

## Investigating the Effect of Greenhouse Height on Performance Evaluation and the Optimal Temperature Distribution Inside the Greenhouse Using Computational Fluid Dynamics

Mohammad Sadegh Sharifian,<sup>1</sup> Hamidreza Shahbazian,<sup>2\*</sup> Alireza Rahimi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Energy, Water and Environment Research Institute, University of Kashan, Iran, sharifiannsadegh@gmail.com

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Iran, Hr.Shahbazian@kashanu.ac.ir

<sup>3</sup> Energy, Water and Environment Research Institute, University of Kashan, Iran, rahimi2@kashanu.ac.ir

---

### Keywords:

Computational Fluid Dynamics (CFD),  
greenhouse,  
temperature uniformity,  
temperature distribution,  
greenhouse height,  
energy efficiency,  
numerical simulation.

---

### Original Research Article

#### Paper History:

Received: 29/07/2025

Revise: 25/08/2025

Accepted: 28/09/2025

**Abstract:** Maintaining uniform temperature in the greenhouse environment is a key factor in plant growth and in rising production efficiency. Temperature non-uniformity can lead to thermal stress, reduced product quality, and increased energy consumption. In this study, the effect of various climatic and geometric parameters on temperature uniformity in a greenhouse was investigated using computational fluid dynamics numerical simulation. To create an accurate microclimate model, processes such as airflow, solar radiation, radiation model, plant transpiration, and porous media characteristics were considered in the design. The proposed model was validated based on experimental data. The average difference between numerical and experimental results was reported to be only 8.4%, indicating the high reliability of the simulation. Next, the effect of three different heights of 4.2, 6.5, and 8.5 meters was studied. The average temperature in the three greenhouses were 37.60, 38.79, and 39.15 degrees Celsius respectively. One of the most important indicators in this case was the temperature change coefficient index. The results in the 6.5-meter greenhouse showed the lowest temperature change coefficient index, which is 2.96. This geometric change significantly improved the temperature distribution of the interior space, reduced temperature gradients in critical areas, and better maintained optimal conditions for plant growth. Findings indicated that this simple solution had the potential to increase plant yield by up to 30% and significantly reduce energy consumption.

---

**How to cite this article:** Sharifian, M. S., Shahbazian, H. R., Rahimi, A., "Investigating the effect of greenhouse height on performance evaluation and the optimal temperature distribution inside the greenhouse using computational fluid dynamics", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 1, PP. 34-49, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.257306.1133>  
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



### Extended Abstract

Ensuring a uniform temperature throughout the greenhouse is a significant factor for crop health, yield, and energy efficiency. Vertical and horizontal temperature gradients produce plant stress, lower product quality, and increase heating/cooling energy demand. This study quantified how greenhouse roof height influenced microclimate uniformity, ventilation performance, and potential crop-yield gains, using a validated computational fluid dynamics (CFD) model that included radiation, plant transpiration, and porous-crop effects.

### Materials and Methods

A three-dimensional CFD model of a fan-and-pad evaporative-cooled greenhouse was simulated in ANSYS Workbench/FLUENT, and it was validated against experimental data from investigation of Sapounas et al. The computational domain represented a greenhouse with dimensions of  $L = 15$  m,  $W = 8$  m and three various heights of 4.2 m, 6.5 m, and 8.5 m. In the numerical solution, the steady flow Navier-Stokes equations and the  $k$ - $\epsilon$  turbulence model were solved. The Discrete Ordinates method was used to model radiation. Plant transpiration was applied based on the FAO-56 equation in the porous space of the plant with a porosity of 20%

### Results

The results demonstrated that the average air temperatures inside the greenhouse at the heights of 4.2, 6.5, and 8.5 meters were 37.60, 38.79, and 39.15 °C respectively. With increasing greenhouse height, the warm layer near the roof became thinner and the temperature of the areas under the greenhouse roof were more homogeneous. The coefficient of variation (CV) index at a height of 6.5 meters was 2.96%, while it was 3.13% for the other two cases. The pressure distribution inside the greenhouse was more uniform for higher altitudes, and simulations displayed that under optimal conditions, greenhouse production can be increased by up to 30%, and significant energy savings can be achieved.

### Discussion and Conclusion

Increasing the height of the greenhouse is an effective geometric solution to reduce temperature gradient and improve the uniformity of the temperature. In general, a height of 6.5m provides the best average temperature uniformity. Rising the height of the greenhouse increases the average temperature inside the greenhouse. At a constant fan flow rate, if the height of the greenhouse becomes shorter, thermal stresses and local temperature fluctuations will be increased. It is, thus, recommended that the height of the greenhouse be optimized along with the greenhouse ventilation capacity and roof openings to suit the coverage.

## بررسی تأثیر ارتفاع گلخانه در ارزیابی عملکردی و بهینه‌ترین توزیع دمایی داخل گلخانه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

محمدصادق شریفیان<sup>۱</sup>، حمیدرضا شهبازیان<sup>۲\*</sup>، علیرضا رحیمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشکده انرژی، آب و محیط‌زیست، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران،

Sharifiannsadeh@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، Hr.shahbazian@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار پژوهشکده انرژی، آب و محیط‌زیست، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، rahimi2@kashanu.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

دینامیک سیالات محاسباتی،

گلخانه،

یکنواختی دما،

توزیع دمای،

ارتفاع گلخانه،

صرفه‌جویی انرژی،

شبیه‌سازی عددی.

چکیده: حفظ یکنواختی دما در محیط گلخانه‌ای به عنوان عامل کلیدی در رشد گیاهان و افزایش بهره‌وری تولید شناخته شده است. عدم یکنواختی دمای می‌تواند منجر به ایجاد تنش حرارتی، کاهش کیفیت محصول و افزایش مصرف انرژی شود. در این مطالعه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر پارامترهای مختلف اقلیمی و هندسی بر یکنواختی دما در گلخانه بررسی گردید. برای ایجاد مدل دقیق میکرواقلیم، فرایندهایی نظیر جریان هوا، تابش خورشیدی، مدل تشعشعی، تعریق گیاه و ویژگی‌های محیط متخلخل در طراحی در نظر گرفته شدند. مدل پیشنهادی براساس داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد و اختلاف میانگین نتایج عددی و آزمایشگاهی فقط ۸.۴٪ گزارش گردید که نشانگر قابلیت اعتماد بالای شبیه‌سازی است. در ادامه، تأثیر سه ارتفاع متفاوت ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر مورد مطالعه قرار گرفته است. دمای میانگین در سه گلخانه به ترتیب ۳۷/۶۰، ۳۸/۷۹ و ۳۹/۱۵ درجه سلسیوس خواهد بود. یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در این مورد شاخص ضریب تغییرات دمای است که نتایج در گلخانه ۶/۵ متر نشان‌دهنده کمترین شاخص ضریب تغییرات دمای بوده که مقدار آن ۲/۹۶ است. این تغییر هندسی باعث بهبود محسوس در توزیع دمای فضای داخلی، کاهش گرادیان دما در نواحی بحرانی و حفظ بهتر شرایط مطلوب برای رشد گیاهان شد. یافته‌ها حاکی از آن است که این راهکار ساده توانایی افزایش عملکرد گیاه تا ۳۰٪ و کاهش قابل توجه در مصرف انرژی را در پی دارد.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

## ۱. مقدمه

در گذشته، گلخانه‌ها به‌عنوان ساختارهای ساده برای کشت محصولات کشاورزی شناخته می‌شده‌اند، اما امروزه به‌عنوان سیستم‌هایی پویا و پیچیده مورد توجه محققان و سیاست‌گزاران این زمینه مطرح شده است. تجزیه و تحلیل جریان هوای داخل گلخانه، نحوه ورود و خروج انرژی، اثر گردان‌های دما بر رشد گیاهان و تأثیر سیستم‌های تهویه متفاوت بر مصرف انرژی ازجمله زمینه‌های بسیار مهم برای افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی است. این تحلیل‌ها برای طراحی گلخانه‌هایی کارآمد و سازگار با محیط‌زیست بسیار ضروری است. اهمیت حفظ یکنواختی دما در گلخانه‌ها به‌عنوان عاملی کلیدی برای بهینه‌سازی رشد گیاهان تأیید شده است. یکنواختی دما، به‌معنای حفظ دمای ثابت و مناسب در سراسر فضای گلخانه، عامل تأثیرگذاری بر رشد و توسعه گیاهان در نظر گرفته شده است. طبق گزارش‌های علمی، تغییرات ناگهانی دما می‌تواند به استرس گیاهان، کاهش کیفیت محصولات و حتی مرگ گیاهان منجر شود [۱]. تحقیقات متعددی در زمینه اهمیت یکنواختی دمای داخل گلخانه‌ها انجام شده است. افزایش فتوسنتز، جذب بهتر مواد مغذی و کاهش بروز بیماری‌های گیاهی در شرایط دمایی پایدار نتیجه یکنواختی دمای داخل گلخانه‌ها گزارش شده است. برای مثال، مطالعه‌ای که توسط دانشگاه کالیفرنیا انجام شده است نشان می‌دهد که حفظ دمای یکنواخت در محدوده ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس، می‌تواند تولید محصول را تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۲]. براساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ میلادی به ۱۰ میلیارد نفر می‌رسد و تقاضای محصولات کشاورزی نیز به میزان ۵۰ درصد نسبت به سال ۲۰۱۳ افزایش خواهد یافت [۳]؛ لذا این مسئله فشار قابل توجهی بر منابع طبیعی موجود تحمیل خواهد کرد. در ایران، با توجه به کمبود ذخایر آبی، کاهش مصرف ۱۰ میلیارد متر مکعب آب ظرف مدت ۱۰ سال توسط وزارت جهاد کشاورزی برنامه‌ریزی شده است [۴]. انتقال مزارع سبزیجات به گلخانه‌ها به‌عنوان بخشی از این راهکار در نظر گرفته شده است [۵]. گزارش شده است که سیستم کشاورزی فشرده به‌عنوان راه‌حلی برای پاسخ به افزایش تقاضای جهانی غذا مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. گلخانه‌ها و ساختمان‌های دامداری به‌عنوان ابزارهایی برای تولید پایدار مواد غذایی پیشنهاد شده‌اند [۷]. این سیستم‌ها توانایی کاهش مصرف کودها، آفت‌کش‌ها و منابع آبی را دارند و هم‌زمان تولید را در طول سال تضمین می‌کنند [۸]. با توجه به افزایش جمعیت و تقاضای غذا، گلخانه‌ها به‌عنوان جایگزین مؤثری بوده و علاوه بر این، روشی برای

کاهش استفاده از کودها، آفت‌کش‌ها و کاهش مصرف آب است. باین‌حال، مدیریت شرایط اقلیمی مورد نیاز گیاهان در گلخانه‌ها مستلزم مصرف بالای انرژی، آب، CO<sub>2</sub> و کودها دانسته شده است. برای پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌عنوان روشی نوین و امیدوارکننده برای پیدا کردن بهترین راهکار می‌تواند پیشنهاد گردد [۹].

## ۲.۱. عوامل مؤثر در گردان‌های دما

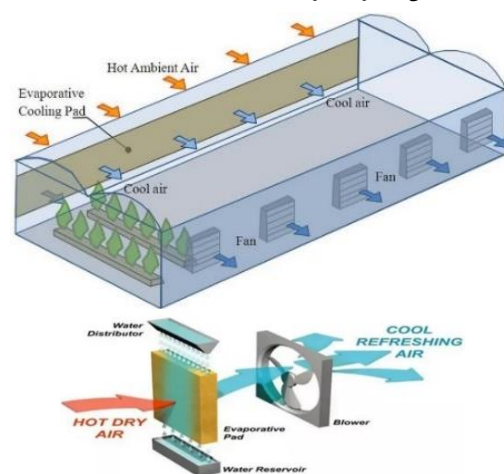
عوامل متعددی در گردان‌های دمای داخل گلخانه‌ها وجود دارد که می‌تواند به نوسانات دما و عدم یکنواختی آن منجر گردد. تهویه ناکافی، سیستم‌های خنک‌کننده ناکارآمد، عایق‌بندی نامناسب و... می‌تواند باعث تجمع هوای گرم در گوشه‌های گلخانه شده و تغییرات شدید دمایی را منجر شود. کنترل دستی دما به‌جای سیستم‌های خودکار نیز می‌تواند نوسانات شدید دمایی را ایجاد کند. پوشش‌های نامناسب مانند پلاستیک‌های غیراستاندارد یا شیشه‌های معمولی نیز می‌تواند باعث افزایش تبخیر و تعریق شوند. رطوبت نسبی هوای ورودی، میزان تابش نور خورشید و سرعت جریان ورودی هوا نیز نقش مهمی در این زمینه دارند. رطوبت نسبی بالا می‌تواند دما را کاهش داده درحالی‌که رطوبت نسبی پایین می‌تواند منجر به افزایش دما شود. تابش مستقیم نور خورشید باعث افزایش دما می‌شود و استفاده از سایه‌بان‌ها می‌تواند به کاهش این اثر کمک کند. سرعت جریان ورودی هوا نیز باید مناسب باشد تا تهویه بهتر و یکنواختی دما حفظ شود. این عوامل باید به‌دقت کنترل شوند تا شرایط بهینه برای رشد گیاهان فراهم شود. شکل (۱) نمایی از سیستم سرمایش پد و فن یک گلخانه را نمایش می‌دهد.

## ۳.۱. سیستم‌های سرمایشی گلخانه‌ای

سیستم‌های سرمایشی رایج در گلخانه‌های شامل سیستم‌های آبی‌اش‌های سقفی و سیستم‌های ایجاد مه هستند که البته نیاز به آب با کیفیت دارند. از دیگر روش‌های متداول در کشور سیستم پد و فن نیز می‌باشد که با استفاده از آن امکان ایجاد خنک‌کاری تا حدود ۸ تا ۱۲ درجه سلسیوس را ایجاد می‌کند [۱۰]. سیستم پد و فن با استفاده از اصول خنک‌کننده تبخیری و گردش هوا، به‌طور مؤثر محیط گلخانه را خنک می‌کند و فضایی راحت و مساعد برای رشد گیاه ایجاد می‌کند. این سیستم نه‌تنها به جلوگیری از تنش گرمایی روی محصولات کمک می‌کند، بلکه به حفظ سطح رطوبت مطلوب نیز کمک می‌کند؛ این موضوع برای تعریق گیاه و سلامت آن بسیار مهم است. سیستم خنک‌کننده پد و فن مزایای متعددی ازجمله بهره‌وری انرژی،

مصنوعی را برای کنترل پیش‌بینی دمای گلخانه و بهبود کارایی مصرف انرژی، در مواجهه با عدم قطعیت‌ها پیشنهاد داده‌اند. ترکیب مدل تحلیلی و داده‌ای در راهبرد کنترل، امکان انطباق انعطاف‌پذیر با داده‌های جدید و به‌کارگیری در گلخانه‌های مختلف را ممکن ساخته است. در صورت تمایل به بررسی جنبه‌های بیشتر از این پژوهش‌ها، می‌توان به جزئیات مدل‌های مورد استفاده و نتایج تجربی مستندشده پرداخت یا به مقایسه عملکرد روش‌های مختلف از دیدگاه‌های مهندسی دقت نمود. بورت و همکاران [۱۶] در یک تحقیق عددی تأثیر طراحی صحیح گلخانه و پوشش‌های آن را بر عملکرد انرژی و ریزاقلیم در شرایط شبانه و روزانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در شب، گلخانه‌های تونلی و دیوار عمودی دمای همگن‌تری دارند و در روز، گلخانه ونلو از اختلاط هوای بهتر بهره‌مند است. مولینا و همکاران [۱۷] کارایی روش‌های المان محدود (FEM) و حجم محدود (FVM) را در شبیه‌سازی تهویه طبیعی گلخانه‌ها مقایسه کرده‌اند. روش FEM برای هندسه‌های پیچیده‌تر دارای مزیت بوده درحالی‌که روش FVM در موارد چنددهانه دقت کمتری نشان می‌دهد. ژولیت و همکاران [۱۸] تأثیر تابش خورشیدی، کمبود فشار بخار و سرعت هوا بر تعلق گوجه‌فرنگی در گلخانه را بررسی کردند؛ نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که دما و  $CO_2$  تأثیر ناچیزی بر تعلق گیاهان دارند. استقلینی و همکاران [۱۹] در این مطالعه کنترل تعلق محصول با استفاده از الگوریتم تنظیم بر پایه تعلق به‌جای دما و رطوبت را ارزیابی نمودند. مدل پیشنهادی حدود ۱۰٪ دقت در پیش‌بینی تعلق را نشان می‌دهد. پترفاربر [۲۰] شبیه‌سازی سه‌بعدی برای تحلیل شارهای حرارتی ناشی از تابش و تعلق در یک گلخانه کوچک را مورد تحقیق قرار داد. استفاده از مش دقیق و توابع تعریف شده، نواحی با رطوبت بالا را شناسایی کرد، اما پیچیدگی محاسباتی می‌تواند کاربرد را محدود کند. وانگ و همکاران [۲۱] در یک تحقیق عددی، توزیع تعلق در یک گلخانه تونل پلاستیکی در فرانسه را شبیه‌سازی کرد و تغییرات فضایی تا ۳۰ درصدی را گزارش نمود. مدل‌های ادغام انتقال حرارت تشعشعی و همرفتی در پیش‌بینی دقیق شرایط ریزاقلیم یکی از ویژگی‌های این تحقیق بود. صابریان و سجادی [۲۲] در پژوهش خود، عملکرد سیستم فن و پد در یک گلخانه نیمه‌گرمسیری اهوازی را از طریق CFD شبیه‌سازی کردند و کاهش دمای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس نسبت به تهویه طبیعی را گزارش نمودند. گانگلی وقوش [۲۳] در مطالعه‌ای، کاربرد خنک‌کننده تبخیری فن-پد در گلخانه‌های هند را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم در تابستان عملکرد بهتری دارد. در شرایط بارانی یا

مقرون‌به‌صرفه بودن و بهبود عملکرد محصول را برای صاحبان گلخانه خواهند داشت [۱۱]. درحالی‌که سیستم خنک‌کننده پد و فن به‌طور گسترده‌ای به‌دلیل اثربخشی آن در تنظیم شرایط آب‌وهوایی گلخانه مورد تأیید قرار گرفته است ولی وابستگی آن به سطح رطوبت محیط باعث شده در مناطقی با رطوبت بالا، کارایی خنک‌کننده تبخیری به خطر بیفتد که منجر به کاهش ظرفیت خنک‌کننده و مشکلات احتمالی با رطوبت بیش از حد در محیط گلخانه می‌شود. همچنین مصرف انرژی آن بالاست. درحالی‌که این سیستم به‌طور کلی نسبت به روش‌های تهویه مطبوع سنتی از نظر انرژی کارآمدتر است، عملکرد فن‌های متعدد و گردش مداوم هوا از طریق پدهای خیس شده می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند.



شکل (۱): طرح‌واره عملکرد سیستم سرمایش پد و فن گلخانه‌ای

#### ۴.۱. مروری بر کارهای پیشین

ساینوس و همکاران [۱۲] در پژوهشی از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی انتقال گرما و جرم در سیستم خنک‌کننده تبخیری گلخانه‌ای با توجه به شرایط اقلیمی داخلی و خارجی استفاده کرده است. اعتبارسنجی مدل‌های ارائه‌شده با داده‌های تجربی اهمیت بهینه‌سازی نرخ تهویه برای افزایش کارایی سیستم را به تصویر کشیده است. ناوتو و همکاران [۱۳] در مطالعه دیگری، انرژی یک گلخانه را مدل‌سازی و تأثیر تغییرات سیستم را بررسی کردند. مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ابزار مؤثری برای پیش‌بینی میکرواقلیم و شناسایی سناریوهای صرفه‌جویی ارائه می‌دهد. کیم و همکاران [۱۴] در تحقیقی به ترکیب فناوری‌های CFD و واقعیت مجازی، یک شبیه‌ساز سه‌بعدی را توسعه داده‌اند که در آن امکان تحلیل ایرودینامیکی محیط گلخانه گوجه‌فرنگی در کره جنوبی و آموزش اختصاصی به کشاورزان را فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی به‌همراه تأیید تجربی در ۲۷ نقطه، دقت مدل و کارایی سیستم را مستند می‌کند. محمود و همکاران [۱۵] در مطالعه دیگری چارچوبی مبتنی بر داده و شبکه‌های عصبی

زمستان، کاهش کارایی و نیاز به تهویه طبیعی بیشتر مشهود است. چن و همکاران [۲۴] با استفاده از نرم‌افزار Fluent توزیع سرعت و دما در گلخانه‌ها با سیستم فن-پد را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها پیشنهادها کاربردی برای نصب بهینه ارتفاع فن-پد را به‌منظور بهبود رشد محصول ارائه می‌دهد. فاطمه عزرا علالی [۲۵] از طریق شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از Ansys، سیستم خنک‌کننده تبخیری مستقیم (DECS) را در گلخانه بررسی نمود. در این مطالعه، با بهینه‌سازی پارامترهایی نظیر ارتفاع پد تبخیری به ۱/۵ متر، نصب فن‌ها در ارتفاع ۲ متری با فاصله ۶ متری و تنظیم سرعت هوای ورودی به ۱/۵ متر بر ثانیه، راهکارهایی برای افزایش یکنواختی دما ارائه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این تنظیمات موجب کاهش میانگین دما از ۴۰ درجه سلسیوس به ۲۱ درجه سلسیوس و بهبود توزیع دما در فضای گلخانه گردیده‌اند. همچنین، جای‌گذاری مناسب فن‌ها به گونه‌ای عمل کرده است که تعادل بین خنک‌کنندگی سایبان بالا و یکنواختی دمای داخل گلخانه برقرار گردد. شبانپنگ سان و همکاران [۲۶] در گلخانه Venlo-type واقع در یانگلینگ چین، بین ۵ تا ۱۱ ژوئن ۲۰۲۲، یک تحقیق میدانی برای بررسی ناهماهنگی محیطی انجام داده‌اند. در این تحقیق، با استفاده از حسگرهای دما و رطوبت با فاصله ۴/۵ متری در نقاط مختلف گلخانه از جمله شاخه، منطقه کشت، مرکز و ریشه، داده‌های دقیقی جمع‌آوری شده است؛ نتایج حاصل نشان داده است که نوسانات دما در نقاط مختلف از صفر تا ۲۰ درجه سلسیوس بوده و تفاوت میانگین دمای داخلی و خارجی بین ۵- تا ۱۰ درجه سلسیوس گزارش شده است. علاوه‌بر این، تغییرات رطوبت نسبی تا ۴۵٪ و عدم یکنواختی دما به‌ویژه در جهت عمودی نسبت به افقی مشاهده شده است. این رویکرد با اعمال کنترل‌های محلی براساس نیازهای هر ناحیه، اجازه می‌دهد تا یکنواختی دما بهبود یابد و به کاهش مصرف انرژی تا حدی معادل ۶۹/۹٪ نسبت به روش‌های کلی محیط‌بندی به دست آید. شبانپنگ سان و همکاران [۲۶] در گلخانه Venlo-type واقع در یانگلینگ، چین، طی مطالعه‌ای که به بررسی میکروکلیمای گلخانه از منظر جریان هوای همگن و توزیع دما پرداخته شده است، با بهره‌گیری از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی، مدل سه‌بعدی محیط گلخانه تدوین و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردیده‌اند. لی‌اچ و همکاران [۲۷] نیز در پژوهشی، نصب سیستم‌های فن-کوئل چندمنظوره (FCU) به‌عنوان راهکاری برای بهبود یکنواختی جریان هوایی و میدان دما مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که زاویه شیب فن به ۲۰ درجه، زاویه تاب فن به ۴۵ درجه و ارتفاع نصب آن به ۲/۹ متر تعیین شده

است. همچنین، فاصله بین دو فن با توجه به ارتفاع محصولات به‌طور مجزا مورد توجه قرار گرفته و به‌عنوان مثال برای محصولات با رشد کمتر فاصله ۴/۲ متر و برای محصولات با رشد بیشتر فاصله ۴/۵ متر توصیه شده است. شاخص تغییرات سرعت در مدل‌های اولیه به‌ترتیب به مقادیر ۰/۵۸ و ۰/۶۶ گزارش شده که پس از بهینه‌سازی به ۰/۳۷ و ۰/۴۱ کاهش یافته و معادل بهبود یکنواختی جریان هوایی به میزان ۳۶/۲۱٪ و ۳۷/۸۸٪ ارزیابی شده است. افزون بر این، توزیع همگن جریان هوایی موجب بهبود یکنواختی میدان دما به میزان ۴۶/۵٪ و ۲۳/۹۵٪ گردیده که درنهایت با تنظیم بهینه فشار فن به مقدار ۳۶/۲ پاسکال، درصد ماده مغذی موجود در محدوده سرعت هوای بهینه به ۶۴/۷٪ و ۲۳/۵٪ افزایش یافته است. این اقدامات به‌عنوان راهکاری مؤثر در طراحی و بهینه‌سازی نصب سیستم‌های FCU برای ارتقای یکنواختی دما در گلخانه‌ها ارائه شده‌اند.

براساس مرور قاطع و شواهد تجربی و عددی، مجموع یافته‌های پیشین نشان‌دهنده آن است که ارتفاع گلخانه از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر یکنواختی دمای داخلی است. افزایش ارتفاع به‌طور مستقیم با افزایش حجم هوای قابل تهویه، کاهش گرادیان دمای عمودی، جلوگیری از تجمع حرارت، و بهبود اختلاط هوا موجب کاهش لایه‌بندی حرارتی و تثبیت شرایط حرارتی در تمام ارتفاع کشت می‌شود.

مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، تحلیل‌های شبکه عصبی و روش‌های عددی، همگی تأیید می‌کنند که گلخانه‌های بلندتر نه تنها از نظر بازده انرژی و عملکرد سیستم تهویه بهینه‌ترند، بلکه در کنترل مسائل بیماری‌زایی و پایداری رشد گیاهان نیز موفق‌تر عمل می‌کنند. ترکیب مدل‌های CFD-ANN و VR-CFD، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و طراحی بهینه‌تر را فراهم ساخته است. مشاهدات تجربی و تحلیل میدانی نیز مؤید این یافته‌ها هستند.

نکته مهم اینکه ارتفاع به‌تنهایی تعیین‌کننده نهایی نیست و باید همراه با پارامترهایی نظیر نوع و ضخامت پوشش، فرم سقف، طراحی پنجره‌های تهویه و سیستم کنترل هوشمند به‌عنوان بسته‌ای یکپارچه از راهکارهای ساختاری و مدیریتی لحاظ شود.

در یک جمله، مطالعات گذشته به‌وضوح نشان می‌دهند که انتخاب ارتفاع مناسب و به‌ویژه افزایش آن، یکی از بهترین راهبردها برای ارتقای کارایی حرارتی، بهبود یکنواختی دما و افزایش بهره‌وری در گلخانه‌های مدرن محسوب می‌شود. این اثر مثبت زمانی تقویت می‌شود که با طراحی سیستمی و هوشمندانه تهویه و سایر پارامترهای مکمل همراه باشد.

## ۲. معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم برای حل میدان سیالاتی و حرارتی مسئله گلخانه [۲۸] به ترتیب عبارت‌اند از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی که در حالت سه بعدی و حالت پایا توسط نرم‌افزار Ansys-Fluent حل شده‌اند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\rho \left( u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i \quad (۲)$$

$$\rho \left( u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho C_p \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + Q \quad (۳)$$

### ۱.۲. مدل‌سازی جریان توربولانسی

با بررسی‌های انجام‌شده از مقالات [۲۹-۳۲] و مدل‌سازی با انواع روابط پیشنهادی توربولانسی در گلخانه، مدل آشفتگی k-ε برای شبیه‌سازی جریان‌های داخلی با پیچیدگی متوسط، از جمله سیستم‌های تهویه و توزیع دما در محیط‌های بسته مانند گلخانه، از دقت و پایداری محاسباتی مناسبی برخوردار است. این مدل به‌طور ویژه برای جریان‌های با عدد رینولدز بالا که در آن اثرات آشفتگی غالب است، و همچنین برای پیش‌بینی الگوی جریان و توزیع دما در مقیاس‌های بزرگ (Macroscale) در مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر که نیاز به منابع محاسباتی بسیار بیشتری دارند، بهینه است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (۴)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_2 \varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۵)$$

### ۲.۲. مدل‌سازی تشعشع داخل گلخانه

تأثیر شدت تابش نور خورشید بر دمای گلخانه و یکنواختی دمایی آن بسیار مهم است. با استفاده از معادلات انرژی تابشی، انتقال حرارت همرفتی و تعادل انرژی، تأثیر تابش بر دمای داخلی گلخانه محاسبه می‌شود. افزایش شدت تابش نور خورشید باعث افزایش دمای داخلی و تغییرات در یکنواختی دمایی می‌شود. این نتایج به بهبود راهبردهای مدیریت دما در گلخانه‌ها کمک می‌کند [۳۳ و ۳۴] که به‌صورت روابط زیر است:

$$Q = I \cdot A \cdot \cos(\theta) \quad (۶)$$

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_a) \quad (۷)$$

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{stored} \quad (۸)$$

با استفاده از معادلات انرژی تابشی (رابطه ۶)، انتقال حرارت همرفتی (رابطه ۷) و تعادل انرژی (رابطه ۸)، تأثیر تابش خورشید بر دمای داخلی گلخانه محاسبه شده است. این روابط به‌عنوان بخشی از مدل جامع انتقال حرارت در شبیه‌سازی CFD به کار رفته‌اند. از آنجا که مدل تشعشعی نقش مهمی در شبیه‌سازی انتقال حرارت در دینامیک سیالات محاسباتی دارد؛ لذا برای مدل‌سازی تشعشع داخل گلخانه، با بررسی‌های انجام‌شده از مراجع [۳۳-۳۵] و مدل‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی، مدل تشعشعی مدل Discrete Ordinates انتخاب شده که به‌صورت رابطه زیر است:

$$S \cdot \nabla I(r, s) = k I_b(r) - BI(r, s) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, s) \Phi(s, s') d\Omega' \quad (۹)$$

### ۲.۳. مدل‌سازی فضای متخلخل داخل گلخانه

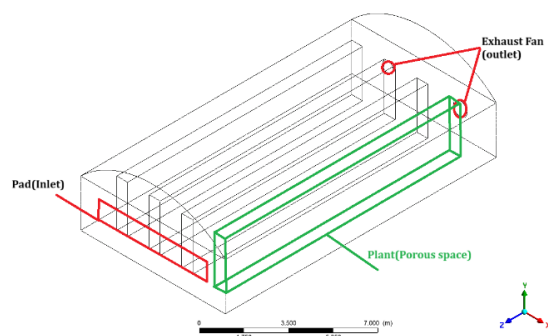
در این مقاله، فضای گلخانه‌ای که گیاهان در آن قرار دارند، به‌عنوان فضای متخلخل مدل‌سازی شده است. این فضا به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، مانند عبور متفاوت سیال هوا نسبت به سایر نواحی، نمی‌تواند به‌صورت همگن فرض شود. برای گیاه گوجه‌فرنگی، فضای متخلخل ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. در طراحی و مش‌بندی این فضای متخلخل، چهار ردیف کشت گیاه گوجه‌فرنگی به عرض ۶۰ سانتی‌متر، طول ۱۳ متر و ارتفاع ۲/۶ متر در نظر گرفته شده است. این مدل‌سازی، امکان بررسی دقیق رفتار جریان هوا و انتقال حرارت در این فضای متخلخل را فراهم خواهد کرد. روش استفاده‌شده برای فضای متخلخل حجم محدود می‌باشد که قسمتی از فضای گلخانه را که گیاه در آن موجود می‌شود، با در نظر گرفتن ۲۰٪ گیاه و استفاده از اطلاعات چوب مدل‌سازی شده است [۱۲].

### ۲.۴. مدل‌سازی تعریق گیاه داخل گلخانه

تعریق گیاه فرایندی است که در آن آب از طریق برگ‌ها و سایر قسمت‌های هوایی گیاه تبخیر می‌شود. این فرایند نقش مهمی در تنظیم دمای گیاه و انتقال مواد مغذی دارد. در این مقاله، تعریق گیاه به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه و مدل‌سازی تعریق گیاه، از روابط FAO56 استفاده شده است که به‌طور گسترده‌ای در مطالعات کشاورزی و منابع آب به کار می‌رود [۳۶].

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۱۰)$$

که در آن،  $ET_0$  میزان تبخیر از سطح مرجع  $R_n$  تابش خالص در سطح محصول  $G$ ، ( $MJ/m^2/day$ )، شار گرمایی خاک



تصویر (۲): مدل سه‌بعدی ترسیمی از گلخانه و نام‌گذاری ورودی، خروجی و فضای متخلخل گیاه در نرم‌افزار دیزاین مدلر

### ۲.۳. شرایط مرزی گلخانه

مدل‌سازی انجام‌شده براساس اطلاعات پژوهش ساپنوس و همکاران [۱۲] انجام شده است و خواص مواد ۳۷-۴۵] مطابق جدول (۱) ارائه می‌گردد. فشار اعمالی در فن‌های خروجی ۳۸- کیلوپاسکال بوده و فشار اتمسفریک منطقه مورد مطالعه ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال است. شار حرارتی خورشیدی منطقه مورد مطالعه ۶۱۰ وات بر متر مربع لحاظ شده است. اطلاعات شرایط مرزی گلخانه در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی

| جنس          | گرماي ویژه<br>Cp(J/kg.K) | چگالي<br>ρ(gr/cm³) | هدايت حرارتي<br>k(W/m.K) |
|--------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| سقف          | ۱۰۰۰                     | ۲/۵۶               | ۰/۰۲۶۲                   |
| دیواره جانبی | ۱۰۳۳                     | ۲/۱۷               | ۰/۲۸۴                    |
| کف زمین      | ۱۴۵۰                     | ۱/۲۶               | ۰/۶                      |

جدول (۲): شرایط مرزی گلخانه

| شرایط مرزی هیدرودینامیکی        | شرایط مرزی حرارتی |
|---------------------------------|-------------------|
| عدم لغزش                        | سقف               |
| عدم لغزش                        | دیواره جانبی      |
| عدم لغزش                        | کف زمین           |
| فشار ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال           | ورودی             |
| فشار ۳۸-P <sub>atm</sub> پاسکال | خروجی             |

### ۳.۳. شبکه‌بندی دامنه حل

برای شبکه‌بندی دامنه حل در پژوهش حاضر از نرم‌افزار انسیس مشینگ (Ansys Meshing) استفاده شده است. شبکه‌بندی به روش سازمان‌یافته و از نوع شش ضلعی منظم بوده و بعد از چندین مرتبه

(MJ/m²/day)،  $T$  دمای هوا در ارتفاع ۲ متر،  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متر،  $e_s$  فشار بخار اشباع،  $e_a$  فشار بخار واقعی،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع،  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه هوا به گرمای نهان تبخیر آب است [۳۶] و میزان محاسبه‌شده در این فرمول به‌صورت چشمه جرم در ناحیه کشت گیاه به مدل اضافه گردید و همچنین در حالت Species Transport فعال و دو گونه هوای خشک و بخار آب با فرض گاز ایدئال مدل شدند.

### ۲.۵. شاخص یکنواختی دما

برای بررسی میزان یکنواختی دما در گلخانه‌ها، روش پیشنهادشده در مراجع علمی با نام ضریب تغییرات دما (Coefficient of Variation) معروف است. این ضریب که از نسبت انحراف معیار دما ( $\sigma_T$ ) به میانگین دما ( $\mu$ ) محاسبه می‌گردد، معیار استاندارد برای سنجش پراکندگی داده‌هاست [۱۲]. مقادیر پایین‌تر این ضریب نشان‌دهنده یکنواختی بهتر دما در محیط گلخانه است که از روابط زیر قابل محاسبه است:

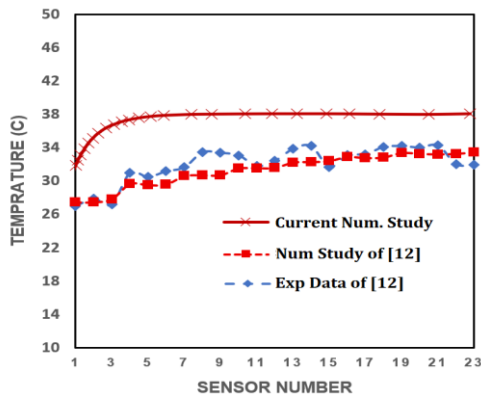
$$CV = \frac{\sigma_T}{\mu} \times 100 \quad (10)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

### ۳. مدل‌سازی گلخانه مورد مطالعه

#### ۱.۳. اطلاعات هندسی گلخانه

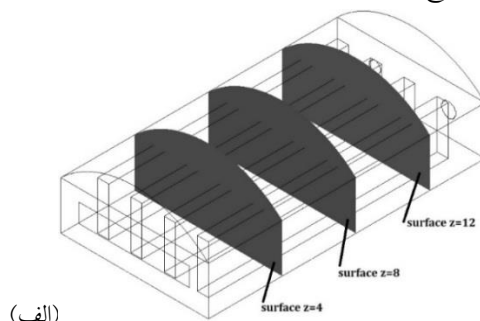
این پژوهش از داده‌های تجربی گلخانه اولیه تحقیقاتی در دانشگاه ارسطو تسلونیک یونان برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی استفاده کرده است. زمان اندازه‌گیری اطلاعات تجربی از گلخانه در تابستان ۲۰۰۶ است. گلخانه در ابعاد ۱۵ متر طول، ۸ متر عرض، ۴/۲ ارتفاع تاج گلخانه و ۲/۶ متر ارتفاع ناودان است. سیستم فن و پد با در نظر گرفتن پد خنک‌کننده در ابعاد ۱ در ۶ متر در ارتفاع یک‌متری از سطح زمین در ضلع عرضی گلخانه و همچنین دو فن مکند با قطرهای ۶۰ و ۷۶ سانتی‌متر در ارتفاع ۱/۳۲ متری از سطح زمین در ضلع روبه‌روی گلخانه تعبیه شده است. برای طراحی هندسه این پژوهش از نرم‌افزار Ansys Geometry استفاده شده است. شکل (۲) نمایی از گلخانه شبیه‌سازی‌شده قابل مشاهده است. شایان ذکر است در ادامه پژوهش، شبیه‌سازی برای ارتفاع ۶/۵ و ۸/۵ متر برای گلخانه نیز انجام خواهد شد.



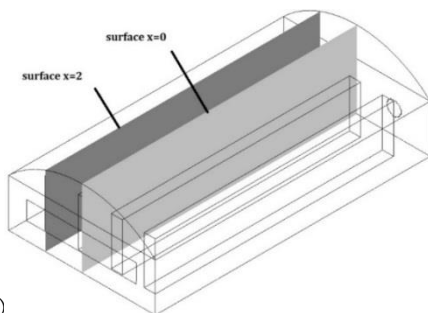
شکل (۵): اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

## ۲.۴. تحلیل نتایج

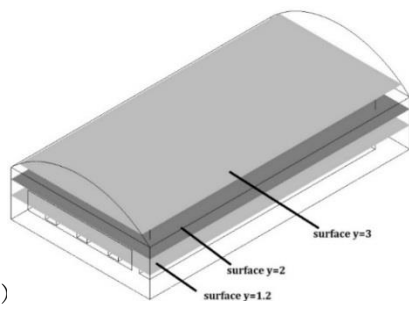
قبل از شروع تحلیل نتایج، شکل (۶) مقاطع عرضی، طولی و ارتفاعی که در آن نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت، معرفی می‌گردد.



(الف)



(ب)

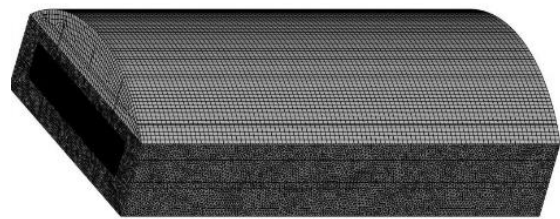


(ج)

شکل (۶): معرفی مقاطع (الف) طولی، (ب) عرضی، (ج) ارتفاعی در گلخانه

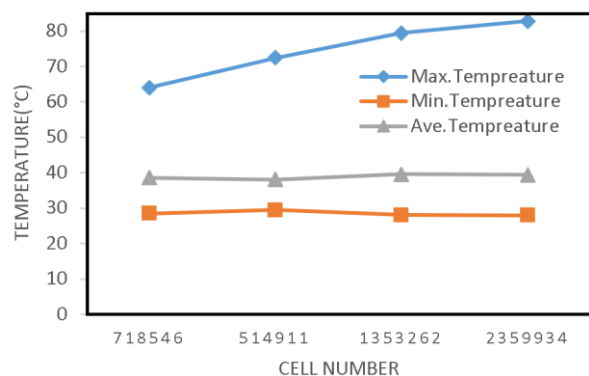
پژوهش حاضر بار تأثیر ارتفاع گلخانه را به کمک مدلی که به وسیله داده‌های تجربی تأیید شد و رویکرد تحلیلی هم‌زمان (آزمایشگاهی و عددی) بر شاخص‌های بهره‌وری، کارایی تهویه، دما

شبکه‌بندی و مطالعه استقلال از شبکه، تعداد سلول ۱۳۵۳۲۶۲ به عنوان شبکه بهینه و دقیق انتخاب شده است. در شکل (۳)، شبکه محاسباتی ایجادشده در دامنه حل قابل مشاهده است.



شکل (۳): شبکه‌بندی فضای سه‌بعدی در نرم‌افزار انسیس مشینگ

شکل (۴) بررسی مطالعات استقلال شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نتایج مطالعات استقلال از شبکه

## ۴. شبیه‌سازی عددی حرارتی-سیالاتی گلخانه

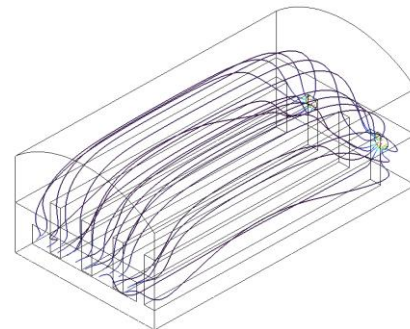
با استفاده از نرم‌افزار Ansys-Workbench2023R2 و اعمال شرایط مرزی ذکرشده و خواص مواد تشکیل‌دهنده دیواره‌های گلخانه مدل‌سازی گلخانه انجام شده است. معیار همگرایی  $10^{-4}$  انتخاب شده است.

### ۱.۴. اعتبارسنجی نتایج

برای تعیین اعتبار نتایجی شبیه‌سازی‌شده از داده‌های عددی و تجربی مرجع [۱۲] استفاده شده که نتایج اعتبارسنجی در شکل (۵) قابل مشاهده است. (گفتنی است که داده‌های تجربی مرجع [۱۲] توسط ۲۳ عدد سنسور دمایی مجزا در راستای طولی گلخانه استخراج شده است). واضح است که نتایج عددی پژوهش حاضر با داده‌های تجربی اختلاف ۸/۴ درصدی دارد؛ لذا می‌توان از انتخاب صحیح مدل توربولانسی و تشعشعی و همچنین تعریق و محیط متخلخل گیاه اطمینان حاصل نمود.

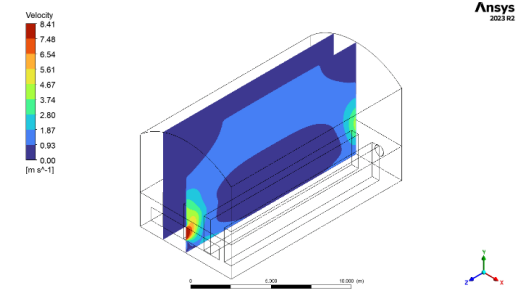
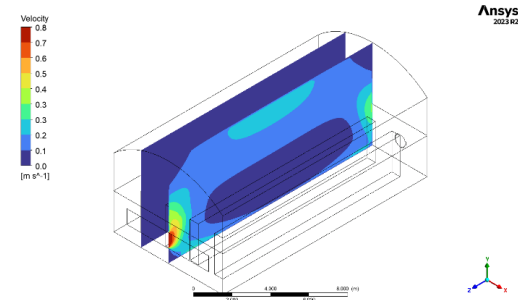
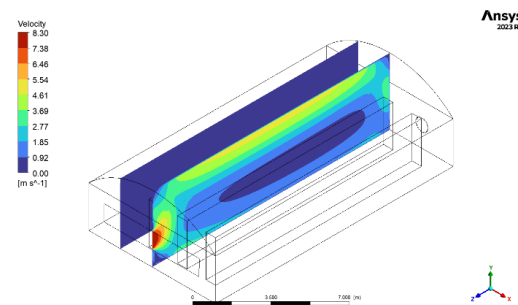
و فشار بخار بررسی کرده است؛ این درحالی است که چنین رویکرد و دامنه‌ای در مقاله ساپنوس [۱۲] وجود ندارد.

شکل (۷) خطوط جریان هوای داخل گلخانه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، خطوط جریان از پدهای خنک‌کننده ابتدایی وارد شده و پس از پیمودن در بین فضاهای متخلخل گیاهی و بالای آن، از قسمت اگراست فن‌ها خارج می‌شود.



شکل (۷): نمایی از مسیرهای جریان هوا در گلخانه با ارتفاع ۶/۵ متری

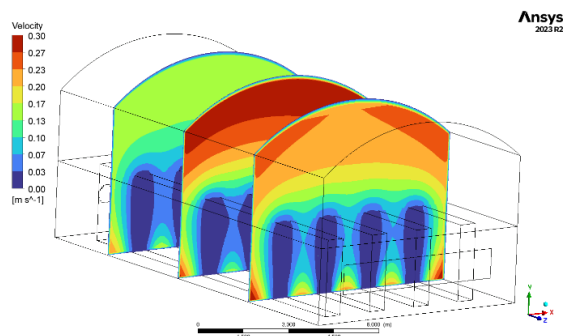
شبیه‌سازی‌ها برای سه ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر انجام شده است. توزیع سرعت در راستای طولی گلخانه در مقاطع  $x=0$ ،  $x=2$  در سه گلخانه با ارتفاع‌های مختلف در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۸): توزیع سرعت در گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صفحه  $x=2$  (صفحه عبورکننده از بین محیط‌های متخلخل گیاهی) سرعت در این مقطع بسیار کم و نزدیک به صفر است که براساس الزامات کشاورزی سرعت مناسبی برای رشد است. در صفحه  $x=0$  و در ابتدای پایینی صفحه، سرعت هوا زیاد بوده (حدود ۷ متر بر ثانیه) که این سرعت به‌علت عبور از پدهای خنک‌کننده با سطح مقطع عبوری کم است. بعد راستای جلویی گلخانه، سرعت مرتباً کمتر می‌شود. بیشترین سرعت سیال هوا در فضای داخلی گلخانه مربوط به بالای محیط‌های متخلخل خواهد بود. در فضای وسط تحت تأثیر فضای متخلخل گیاه، سرعت نزدیک ۰/۱ متر بر ثانیه بوده که برای رشد گیاه نیز همین سرعت توصیه می‌شود. این روند برای گلخانه‌هایی با ارتفاع ۶/۵ و ۸/۵ متر نیز تکرار می‌شود؛ با این دقت که سرعت در بالای فضای متخلخل کمتر از گلخانه ۴/۲ متری خواهد بود.

شکل (۹) نیز کانتور توزیع سرعت در مقاطع عرضی  $z=4$  و  $z=8$  و  $z=12$  در گلخانه با ارتفاع ۶/۵ متر را نمایش می‌دهد. واضح است که سرعت در بین فضای متخلخل گیاهی نزدیک ۰/۱ متر بر ثانیه بوده و بسیار برای گیاه مناسب است. بیشترین سرعت هوا از فضای بالای گیاهان بوده و چون از گرمای ورودی سقف گلخانه تأثیر می‌پذیرد، سرعت بیشتری خواهد داشت. این سرعت بیشتر به‌علت کاهش چگالی بر اثر گرمای وارد شده به داخل گلخانه از طرف خورشید است.

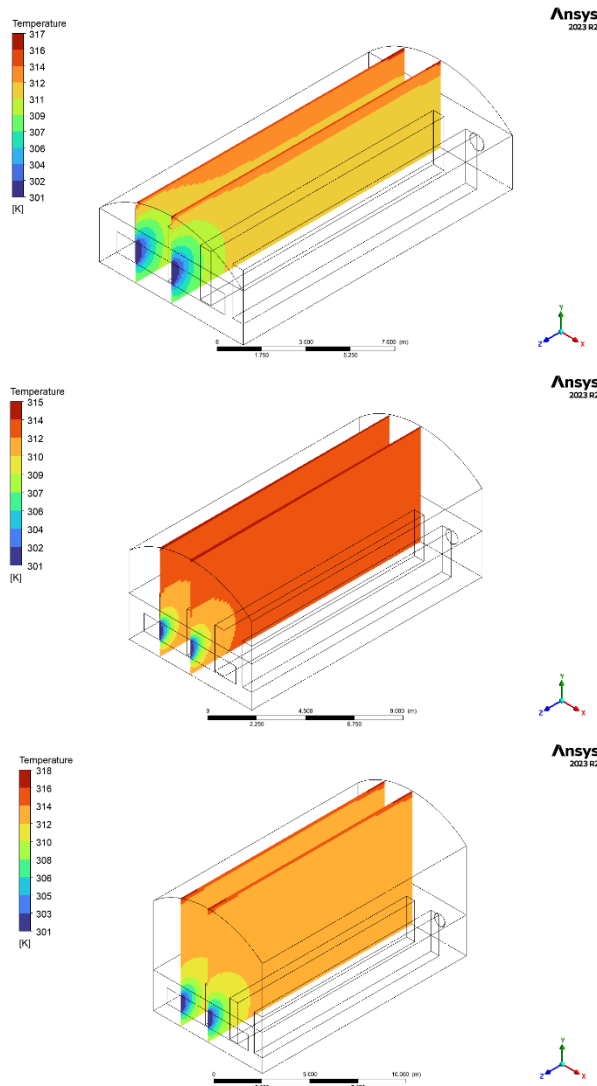


شکل (۹): توزیع سرعت در گلخانه در سه سطح مقطع  $z$  در گلخانه با ارتفاع ۶/۵ متر

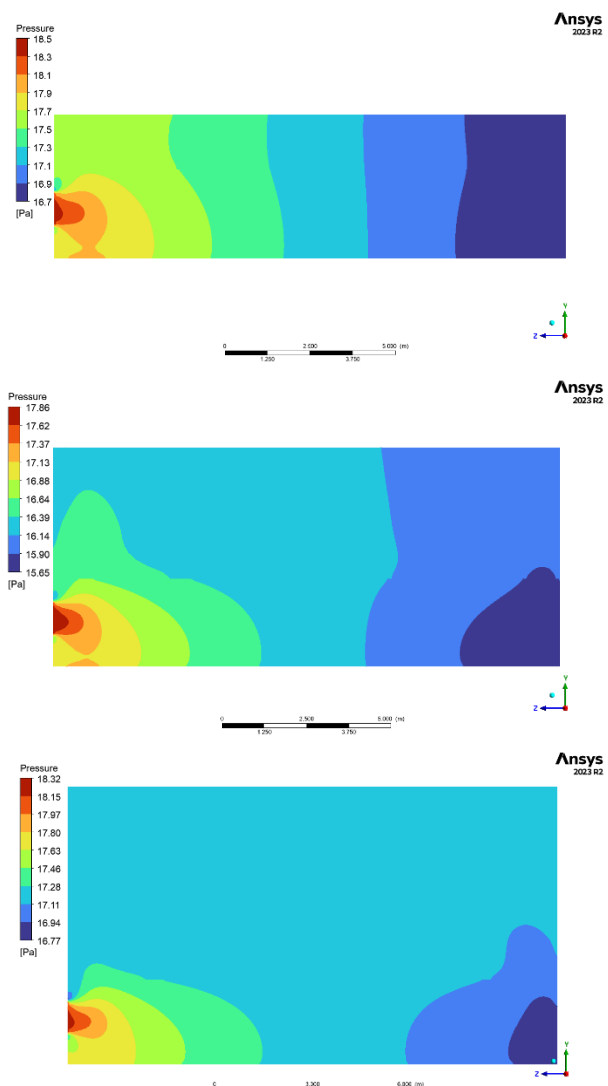
در شکل (۱۰)، کانتور توزیع فشار در سطح مقطع میانی در سه گلخانه مورد مطالعه با ارتفاع‌های ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر، قابل نمایش است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار درون گلخانه تغییرات چندانی ندارد و بیشترین فشار در جلوی ورودی پدهای خنک‌کننده و کمترین آن در قسمت خروجی و نزدیک فن‌های مکنده تجربه خواهد شد. این اختلاف فشار، عامل حرکت سیال داخل گلخانه بوده و

کانتورها برای شناسایی نواحی بحرانی در گلخانه و کمک به اتخاذ تصمیماتی برای یکنواخت سازی گلخانه‌ها می‌تواند بسیار مفید باشد.

هرچه ارتفاع گلخانه زیادتر می‌شود، یکنواختی بیشتر فشار و عدم وجود گرادین فشار در ارتفاع گلخانه بیشتر واضح خواهد بود.



شکل (۱۱): توزیع دما در سطح مقطع  $x=0$  و  $x=2$  در سه گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر



شکل (۱۰): توزیع فشار در سطح مقطع  $x=0$  در سه گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر

شکل (۱۲) کانتور توزیع دما در سطح مقطع  $z=4$  و  $z=8$  و  $z=12$  در سه گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم دما به‌صورت یک نوار نازک در محدوده ۳۱۵ تا ۳۱۸ درجه کلوین در زیر سقف خواهد بود. اثرات کانوکشن طبیعی باعث جمع شدن توده هوای گرم به بالای گلخانه شده که با تعبیه بازشوهای مناسب در تاج گلخانه امکان تخلیه یا نگهداری این توده هوای گرم برای بهره‌برداری بهینه، میسر خواهد بود.

در لایه‌های پایین‌تر از تاج گلخانه دما حدود ۳۱۴ درجه کلوین بوده و به‌صورت خطی تا دمای ۳۱۲ درجه کلوین تا پایین گلخانه

شکل (۱۱) کانتور توزیع دما در سطح مقطع  $x=0$  و  $x=2$  در سه گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر را نمایش می‌دهد. واضح است کمترین دما در گلخانه در محل ورودی پدهای خنک‌کننده بوده و هرچه هوا به سمت جلو در گلخانه حرکت می‌کند، بر اثر ورود شار تشعشعی به سقف گلخانه و ورودی آن به داخل گلخانه، دمای هوا زیادتر می‌شود. بیشترین دمای هوا حدود ۳۱۸ درجه کلوین بوده که در بالاترین نقطه تاج گلخانه در سه گلخانه مورد مطالعه قابل تجربه است. از آنجاکه هوای گرم به‌علت پدیده بایانسی طبیعی و شتاب گرانش در بالاترین نقطه گلخانه جمع می‌گردد، وجود بیشترین دما در تاج گلخانه‌های مورد مطالعه قابل توجیه است. اطلاعات دریافتی از

خواهد بود و علت آن ثابت بودن میزان هوای ورودی از سیستم تهویه در کنار افزایش حجم هوای داخل گلخانه است که باعث کاهش نرخ تعویض هوا و در نتیجه انباشت بیشتر انرژی حرارتی در گلخانه‌های مرتفع‌تر می‌گردد.



شکل (۱۳): نمودار مقایسه نتایج دما در ارتفاع ۱/۲ متری در مرکز گلخانه برای نتایج آزمایشگاهی و عددی در گلخانه‌های مورد مطالعه

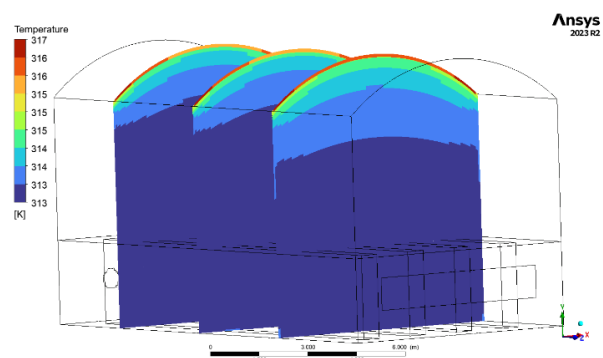
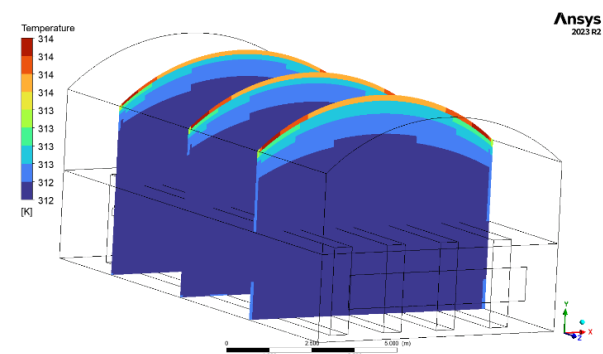
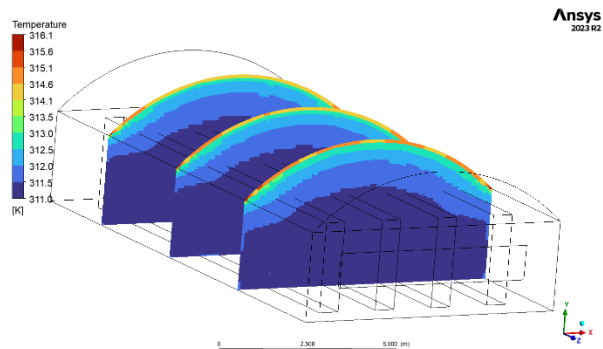
از آنجاکه هدف این پژوهش، بررسی تأثیر پارامتر ارتفاع بر یکنواختی فضای گلخانه با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی است، برای مقایسه کمی یکنواختی دمایی در سه پیکربندی مختلف گلخانه، ابتدا میانگین دمای ( $\mu$ ) نقاط نمونه‌برداری در هر گلخانه محاسبه می‌شود. در صورت عدم یکنواختی فاصله نقاط، از روش‌های وزنی یا میان‌یابی برای تعیین مقادیر دما در نقاط با فواصل معین استفاده می‌شود. سپس، انحراف معیار ( $\sigma$ ) دمای این نقاط نسبت به میانگین محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده پراکندگی داده‌هاست. برای سنجش عینی‌تر میزان یکنواختی، شاخص ضریب تغییرات دمایی (CV) به عنوان معیاری نرمال‌سازی شده تعیین می‌گردد. مقدار کمتر CV نشان‌دهنده یکنواختی دمایی بالاتر در فضای گلخانه است. فرمول‌های محاسباتی بدین شرح‌اند:

میانگین دمایی، انحراف معیار دمایی و شاخص ضریب تغییرات دمایی برای سه گلخانه مورد مطالعه به صورت جدول (۳) خواهد بود.

جدول (۳): میانگین، انحراف معیار و شاخص ضریب تغییرات دمایی

| گلخانه ۸/۵ متری | گلخانه ۶/۵ متری | گلخانه ۴/۲ متری |                         |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| ۳۹/۱۵           | ۳۸/۷۹           | ۳۷/۶۰           | میانگین دمایی           |
| ۱/۶۱            | ۱/۱۴            | ۱/۱۷            | انحراف معیار دمایی      |
| ۴/۱۳            | ۲/۹۶            | ۳/۱۳            | شاخص ضریب تغییرات دمایی |

توزیع می‌گردد. به صورت کیفی، گرایان دما در گلخانه‌های با ارتفاع‌های زیاد، کمتر بوده و محیط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم خواهد شد.



شکل (۱۲): توزیع دما در سطح مقطع  $z=4$  و  $z=8$  و  $z=12$  در سه گلخانه با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر

نمودار مقایسه‌ای نتایج دما در ارتفاع ۱/۲ متری از زمین در خط مرکزی گلخانه برای نتایج عددی شبیه‌سازی شده برای گلخانه‌های با ارتفاع ۴/۲، ۶/۵ و ۸/۵ متر در شکل (۱۳) ارائه شده است. برای مقایسه بیشتر، نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری سنسورهای تعبیه شده در مرجع [۱۲] نیز ضمیمه نمودار شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سه گلخانه مورد مطالعه، دما از ۲۷ درجه سلسیوس شروع شده و با افزایش قابل توجهی در ابتدای گلخانه، به مقدار ثابتی خواهد رسید. مقدار دمای ثابت در سه گلخانه به ترتیب حدود ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ درجه برای ارتفاع‌های ۴/۲ و ۶/۵ و ۸/۵ متر

خشک ایران (مانند یزد یا کاشان) قابل قیاس است؛ اگرچه مقادیر اوج تابش و دما در میانه تابستان این مناطق به مراتب بیشتر است. برای تطبیق کامل تر، پیشنهاد می شود شبیه سازی در آینده با داده های اوج تابستان یزد (تابش  $1000 \sim W/m^2$  و دمای  $50 \sim ^\circ C$ ) نیز انجام پذیرد. این امر امکان دستیابی به یک راهکار بهینه شده برای سخت ترین شرایط اقلیمی کشور را فراهم خواهد کرد.

## ۶. ضمایم

| علامت            | تعریف و توضیح                                                         | واحد                          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $\Phi$           | متغیر انتقالی (مثلاً دما یا غلظت)                                     | $^\circ C-K$                  |
| $\Gamma$         | ضریب انتشار (Diffusivity)                                             | $m^2/s$                       |
| $S_c(\Phi)$      | جمله منبع مربوط به متغیر انتقالی                                      | وابسته به متغیر<br>$[\Phi/s]$ |
| $Q$              | نرخ انتقال حرارت                                                      | $W$                           |
| $h$              | ضریب انتقال حرارت همرفتی                                              | $W/(m^2 \cdot K)$             |
| $T_\square$      | دمای سطح                                                              | $^\circ C$ یا $K$             |
| $T_a$            | دمای محیط (دمای هوای اطراف)                                           | $^\circ C$ یا $K$             |
| $k$              | انرژی جنبشی توربولانسی                                                | $m^2/s^2$ (J/kg)              |
| $k$              | ضریب جذب در معادلات انتقال تشعشعی                                     | $1/m$                         |
| $x_i$            | مختصات مکانی در جهت i                                                 | $m$                           |
| $\mu_\square$    | ویسکوزیته مؤثر توربولانسی                                             | $kg/(m \cdot s)$              |
| $\sigma_\square$ | ضریب پراشتل مربوط به مدل توربولانسی                                   | بی بعد                        |
| $\varepsilon$    | نرخ افت انرژی جنبشی توربولانسی                                        | $m^2/s^3$                     |
| $\sigma_e$       | ضریب پراشتل مربوط به مدل توربولانسی                                   | بی بعد                        |
| $E_i \square$    | مولفه های نرخ تغییر یا تنش برشی                                       | $1/s$                         |
| $I(r, s)$        | شدت تشعشعی در نقطه r                                                  | $W/(m^2 \cdot sr)$            |
| $I_b(r)$         | شدت تشعشعی بدنه سیاه در نقطه r                                        | $W/(m^2 \cdot sr)$            |
| $\beta$          | ضریب تضعیف انتقال حرارت تشعشعی                                        | $1/m$                         |
| $\sigma$         | ضریب پراکندگی در معادل انتقال تشعشعی                                  | $1/m$                         |
| $\Phi(s, s')$    | تابع فاز پراکندگی بیانگر توزیع زاویه ای پراکندگی تشعشع از جهت s به s' | بی بعد                        |
| $ET_0$           | تبخیر-تعریق طبق مدل FAO56                                             | $mm/day$                      |
| $R_\square$      | تابش خالص سطح                                                         | $MJ/m^2/day$                  |
| $G$              | شار حرارتی خاک                                                        | $MJ/m^2/day$                  |
| $\gamma$         | ضریب روان گرمایی                                                      | $kPa/^\circ C$                |
| $u_2$            | سرعت باد در ارتفاع ۲ متر                                              | $m/s$                         |
| $e_\square$      | فشار بخار اشباع                                                       | $kPa$                         |
| $e_a$            | فشار بخار واقعی                                                       | $kPa$                         |
| $CV$             | ضریب تغییرات دما                                                      | (%) درصد                      |
| $\sigma_T$       | انحراف معیار دما                                                      | $^\circ C$ یا $K$             |
| $C_p$            | ظرفیت حرارتی ویژه                                                     | $J/(kg \cdot K)$              |
| $\$/ha$          | دلار بر هکتار                                                         | $\$$                          |
| $Ton/ha$         | تن بر هکتار                                                           | $ton$                         |

## ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه با شبیه سازی CFD بر پایه معادلات ناویر-استوکس و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  تأثیر افزایش ارتفاع تاج گلخانه بر یکنواختی دمایی و کارایی رشد بررسی شد. مدل عددی با خطای میانگین  $8/4$  درصد اعتبارسنجی گردید و نشان داد که تغییر هندسی ساده در ارتفاع تاج می تواند تأثیر چشمگیری بر توزیع دما و بازده اقتصادی داشته باشد. سرخط نتایج این پژوهش به صورت زیر است:

- تأیید صحت مدل CFD با مقایسه داده های تجربی و میانگین خطای  $8/4$  درصد بوده که می تواند نتایج مستخرج از شبیه سازی را اعتبار دهد.
- کمترین میانگین دمایی در گلخانه با ارتفاع  $4/2$  و بیشترین آن مربوط به گلخانه  $8/5$  متری محاسبه گردید.
- کمترین و بهترین مقدار شاخص ضریب تغییرات دمایی که شرایط مطلوب برای رشد گیاهان را موجب خواهد شد، در گلخانه با ارتفاع  $6/5$  متری رخ می دهد.
- پتانسیل افزایش راندمان رشد تا  $30\%$  تحت شرایط حرارتی بهینه در سراسر فضای گلخانه می تواند رخ دهد.
- بهترین آنالیز اقتصادی در ارتفاع  $6/5$  متر با  $NPV 480,000$   $\approx$  دلار به ازای هر هکتار و دوره بازگشت سرمایه  $4/2$  سال است.
- کاهش انتشار  $CO_2$  تا  $15\%$  نسبت به ارتفاع  $8/5$  متری و کاهش  $30\%$  ریسک نقاط سرد در فضا برای گلخانه  $6/5$  متر است.
- ایجاد تغییرات هندسی در ارتفاع تاج گلخانه به عنوان یک راهکار ساده و مؤثر برای کاهش گرادیان دمایی پیشنهاد می گردد.
- با توجه به تنوع اقلیمی ایران، پیشنهاد می شود یافته های این تحقیق برای شرایط آب و هوایی خاص کشور اعتبارسنجی شود. شرایط دمایی و تابشی مطالعه حاضر (حدود  $45^\circ C$  و تابش  $610 W/m^2$ ) با اوایل فصل تابستان در اقلیم گرم و

## مراجع

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "The future of food and agriculture: Trends and Challenges", 2017, FAO.
- [2] Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran, "Iran annual agricultural statistic", 2015; Available from: [www.maj.ir](http://www.maj.ir).
- [3] The Financial Tribune, "The Ministry of Agriculture Plan to Transfer All Vegetable Farms to Greenhouses", Financ Trib, 2017.
- [4] Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., "Global food demand and the sustainable intensification of agriculture", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 108, No. 50, pp. 20260-20264, 2011, <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>.
- [5] Gruda, N., "Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption", Critical Reviews in Plant Sciences, Vol. 24, No. 3, pp. 227-247, 2005, <https://doi.org/10.1080/07352680591008628>.
- [6] Steinfeld, H., Gerber, P., "Livestock production and the global environment: consume less or produce better?", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 43, pp. 18237-18238, 2010, <https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107>.
- [7] Bournet, P.-E., Boulard, T., "Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 74, No. 2, pp. 195-217, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>.
- [8] Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., "Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Modelling and Design of Ventilation Systems in the Agricultural Industry: A Review", Bioresource Technology, Vol. 98, No. 12, pp. 2386-2414, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>.
- [9] Rong, L., Nielsen, P.V., Bjerg, B., Zhang, G., "Summary of best guidelines and validation of cfd modeling in livestock buildings to ensure prediction quality", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 121, pp. 180-190, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.005>.
- [10] Kumar, K.S., Tiwari, K.N., Jha, M.K., "Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: a review", Energy and Buildings, Vol. 41, No. 12, pp. 1269-1275, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.011>.
- [11] Carlini, M., Castellucci, S., Cocchi, S., Honorati, T., "Numerical modeling and simulation of pitched and curved-roof solar greenhouses provided with internal heating systems for different ambient conditions", Energy Reports, Vol. 6, pp. 146-154, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.013>.
- [12] Sapounas, A., Nikita-Martzopoulou, C., Bartzanas, T., Kittas, C., "Aspects of CFD modelling of a fan and pad evaporative cooling system in greenhouses", International Journal of Ventilation, Vol. 6, No. 4, pp. 379-388, 2008, <https://doi.org/10.1080/14733315.2008.11683810>.
- [13] Nauta, A., Leiva, F., Le, I., Le, K., Gracia, E., "A new greenhouse energy model for predicting the year-round interior microclimate of a commercial greenhouse in ontario, canada", Information Processing in Agriculture, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2023.05.003>.
- [14] Kim, R.-w., Lee, I.-b., Kwon, K.-s., Ha, T., Hong, S.-w., "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, Vol. 207, pp. 33-58, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.007>.
- [15] Mahmood, F., Govindan, R., Nielsen, P.V., "Data-Driven robust model predictive control for greenhouse temperature control and energy utilisation assessment", Applied Energy, Vol. 343, pp. 121190, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121190>.
- [16] Bournet, P.-E., Boulard, T., "Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 74, No. 2, pp. 195-217, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>.
- [17] Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Peña, A.A., Gil, J.A., "Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 72, No. 2, pp. 69-86, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.03.002>.
- [18] Jolliet, O., Bailey, B.J., "The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison", Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 58, No. 1-2, pp. 43-62, 1992, [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90110-3).
- [19] Stanghellini, C., "Environmental control of greenhouse crop transpiration", Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 51, pp.

- 297-311, 1992, [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80047-7](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80047-7).
- [20] Farber, K., Baggio, P., Scattolini, M., Schiavon, A., "A numerical study of a greenhouse CFD simulation including radiation heat transfer and transpiration", International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, Vol. 9, No. 3, pp. 161-168, 2017, <https://doi.org/10.1504/IJESMS.2017.085277>.
- [21] Boulard, T., Wang, S., "Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 34, No. 1-3, pp. 173-190, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00186-5).
- [22] Saberian, A., Sajadiye, S.M., "Assessing the variable performance of fan-and-pad cooling in a subtropical desert greenhouse", Applied Thermal Engineering, Vol. 179, p. 115672, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115672>.
- [23] Ganguly, A., Ghosh, S., "Modeling and analysis of a fan-pad ventilated floricultural greenhouse", Energy and Buildings, Vol. 39, No. 10, pp. 1092-1097, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.11.012>.
- [24] Chen, J., Liu, H., Wang, Y., "Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD", Advances in Mechanical Engineering, Vol. 6, p. 712740, 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/712740>.
- [25] Allali, F.E., Rodríguez, F.A., Díaz, J.M.G., Chacón, M.C.M., "CFD-Based optimization of direct evaporative cooling systems for canarian greenhouses in semi-arid regions", Energy and Buildings, Vol. 323, p. 114767, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114767>.
- [26] Sun, X., Li, H., Zhang, Y., Wang, T., "Field investigation of non-uniform environment in a venlo-type greenhouse in yangling, china", Heliyon, Vol. 9, No. 11, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21563>.
- [27] Li, H., Sun, X., Zhang, Y., Wang, T., "Effect of installation factors on the environment uniformity of multifunctional fan-coil unit system in chinese solar greenhouse", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 60, p. 104818, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104818>.
- [28] De la Torre-Gea, G., Soto-Zarazúa, G.M., López-Cruz, I.L., Rico-García, E., "Computational fluid dynamics in greenhouses: a review", African Journal of Biotechnology, Vol. 10, No. 77, pp. 17651-17662, 2011, <https://doi.org/10.5897/AJB11.2632>.
- [29] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., "Fundamentals of heat and mass transfer", Vol. 6, 1996, Wiley New York.
- [30] Bergman, T.L., Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Lavine, A.S., "Introduction to heat transfer", 2011, John Wiley & Sons.
- [31] Launder, B.E., Spalding, D.B., "The numerical computation of turbulent flows", in Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion, 1983, Elsevier, pp. 96-116.
- [32] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", 2/E, 2007, Pearson Education India.
- [33] Modest, M.F., Mazumder, S., "Radiative heat transfer", 2021, Academic Press.
- [34] Roberts, J., "Direct Solution of the Discrete Ordinates Equations", 2010, Manhattan.
- [35] Ansys, I., "ANSYS FLUENT user's guide", 2011, Canonsburg, PA.
- [36] Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., "Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future", Agricultural Water Management, Vol. 147, pp. 4-20, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>.
- [37] Xiong, K., Zhang, J., Wang, Y., Li, S., "A New Model to Predict Soil Thermal Conductivity", Scientific Reports, Vol. 13, No. 1, p. 10684, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37832-4>.
- [38] Alnefaie, K.A., Abu-Hamdeh, N.H., "Specific heat and volumetric heat capacity of some saudi soils as affected by moisture and density", in International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields, 2013.
- [39] Torres-Gomez, L.A., Yañez-Nieto, R., "Wide range determination of thermal conductivity by differential scanning calorimetry", Thermochimica Acta, Vol. 140, pp. 139-144, 1989, [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(89\)87247-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(89)87247-3).
- [40] Furukawa, G.T., McCoskey, R.E., King, G.J., "Calorimetric properties of polytetrafluoroethylene (Teflon) from 0 to 365 K", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 49, No. 4, pp. 273-276, 1952.
- [41] Zhao, Y., Wang, X., Li, H., "numerical simulation of thermal performance of glass-fibre-reinforced polymer", in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 231, 2017, IOP Publishing.
- [42] Çuvalci, H., Erbay, K., İpek, H., "Investigation of the effect of glass fiber content on the mechanical properties of cast polyamide", Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 39, pp. 9049-9056, 2014, <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1492-x>.
- [43] Wang, H., Glicksman, L., Kaminski, D., "G-Plus report to owens corning-thermal conductivity measurements of fiberglass", 2003, United States Department of Energy.

- [44] Beleño Rosero, A.A., Pareja Rodríguez, L., Andrade Fonseca, L.F., "Analysis of the chemical behavior at the molecular level of lined pipes with fluoropolymers in a sodium hypochlorite production line/bibliographic review", SN Applied Sciences, Vol. 4, No. 8, p. 238, 2022, <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05117-6>.
- [45] Shan, L., He, Y., Chen, J., Huang, M., Wang, H., "Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of chengdu plain, southwest china", Journal of Integrative Agriculture, Vol. 18, No. 2, pp. 290-300, 2019, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62071-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62071-3).