زمان جریان هوا، انتقال حرارت و تابش خورشیدی، مطالعه تجربی این سامانه‌ها دشوار و پرهزینه است. از این رو، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به یکی از ابزارهای اصلی تحلیل ریزاقلیم گلخانه تبدیل شده و مطالعات متعدد دقت آن را در پیش‌بینی میدان جریان و توزیع دما در سامانه‌های تهویه طبیعی تأیید کرده‌اند (Cheng et al., 2021; R. Kim et al., 2021; Norton et al., 2007; Tong et al., 2019). با وجود مطالعات گسترده درباره تهویه طبیعی بادمحور و دودکش‌های خورشیدی، تاکنون مقایسه مستقیمی میان این دو سازوکار بر اساس شاخص‌های هم‌زمان ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم و شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، گزارش نشده است. افزون بر این، پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر افزایش نرخ تعویض هوا تمرکز داشته‌اند و ارتباط آن با شرایط واقعی ناحیه رشد گیاه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، پژوهش پیشین نویسندگان درباره همین گلخانه، عملکرد دودکش خورشیدی را در ترکیب با سامانه‌های فعال سرمایش و گرمایش ارزیابی کرده بود (سجادی و صابریان، ۱۴۰۳)، اما کارایی آن به‌عنوان یک سامانه مستقل تهویه طبیعی همچنان نیازمند بررسی بود. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی عملکرد تهویه طبیعی بادمحور (WDNV) و تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV) در یک گلخانه واقع در اقلیم گرم و خشک اهواز انجام شد. برای این منظور، رفتار آیرودینامیکی و حرارتی گلخانه در سه ماه معتدل سال (اسفند، فروردین و مهر) و تحت شرایط واقعی باد، دما و تابش خورشیدی، با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی CFD بررسی شد. عملکرد سامانه‌ها علاوه بر تحلیل کیفی میدان جریان و توزیع دما، با استفاده از شاخص‌های نرخ تعویض هوا، یکنواختی دما، دمای تراز سایه‌بان گیاهی، اثربخشی کاهش دمای ناحیه رشد گیاه، نرخ دفع گرمای محسوس و بازده حرارتی کلکتور خورشیدی ارزیابی شد. این پژوهش بر این فرض استوار است که افزایش ظرفیت تهویه، لزوماً به بهبود شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه منجر نمی‌شود و کیفیت ریزاقلیم گلخانه باید هم‌زمان با ظرفیت تهویه مورد ارزیابی قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کیفیت ریزاقلیم ناحیه کشت در گلخانه ارتباط مستقیمی با عملکرد سامانه‌های تهویه دارد؛ به‌گونه‌ای که نرخ و الگوی جریان هوا می‌تواند توزیع دما، رطوبت و شرایط محیط رشد گیاه را به‌طور محسوسی تغییر دهند. از این رو، بهینه‌سازی طراحی

بازشوها، ابعاد گلخانه، صفحات هدایت‌کننده جریان و توری‌های ضدحشره از مهم‌ترین راهکارهای بهبود تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی محسوب می‌شود (M. C. Singh et al., 2022). با این حال، عملکرد تهویه طبیعی به شرایط محیطی، به‌ویژه سرعت و جهت باد، وابسته بوده و کنترل دقیق آن همواره امکان‌پذیر نیست (Kacira et al., 2004). پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که افزایش نرخ تهویه الزاماً به بهبود شرایط ریزاقلیم ناحیه رشد گیاه منجر نمی‌شود و نحوه توزیع جریان هوا در فضای گلخانه نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت محیط رشد دارد (Kacira et al., 2004; Lamrani et al., 2001). در همین راستا، مطالعات مختلف اثر هندسه و آرایش بازشوهای تهویه، جهت باد و مقاومت آیرودینامیکی اجزای داخلی را بر نرخ تهویه و توزیع دما بررسی کرده‌اند (Bournet & Boulard, 2010; Campen, 2004; Majdoubi et al., 2009; Teitel et al., 2008; Von Elsner et al., 2000).

به دلیل وابستگی شدید تهویه بادمحور به شرایط جوی، در سال‌های اخیر سامانه‌های مبتنی بر شناوری حرارتی، به‌ویژه دودکش خورشیدی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. عملکرد این سامانه تحت تأثیر عواملی نظیر شرایط اقلیمی، موقعیت جغرافیایی، زاویه و جهت استقرار، ویژگی مصالح و روش‌های ذخیره‌سازی حرارت قرار دارد (Barghi Jahromi et al., 2023; Jiménez-Xamán et al., 2020; Kong et al., 2020; Sornek et al., 2025; Villar-Ramos et al., 2020; Wang & Lei, 2020). کارایی آن، راهکارهایی نظیر استفاده از مواد تغییر فاز، منابع حرارتی کمکی، مبدل‌های حرارتی، سامانه‌های فتوولتائیک و روش‌های هوشمند بهینه‌سازی پیشنهاد شده است (Aliaga et al., 2021; Kalantar & Khayyamnejad, 2022; Long et al., 2021; Mandal et al., 2024). Rashid et al., 2025; Sajjadi et al., 2021; A. P. Singh et al., 2020). در اقلیم‌های گرم نیز ترکیب دودکش خورشیدی با سامانه‌های سرمایش تبخیری نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته و کاهش دمای ۳/۵ تا ۱۸/۶ درجه سلسیوس و نرخ تعویض هوای ۹ تا ۴۲/۲ بار در ساعت گزارش شده است، هرچند عملکرد این سامانه‌ها به شدت به شرایط اقلیمی، هندسه سازه و نحوه آرایش اجزای سامانه وابسته است (Abdallah, 2017; Khani et al., 2017; Moosavi et al., 2020).

همزمان با توسعه این سامانه‌ها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به ابزار اصلی تحلیل تهویه طبیعی تبدیل شده است. اگرچه مطالعات جدید استفاده از مدل LES را برای پیش‌بینی دقیق‌تر ساختارهای جریان پیشنهاد کرده‌اند (Tominaga et al., 2008)، پژوهش‌های متعددی نیز کارایی مدل‌های CFD را در تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد دودکش‌های خورشیدی و سامانه‌های تهویه طبیعی تأیید کرده‌اند (Charqui et al., 2023; Liu et al., 2023; Murena et al., 2022; Simou et al., 2026; Suhendri et al., 2022). با وجود این پیشرفت‌ها، مرور مطالعات نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی عمدتاً بر پایه شاخص‌هایی مانند نرخ تعویض هوا، دمای متوسط گلخانه یا ظرفیت سرمایش انجام شده و شاخص‌هایی که مستقیماً کیفیت ریزاقلیم ناحیه رشد گیاه را توصیف می‌کنند، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزون بر این، بیشتر مطالعات دودکش خورشیدی بر طراحی و بهینه‌سازی خود سامانه یا کاربرد آن در کنار تجهیزات فعال تمرکز داشته‌اند و مقایسه مستقیم عملکرد آن با تهویه طبیعی بادمحور در شرایط واقعی گلخانه محدود است. همچنین، اگرچه پژوهش پیشین نویسنندگان نشان داد که دودکش خورشیدی دیواری در ترکیب با سامانه‌های فعال می‌تواند موجب کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد گرمایش و سرمایش شود (سجادیه و صابریان، ۱۴۰۳)، عملکرد این سامانه به‌عنوان یک راهکار مستقل تهویه طبیعی و ارتباط میان ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم و شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه همچنان به‌طور جامع بررسی نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از شبیه‌سازی سه‌بعدی CFD و استفاده هم‌زمان از شاخص‌های ACH، یکنواختی دما، دمای تراز سایه‌بان گیاهی، ظرفیت دفع گرمای محسوس و بازده حرارتی کلکتور خورشیدی، به ارزیابی تطبیقی سامانه تهویه طبیعی بادمحور و سامانه تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری در اقلیم گرم و خشک اهواز می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

شهر اهواز دارای اقلیم گرم و خشک با تابستان‌های بسیار گرم، زمستان‌های نسبتاً معتدل و دوره‌های گذار کوتاه در بهار و پاییز است. در گلخانه‌های این منطقه، راهبرد کنترل اقلیم متناسب با شرایط فصلی تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که در دوره گرم سال (۳۰ اردیبهشت تا ۲۰ مهر) سامانه سرمایش تبخیری فن-پد، در دوره‌های معتدل شامل ۱۴ اسفند تا ۲۹ فروردین و ۲۱ مهر تا ۱ آذر تهویه طبیعی مبتنی بر باد غالب، و در دوره سرد سال (۲ آذر تا ۱۳ اسفند) گرمایش غیرفعال ناشی از تابش خورشیدی، راهبرد اصلی بهره‌برداری محسوب می‌شود (Saberian & Sajadiye, 2019). با توجه به فراوانی تابش خورشیدی در اهواز، در این پژوهش عملکرد دودکش خورشیدی دیواری به‌عنوان راهکاری غیرفعال برای تقویت تهویه طبیعی، در همان بازه‌های زمانی که تهویه طبیعی در بهره‌برداری واقعی گلخانه‌ها مورد استفاده قرار

می‌گیرد، ارزیابی شد. به منظور پوشش شرایط اقلیمی دوره‌های گذار، سه ماه اسفند، فروردین و مهر به عنوان ماه‌های نماینده انتخاب شدند. برای مقایسه عملکرد سامانه‌های تهویه، سه سناریوی شامل: (۱) گلخانه بدون تهویه طبیعی (حالت مرجع)، (۲) تهویه طبیعی مبتنی بر باد غالب (WDNV)، و (۳) تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV) بررسی شدند. در مجموع، با ترکیب سه ماه منتخب و سه سناریوی تهویه، ۹ شبیه‌سازی عددی مستقل انجام شد که امکان مقایسه مستقیم عملکرد دو راهبرد تهویه طبیعی و همچنین ارزیابی آن‌ها نسبت به حالت مرجع را فراهم ساخت. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، هندسه گلخانه، ابعاد سازه، خواص مصالح و مدل‌های عددی ثابت نگه داشته شد و تنها شرایط مرزی شامل دمای محیط، شدت تابش خورشیدی، مشخصات باد و آرایش سامانه تهویه تغییر کرد؛ بنابراین، اختلاف نتایج صرفاً ناشی از تفاوت شرایط اقلیمی و نوع سامانه تهویه بود. علاوه بر این، برای سامانه SCNV انرژی جذب‌شده توسط کلکتور و بازده حرارتی دودکش خورشیدی نیز محاسبه شد تا ارزیابی جامع‌تری از عملکرد این سامانه در اقلیم گرم و خشک اهواز ارائه شود. جزئیات هندسه، شبکه محاسباتی، شرایط مرزی، معادلات حاکم، روش حل عددی و شاخص‌های ارزیابی شامل نرخ تعویض هوا (ACH)، شاخص یکنواختی دما (TUI)، دمای تراز سایه‌بان گیاهی، توان برودتی و بازده حرارتی دودکش خورشیدی در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

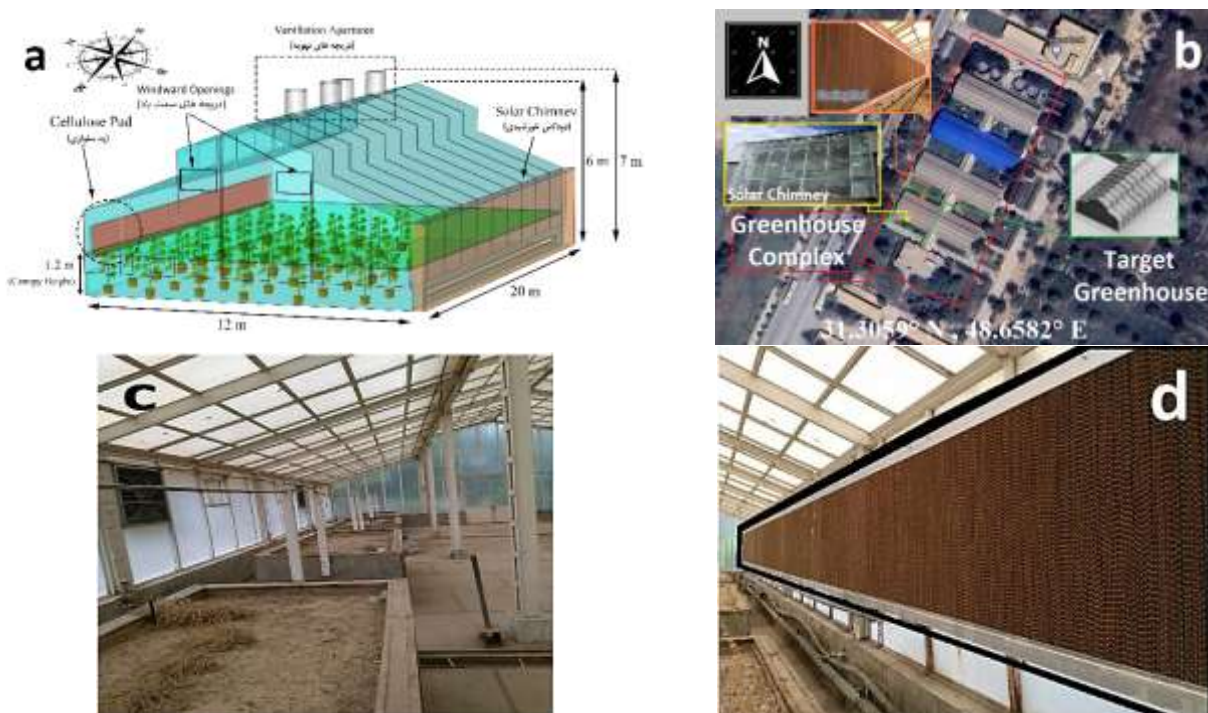
هندسه، شبکه‌بندی و ویژگی‌های مواد مدل

گلخانه مورد مطالعه، سازه‌ای خالی (بدون پوشش گیاهی) با سقف دوشیب، ابعاد 20×12 متر و ارتفاع ۶ متر است (شکل ۱) که در محوطه دانشگاه شهید چمران اهواز (عرض جغرافیایی $30/30.59$ درجه شمالی، طول جغرافیایی $48/65.82$ درجه شرقی و ارتفاع ۱۴ متر از سطح دریا) قرار دارد. محور طولی گلخانه در راستای شمال غربی-جنوب شرقی است. سامانه تهویه شامل یک دودکش خورشیدی دیواری نصب‌شده بر روی دیوار جنوب غربی و یک پد سلولزی در امتداد دیوار شمال شرقی است. با توجه به محدودیت‌های نفوذ نور و ضرورت حفظ یکنواختی ریزاقلیم در گلخانه، در این پژوهش از دودکش خورشیدی دیواری با آرایش موازی محور طولی گلخانه استفاده شد. این پیکربندی نسبت به سامانه‌های سقفی، ضمن کاهش تداخل با تابش خورشیدی، توزیع یکنواخت‌تری از جریان هوا فراهم می‌کند و با نصب بر روی دیوار جنوبی، بیشترین بهره‌برداری از تابش خورشیدی را در نیمکره شمالی ممکن می‌سازد (Abdeen et al., 2019; Arce et al., 2009). دودکش خورشیدی دارای طول ۲۰ متر، ارتفاع $2/7$ متر و فاصله $0/4$ متر بین صفحه جاذب و پوشش شیشه‌ای است. کلکتور از یک صفحه فولادی سیاه‌رنگ با ضخامت $0/5$ میلی‌متر و پوشش شیشه‌ای ۴ میلی‌متری تشکیل شده است. برای تخلیه هوای گرم، چهار دریچه سقفی نیز در نظر گرفته شد. پوشش گلخانه از صفحات پلی‌کربنات دوجداره شفاف ساخته شده و پد سلولزی با ابعاد $18 \times 10/15$ متر، آرایش ۴۵-۴۵ و تخلخل $0/94$ در مدل لحاظ شد. در سامانه WDNV، دو بازشوی ورودی با ابعاد $1 \times 1/2$ متر بر روی دیوار شمال غربی و چهار دریچه سقفی با قطر ۴۰ سانتی‌متر به عنوان مسیر خروج هوا در نظر گرفته شدند. مدل‌سازی هندسی و تولید شبکه با نرم‌افزار ANSYS Fluent 19.3 انجام شد. از شبکه عمدتاً چهاروجهی استفاده گردید و کیفیت آن بر اساس شاخص‌های کجی سلول، نسبت ابعادی و مقادیر y^+ در محدوده $200 < y^+ < 20$ ارزیابی شد (Roache, 1998). استقلال شبکه با روش برون‌یابی ریچاردسون بررسی شد (Mohammadi & Pironneau, 1994). تعداد سلول‌ها از حدود ۲۲۰ هزار تا $5/3$ میلیون برای گلخانه هدف افزایش یافت و نتایج نشان داد اختلاف میان شبکه‌های $1/9$ و $5/3$ میلیون سلولی کمتر از ۲ درصد است. از این‌رو، شبکه نهایی شامل حدود $1/9$ میلیون سلول برای گلخانه هدف و $4/3$ میلیون سلول برای مجموعه کامل گلخانه‌ها انتخاب شد. از آنجا که این پژوهش ادامه مطالعات پیشین بر روی همین گلخانه است، مشخصات کامل خواص حرارتی و اپتیکی مصالح در مقاله پیشین نویسندگان ارائه شده و از تکرار آن در اینجا خودداری شده است (سجادی و صابریان، ۱۴۰۳).

شرایط مرزی مدل‌ها و اعمال پیکربندی‌های مختلف تهویه طبیعی

با توجه به اقلیم گرم و خشک اهواز، با تابستان‌های بسیار گرم، زمستان‌های نسبتاً معتدل و دوره‌های گذار در ماه‌های اسفند، فروردین و مهر، شرایط مرزی گلخانه در طول سال تحت تأثیر تغییرات دما، تابش خورشیدی و باد قرار می‌گیرد. از این‌رو، به منظور ارزیابی عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی در شرایط بهره‌برداری متداول گلخانه‌های منطقه، سه سناریوی مستقل شامل: (۱) حالت مرجع (بدون تهویه)، (۲) تهویه طبیعی مبتنی بر باد غالب (WDNV)، و (۳) تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV)، تعریف و شبیه‌سازی شدند (شکل ۲). جزئیات عملکرد اجزای ورودی و خروجی هر سناریو در جدول ۱ ارائه شده است. در سامانه WDNV ورود هوا از طریق دو بازشوی جانبی با ابعاد $1/2 \times 1$ متر در دیوار شمال غربی و خروج آن عمدتاً از چهار دریچه سقفی با قطر $0/4$ متر انجام می‌شد؛ در این حالت،

پد سلولزی نیز به صورت باز در مدل لحاظ شد. در سامانه SCNV، هوا عمدتاً از طریق پد سلولزی وارد شده و تحت اثر شناوری حرارتی از طریق دودکش خورشیدی دیواری و دریچه‌های سقفی از گلخانه خارج می‌شود. در حالت مرجع، تمامی بازشوهای تهویه بسته فرض شدند و تنها تبادل محدود هوا از طریق پد سلولزی و اختلاف فشار ناشی از باد محیطی امکان‌پذیر بود. بدین ترتیب، هر سه سناریو با هندسه یکسان و تنها با تغییر راهبرد تهویه مورد مقایسه قرار گرفتند. داده‌های اقلیمی از پایگاه Weather and Climate استخراج شد (Weather and Climate, 2024) و شامل میانگین روزانه دمای هوا، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد برای ماه‌های اسفند، فروردین و مهر بود (جدول ۲). همچنین، تحلیل داده‌های بلندمدت هواشناسی نشان داد که در دوره‌های گذار، باد غالب منطقه از شمال غرب به جنوب شرق می‌وزد؛ بنابراین این جهت به عنوان جهت باد غالب در تعریف شرایط مرزی در نظر گرفته شد. برای کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت جوی، تمامی شبیه‌سازی‌ها در زمان متناظر با ظهر خورشیدی انجام شدند. مدل انتقال تابش خورشیدی با استفاده از مدل جهات گسسته (DO) در نرم‌افزار ANSYS Fluent پیاده‌سازی شد. در این مدل، مختصات جغرافیایی، تاریخ، زمان و شرایط تابشی منطقه به گونه‌ای تعریف شدند که شدت و زاویه تابش خورشیدی به صورت خودکار محاسبه و در معادلات انتقال حرارت لحاظ شوند. اعتبار این رویکرد پیش‌تر در مطالعات تجربی و عددی مختلف، از جمله پژوهش‌های مونتر و همکاران (Montero et al., 2005)، کیم و همکاران (K. Kim et al., 2008)، بورت و همکاران (Bournet et al., 2007)، و همچنین در مطالعات انجام‌شده توسط نویسندگان این پژوهش بر روی همین گلخانه (Saberian & Sajadiye, 2019, 2020) مورد تأیید قرار گرفته است. جزئیات معادلات انتقال تابش و نحوه کوپل آن با معادلات حاکم بر جریان و انرژی در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.

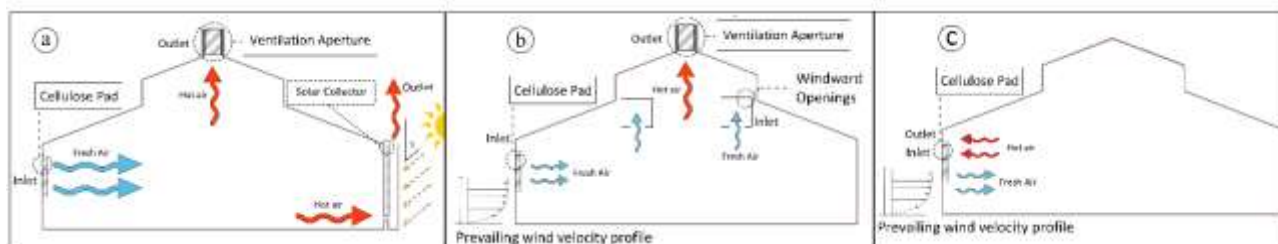


شکل ۱. نمای شماتیک گلخانه مورد مطالعه با سقف دوشیب، مجهز به دودکش خورشیدی دیواری نصب‌شده بر دیوار جنوب غربی، پد سرمایش تبخیری سلولزی در دیوار مقابل (شمال شرقی) و پنجره تهویه روی دیواره شمال غربی و دریچه‌های تهویه سقفی (a)؛ موقعیت گلخانه مورد مطالعه در مجموعه گلخانه‌های دانشگاه شهید چمران اهواز و آرایش فضایی سامانه‌های تهویه نسبت به جهات جغرافیایی (b)؛ نمای داخلی گلخانه (c) و پد سلولزی (d)

معادلات حاکم

مدل عددی به کاررفته در این پژوهش بر پایه همان چارچوب ریاضی و فیزیکی ارائه‌شده در مطالعه پیشین نویسندگان برای این گلخانه توسعه یافته است. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی، مدل آشفستگی، مدل سازی دینامیک جریان هوا از میان پد سلولزی م معادله تابش متغیر خورشیدی، معادله پروفیل متغیر سرعت باد غالب منطقه، به همراه شرایط مرزی و فرضیات مدل، پیش‌تر به صورت کامل تشریح و اعتبارسنجی شده‌اند. از این رو، به منظور پرهیز از تکرار مطالب و حفظ انسجام مقاله، از ارائه مجدد جزئیات کامل

معادلات صرف نظر شده و تنها جنبه‌های مرتبط با سناریوهای مورد بررسی در پژوهش حاضر بیان می‌شود (Saberian & Sajadiye, 2019, 2020).



شکل ۲. شماتیک هندسه گلخانه، مسیر عبور جریان، شرایط مرزی و اجزای مختلف بکارگرفته شده در اجرای پیکربندی انواع سیستم تهویه طبیعی شامل تهویه طبیعی تقویت شده با دودکش خورشیدی (a)؛ تهویه طبیعی بادمحور (b)؛ و بدون تهویه (c) در طول ماه‌های معتدل

جدول ۱. پیکربندی سناریوهای مختلف تهویه طبیعی و مسیرهای ورود و خروج هوا در گلخانه مورد مطالعه شامل حالت مرجع (Control)، تهویه طبیعی مبتنی بر باد غالب (WDBV) و تهویه طبیعی تقویت شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV)

سناریو تهویه	مکانیزم تهویه طبیعی	ورودی هوا	خروجی هوا
بدون تهویه	متأثر از نفوذ باد غالب به داخل گلخانه از قسمتهایی از پد سلولزی و خروج از قسمتهای دیگر پد	قسمتهایی از پد سلولزی	قسمتهایی از پد سلولزی
بادمحور	متأثر از نفوذ باد غالب از پنجره‌های تهویه روی دیواره شمال غربی و خروج از دریچه‌های تهویه سقفی	پنجره‌های تهویه (بر روی دیواره شمال غربی)	دریچه‌های تهویه سقفی
بکمک دودکش خورشیدی	متأثر از مکش هوایی که دودکش خورشیدی ایجاد می‌کند و ورود هوا از دیواره سلولزی و خروج از دودکش خورشیدی و نیز دریچه‌های تهویه سقفی	پد سلولزی	خروجی دودکش خورشیدی و دریچه‌های تهویه سقفی

جدول ۲. شرایط اقلیمی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های CFD شامل دمای محیط، سرعت باد غالب برای ماه‌های گذار در اقلیم گرم و خشک اهواز (Weather and Climate, 2024)

ماه	دمای متوسط محیط (°C)	سرعت در ارتفاع ۱۰ متری زمین (m s ⁻¹)	شدت تابش خورشیدی (W m ⁻²) در ظهر خورشیدی
اسفند (مارس)	۲۹/۱۲	۳/۵۸	۷۲۰/۵۱
فروردین (آوریل)	۳۵/۹۱	۳/۳۶	۸۳۲/۳۵
مهر (اکتبر)	۳۹/۱۶	۳/۱۹	۵۶۲/۷۴

روش‌های عددی گسسته و فرایندهای حل

معادلات حاکم بر جریان، انتقال حرارت و آشفته‌گی با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار ANSYS Fluent حل شدند. به منظور افزایش دقت پیش‌بینی میدان جریان و انتقال حرارت، گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، انرژی و کمیت‌های آشفته‌گی با استفاده از طرح مرتبه دوم Upwind انجام شد. برای کوپل فشار و سرعت نیز از الگوریتم SIMPLEC استفاده گردید. تمامی شبیه‌سازی‌ها به صورت پایا (Steady-State) و متناظر با شرایط شبه‌پایای حاکم بر گلخانه در زمان ظهر خورشیدی انجام شدند. معیار همگرایی برای معادله انرژی برابر با 10^{-6} و برای معادلات پیوستگی، انرژی جنبشی آشفته‌گی و نرخ اتلاف آشفته‌گی برابر با 10^{-4} در نظر گرفته شد. علاوه بر پایش باقیمانده‌ها، پایداری متغیرهای کلیدی نظیر دمای متوسط گلخانه و نرخ جریان جرمی در مرزهای ورودی و خروجی نیز برای اطمینان از دستیابی به همگرایی عددی کنترل شد. ساختار شبکه در مجاورت سطوح جامد به گونه‌ای اصلاح شد که مقادیر پارامتر y^+ در بازه پیشنهادی ۲۰ تا ۲۰۰ قرار گیرند (Mohammadi & Pironneau, 1994). همچنین، برای اطمینان از استقلال نتایج از اندازه شبکه، تحلیل استقلال مش از طریق چند مرحله ریزسازی تدریجی انجام شد. بر اساس نتایج این تحلیل و با در نظر گرفتن تعادل میان دقت و هزینه محاسباتی، شبکه‌ای شامل حدود ۱/۹ میلیون سلول برای گلخانه هدف و در مجموع حدود ۴/۳ میلیون سلول برای کل دامنه محاسباتی انتخاب شد. پردازش و تحلیل نتایج عددی و همچنین ترسیم خطوط جریان، کانتورهای دما و سایر متغیرهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار Tecplot انجام گرفت. محاسبات بر روی یک ایستگاه کاری مجهز به پردازنده Intel Core i7-4710HQ و ۱۶ گیگابایت حافظه RAM اجرا شد.

اعتبارسنجی مدل CFD

به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد مدل عددی و بررسی دقت پیش بینی شرایط ریزاقلیم ناحیه کشت در گلخانه، فرآیند اعتبارسنجی مدل CFD بر پایه داده های تجربی حاصل از دو مطالعه مستقل که پیش تر توسط نویسندگان در همان گلخانه انجام شده بود، صورت گرفت (Saberian & Sajadiye, 2019, 2020). این مطالعات با هدف بررسی توانایی مدل در بازنمایی پارامترهای کلیدی محیطی شامل توزیع دما، میدان سرعت هوا و شدت تابش خورشیدی طراحی شده بودند. در نخستین مطالعه، که طی بازه زمانی ۱۰ تا ۱۵ ژوئیه (۱۹ تا ۲۴ تیر) انجام شد، عملکرد مدل در پیش بینی توزیع دما و تابش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت (Saberian & Sajadiye, 2019). در این آزمایش، دمای هوا در ۱۵۵ نقطه مختلف داخل گلخانه به کمک حسگرهای حرارتی اندازه گیری شد و همزمان شدت تابش خورشیدی جهانی نیز با استفاده از پیرانومتر ثبت گردید. نمونه برداری ها در سه نوبت روزانه (ساعت ۱۰، ۱۲ و ۱۴) انجام شد و دقت مدل از طریق تحلیل رگرسیونی و محاسبه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی گردید. در مطالعه دوم، دامنه اعتبارسنجی به بررسی میدان جریان هوا نیز گسترش یافت (Saberian & Sajadiye, 2020). در این مرحله، علاوه بر دما، سرعت جریان هوا در نواحی مجاور فن های اگزاست اندازه گیری شد. داده های تجربی با استفاده از بادسنج تیغه ای و حسگرهای دما از ۸۰ نقطه مختلف داخل گلخانه جمع آوری شدند و نتایج عددی با داده های اندازه گیری شده از طریق شاخص های آماری مشابه مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج اعتبارسنجی نشان دادند که مدل CFD توسعه یافته قادر است شرایط حرارتی، میدان جریان و انتقال تابش در محیط گلخانه را با دقت قابل قبولی بازنمایی کند. در مطالعه نخست، ضریب همبستگی بین دماهای اندازه گیری شده و پیش بینی شده در بازه ۰/۷۸ تا ۰/۸۹ قرار داشت و مقادیر RMSE برای دما بین ۱/۸۸ تا ۳/۰۳ درجه سلسیوس به دست آمد. همچنین، شبیه سازی تابش خورشیدی با ضریب همبستگی ۰/۹۹ و RMSE برابر با معادل $W m^{-2}$ ۷۵/۵۸ انطباق بسیار مطلوبی با داده های تجربی نشان داد (Saberian & Sajadiye, 2019). در مطالعه دوم نیز، سرعت هوا با ضریب همبستگی ۰/۹۸ و RMSE برابر با $0.4 m s^{-1}$ پیش بینی شد که بیانگر توانایی مناسب مدل در بازنمایی میدان جریان داخل گلخانه است. مقدار RMSE دما نیز حدود $2/2^{\circ}C$ محاسبه شد و نتایج تابش خورشیدی با یافته های مطالعه نخست سازگاری مناسبی داشتند (Saberian & Sajadiye, 2020). در مجموع، نتایج حاصل از دو مجموعه داده تجربی مستقل نشان می دهد که مدل CFD توسعه یافته قادر است برهم کنش میان جریان هوا، انتقال حرارت و تابش خورشیدی را در محیط گلخانه با دقت قابل قبول بازنمایی کند. بنابراین، مدل حاضر می تواند به عنوان ابزاری معتبر برای تحلیل و مقایسه سناریوهای مختلف تهویه طبیعی و ارزیابی عملکرد دودکش خورشیدی در شرایط اقلیمی مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

ارزیابی عملکرد سیستم تهویه در ماه های گذار (معتدل)

کارایی سامانه های تهویه در این پژوهش بر اساس توانایی آن ها در کاهش دمای ناحیه رشد گیاه و دفع گرمای اضافی از فضای داخلی گلخانه ارزیابی شد. به این منظور، شاخص اثربخشی کاهش دما^۱ (TRE) تعریف گردید (رابطه ۱). این شاخص میزان موفقیت هر سامانه تهویه را در کاهش دمای تراز سایه بان گیاهی نسبت به حالت بدون تهویه و در مقایسه با بیشینه کاهش دمای قابل دستیابی تحت شرایط محیطی نشان می دهد. مقادیر بزرگ تر TRE بیانگر عملکرد بهتر سامانه در تعدیل شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه هستند. علاوه بر این، نرخ تعویض هوای ساعتی (ACH) به عنوان یکی از مهم ترین شاخص های عملکرد تهویه طبیعی محاسبه شد (رابطه ۲). این شاخص بیانگر تعداد دفعات جایگزینی حجم هوای داخل گلخانه در هر ساعت بوده و از نسبت دبی حجمی هوای عبوری به حجم گلخانه به دست می آید (McFarlane, 2021). به منظور ارزیابی کیفیت توزیع حرارتی در ناحیه رشد گیاه، شاخص یکنواختی دما^۲ (TUI) نیز محاسبه شد (رابطه ۳). این شاخص برای سنجش میزان همگنی میدان دما در تراز سایه بان گیاهی مورد استفاده قرار گرفت؛ به گونه ای که مقادیر بزرگ تر آن بیانگر توزیع یکنواخت تر دما و کاهش نواحی گرم و سرد موضعی در فضای کشت هستند.

$$TRE = \frac{T_c - T_s}{T_c - T_a} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$ACH = \frac{\dot{m} \times 3600}{\rho V_{vol}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$TUI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - T_{ave}|}{n(T_{max} - T_{min})} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، T_c بیانگر میانگین دمای سطح سایبان گیاهی در حالت بدون تهویه، T_s میانگین دمای همان تراز در حضور سامانه تهویه

1. Temperature Reduction Effectiveness; TRE

2. Temperature Uniformity Index; TUI

و T_a دمای محیط خارج گلخانه است. در رابطه ۴، $\dot{m}$ دبی جرمی خروجی از گلخانه، و V_{vol} حجم گلخانه می‌باشد. در رابطه ۵، T_i دمای هر نقطه نمونه‌برداری، T_{avg} میانگین دمای ناحیه مورد بررسی و T_{min} و T_{max} به ترتیب بیشترین و کمترین دمای ثبت شده در آن ناحیه هستند.

ارزیابی نرخ دفع گرمای محسوس

به منظور مقایسه عملکرد حرارتی سامانه‌های تهویه، نرخ دفع گرمای محسوس از فضای داخلی گلخانه (SHRR) محاسبه شد. این شاخص بیانگر میزان انرژی حرارتی حذف شده از گلخانه توسط جریان هوای تهویه بوده و بر اساس نرخ جریان جرمی هوا و اختلاف دمای بین جریان ورودی و خروجی تعیین می‌شود. محاسبات بر مبنای موازنه انرژی برای جریان پایا و مطابق رابطه عمومی انتقال گرمای محسوس انجام گرفت (ASHRAE., 2006; Incropera et al., 1996). برای سامانه تهویه طبیعی تقویت شده با دودکش خورشیدی، گرمای دفع شده از طریق دو مسیر خروجی شامل دریچه‌های تهویه و خروجی دودکش خورشیدی محاسبه شد:

$$SHRR = \dot{m}_s C_p (T_i - T_{so}) + \dot{m}_v C_p (T_i - T_{vo}) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، $\dot{m}_s$ و $\dot{m}_v$ به ترتیب نرخ جریان جرمی هوای خروجی از دودکش خورشیدی و دریچه‌های تهویه و T_{so} و T_{vo} به ترتیب دماهای خروجی دودکش خورشیدی و دریچه‌های تهویه، و T_i دمای هوای ورودی و C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا هستند. برای سامانه تهویه طبیعی بادمحور تنها خروجی‌های تهویه در محاسبه لحاظ شدند:

$$SHRR = \dot{m}_v C_p (T_i - T_{vo}) \quad \text{رابطه ۵}$$

در سامانه بدون تهویه (کنترل)، با وجود بسته بودن دریچه‌ها و نبود سامانه تهویه فعال، به دلیل نفوذ طبیعی هوا از طریق دیواره سلولزی، نرخ دفع گرما بر اساس دبی جرمی عبوری از این مسیر و اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی محاسبه شد. از آنجا که هدف این مطالعه ارزیابی عملکرد حرارتی سامانه‌ها در کاهش دمای هوای گلخانه و بهبود ریزاقلیم ناحیه رشد گیاه بوده است، تنها مؤلفه گرمای محسوس در محاسبات توان برودتی لحاظ شد.

ارزیابی بازده حرارتی کلکتور خورشیدی دودکش

به منظور ارزیابی عملکرد انرژی سامانه دودکش خورشیدی، بازده حرارتی کلکتور خورشیدی دودکش نیز محاسبه شد. این شاخص نسبت انرژی حرارتی مفید جذب شده توسط جریان هوا به انرژی تابشی فرودی بر سطح کلکتور را بیان می‌کند و یکی از متداول ترین معیارهای ارزیابی عملکرد کلکتورهای خورشیدی هواگرم محسوب می‌شود (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2023). هرچند این شاخص مستقیماً یکی از معیارهای اصلی ارزیابی اقلیم گلخانه به شمار نمی‌رود، اما اطلاعات ارزشمندی درباره عملکرد انرژی سامانه و قابلیت توسعه و طراحی دودکش‌های خورشیدی در اقلیم‌های مشابه فراهم می‌کند. بازده حرارتی کلکتور از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m}_s C_p (T_{so} - T_{si})}{I_G A} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن η_{col} بازده حرارتی کلکتور خورشیدی، $\dot{m}_s$ نرخ جریان جرمی هوا در کانال دودکش، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، T_{si} و T_{so} به ترتیب دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور، I_G تابش خورشیدی فرودی بر سطح کلکتور و A سطح مؤثر جذب کننده تابش خورشیدی هستند.

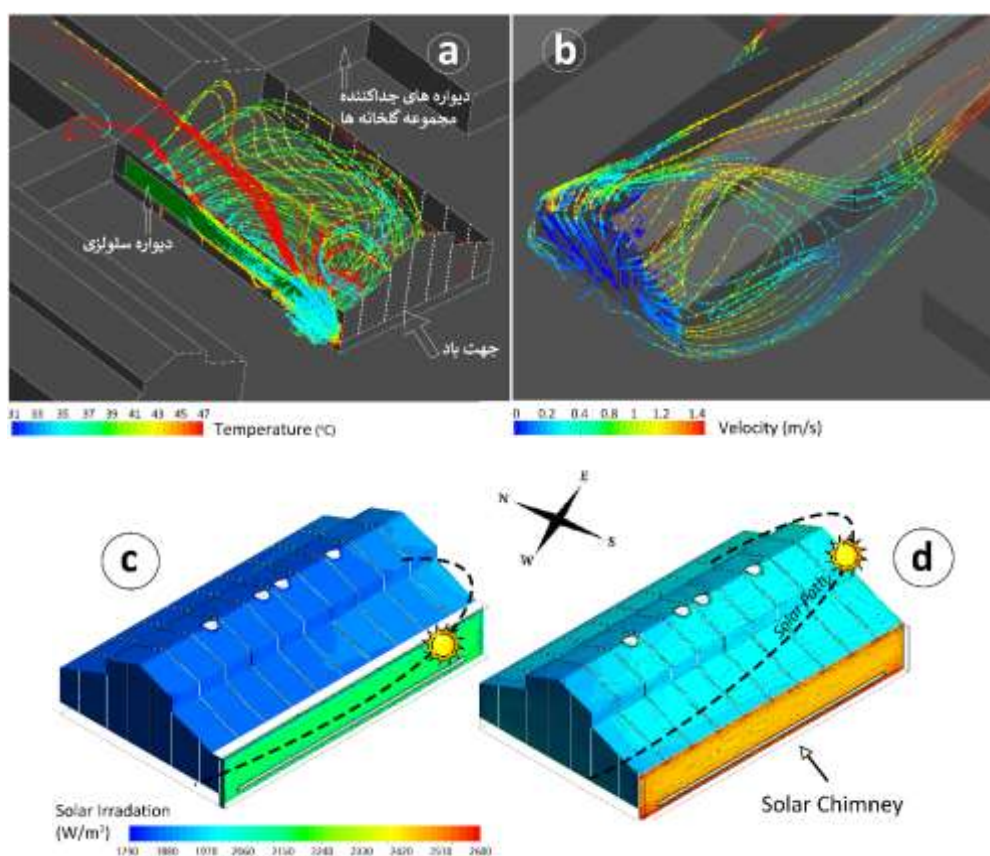
یافته های پژوهش و بحث

به منظور دستیابی به درک جامع تری از عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی مورد بررسی، نتایج پژوهش در دو بخش مکمل ارائه شده‌اند. در بخش نخست، تحلیل کیفی رفتار آیرودینامیکی و حرارتی گلخانه بر اساس خروجی‌های میدان جریان و انتقال حرارت انجام شده است. در این بخش، الگوهای جریان هوا، توزیع دما، شدت تابش خورشیدی، ضریب انتقال حرارت و سایر متغیرهای میدانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا سازوکارهای فیزیکی حاکم بر عملکرد سامانه‌های تهویه و نحوه تعامل میان باد، شناوری حرارتی و تابش خورشیدی تبیین شود. این تحلیل علاوه بر فراهم ساختن درک بصری از فرآیند انتقال حرارت، امکان ارزیابی میزان انطباق نتایج شبیه‌سازی با رفتار فیزیکی مورد انتظار را نیز فراهم می‌آورد. در بخش دوم، ارزیابی کمی عملکرد سامانه‌های مختلف تهویه ارائه شده است. در این بخش، شاخص‌هایی

نظیر نرخ تعویض هوای ساعتی (ACH)، شاخص یکنواختی دما (TUI)، اثربخشی کاهش دمای ناحیه رشد گیاه (TRE)، نرخ دفع گرمای محسوس (SHRR)، دمای تراز سایه بان گیاهی (T_c) و بازده حرارتی کلکتور خورشیدی (η_{col}) مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. ترکیب نتایج کیفی و کمی امکان ارزیابی هم‌زمان ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم ناحیه رشد و عملکرد انرژی سامانه‌ها را فراهم ساخته و مبنایی برای تعیین مناسب‌ترین راهبرد تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک اهواز ارائه می‌دهد.

میدان جریان باد و توزیع تابش خورشیدی پیرامون گلخانه

بررسی میدان جریان در گلخانه مورد مطالعه (شکل ۳) نشان می‌دهد که باد غالب پس از برخورد با دیواره شمال غربی، به دلیل ایجاد ناحیه فشار مثبت، به سمت کناره‌های سازه و به‌ویژه دیواره حاوی پد سلولزی منحرف می‌شود. در نتیجه، مسیرهای ترجیحی جریان در امتداد دیواره‌های جانبی شکل گرفته و بخشی از هوای پرفشار از طریق پد سلولزی متخلخل وارد گلخانه می‌شود. این هوا پس از تبادل حرارت با محیط داخلی و جذب گرما، از نواحی با فشار کمتر خارج شده و یک چرخه تهویه موضعی ناشی از توزیع غیریکنواخت فشار در طول دیواره سلولزی ایجاد می‌کند. بنابراین، حتی در شرایط بسته بودن دریچه‌های تهویه نیز میدان جریان خارجی می‌تواند بر نفوذ هوا و شرایط حرارتی داخل گلخانه اثرگذار باشد. این نتایج اهمیت در نظر گرفتن هندسه واقعی مجموعه گلخانه‌ها را در پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی نشان می‌دهد.



شکل ۳. کانتورهای دما و خطوط جریان، نشان‌دهنده نفوذ هوا از طریق پد سلولزی متخلخل، توزیع جریان در فضای داخلی گلخانه و مسیرهای خروج هوا (a)؛ کانتورهای سرعت و خطوط جریان، بیانگر میدان جریان باد پیرامون گلخانه و نحوه عبور آن از روی سازه (b)؛ الگوی توزیع تابش خورشیدی جذب‌شده بر روی سطوح گلخانه و دودکش خورشیدی در ظهر خورشیدی، پیش‌بینی‌شده توسط مدل انتقال تابش گسسته (DO)، به همراه موقعیت و مسیر خورشید در مهرماه (c) و فروردین‌ماه (d).

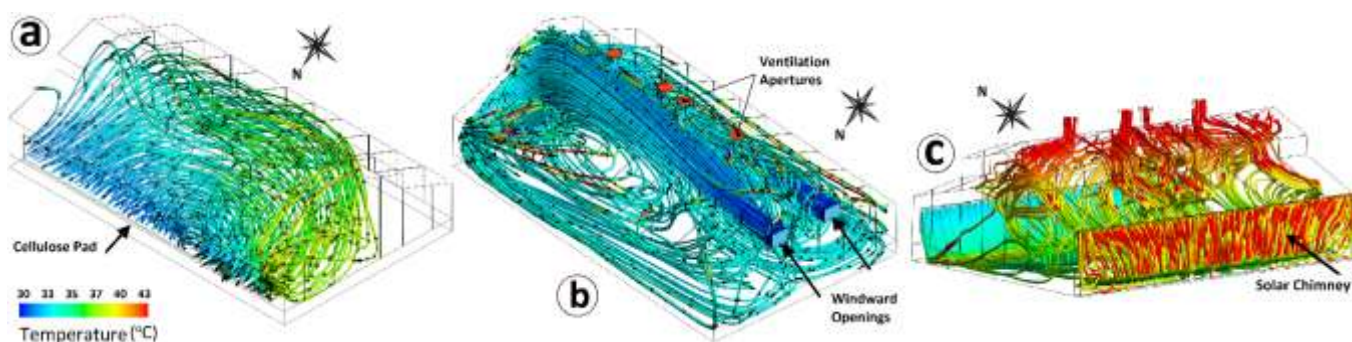
شکل ۳ همچنین توزیع فضایی انرژی خورشیدی جذب‌شده بر روی سطوح گلخانه و دودکش خورشیدی را که با استفاده از مدل انتقال تابش گسسته (DO) برای ماه‌های فروردین و مهر محاسبه شده است، نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که توزیع انرژی تابشی به موقعیت خورشید، زاویه تابش، جهت‌گیری سطوح، هندسه سازه و پدیده خودسایه‌اندازی وابسته است. به دلیل انحراف دودکش خورشیدی از راستای جنوب جغرافیایی، الگوهای نامتقارن سایه‌اندازی بر روی سطوح مجاور ایجاد شده است. در فروردین، به علت ارتفاع بیشتر

خورشید، توزیع انرژی یکنواخت‌تر بوده و بخش وسیع‌تری از سطوح در معرض تابش مستقیم قرار گرفته است؛ در مقابل، در مهر کاهش ارتفاع خورشید موجب افزایش سایه‌اندازی، تشدید ناهمگنی میدان تابشی و کاهش وسعت نواحی پرتابش شده است. این تفاوت‌ها مستقیماً بر شرایط حرارتی سطوح و عملکرد سامانه تهویه طبیعی اثر می‌گذارند. بیشترین انرژی تابشی در هر دو ماه بر روی سطوح رو به خورشید، به‌ویژه دیواره جنوبی مجهز به دودکش خورشیدی، مشاهده شد که بیانگر ظرفیت مناسب این سامانه برای جذب انرژی خورشیدی و ایجاد جریان شناوری است. نتایج مشابهی نیز توسط تیجامپو گزارش شده است (Tigampo et al., 2023).

نکته قابل توجه آن است که حتی در مهرماه، با وجود ثبت کمترین شدت تابش خورشیدی محیطی $562/74 \text{ W m}^{-2}$ ، دودکش خورشیدی همچنان توانایی مناسبی برای جذب انرژی و ایجاد نیروی شناوری دارد. همچنین، بیشترین شدت تابش در فروردین $832/35 \text{ W m}^{-2}$ ثبت شد که موجب افزایش سطح دریافت‌کننده تابش و فراهم شدن شرایط مناسب‌تر برای عملکرد حرارتی دودکش گردید. بنابراین، اگرچه هندسه گلخانه و محل استقرار دودکش ثابت است، تغییرات فصلی تابش خورشیدی می‌تواند شرایط مرزی حرارتی، شدت جریان شناوری، نرخ تهویه و عملکرد کلی سامانه را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار دهد. ارزیابی کمی این اثرات از طریق تحلیل بازده حرارتی کلکتور خورشیدی، نرخ تعویض هوا و سایر شاخص‌های عملکردی در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

رفتار آیرودینامیکی و توزیع دما در فضای داخلی گلخانه

پس از بررسی شرایط مرزی خارجی، در این بخش تأثیر راهبردهای مختلف تهویه طبیعی بر الگوی جریان هوا و توزیع دما در داخل گلخانه ارزیابی شد. رفتار جریان حاصل برهم‌کنش نیروهای ناشی از باد، شناوری حرارتی، هندسه سازه و توزیع انرژی خورشیدی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ریزاقلم ناحیه کشت دارد. از این‌رو، الگوی جریان هوا، بردارهای سرعت و توزیع دما برای سه سناریوی بدون تهویه، WDNV و SCNV به‌صورت تطبیقی بررسی شدند. شکل ۴ خطوط جریان و توزیع دمای متناظر را در ظهر خورشیدی روز ۲۶ اسفند (۱۶ مارس) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که نوع سامانه تهویه نقش تعیین‌کننده‌ای در سازمان‌دهی میدان جریان و مسیرهای انتقال هوا دارد. در حالت بدون تهویه، به دلیل بسته بودن دریچه‌ها، تبادل هوا تنها از طریق پد سلولزی انجام می‌شود. در این شرایط، هوای ورودی انرژی جنبشی اندکی داشته و پس از ورود به‌سرعت تضعیف می‌شود؛ در نتیجه، تنها گردش ضعیفی در طول گلخانه شکل گرفته و نواحی وسیعی با سرعت پایین و اختلاط محدود ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده نرخ پایین تعویض هوا و زمان ماند زیاد توده‌های هوایی است.



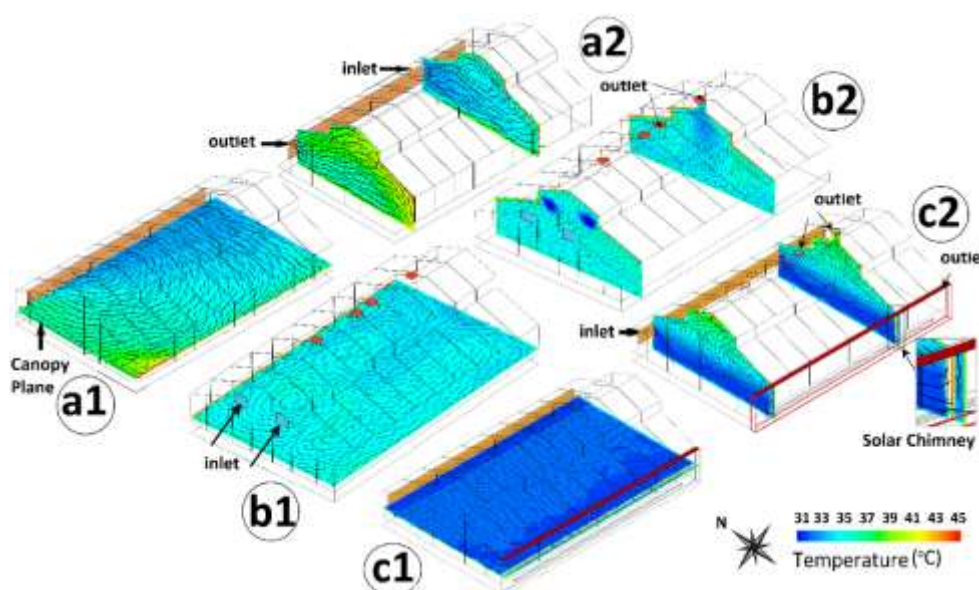
شکل ۴. مقایسه الگوی جریان هوا و میدان دمایی گلخانه در سه حالت بهره‌برداری: (a) بدون تهویه فعال، (b) تهویه طبیعی بادمحور (WDNV) و (c) تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV)، در ظهر خورشیدی روز ۲۶ اسفند (۱۶ مارس). خطوط جریان، مسیر حرکت هوا و کانتورهای دما، توزیع فضایی شرایط حرارتی داخل گلخانه را در هر سناریو نشان می‌دهند.

در سامانه WDNV، اختلاف فشار میان دریچه‌های ورودی و خروجی، همراه با شناوری طبیعی هوای گرم در نزدیکی سقف، موجب توزیع مناسب‌تر جریان و تخلیه مؤثرتر هوای گرم می‌شود. هرچند وجود گردابه‌های موضعی نشان می‌دهد بخشی از انرژی جریان صرف بازپرخش هوا می‌شود، اما همین آشفتگی کنترل‌شده باعث افزایش اختلاط، کاهش نواحی رکود و شکستن لایه‌های مرزی حرارتی می‌شود (Sase, 2006). در مقابل، در سامانه SCNV، گرم شدن هوا در کانال دودکش خورشیدی، نیروی شناوری پایداری ایجاد کرده و منظم‌ترین و جهت‌دارترین الگوی جریان را در میان سه سناریو به وجود می‌آورد. در این حالت، هوا به‌صورت پیوسته از پد سلولزی به سمت دودکش هدایت می‌شود؛ رفتاری که با نتایج مطالعات پیشین نیز مطابقت دارد (Kasaeian et al., 2017). برخلاف سامانه WDNV که عملکرد آن به شرایط باد محیط وابسته است، در SCNV بخش عمده نیروی محرکه از اختلاف چگالی ناشی از گرمایش هوای کانال تأمین

می‌شود؛ بنابراین، این سامانه حتی در شرایط باد ضعیف نیز بخشی از ظرفیت تهویه خود را حفظ می‌کند (Lee & Strand, 2009). تفاوت در الگوی جریان، به‌طور مستقیم بر توزیع دما نیز اثرگذار است. در حالت بدون تهویه، ماندگاری طولانی هوا موجب تجمع گرمای ناشی از تابش خورشیدی، تشکیل نواحی داغ در نزدیکی سقف و مرکز گلخانه و ایجاد گرادیان‌های حرارتی شدید می‌شود؛ شرایطی که می‌تواند تنش حرارتی گیاه را افزایش داده و احتمال تشکیل میعان را بیشتر کند (Teitel et al., 2008).

لایه‌بندی حرارتی و ریزاقلیم ناحیه کشت

عملکرد سامانه‌های تهویه تنها به ظرفیت جابه‌جایی هوا محدود نمی‌شود، بلکه به نحوه سازمان‌دهی میدان جریان و توزیع حرارت در ناحیه رشد گیاه نیز وابسته است. شکل ۵ الگوی جریان هوا و توزیع دما را در سه سناریوی بدون تهویه، WDNV و SCNV در تراز سایه‌بان گیاهی (ارتفاع ۱/۲ متری از کف گلخانه) و دو مقطع عرضی ابتدا و انتهای گلخانه نشان می‌دهد. این ناحیه محل اصلی تبادل حرارت، رطوبت و دی‌اکسیدکربن میان گیاه و محیط است و ویژگی‌های آیرودینامیکی آن مستقیماً بر انتقال جرم و رشد گیاه اثر می‌گذارد (Boulard & Wang, 2000). در حالت بدون تهویه، شدت جریان هوا بسیار محدود بوده و نواحی گسترده‌ای از رکود جریان در میان ردیف‌های گیاهی مشاهده می‌شود که موجب تجمع هوای گرم و شکل‌گیری نواحی با دمای بالا شده است. همچنین، میدان جریان در طول گلخانه نامنظم بوده و اختلاف دمای محسوسی میان دو مقطع وجود دارد؛ به‌طوری‌که میانگین دما در مقطع ابتدایی حدود 40°C و در مقطع انتهایی حدود 35°C است. این اختلاف بیانگر گرادیان طولی شدید و یکنواختی حرارتی ضعیف در فضای گلخانه است. اگرچه گردابه‌های تشکیل‌شده در نزدیکی سقف تا حدودی موجب اختلاط موضعی می‌شوند، اما به دلیل شدت پایین جریان، تأثیر آن‌ها بر بهبود تهویه محدود است (Campen & Bot, 2003; Norton et al., 2007).



شکل ۵. مقایسه میدان جریان و توزیع دما در گلخانه تحت سه راهبرد تهویه شامل: بدون تهویه فعال (a)، تهویه طبیعی بادمحور (b) (WDNV) و تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (c) (SCNV)، در ظهر خورشیدی روز ۲۶ اسفند (۱۶ مارس). زیرشکل‌های a1-c1 الگوی جریان هوا و میدان دمایی را در تراز سایه‌بان گیاهی و زیرشکل‌های a2-c2 توزیع متناظر آن‌ها را در دو مقطع عرضی واقع در ابتدای و انتهای گلخانه نشان می‌دهند.

در سامانه WDNV ورود هوا از دریچه‌های جانبی موجب افزایش سرعت جریان و بهبود اختلاط حرارتی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اختلاف دمای طولی کاهش یافته و دمای متوسط هر دو مقطع در حدود 35°C باقی می‌ماند. با این حال، وجود نواحی بازچرخش و گردابه‌های متعدد نشان می‌دهد که مسیر جریان هنوز کاملاً پایدار و جهت‌دار نیست و بخشی از انرژی جریان صرف آشفستگی‌های موضعی می‌شود. در مقابل، سامانه SCNV منظم‌ترین الگوی جریان را ایجاد می‌کند. هوا پس از عبور از پد سلولزی در امتداد طول گلخانه به سمت دودکش خورشیدی هدایت شده و مسیر جریان پیوسته و جهت‌داری را شکل می‌دهد که موجب کاهش نواحی رکود و بازچرخش می‌شود. همچنین، در مقاطع عرضی نیز ساختار جریان در طول گلخانه تقریباً حفظ شده و شدت گردابه‌ها کاهش می‌یابد که بیانگر نقش دودکش

خورشیدی در حفظ نیروی محرکه تهویه است.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سامانه SCNV، تشکیل یک لایه‌بندی حرارتی کنترل‌شده است؛ به‌گونه‌ای که هوای گرم در نزدیکی سقف تجمع یافته و هوای خنک‌تر در ناحیه کشت باقی می‌ماند و اختلاف دمایی در حدود 5°C میان لایه فوقانی و ناحیه سایه‌بان گیاهی ایجاد می‌شود. این رفتار که پیش‌تر نیز برای سامانه‌های مبتنی بر فناوری حرارتی گزارش شده است (Kasaeian et al., 2017)، می‌تواند با کاهش تنش گرمایی و جلوگیری از بازگشت هوای گرم به ناحیه رشد، شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم کند (Kittas et al., 1997). اگرچه لایه‌بندی حرارتی در برخی شرایط ممکن است موجب تجمع گرما و رطوبت در بخش فوقانی شود (Bailey, 2000; Fatnassi et al., 2013)، در این پژوهش مکش پیوسته دودکش خورشیدی از پایداری نامطلوب این لایه جلوگیری کرده است.

در مجموع، تحلیل هم‌زمان خطوط جریان، بردارهای سرعت و کانتورهای دما نشان می‌دهد که برتری سامانه SCNV صرفاً ناشی از افزایش ظرفیت تهویه نیست، بلکه از سازمان‌دهی بهتر میدان جریان، هدایت مؤثر هوا، تخلیه پیوسته هوای گرم و ایجاد ساختار حرارتی مطلوب در ناحیه رشد گیاه ناشی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی سامانه‌های تهویه طبیعی تنها بر اساس نرخ تعویض هوا برای توصیف کیفیت واقعی ریزاقلیم کافی نیست. مقایسه کمی شاخص‌هایی مانند نرخ تعویض هوا، اثربخشی کاهش دما، یکنواختی دما و نرخ دفع گرمای محسوس در بخش بعدی ارائه شده است.

ارزیابی کمی عملکرد سامانه‌های تهویه

اگرچه تحلیل کیفی میدان جریان و توزیع دما درک مناسبی از سازوکارهای حاکم بر عملکرد سامانه‌های تهویه فراهم می‌کند، قضاوت نهایی درباره کارایی هر سامانه نیازمند استفاده از شاخص‌های کمی و قابل مقایسه است. از این‌رو، در این بخش عملکرد سه حالت مورد بررسی شامل گلخانه بدون تهویه (کنترل)، WDNV و SCNV بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های ریزاقلیمی، تهویه‌ای و انرژی ارزیابی می‌شود. به این منظور، نرخ تعویض هوای ساعتی (ACH) به‌عنوان شاخص ظرفیت تهویه، شاخص یکنواختی دما (TUI) به‌عنوان معیار کیفیت توزیع حرارتی، اثربخشی کاهش دمای ناحیه رشد گیاه (TRE) به‌عنوان شاخص عملکرد ریزاقلیمی، دمای تراز سایه‌بان گیاهی (T_c) و دمای متوسط هوای داخل گلخانه (T_{in})، نرخ دفع گرمای محسوس (SHRR)، به‌عنوان معیار عملکرد حرارتی سامانه‌های تهویه و بازده حرارتی کلکتور خورشیدی (η_{col}) به‌عنوان شاخص عملکرد انرژی سامانه SCNV مورد بررسی قرار گرفتند. این شاخص‌ها امکان ارزیابی هم‌زمان ظرفیت تهویه، کیفیت ریزاقلیم ناحیه کشت و کارایی انرژی سامانه‌ها را فراهم می‌کنند. لازم به ذکر است که در بسیاری از مطالعات، عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی عمدتاً بر اساس نرخ تعویض هوا ارزیابی می‌شود؛ در حالی که افزایش ظرفیت تهویه لزوماً به معنای بهبود کیفیت ریزاقلیم یا ایجاد شرایط حرارتی مطلوب‌تر در ناحیه رشد گیاه نیست (Boulard & Wang, 2000). از این‌رو، در پژوهش حاضر تلاش شده است با تحلیل هم‌زمان شاخص‌های تهویه، حرارتی و انرژی، تصویری جامع از عملکرد واقعی سامانه‌ها ارائه شود.

مقادیر تمامی شاخص‌های عملکردی در ماه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه WDNV از نظر ظرفیت تهویه بیشترین عملکرد را داشته است. میانگین نرخ تعویض هوا در این سامانه برابر با $5/35\text{ h}^{-1}$ بوده که در مقایسه با SCNV ($1/75\text{ h}^{-1}$)، حدود سه برابر بیشتر و نسبت به حالت کنترل ($0/06\text{ h}^{-1}$) حدود ۸۹ برابر بزرگ‌تر است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه سازگار است که برای سیستم تهویه مطبوع با کمک دودکش خورشیدی ACH در بازه $2/42$ تا $4/33$ (Maerefat & Haghighi, 2010)، $2/4$ تا $3/8$ (Salehi et al., 2019) و $1/76$ تا $5/04$ (Jiménez-Xamán et al., 2020) و نیز برای سیستم خنک‌سازی تبخیری مبتنی بر دودکش خورشیدی در بازه $4/07$ تا $6/95$ (Abdallah et al., 2013)، گزارش کرده‌اند. با توجه به توصیه انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا^۱ که ACH در شرایط تهویه طبیعی حداقل حدود $0/5$ تا 1 را برای کنترل رطوبت و جلوگیری از بیماری در محیط‌های گلخانه‌ای پیشنهاد داده شده است (ASAE, 2003)، می‌توان گفت هر دو نوع سیستم تهویه طبیعی قادر به تامین حداقل نیاز تهویه‌ای گلخانه می‌باشند. با این حال، تهویه بادمحور به دلیل ایجاد نرخ تعویض هوای بالاتر، ظرفیت بیشتری برای تخلیه گرما و رطوبت از محیط گلخانه فراهم کرده است. این نتیجه بیانگر نقش غالب اختلاف فشار ناشی از باد در افزایش تبادل هوا میان محیط داخلی و خارجی گلخانه است. با این حال، همان‌گونه که در تحلیل کیفی ریزاقلیم ناحیه کشت اشاره شده است، ظرفیت تهویه به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر کیفیت عملکرد سامانه باشد. در واقع، نحوه سازمان‌دهی میدان جریان، پایداری مسیرهای انتقال هوا و محل تخلیه توده‌های هوای گرم نیز در تعیین عملکرد نهایی سامانه نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (Teitel et al., 2008). این موضوع به‌خوبی در مقادیر SHRR منعکس شده است. میانگین نرخ دفع گرمای

محسوس در سامانه WDNV برابر با $11/55 \text{ kW}$ بوده که نسبت به حالت کنترل ($0/41 \text{ kW}$) افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. در مقابل، سامانه SCNV با وجود ACH پایین‌تر، میانگین SHRR معادل $3/33 \text{ kW}$ ایجاد کرده است که بیش از هشت برابر بزرگ‌تر از حالت کنترل است. این نتیجه نشان می‌دهد که رابطه میان ظرفیت تهویه و دفع گرما الزاماً خطی نبوده و نحوه هدایت جریان می‌تواند به اندازه مقدار جریان هوا اهمیت داشته باشد.

جدول ۳. مقایسه شاخص‌های عملکرد حرارتی و تهویه‌ای سامانه‌های مختلف تهویه گلخانه در ماه‌های معتدل (اسفند، فروردین و مهر)

پارامتر	مهر Oct	اسفند Mar	فروردین Apr	میانگین	بازه
بدون تهویه					
$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	۴۵/۳	۳۵/۹	۴۲/۳	۴۱/۱۶	۳۵/۴۵-۹/۳
$T_{canopy} (^{\circ}\text{C})$	۴۳/۰	۳۵/۱	۴۰/۹	۳۹/۶۶	۳۵/۴۳-۱/۰
TUI (-)	-۰/۴۵	-۰/۵۸	-۰/۵۶	-۰/۵۳	-۰/۰-۴۵/۵۸
ACH (h^{-1})	-۰/۰۷	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰-۰۵/۰۷
SHRR (kW)	-۰/۵۶	-۰/۳۸	-۰/۲۹	-۰/۴۱	-۰/۰-۲۹/۵۶
تهویه بادمحور (WDNV)					
$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	۴۰/۶	۳۳/۷	۳۹/۷	۳۸/۰	۳۳/۴۰-۷/۶
$T_{canopy} (^{\circ}\text{C})$	۴۲/۴	۳۴/۲	۴۰/۲	۳۸/۹۳	۳۴/۴۲-۲/۴
TUI (-)	-۰/۸۰	-۰/۷۱	-۰/۷۴	-۰/۷۵	-۰/۰-۷۱/۸۰
TRE (-)	-۰/۱۱	-۰/۱۳	-۰/۱۸	-۰/۱۴	-۰/۰-۱۱/۱۸
ACH (h^{-1})	۵/۰۲	۵/۷۷	۵/۲۹	۵/۳۶	۵/۵-۰۲/۷۷
SHRR (kW)	۱۰/۲۲	۱۲/۹۱	۱۱/۵۲	۱۱/۵۵	۱۰/۱۲-۲۲/۹۱
تهویه بکمک دودکش خورشیدی (SCNV)					
$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	۴۱/۹	۳۴/۸	۴۰/۸	۳۹/۱۶	۳۴/۴۱-۸/۹
$T_{canopy} (^{\circ}\text{C})$	۴۰/۶	۳۳/۱	۳۸/۲	۳۶/۹۶	۳۲/۴۰-۱/۶
TUI (-)	-۰/۸۷	-۰/۹۶	-۰/۹۰	-۰/۹۱	-۰/۰-۸۷/۹۶
TRE (-)	-۰/۵۶	-۰/۵۴	-۰/۵۲	-۰/۵۴	-۰/۰-۵۲/۵۶
ACH (h^{-1})	۱/۴۸	۱/۸۴	۱/۹۳	۱/۷۵	۱/۱-۴۸/۹۳
SHRR (kW)	۲/۸۵	۳/۵۲	۳/۶۲	۳/۳۳	۲/۳-۸۵/۶۲
$\eta_{col} (\%)$	۵/۸۰	۷/۴۳	۶/۶۷	۶/۶۳	۵/۷-۸/۴۳

بررسی شاخص‌های مرتبط با ناحیه رشد گیاه نیز تفاوت قابل توجهی میان دو سامانه تهویه را آشکار می‌کند. میانگین دمای سایه‌بان گیاهی در حالت کنترل برابر با $39/68^{\circ}\text{C}$ بوده است. استفاده از سامانه WDNV این مقدار را به $38/94^{\circ}\text{C}$ کاهش داده، در حالی که سامانه SCNV کمترین مقدار را با میانگین $36/96^{\circ}\text{C}$ ایجاد کرده است. بنابراین، علی‌رغم آنکه WDNV حدود سه برابر بیشتر از SCNV هوا را جابه‌جا کرده است، سامانه SCNV توانسته دمای ناحیه رشد گیاه را حدود 2°C کمتر نگه دارد. تحقیقات مشابه کاهش دمایی حدود 2°C (Salehi et al., 2019)؛ 6°C (Chung et al., 2015)؛ و 7°C (Khanal & Lei, 2011) را گزارش کرده‌اند. این رفتار با نتایج کیفی ارائه‌شده در بخش تحلیل کیفی، سازگاری کامل دارد و ناشی از شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی کنترل‌شده در فضای گلخانه است (شکل ۵). در نتیجه، شرایط حرارتی مطلوب‌تری در اطراف گیاهان فراهم می‌شود؛ ناحیه‌ای که بیشترین اهمیت را از نظر تبادل حرارت، تعرق و فتوسنتز دارد. همین روند در شاخص TRE نیز مشاهده می‌شود. میانگین TRE در سامانه SCNV برابر با $0/54$ بوده، در حالی که این مقدار برای WDNV تنها $0/14$ به دست آمده است. این اختلاف نشان می‌دهد که سامانه SCNV در کاهش دمای ناحیه رشد گیاه نسبت به شرایط بدون تهویه موفق‌تر عمل کرده است. شاخص یکنواختی دما نیز این موضوع را تأیید می‌کند. مقدار میانگین TUI از $0/52$ در حالت کنترل

به ۰/۷۵ در سامانه WDNV و ۰/۹۱ در سامانه SCNV افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه نشان می‌دهد که استفاده از دودکش خورشیدی نه تنها موجب کاهش دما در تراز سایه‌بان گیاهی شده، بلکه توزیع حرارتی را نیز در سراسر ناحیه کشت یکنواخت‌تر کرده است. یکنواختی بیشتر دما می‌تواند از ایجاد نقاط گرم موضعی، ناهمگنی رشد گیاه و اختلاف عملکرد محصول در بخش‌های مختلف گلخانه جلوگیری کند (Fatnassi et al., 2013; Kittas et al., 1997). بررسی دمای متوسط هوای داخل گلخانه (T_{in}) نیز یافته جالب توجه دیگری را آشکار می‌کند. کمترین دمای متوسط هوا مربوط به سامانه WDNV با مقدار $38/05^{\circ}\text{C}$ است، در حالی که میانگین دمای داخل در سامانه SCNV برابر با $39/17^{\circ}\text{C}$ بوده است. در نگاه نخست ممکن است این نتیجه با برتری SCNV در شاخص‌های T_c ، TRE و TUI متناقض به نظر برسد؛ اما در واقع بیانگر تفاوت میان شرایط حرارتی کل حجم گلخانه و شرایط واقعی ناحیه رشد گیاه است. همان‌گونه که نتایج کیفی نشان دادند، در سامانه SCNV بخشی از هوای گرم در لایه‌های فوقانی متمرکز شده و از ناحیه کشت فاصله می‌گیرد. بنابراین، دمای متوسط کل حجم گلخانه لزوماً شاخص مناسبی برای ارزیابی کیفیت ریزاقلیم گیاه نیست و شاخص‌هایی نظیر T_c و TRE تصویر دقیق‌تری از شرایط واقعی رشد ارائه می‌کنند. استفاده از پرده‌های حرارتی، صفحات صرفه‌جویی انرژی^۲ و سقف‌های موقت کوتاه‌امی^۳ می‌تواند با ایجاد یک ناحیه حائل حرارتی^۴ در بخش فوقانی گلخانه، اختلاط عمودی میان هوای گرم تجمع‌یافته زیر سقف و هوای خنک‌تر ناحیه کشت را محدود کند. این امر موجب کاهش انتقال حرارت جابجایی و تابشی به تراز سایه‌بان گیاهی، حفظ دمای پایین‌تر در ناحیه رشد گیاه و افزایش کارایی سامانه تهویه می‌شود. در نتیجه، به‌کارگیری سقف‌های ثانویه یا پرده‌های حرارتی در ارتفاعی پایین‌تر از سقف اصلی گلخانه می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مکمل مؤثر در کنار سامانه‌های تهویه مبتنی بر دودکش خورشیدی برای بهبود کنترل ریزاقلیم و کاهش تنش حرارتی گیاه مورد استفاده قرار گیرد.

مقایسه عملکرد سامانه‌ها در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که تغییرات شاخص‌های عملکردی به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر شرایط تابشی و حرارتی محیط قرار دارد. در سامانه SCNV، مقادیر ACH از $1/48\text{ h}^{-1}$ در مهرماه به $1/84\text{ h}^{-1}$ در اسفند و $1/93\text{ h}^{-1}$ در فروردین افزایش یافت. روند مشابهی نیز برای SHRR مشاهده شد، به‌طوری‌که این شاخص از $2/85\text{ kW}$ در مهر به $3/52\text{ kW}$ و $3/62$ به‌ترتیب در اسفند و فروردین رسید. بیشترین شدت تابش خورشیدی در فروردین ماه ($832/35\text{ W m}^{-2}$) ثبت شد، و بیشترین مقادیر ACH و SHRR نیز در فروردین مشاهده گردید. در مقابل، تغییرات ماهانه ACH در سامانه WDNV محدودتر بود و در بازه $5/02\text{ h}^{-1}$ تا $5/77$ قرار داشت. از آنجا که سرعت باد در سه ماه مورد بررسی تفاوت چندانی نداشت ($3/19$ تا $3/58\text{ m s}^{-1}$) انتظار می‌رود ظرفیت تهویه این سامانه نیز تغییرات محدودی نشان دهد. افزون بر این، روند تغییرات T_c و TRE در سامانه SCNV بیانگر آن است که بهترین شرایط ریزاقلیمی در اسفندماه حاصل شده است؛ به‌طوری‌که کمترین دمای سایه‌بان گیاهی ($32/1^{\circ}\text{C}$)، بیشترین مقدار TUI ($0/96$)، و بالاترین مقدار TRE ($0/54$) در این ماه مشاهده شد. عملکرد انرژی سامانه SCNV از طریق بازده حرارتی لحظه‌ای کالکتور در ظهر خورشیدی (η_{col}) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین η_{col} برابر با $6/63$ درصد بوده و در بازه $5/8$ تا $7/43$ درصد تغییر کرده است. نکته قابل توجه آن است که بیشترین شدت تابش خورشیدی در فروردین ماه ($832/35\text{ W m}^{-2}$) مشاهده شد، در حالی که بیشترین مقدار بازده کالکتور ($7/43$) در اسفندماه بوقوع پیوسته است. این رفتار نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی دودکش خورشیدی صرفاً تابع شدت تابش دریافتی نیست و عواملی نظیر دمای محیط، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی، نرخ جریان جرمی عبوری از کانال، و تلفات حرارتی جابجایی و تابشی نیز در تعیین بازده نهایی نقش مهمی ایفا می‌کنند. نتایج نشان داد که انرژی خورشیدی جذب‌شده توانسته است نیروی محرکه کافی برای ایجاد جریان شناوری پایدار، تخلیه هوای گرم تجمع‌یافته در لایه‌های فوقانی و بهبود محسوس کیفیت ریزاقلیم ناحیه رشد گیاه را فراهم کند. با وجود آن که عملکرد حرارتی دودکش خورشیدی در پژوهش حاضر رضایت‌بخش ارزیابی شد، نتایج نشان می‌دهد که هنوز ظرفیت قابل توجهی برای بهینه‌سازی طراحی این سامانه وجود دارد. به‌ویژه، کاهش مقاومت آیرودینامیکی و افت فشار در مسیر جریان می‌تواند به افزایش نرخ تهویه و بهبود عملکرد حرارتی سامانه منجر شود. در این راستا، بازنگری در هندسه اجزای انتقال هوا، از جمله افزایش عرض ورودی دودکش خورشیدی، بهینه‌سازی سطح مقطع کانال هوا و کاهش تلفات موضعی در محل ورود و خروج جریان، می‌تواند نیروی محرکه ناشی از شناوری حرارتی را با کارایی بیشتری به جریان تهویه تبدیل کند. مطالعات بهینه‌سازی نیز نشان داده‌اند که ابعاد کانال هوا، به‌ویژه عرض آن، یکی از مؤثرترین پارامترهای طراحی در تعیین نرخ جریان جرمی، شدت شناوری و عملکرد حرارتی دودکش خورشیدی

محسوب می‌شود (Hosien & Selim, 2017; Lee & Strand, 2009). بنابراین، انتظار می‌رود با بهینه‌سازی هندسی سامانه، بدون نیاز به مصرف انرژی اضافی، ظرفیت تهویه و راندمان عملکردی دودکش خورشیدی به‌طور محسوسی افزایش یابد.

با وجود بازده حرارتی نسبتاً محدود کلکتور خورشیدی، نتایج نشان داد که این سامانه نقش مؤثری در سازمان‌دهی میدان جریان، بهبود یکنواختی حرارتی و ارتقای کیفیت ریزاقلیم گلخانه ناحیه کشت ایفا می‌کند. به‌ویژه، عملکرد مناسب سامانه در کاهش دمای ناحیه رشد گیاه نشان می‌دهد که اثربخشی دودکش خورشیدی صرفاً به میزان انرژی حرارتی بازیابی‌شده محدود نبوده و نحوه هدایت و تخلیه هوای گرم نیز در عملکرد نهایی آن نقش تعیین‌کننده دارد. مطالعات پیشین انجام‌شده بر روی همین گلخانه نشان داده‌اند که ترکیب سامانه SCNV با پد سلولزی مرطوب در قالب یک سامانه سرمایش تبخیری، طی ماه‌های گرم سال عملکرد حرارتی سامانه را به‌طور چشمگیری ارتقا داده و امکان دستیابی به کاهش دمایی در محدوده 17°C تا 13°C و نرخ تعویض هوای حدود 2 h^{-1} را فراهم کرده است (سجادی و صابریان، ۱۴۰۳). نتایج همان مطالعه همچنین نشان داد که اگرچه سامانه دودکش خورشیدی به‌تنهایی نسبت به سامانه فن-پد دمای داخلی بالاتر و شاخص یکنواختی دمای پایین‌تری ایجاد می‌کند، اما دمای تراز سایه‌بان گیاهی در هر دو سامانه همچنان در محدوده قابل قبول برای رشد گیاه باقی می‌ماند. نکته قابل توجه آن است که مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج حاصل از سامانه ترکیبی دودکش خورشیدی-سرمایش تبخیری، تفاوت اندکی را در شاخص TRE نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین این شاخص در پژوهش حاضر برابر $0/54$ و در سامانه ترکیبی برابر $0/56$ گزارش شده است (سجادی و صابریان، ۱۴۰۳). این اختلاف ناچیز، علی‌رغم تفاوت چشمگیر در ظرفیت سرمایش دو سامانه، نشان می‌دهد که دستیابی به شرایط حرارتی مطلوب در ناحیه رشد گیاه تنها تابع شدت سرمایش یا نرخ تهویه نیست. بلکه نحوه توزیع جریان هوا، کنترل ساختار حرارتی گلخانه و تخلیه مؤثر گرمای تجمع‌یافته از نواحی فوقانی نیز نقش اساسی در بهبود ریزاقلیم ناحیه کشت ایفا می‌کنند. از این‌رو، به نظر می‌رسد مدیریت هوشمندانه میدان جریان و بهره‌گیری از سازوکارهای شناسایی حرارتی می‌تواند در برخی شرایط، اثربخشی ریزاقلیمی قابل مقایسه‌ای با سامانه‌های سرمایش فعال‌تر فراهم آورد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش به ارزیابی تطبیقی عملکرد دو راهبرد تهویه طبیعی شامل تهویه مبتنی بر باد غالب (WDNV) و تهویه طبیعی تقویت‌شده با دودکش خورشیدی دیواری (SCNV) در یک گلخانه واقع در اقلیم گرم و خشک اهواز طی ماه‌های معتدل سال پرداخت. برخلاف مطالعات پیشین انجام‌شده بر روی همین گلخانه که عمدتاً نقش دودکش خورشیدی را در ترکیب با سامانه‌های فعال سرمایش و گرمایش بررسی کرده بودند، در این مطالعه قابلیت این سامانه به‌عنوان یک راهکار مستقل تهویه طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌های CFD نشان داد که اگرچه سامانه WDNV با میانگین نرخ تعویض هوا برابر $5/36\text{ h}^{-1}$ ظرفیت تهویه بیشتری نسبت به سامانه SCNV ($1/75\text{ h}^{-1}$) فراهم می‌کند، اما عملکرد برتر آن در شاخص ACH الزاماً به معنای ایجاد شرایط ریزاقلیمی مطلوب‌تر نیست. تحلیل خطوط جریان، بردارهای سرعت و توزیع دما نشان داد که دودکش خورشیدی با ایجاد یک مسیر جریان پایدار و جهت‌دار، شدت بازچرخش هوا و نواحی رکود را کاهش داده و ساختار آیرودینامیکی منظم‌تری در فضای گلخانه ایجاد می‌کند. این ویژگی موجب شکل‌گیری یک لایه‌بندی حرارتی کنترل‌شده شد که در آن هوای خنک‌تر در ناحیه رشد گیاه حفظ و هوای گرم تجمع‌یافته در نزدیکی سقف به‌طور مؤثر تخلیه گردید. بررسی شاخص‌های کمی نیز برتری سامانه SCNV را از منظر کیفیت ریزاقلیم ناحیه کشت تأیید کرد. میانگین شاخص یکنواختی دما در این سامانه به $0/91$ رسید که به‌طور محسوسی بالاتر از مقدار $0/75$ در سامانه WDNV بود. همچنین اثربخشی کاهش دمای ناحیه رشد گیاه (TRE) در سامانه SCNV حدود $0/54$ محاسبه شد که تقریباً چهار برابر مقدار متناظر در سامانه بادمحور ($0/14$) است. افزون بر این، میانگین دمای سایه‌بان گیاهی در سامانه SCNV به $36/96^{\circ}\text{C}$ کاهش یافت، در حالی که این مقدار در سامانه WDNV برابر $38/93^{\circ}\text{C}$ بود. از دیدگاه انرژی نیز دودکش خورشیدی با بازده حرارتی متوسط $6/63$ درصد توانست نیروی شناسایی لازم برای تداوم فرآیند تهویه را بدون نیاز به مصرف انرژی خارجی فراهم کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی عملکرد سامانه‌های تهویه طبیعی نباید صرفاً بر اساس نرخ تعویض هوا انجام شود، بلکه شاخص‌های مرتبط با کیفیت ریزاقلیم، توزیع جریان هوا، شرایط حرارتی ناحیه رشد گیاه و نحوه حذف گرمای تجمع‌یافته نیز باید به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس، سامانه SCNV با وجود نرخ تهویه کمتر، به دلیل بهبود محسوس شرایط حرارتی در تراز سایه‌بان گیاهی و ایجاد محیط رشد یکنواخت‌تر، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و کم‌مصرف برای گلخانه‌های واقع در اقلیم‌های گرم و خشک مطرح شود.

برای مطالعات آینده، بررسی اثر پارامترهای هندسی دودکش خورشیدی شامل ارتفاع، عرض، عمق کانال و زاویه استقرار بر عملکرد

تهویه و شاخص‌های ریزاقليم ناحیه کشت توصیه می‌شود. همچنین ارزیابی عملکرد سامانه تحت شرایط مختلف سرعت و جهت باد می‌تواند شناخت جامع‌تری از پایداری عملکرد آن فراهم سازد. از آنجا که نتایج این پژوهش نشان‌دهنده شکل‌گیری یک لایه‌بندی حرارتی کنترل‌شده در فضای گلخانه بود، استفاده هم‌زمان از پرده‌های حرارتی یا صفحات جداکننده افقی برای جداسازی ناحیه کشت از لایه هوای گرم فوقانی نیز پیشنهاد می‌شود. افزون بر این، توسعه مدل با در نظر گرفتن انتقال رطوبت، غلظت دی‌اکسیدکربن، پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه و تحلیل اقتصادی سامانه می‌تواند مسیر کاربرد عملی این فناوری در گلخانه‌های تجاری مناطق گرم و خشک را هموار سازد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در فرایند آماده‌سازی این مقاله، نویسندگان از ChatGPT به منظور ویرایش زبان انگلیسی، بهبود نگارش علمی و بهینه‌سازی ترجمه متون استفاده کرده‌اند. پس از استفاده از این ابزار، تمامی بخش‌های مقاله توسط نویسندگان به دقت بازبینی، اصلاح و تأیید شده است و مسئولیت کامل محتوای نهایی مقاله بر عهده نویسندگان می‌باشد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان نتایج این پژوهش بنا به درخواست از نویسنده مسئول در دسترس خواهند بود.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل حمایت مالی و تخصیص گرنت پژوهشی که امکان انجام این مطالعه را فراهم کرد، صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین از حمایت‌های علمی، پژوهشی و اداری دانشگاه در طول اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان در تمامی مراحل انجام و انتشار این پژوهش، اصول صداقت علمی و اخلاق پژوهش را رعایت کرده و از هرگونه جعل داده، دستکاری نتایج، سرقت علمی و سایر مصادیق سوءرفتار پژوهشی اجتناب نموده‌اند. این پژوهش شامل مشارکت انسان، حیوانات، داده‌های بالینی یا هرگونه فعالیتی که مستلزم دریافت تأییدیه کمیته اخلاق باشد، نبوده است. بنابراین، بر اساس دستورالعمل‌های ملی و بین‌المللی اخلاق پژوهش، اخذ تأییدیه کمیته اخلاق و کد اخلاق برای این پژوهش ضروری نبوده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

سجادیه، سیدمجید و 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، دوره ۵۵ (۳)، ۸۷-۱۰۸.

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., 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.
- Aliaga, D. M., Feick, R., Brooks, W. K., Mery, M., Gers, R., Levi, J. F., & Romero, C. P. (2021). Modified solar chimney configuration with a heat exchanger: Experiment and CFD simulation. *Therm. Sci. Eng. Prog*, 22, 100850.
- 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>
- ASAE. (2003). EP406.4: Heating, Ventilating, and Cooling Greenhouses. ASAE, St. Joseph, MI, p. 10.
- A.S.H.R.A.E. (2006). Thermal comfort. In *Handbook fundamentals*. ASHRAE.
- Bailey, B. J. (2000). Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium* 534, 21–30. https://www.actahort.org/books/534/534_1.htm
- Barghi Jahromi, M. S., Kalantar, V., Samimi Akhijahani, H., Kargarsharifabad, H., & Shoeibi, S. (2023). Performance analysis of a new solar air ventilator with phase change material: Numerical simulation, techno-economic and environmental analysis. *Journal of Energy Storage*, 62, 106961. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106961>
- Boulard, T., Haxaire, R., Lamrani, M. A., Roy, J. C., & Jaffrin, A. (1999). Characterization and Modelling of the Air Fluxes induced by Natural Ventilation in a Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(2), 135–144. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0442>
- Boulard, T., & Wang, S. (2000). Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 25–34.
- Bournet, P. E., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric*, 74, 195–217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- 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.
- Campen, J. B. (2004). Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions. *International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys2004* 691, 419–424. https://www.actahort.org/books/691/691_50.htm
- Campen, J. B., & Bot, G. P. A. (2003). Determination of Greenhouse-specific Aspects of Ventilation using Three-dimensional Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 84(1), 69–77. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00221-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00221-0)
- Charqui, Z., Moutaouakil, L. E., Boukendil, M., Hidki, R., Zrikem, Z., & Abdelbaki, A. (2023). Numerical simulation of turbulent coupled heat transfer in a Trombe wall subjected to periodic thermal excitations. *Energy Build*, 278, 112631. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112631>
- 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, L. P., Ahmad, M. H., Ossen, D. R., & Hamid, M. (2015). Effective solar chimney cross section ventilation performance in Malaysia terraced house. *Procedia - Soc Behav Sci*, 179, 276–289.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Q1tjDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Duffie,+J.+A.,+%26+Beckman,+W.+A.+\(2013\).+Solar+engineering+of+thermal+processes+\(4th+ed.\).+Hoboken,+NJ:+John+Wiley+%26+Sons.&ots=ZlgLesgGPE&sig=dXGKktcFCTR4zmqWijJuae06DXU](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Q1tjDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Duffie,+J.+A.,+%26+Beckman,+W.+A.+(2013).+Solar+engineering+of+thermal+processes+(4th+ed.).+Hoboken,+NJ:+John+Wiley+%26+Sons.&ots=ZlgLesgGPE&sig=dXGKktcFCTR4zmqWijJuae06DXU)
- Fatnassi, H., Boulard, T., & Bouirden, L. (2013). Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse equipped with insect-proof nets. *Comput. Electron. Agric*, 98, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.008>
- 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.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer* (Vol. 6). Wiley New York. <https://pdfyl.ertongbook.com/46/32527305.pdf>
- 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.
- Kacira, M., Sase, S., & L. (2004). Okushima, optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation. *Trans. ASAE*, 47. <https://doi.org/10.13031/2013.17803>.
- Kalantar, V., & Khayyaminejad, A. (2022). Numerical simulation of a combination of a new solar ventilator and geothermal heat exchanger for natural ventilation and space cooling. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(2), 785–804. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00463-4>
- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Elsevier. [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=8C2gEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kalogirou,+S.+A.+\(2020\).+Solar+energy+engineering:+Processes+and+systems+\(3rd+ed.\).+Academic+Press&ots=2COC7WRycP&sig=1ME4lz1qF_nEbbcY-b_eefAjlAU](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=8C2gEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kalogirou,+S.+A.+(2020).+Solar+energy+engineering:+Processes+and+systems+(3rd+ed.).+Academic+Press&ots=2COC7WRycP&sig=1ME4lz1qF_nEbbcY-b_eefAjlAU)
- Kasaeian, A. B., Molana, Sh., Rahmani, K., & Wen, D. (2017). A review on solar chimney systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 954–987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.081>
- 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.
- 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. (2021). 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. *Biosyst. Eng*, 207, 12–32.
- Kittas, C., Boulard, T., & Papadakis, G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40(2), 415–425.
- 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.
- Lamrani, M. A., Boulard, T., Roy, J. C., & Jaffrin, A. (2001). SE—Structures and Environment: AirFlows and Temperature Patterns induced in a Confined Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1), 75–88.
- Lee, K. H., & Strand, R. K. (2009). Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy Build*, 41, 615–621.
- Liu, F., Qian, H., Ma, J., & He, P. (2023). A simple model for predicting dispersion characteristics of high-temperature airflow and particle distribution during smelting process in a thermally stratified foundry shop. *Energy Build*, 278, 112614. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112614>.
- Long, T., Zheng, D., Li, W., Li, Y., Lu, J., Xie, L., & Huang, S. (2021). Numerical investigation of the working mechanisms of solar chimney coupled with earth-to-air heat exchanger (SCEAHE). *Sol. Energy*, 230, 109–121.
- 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.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., & Bouriden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study, *Agric. For. Meteorol*, 149, 1050–1062.
- Mandal, D. K., Biswas, N., Manna, N. K., Gayen, D. K., & Benim, A. C. (2024). An application of artificial neural network (ANN) for comparative performance assessment of solar chimney (SC) plant for green energy production. *Scientific Reports*, 14(1), 979. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46505-1>
- Mathur, J., Mathur, S., & Anupma. (2006). Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy Build*, 38, 1156–1163.
- McFarlane, R. E. (2021). ASHRAE STANDARDS AND PRACTICES FOR DATA CENTERS. In H. Geng (Ed.), *Data Center Handbook* (1st ed., pp. 175–191). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119597537.ch11>
- Mohammadi, B., & Pironneau, O. (1994). *Analysis 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 Hort*, 691, 403.
- Moosavi, L., Zandi, M., Bidi, M., Behroozizade, E., & Kazemi, I. (2020). New design for solar chimney with

- integrated windcatcher for space cooling and ventilation. *Build Environ*, 181(106785).
- Murena, F., Gaggiano, I., & Mele, B. (2022). Fluid dynamic performances of a solar chimney plant: Analysis of experimental data and CFD modelling. *Energy*, 249, 123702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123702>.
- 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).
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review, *Bioresour. Technol*, 98, 2386–2414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>.
- 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.
- 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>
- Sajjadi, M., Shirvani, M., Yousefi, M. R., Afsari, H., Rezaei, L., & Ghanadi, M. (2021). Day and Night Times Performance Improvement of the Solar Chimney by Combining with the CSP System. *Applied Solar Energy*, 57(4), 310–322. <https://doi.org/10.3103/S0003701X21040095>
- Salehi, A., Fayaz, R., Bozorgi, M., Asadi, S., Costanzo, V., & Imani, N. (2019). Investigation of thermal comfort efficacy of solar chimneys under different climates and operation time periods. *Energy Build*, 205(109528).
- Sase, S. (2006). Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *International Symposium on Greenhouse Cooling* 719, 313–324. https://www.actahort.org/books/719/719_35.htm
- Sharon, H. (2023). A detailed review on sole and hybrid solar chimney based sustainable ventilation, power generation, and potable water production systems. *Energy Nexus*, 10, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100184>
- Simou, Z., Hamdaoui, S., Sebbar, E. H., Oubenmoh, S., Laaroussi, N., & Msaad, A. A. (2026). Computational analysis of passive radiative cooling for building thermal comfort in hot climates. *Energy and Buildings*, 354, 116945. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.116945>
- Singh, A. P., Kumar, A., & Singh, O. P. (2020). Performance enhancement strategies of a hybrid solar chimney power plant integrated with photovoltaic panel, *Energy Convers. Manag*, 218, 113020.
- Singh, M. C., Sharma, K. K., & Prasad, V. (2022). Impact of ventilation rate and its associated characteristics on greenhouse microclimate and energy use. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3), 288. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09587-1>
- 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.
- Suhendri, S., Hu, M., Su, Y., Darkwa, J., & Riffat, S. (2022). Performance evaluation of combined solar chimney and radiative cooling ventilation, *Build. Environ*, 209, 108686. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108686>.
- Teitel, M., Ziskind, G., Liran, O., Dubovsky, V., & Letan, R. (2008). Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosyst. Eng*, 101, 351–369. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.004>.
- Tigampo, S., Kooli, S., Salah, N. B., Foudhil, W., Errais, R., Sambou, V., & Jabrallah, S. B. (2023). CFD modelling of the microclimate of a cultivated greenhouse: A validation study between experimental and numerical results. *Journal of Thermal Engineering*, 9(5), 1115. <https://doi.org/10.18186/thermal.1370719>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761.
- 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. *Biosyst. Eng*, 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.
- Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, C., Gratraud, J., Russo, G., & Suay-Cortes, R. (2000). Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries: Part I, design requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(1), 1–16.
- Von Zabeltitz, C. (2011). Greenhouse Structures. In C. Von Zabeltitz, *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates* (pp. 59–135). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5
- 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.
- Weather and Climate. (2024). *Ahvaz weather and climate*. https://weatherandclimate.com/iran/khuzestan/ahvaz#google_vignette
- Sajadiye, S. M., & Saberian, A. (2025). 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 Biosystems Engineering*, 55(3), 87–108. (In Persian).