



## Energy analysis by simulating the geometry and climatic parameters of a miniature rose greenhouse in TRNSYS and validation with measured data

Vahid savabi<sup>1</sup> | Gholamreza chegini<sup>2✉</sup> | AAkbar arabhosseini<sup>3</sup>

1. Department of agrotechnologr, Faculty College of Agricultural Technology(Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [v\\_savabi@ut.ac.ir](mailto:v_savabi@ut.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of agrotechnologr, Faculty College of Agricultural Technology(Aburaihan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [chegini@ut.ac.ir](mailto:chegini@ut.ac.ir)
3. Department of Information Science, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [ahosseini@ut.ac.ir](mailto:ahosseini@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** June. 10, 2024

**Revised:** Nov. 25, 2024

**Accepted:** Dec. 2, 2024

**Published online:** Summer 2024

**Keywords:**

*Energy balance,  
Greenhouse,  
Energy simulation,  
Greenhouse design*

### ABSTRACT

Energy costs for greenhouses are one of the most important challenges for crop production in such environments. Predicting the thermal needs of a greenhouse is essential to improve its thermal performance, and achieving an optimal solution for predicting thermal behavior and energy management is very complex. In this study, a real rose greenhouse model in Pakdasht city was simulated using TRNSYS software. In this model, the greenhouse geometry as well as the ventilation, cooling, and heating systems were simulated according to their real counterparts. During a month, the temperature and relative humidity inside the greenhouse were measured using sensors installed at different points in the greenhouse. The simulated data were compared with the measured data collected each month. The difference between the simulation results and the measured data was calculated using the following criteria: root mean square error (RMSE), coefficient of variation of root mean square error (CV RMSE), and normalized mean bias error (NMBE). The temperature error inside the greenhouse was 3.5 °C and 12% for relative humidity. Using greenhouse simulation, the greenhouse energy balance was calculated for each month over a year, which showed that the largest energy losses in the greenhouse were related to the ventilation system and heat transfer through its walls. In addition, the orientation of the greenhouse played a significant role in its thermal performance, with orientation changing up to 5% of the solar energy received by the walls.

Cite this article: Savabi, V., Chegini, G.R., & Arabhosseini, A. (2024). Energy analysis by simulating the geometry and climatic parameters of a miniature rose greenhouse in TRNSYS and validation with measured data, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 55 (2),21-40. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.377097.665554>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.377097.665554>





## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The purpose of this research is to simulate the greenhouse with TRNSYS software and compare the simulation data with the experimental data of temperature and relative humidity inside the greenhouse, taking into account all the parameters affecting its thermal performance, to reduce the cooling and heating loads of the greenhouse during one year. It should also be noted that this software is able to predict thermal loads with some percentage of error compared to the actual greenhouse sample.

### Materials and methods

The studied miniature rose greenhouse is located in the Pakdasht greenhouse town with the latitude and longitude of the greenhouse location 51/51 E, 441406/35 N. The purpose of this research is to simulate the greenhouse and validate the temperature and relative humidity inside the greenhouse with the measured temperature and relative humidity during one month of the year and generalize it for the whole year. For this, the temperature and relative humidity inside the greenhouse were measured and compared with the simulated data. The geometry of the greenhouse is drawn with TRNSYS 3D Plug-in with Sketch Up along with the information given in the greenhouse plan. The interior of the greenhouse is designed with the same distribution as a real greenhouse. Each greenhouse is considered as a separate space. In TRNSYS, each space is considered a thermal zone.

### Results and discussion

The simulation greenhouse simulation diagram developed in TRNSYS is formed by several components called Types, which are configured in the Simulation Studio interface. The simulation starts at 00:00 on July 1 and ends at 00:00 on August 1, 1402, and the time interval was one hour. The building file generated by TRNBUILD was called by the Type 56 component in the TRNSYS simulation. The temperature and relative humidity of the ambient air (Pakdasht city) were simulated during one year to better understand the results. The temperature and relative humidity inside the simulated greenhouse were compared with the real data of the temperature and relative humidity of the greenhouse. Then the heat requirement of the greenhouse was investigated. Also, the energy balance for the greenhouse with the ideal cooling and heating system was also obtained so that a comparison between two types of cooling system can be made and the greenhouse can be generalized in different weather conditions of the country. Also, one of the design parameters of the greenhouse, which is its orientation, was investigated.

### Conclusion

The energy balance of a real greenhouse with a miniature rose crop was simulated in TRNSYS software and the results of the simulation data were compared with the measured data. The errors obtained from the compared results were acceptable. The energy balance for the studied greenhouse was obtained during one year. The biggest energy loss in the greenhouse was related to the ventilation system. After the cooling system, the energy losses from the walls had the largest share of the greenhouse energy losses. The orientation of the greenhouse plays an important role in the thermal performance of the greenhouse, and its orientation should be determined according to the conditions of the greenhouse and its location.

### Author Contributions

“Conceptualization, G.R. and A.A.; methodology, G.R.; software, M.S.; validation, M.S., G.R. and A.a.; formal analysis, M.S.; investigation, G.R.; resources, A.A.; data curation, X.X.; writing—original draft preparation, M.S.; writing—review and editing, M.S.; visualization, A.A.; supervision, G.R.; project administration, G.R.; funding acquisition, M.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

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

### Data Availability Statement

The measured data from the Jafari greenhouse located in the Gulfam greenhouse town was used.

### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the generous assistance of Mr. Jafari, the greenhouse manager, as well as the agricultural technical group.

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

**Ethical considerations**

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

**Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

## تحلیل انرژی با شبیه‌سازی هندسه و پارامترهای اقلیمی گلخانه رز مینیاتوری در TRNSYS و اعتبارسنجی با داده‌های اندازه‌گیری شده

وحید ثوابی<sup>۱</sup> | غلامرضا چگینی<sup>۲</sup> | اکبر عرب حسینی<sup>۳</sup>

۱. گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [vsavabi@ut.ac.ir](mailto:vsavabi@ut.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [chegini@ut.ac.ir](mailto:chegini@ut.ac.ir)

۳. گروه فنی کشاورزی، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [ahosseini@ut.ac.ir](mailto:ahosseini@ut.ac.ir)

| اطلاعات مقاله   | چکیده   |
|---|---|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی   | تامین هزینه انرژی گلخانه از مهمترین چالش‌های تولید محصولات در گلخانه می‌باشد. لذا برای بهبود عملکرد حرارتی گلخانه پیش‌بینی نیاز حرارتی گلخانه ضروری است و دستیابی به یک راهکار مطلوب برای پیش‌بینی رفتار حرارتی و مدیریت انرژی بسیار پیچیده است. در این پژوهش، مدل یک گلخانه واقعی گل رز در شهر پاکدشت با نرم‌افزار TRNSYS شبیه‌سازی شده است. در این مدل، هندسه گلخانه، سیستم‌های تهویه، سرمایشی و گرمایشی مطابق نمونه واقعی آن شبیه‌سازی شده است. در طول یک ماه، دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه با استفاده از حسگرهایی که در نقاط مختلف گلخانه نصب شده بودند اندازه‌گیری شد. داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در طول یک ماه مقایسه شدند. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده با معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا ((RMSE)، ضریب تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا ((CV RMSE و میانگین خطای بایاس نرمال شده ((NMBE محاسبه شدند. میزان خطا برای دمای داخل گلخانه ۳/۵ درجه سلسیوس و برای رطوبت نسبی داخل گلخانه ۱۲ درصد بود. با استفاده از شبیه‌سازی گلخانه موازنه انرژی برای گلخانه در طول یک سال به تفکیک هر ماه محاسبه شد و مشخص شد که بیشترین تلفات انرژی در گلخانه مربوط به سیستم تهویه و انتقال حرارت از دیوارهای آن می‌باشد و جهت گیری گلخانه نقش مهمی در عملکرد حرارتی آن داشت و انرژی خورشیدی دریافتی از دیوارها را تا ۵٪ تحت تاثیر قرار داد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۱   |   |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۵   |   |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۱۲  |   |
| تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۳  |   |
| واژه‌های کلیدی:<br>موازنه انرژی،<br>گلخانه،<br>شبیه‌سازی انرژی،<br>طراحی گلخانه |   |

استناد: ثوابی وحید؛ چگینی، غلامرضا؛ و عرب حسینی، اکبر (۱۴۰۲). تحلیل انرژی با شبیه‌سازی هندسه و پارامترهای اقلیمی گلخانه رز مینیاتوری در TRNSYS و اعتبارسنجی با داده‌های اندازه‌گیری شده، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران*، ۵۵ (۲)، ۴۰-۲۱.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.377097.665554>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.377097.665554>

## مقدمه

تولید محصول در گلخانه با کنترل شرایط محیطی موجب تولید پایدار محصولات کشاورزی می شود که به طور گسترده در بسیاری از نقاط جهان مورد استفاده قرار گرفته است (Fox et al., 2019; Canalci et al., 2013). گلخانه یک محیط بسته و شفاف است که با جذب نور خورشید و شرایط اقلیمی مناسب و محافظت از عوامل خارجی می تواند محصول خاص را در زمان‌های مختلف با کیفیت و کمیت بالا تولید کند و ضریب امنیت غذایی را بالا ببرد (Taki & Yildizhan, 2018; Baddadi et al., 2019). از جمله هزینه‌های بالای تولید در محصولات گلخانه ای مصرف بالای انرژی در فرآیند گرمایش و سرمایش گلخانه است. تا جایی که نزدیک به ۹۰ درصد انرژی کل مصرفی گلخانه صرف تامین نیاز سرمایشی و گرمایشی گلخانه می شود. پیش‌بینی نیاز انرژی گلخانه نقش اساسی در بهبود عملکرد حرارتی آن دارد و مدیریت انرژی یکی از چالش‌های اصلی گلخانه است. مدل‌ها و ابزارهای مختلفی برای محاسبه نیازهای گرمایشی و سرمایشی در گلخانه‌ها استفاده شده است. پارامترهای کلیدی طراحی که بر رفتار حرارتی و تامین انرژی گرمایش و سرمایش یک گلخانه تأثیر می‌گذارد عبارتند از: سازه گلخانه، جهت گیری و هندسه گلخانه، پوشش و میزان تغییرات پارامترهای اقلیمی محیط اطراف گلخانه می‌باشد (Choab et al., 2019). دمای هوای داخل گلخانه عمدتاً به شرایط آب و هوایی بیرون (دمای محیط و تابش خورشیدی) و پارامترهای طراحی گلخانه بستگی دارد (Choab et al., 2019). برای ساخت یک مدل حرارتی کامل، برآورد دقیق تابش خورشیدی و ضرایب انتقال حرارت بسیار مهم است، این پارامترها به طور قابل توجهی بر موازنه انرژی و جرم گلخانه تأثیر می‌گذارد (Ahamed et al., 2016; Taki et al., 2016). شکل و جهت گلخانه نیز تأثیر قابل توجهی بر جذب انرژی تابشی خورشید دارد که در نهایت بر دمای هوای داخل گلخانه تأثیر می‌گذارد (Chen et al., 2018; Stanciu et al., 2016). تحلیل انرژی گلخانه با محصول بسیار پیچیده است. (Vadiei et al., 2011; Vadiei et al., 2013). انواع روش‌ها و نرم افزارهای مختلف برای شبیه‌سازی و مکانیسم‌های انتقال گرما و جرم داخل گلخانه وجود دارد. از جمله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی EnergyPlus و TRNSYS می‌توانند برای پیش‌بینی و تخمین بارهای انرژی و شبیه‌سازی رفتار حرارتی اقلیم داخل گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرند (Bambara & Athienitis, 2019; Choab et al., 2019). این نرم افزارها عملکرد بالایی در زمینه تحلیل انرژی و پیش‌بینی بار حرارتی گلخانه دارند (Mohsenipour et al., 2020; Mashonjow et al., 2013).

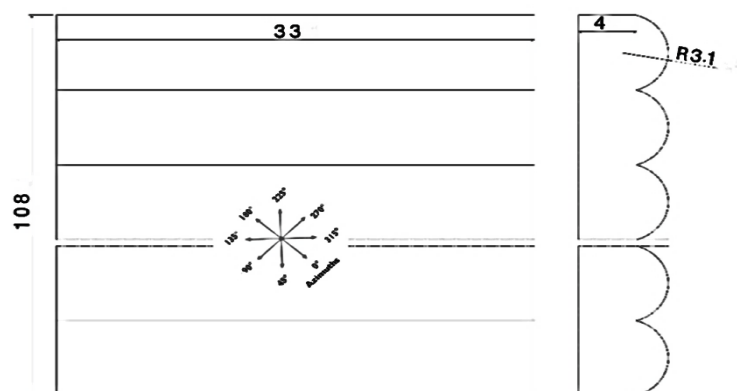
Ahmed et al یک مدل حرارتی شبه پایدار برای تعیین بار گرمایش یک گلخانه واقع در کانادا بدست آوردند. در مطالعه ای دیگر، مدل حرارتی برای گلخانه های خورشیدی سبک چینی (CSGHEAT) برای تخمین نیاز انرژی گرمایی استفاده کردند و ریشه نسبی میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد خطا معادل ۸/۷ و ۱۱/۵ درصد به دست آوردند. در مقایسه مدل گلخانه چینی با مدل TRNSYS نرخ نفوذ ثابت، افزایش رطوبت و پوشش حرارتی خطای بالایی در برآورد نیاز گرمایش حاصل شد (Ahamed et al., 2020). ها و همکاران یک مدل شبیه‌سازی انرژی ساختمان (BES) برای تعیین نیاز انرژی گلخانه‌ای تحت شرایط آب و هوایی کره با استفاده از TRNSYS بدست آوردند (Ha et al., 2015). Banakar et al با استفاده از TRNSYS عملکرد حرارتی سه نوع گلخانه باز، نیمه باز و بسته را مورد بررسی قرار دادند و نیاز گرمایشی و سرمایشی را مقایسه کردند (Banakae et al., 2021). Chob et al با استفاده از نرم افزار TRNSYS نتیجه گرفتند که بهینه‌ترین جهت گیری گلخانه در مراکش شرقی-غربی با مدل هندسه تونلی می‌باشد (Choab et al., 2020).

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی گلخانه با نرم‌افزار TRNSYS و مقایسه داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی (دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه) و برآورد بار سرمایشی و گرمایشی گلخانه در طول یک سال است. همچنین درصد خطای نرم‌افزار در پیش‌بینی بارهای حرارتی با نمونه واقعی در طول یک ماه ارزیابی شده است. گلخانه با گیاه رز مینیاتوری و با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق گیاه که تأثیر زیادی در موازنه جرم و عملکرد حرارتی گلخانه دارد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ویژگی گلخانه

گلخانه مورد بررسی در شهرک گلخانه پاکدشت، استان تهران با طول و عرض جغرافیای محل گلخانه ۵۱/۶۵۷۸۸۸ E<sup>0</sup>، ۳۵/۴۴۱۴۰۶ N<sup>0</sup>

با محصول گل رز مینیاتوری بود. در این تحقیق شبیه‌سازی گلخانه و اعتبار سنجی دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه با دما و رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده، در طول یک ماه از سال و تعمیر آن برای کل سال انجام شد. گلخانه از نوع تونلی با دو سالن مجزا به ابعاد  $۵۴ \times ۳۴$  متر و هر سالن از ۹ تونل به عرض ۶ متر و طول ۳۳ متر و یک سالن کوچک برای فرآوری و بسته بندی محصول تشکیل شده بود. جهت گلخانه نسبت به جنوب  $۱۳۵$  درجه بود. جهت گیری گلخانه و نمای داخلی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. اطراف گلخانه با دیوار آجری به ارتفاع یک متر محصور شده بود که خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل دهنده آن در جدول ۱. خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل دهنده دیوارهای گلخانه نشان داده شده است.



شکل ۱. طرح و جانمای کلی گلخانه مورد بررسی (ابعاد بر حسب متر می‌باشد)



شکل ۱. تصویر گلخانه مورد بررسی مشخصات گلخانه، شکل، بستر نوع کاور

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل دهنده دیوارهای گلخانه، (کتابخانه نرم‌افزار TRNSYS 18.5)

| جنس               | ظرفیت گرمایی $(\frac{kJ}{kg K})$ | مقاومت حرارتی $(\frac{kJ}{hmK})$ | چگالی $(\frac{kg}{m^3})$ | ضخامت (سانتی متر) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------|
| مالات             | ۱                                | ۵/۰۴                             | ۲۰۰۰                     | ۲                 |
| اجر               | ۰/۷۹                             | ۱/۲۲                             | ۷۲۰                      | ۳۵                |
| مالات             | ۱                                | ۵/۰۴                             | ۲۰۰۰                     | ۲                 |
| نرمه <sup>۱</sup> | ۱                                | ۱/۲۶                             | ۱۲۰۰                     | ۰/۵               |

کل دیواره گلخانه با پوشش پلاستیکی از جنس PE با خواص ترموفیزیکی نشان داده شده در جدول ۲ پوشیده شده بود.

جدول ۲. خواص ترموفیزیکی پوشش گلخانه، (Pedro et al., 2014)

| نوع پوشش گلخانه | g-value (%) | U-value $(\frac{W}{m^2 K})$ | ضخامت (mm) |
|-----------------|-------------|-----------------------------|------------|
| پلاستیکی PE     | ۹۲          | ۶/۲                         | ۱/۵        |

سیستم سرمایشی گلخانه فن و پد و مه پاش برای نگه داشتن رطوبت مطلوب بود که در هر سالن گلخانه ۶ عدد فن و ۳ عدد بخاری گازی (شکل ۳) با مشخصات فنی داده شده در جدول ۳ نصب شده بود. سیستم تهویه مطبوع گلخانه باید بتواند دما و رطوبت بهینه برای رشد گل رز مینیاتوری نشان داده شده در جدول ۴ را تامین کند.



شکل ۳. فن و سیستم گرمایشی مورد استفاده در گلخانه

جدول ۳. اطلاعات فنی فن و بخاری مورد استفاده در گلخانه

| ابعاد فن<br>mm | دبی هوای خروجی<br>m <sup>3</sup> /h    | سرعت پروانه<br>rpm    | توان موتور<br>hp      | سیستم تهویه   |
|----------------|--|-----------------------|-----------------------|---------------|
| ۱۳۸۰×۴۵۰×۸۰    | ۴۳۹۴۰                                  | ۴۶۷                   | ۱/۱                   |               |
| ابعاد بخاری cm | دبی هوای<br>خروجی<br>m <sup>3</sup> /h | دمای هوای خروجی<br>°C | ظرفیت حرارتی<br>kal/h | سیستم گرمایشی |
| ۱۷۸×۹۲×۱۷۸     | ۳۶۰۰۰                                  | ۹۰                    | ۲۲۰۰۰۰                | سیستم تهویه   |

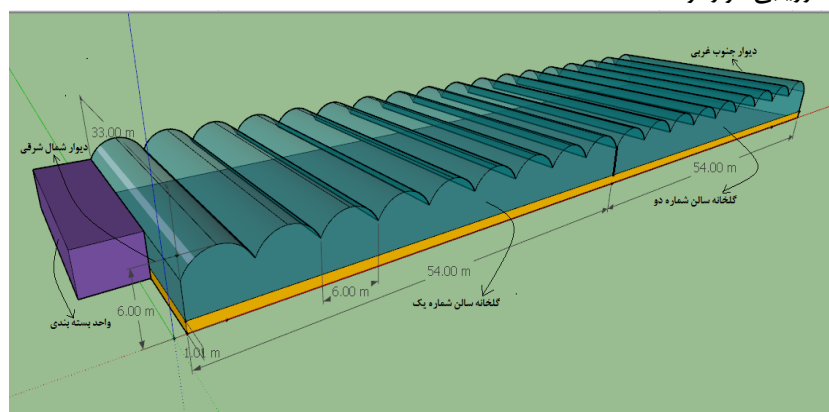
جدول ۴. دما و رطوبت نسبی مناسب برای پرورش گل رز مینیاتوری

| دما<br>(°C) | رطوبت نسبی<br>(%) | زمان    |
|-------------|-------------------|---------|
| ۲۰~۲۶       | ۶۰~۷۰             | طول روز |
| ۱۷~۱۹       | ۶۰~۸۰             | طول شب  |

## مواد و روش‌ها

### هندسه، گلخانه

مشخصات ابعادی و هندسی گلخانه (شکل ۴) در قالب مدل هندسی با Plug-in ، Sketch Up طراحی شد و اطلاعات پلن گلخانه به TRNSYS 3D انتقال داده شد. در این ترسیم هرسالن گلخانه به عنوان یک فضای مجزا در نظر گرفته شد و در TRNSYS به عنوان یک منطقه حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۴. ابعاد و مشخصات هندسی گلخانه طراحی شده در Sketch Up

### ایجاد مدل TRANBUILD

برای طراحی فایل TRANBUILD نیاز هست داده‌های مهم گلخانه همچون سازه ها، در و پنجره ها، انرژی تولید داخلی، تهویه و درز و نفوذ تعریف شود که در ذیل به هر کدام از آنها پرداخته شده است.

#### سازه‌ها

ضخامت کل و ضرایب انتقال حرارت کلی (U-value) هر دیوار مطابق نمونه واقعی گلخانه با توجه به فایل کتابخانه‌ای TRANBUILD در جدول ۳ نشان داده شده است. میزان جذب بیرونی سقف ۰/۶۳ در نظر گرفته شد. ضرایب همرفت بیرونی دیوارهای بیرونی با روش ASHRAE/DOE-2 که ترکیب مدل‌های MoWiTT و Blast است و ضریب را به عنوان تابعی از دمای محیط، سرعت باد و جهت باد محاسبه می‌کند، بدست آمد (Eguía-Oller et al., 2021). مدل ASHRAE/DOE-2 برای محاسبه ضریب جریان همرفتی با انتقال گرمای تشعشی ثابت  $5/11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است (Yazdaniyan, & Klems 1993).

$$h_o = 8.23 + 3.83V - 0.047V^2 \quad \text{رابطه ۱} \quad \text{برای سطوح صاف}$$

$$h_o = 11.58 + 6.806V \quad \text{رابطه ۲} \quad \text{برای سطوح زبر}$$

V سرعت باد (متر بر ثانیه)

ضریب همرفت بیرونی دیوارها  $11/36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  در نظر گرفته شد که یک مقدار متوسط بین ضرایب همرفت معمولی درون و بیرون گلخانه است. برای محاسبه ضرایب همرفت داخلی، گزینه محاسبه داخلی TRANBUILD انتخاب شد. دیوار جنوب شرقی تا ارتفاع یک متر دیوار از آجر و تا ارتفاع ۳ متر پد نصب شده بود که در محاسبات پد نیز به عنوان دیوار در نظر گرفته شد.

جدول ۳- ضخامت و ضریب انتقال حرارت کل هر دیوار

| ضخامت<br>m | U<br>W/m <sup>2</sup> ·K | مساحت<br>m <sup>2</sup> | سازه                   |
|------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| ۰/۴        | ۰/۳۳۹                    | ۱۱۰                     | دیوار بیرونی شمال شرقی |
| ۰/۴        | ۰/۳۳۹                    | ۷۲                      | دیوار بیرونی شمال غربی |
| ۰/۴        | ۰/۳۳۹                    | ۱۱۰                     | دیوار بیرونی جنوب شرقی |
| ۰/۲۵       | ۰/۰۴۵                    | ۳۴۰                     | دیوار بیرونی جنوب شرقی |
| ۰/۴        | ۰/۳۳۹                    | ۷۲                      | دیوار بیرونی جنوب غربی |
| ۰/۴        | ۰/۳۳۹                    | ۱۳۶                     | دیوار داخلی            |
| ۰/۵۵       | ۰/۳۱۳                    | ۳۵۶۴                    | کف گلخانه              |

#### در و پنجره‌ها

درهای داخلی بین دو سالن گلخانه به صورت پنجره در Sketch Up ترسیم و با شناسه شیشه ای کتابخانه "۱۰۰۰۱" TRANBUILD، به عنوان "بدون شیشه" یا معادل باز بودن است در نظر گرفته شد. پوشش گلخانه مشابه پنجره با ضریب انتقال حرارت (U-value)،  $W/m^2$  ۶/۲ K و ضریب افزایش حرارت خورشیدی (g-value) ۰/۹۲ در نظر گرفته شد (Pedro et al., 2014). با توجه به اینکه مدل خاصی برای پنجره ها در کتابخانه TRANBUILD وجود نداشت از نرم افزار Window 7.8 برای توسعه مدل های پنجره های مورد نیاز TRANBUILD استفاده شد. شکل ۵ فلوچارت طراحی اجزاء مختلف گلخانه در TRANBUILD نشان داده شده است.

#### انرژی تولیدی داخلی<sup>۱</sup>

همه انرژی هایی که در داخل گلخانه تولید می شود انرژی داخلی گلخانه است. این انرژی ها شامل انرژی گرمایی تولید شده با دستگاه ها و لوازم الکتریکی (پمپ، سیستم روشنایی، مانیتور، موتور فن و ... به غیر از سیستم گرمایشی) و انرژی تبخیر و تعرق کارگران داخل گلخانه است. انرژی داخلی گلخانه در مقایسه با انرژی گرمایی مصرفی گلخانه ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. البته تبخیر و تعرق گیاهان به صورت نامحسوس انرژی داخلی گلخانه را افزایش می دهد و در طول شب و روز متفاوت است و به دوره رشد و تراکم گیاه در گلخانه بستگی دارد. در شبیه سازی مقدار تبخیر و تعرق بین ۳۰ الی ۴۰ کیلوگرم در ساعت در نظر گرفته شد (کیخای و همکاران، ۱۳۹۹).

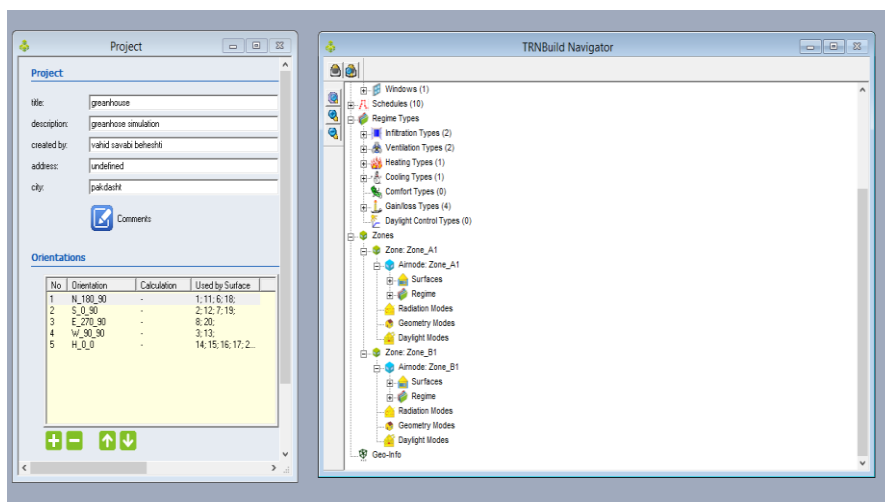


### تهویه

در این گلخانه از تهویه مکانیکی به عنوان سیستم سرمایشی تبخیری گلخانه استفاده شد. در این سیستم در فصل گرم دمای خشک گلخانه به میزان ۲۲ الی ۲۴ کاهش می یابد. مقدار گرمای انتقالی از یا به گلخانه از محیط از رابطه ۳ **Error! Reference source not found.** به دست می آید (Dimitropoulou et al., 2023).

$$\dot{Q}_{ven}[kW] = \dot{m}_{in} [kg/s] * C_{air} [kJ/kgK] * (T_{in} - T_{out}) \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳  $\dot{m}_{in}$  و  $C_{air}$  به ترتیب نرخ جرم ورودی و ظرفیت گرمای ویژه هوا است.  $T_{in}$  و  $T_{out}$  به ترتیب دمای هوای ورودی و خروجی گلخانه می باشد.



شکل ۵. فلوجارت طراحی اجزاء مختلف گلخانه در TRNBUILD

### درز و نفوذ

درز و نفوذ، نرخ جابجایی هوا از روزنه‌ها و درزهای گلخانه است که محاسبه دقیق آن بسیار مشکل بوده و نیازمند آزمایشهای دقیق می باشد. ASHREA یک مدل نیمه تجربی برای اندازه گیری درز و نفوذ ارائه داده که روش موسوم به  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  است. این مدل نسبت به مدل‌های دیگری که درز و نفوذ را بر اساس فشار دینامیکی باد، نیروهای شناوری و ویژگی‌های پوشش محاسبه می کنند ساده تر است. رابطه ۴ مقدار جابجایی هوا از درز و نفوذ را با مدل ASHREA نشان می دهد که در آن پارامترهای  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  با توجه به نوع ساختمان از جدول استاندارد ASHREA به دست می آید (ASHREA, 1989:22).

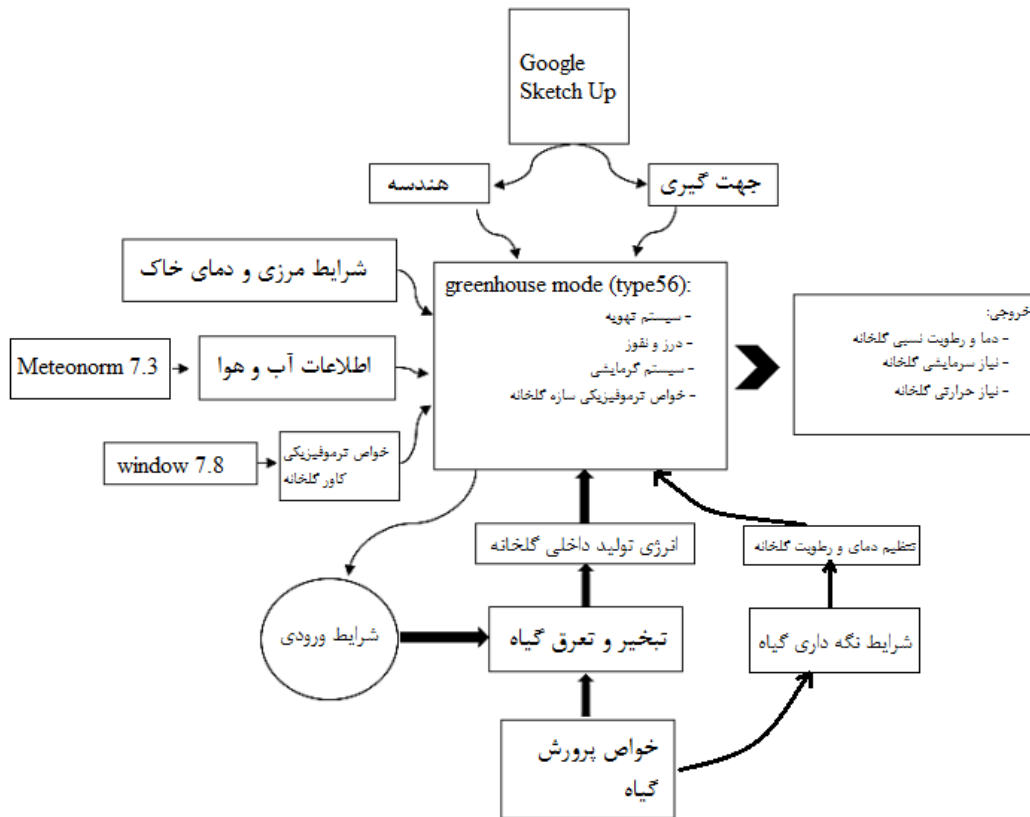
$$ACH = K_1 + K_2 \times (T_{zone} - T_{amb}) + K_3 \times WindSpeed \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه شماره ۴  $T_{zone}$  دمای داخل گلخانه،  $T_{amb}$  دمای محیط و ضرایب  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۴۹ در نظر گرفته شده است.

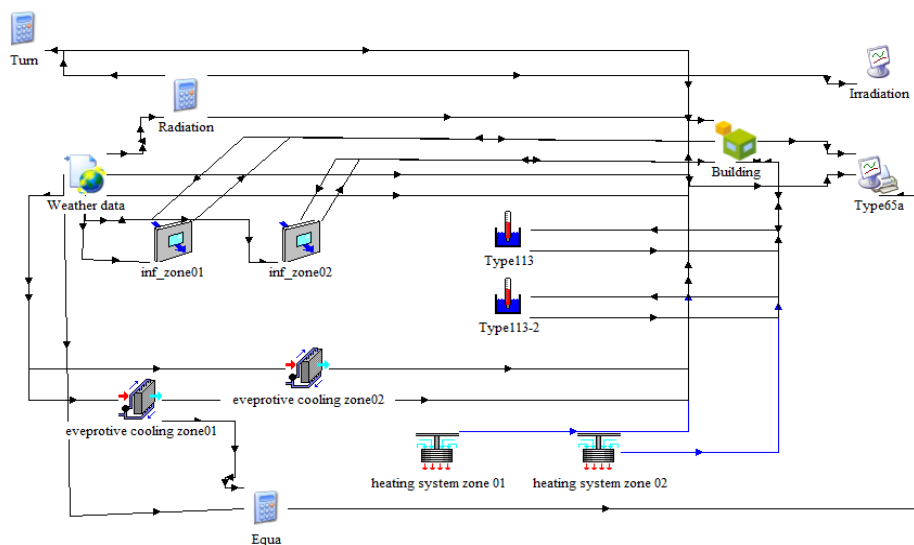
### شبیه سازی گلخانه در TRNSYS

دیگرام شبیه سازی گلخانه که شامل جهت و هندسه گلخانه، اطلاعات آب و هوایی، شرایط مرزی و سایر پارامترهای تاثیر گذار بر گلخانه در شکل ۶ و مراحل شبیه سازی توسعه یافته در TRNSYS در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷ چندین مؤلفه به نام Types بکار رفته که در Simulation Studio پیکربندی شده اند. شبیه سازی از ۱ تیر ساعت ۰۰:۰۰ شروع و با فاصله زمانی یک ساعت در ساعت ۰۰:۰۰:۰۱ مرداد ۱۴۰۲ به پایان رسید. فایل گلخانه تولید شده توسط TRNBUILD توسط مؤلفه "Type 56" در شبیه سازی TRNSYS فرا خوانده می شود. در این مؤلفه داده های اندازه گیری شده از سیستم تهویه، آب و هوا، سازه گلخانه، سیستم های گرمایش و سرمایش فرا خوانده شده است. همچنین دمای محیط، رطوبت نسبی محیط، دمای زمین، سرعت و جهت باد و دمای موثر آسمان برای تشعشعات موج بلند مستقیماً به Type 56 نیز متصل شده است. پردازشگر تابش خورشیدی "Type15-2" برای محاسبه تابش خورشیدی در جهت های مختلف استفاده شد. "Type15-2" مجموع تشعشعات تابشی، تشعشعات پراکنده و زاویه برخورد آنها در چهار سطح با جهت گیری

مختلف گلخانه و با توجه به تابش افقی جهانی اندازه‌گیری شده و تابش پراکنده محاسبه می‌کند. سیستم تهویه با مولفه های دیگری در نرم افزار فراخوانده شد. در این مولفه هوا با دما و رطوبت محیط وارد سیستم شده و با افزایش رطوبت نسبی هوا و کاهش دمای خشک به گلخانه وارد می‌شود. سیستم گرمایشی با همان مشخصات بخاری گلخانه در شبیه‌سازی و سیستم کنترلی با توجه به دمای مناسب رشد گیاه مطابق جدول های ۳ و ۴ در نظر گرفته شد.



شکل ۶. دیاگرام شبیه‌سازی گلخانه در TRNSYS



شکل ۷. روند شبیه‌سازی گلخانه در TRNSYS Studio

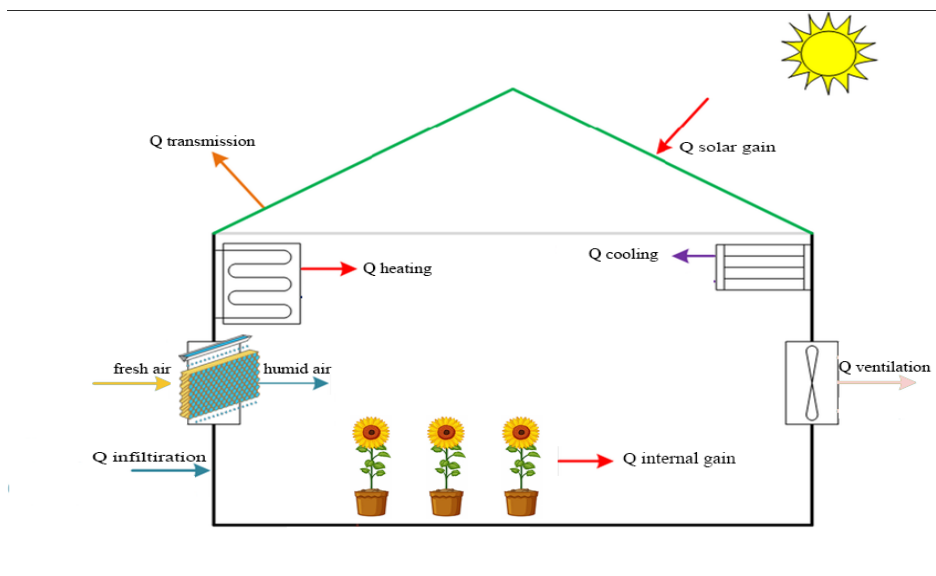
### موازنه انرژی برای گلخانه

در شکل ۸ شماتیکی از انرژی های ورودی و خروجی به گلخانه نشان داده شده است. در موازنه انرژی گلخانه سطح بیرونی گلخانه به

عنوان مرز در نظر گرفته شد و در رابطه ۵ موازنه حرارتی کلی گلخانه ارائه شده است. (Seem, 1987). روابط  $\dot{Q}_{gain}$  و  $\dot{Q}_{ven}$ ،  $\dot{Q}_{inf}$ ،  $\dot{Q}_{solar}$  در بالا و روابط  $\dot{Q}_{solar}$  در ادامه توضیح داده شده است.

$$\frac{dQ_{air}}{dt} + \dot{Q}_{heat} - \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{ven} + \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{gain} + \dot{Q}_{solar} = 0 \quad kJ/h \quad \text{(رابطه ۵)}$$

|   |                       |
|---|-----------------------|
| تغییر انرژی داخلی گلخانه، $kJ/h$ :                    | $\frac{dQ_{air}}{dt}$ |
| انرژی گرمایشی، $kJ/h$ :                               | $\dot{Q}_{heat}$      |
| انرژی سرمایشی، $kJ/h$ :                               | $\dot{Q}_{cool}$      |
| انرژی دریافتی از درز و نشتی، $kJ/h$ :                 | $\dot{Q}_{inf}$       |
| انرژی دریافتی از تهویه، $kJ/h$ :                      | $\dot{Q}_{ven}$       |
| انرژی انتقالی از دیواره‌ها، $kJ/h$ :                  | $\dot{Q}_{trans}$     |
| انرژی دریافتی از داخل گلخانه، $kJ/h$ :                | $\dot{Q}_{gain}$      |
| جذب انرژی خورشیدی در تمام سطوح داخلی گلخانه، $kJ/h$ : | $\dot{Q}_{solar}$     |



شکل ۸. شماتیکی از انرژی های ورودی و خروجی گلخانه

در یک گلخانه، منبع اصلی افزایش گرما تابش خورشید است. به عبارت دیگر گلخانه را می توان به عنوان کلکتور خورشیدی در نظر گرفت. تابش خورشیدی عبوری از مواد پوشش گلخانه با رابطه (۶) محاسبه می شود (Duffie & bechman, 1974).

$$\dot{Q}_{solar} = [A_i + I_i(t)]\tau_i \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در رابطه ۶  $A_i$ ،  $I_i$  و  $\tau_i$  به ترتیب مساحت سطح گلخانه، تابش خورشید کل و ضریب انتقال تابش پوشش گلخانه است. برای محاسبه تابش خورشیدی کل روی یک سطح شیبدار، مدل های مختلفی وجود دارد که در نرم افزار TRNSYS از مدل آسمان همسانگرد استفاده شده است. بر اساس این مدل، اگر مجموع تابش پراکنده و منعکس شده از زمین همسانگرد در نظر گرفته شود، مجموع تابش پراکنده از آسمان و تابش منعکس شده از زمین بر روی یک سطح شیبدار، صرف نظر از جهت آنها یکسان است (Duffie & bechman, 1974). بنابراین، مجموع تابش در یک سطح شیبدار برابر است با مجموع سهم پرتو و تابش پراکنده در یک سطح افقی. پس از چند ساده سازی، مقدار تابش خورشیدی کل در یک سطح شیبدار را می توان با رابطه (۷) به دست آورد (Liu & Jordan, 1963).

$$I_i = I_b \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z} + I_d \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad \text{رابطه ۷}$$

که:  $\beta$ ،  $\theta_i$  و  $\theta_z$ ، به ترتیب زاویه شیب سطح، زاویه تابش پرتو بر یک سطح و زاویه اوج خورشید هستند. که مقادیر  $\cos\theta_z$  و  $\cos\theta_i$  از روابط ۸ و ۹ بدست می آیند.

$$\cos\theta_i = \cos\beta \sin\delta \sin\varphi - \cos\varphi \cos\gamma \sin\delta \sin\beta + \cos\varphi \cos\delta \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\omega \cos\gamma + \cos\delta \sin\beta \sin\omega \sin\gamma \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\delta \sin\varphi \quad \text{رابطه ۹}$$

که:  $\omega$ ،  $\delta$ ،  $\gamma$  و  $\varphi$  به ترتیب زاویه ساعت، زاویه انحراف خورشید، زاویه نسبت به جنوب سطح و زاویه عرض جغرافیایی محلی هستند.

### تجهیزات اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه

برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه از حسگرهای مدل DHT22 استفاده شد (شکل ۹). این حسگرها در ۱۲ نقطه از هر سالن در ارتفاع ۱/۶ متری نصب شد. داده‌های این حسگرها به صورت مجزا و آنلاین به سیستم پردازشگر ارسال می‌شود. در اعتبار سنجی، میانگین دما و رطوبت نسبی حسگرهای هر سالن گلخانه در محاسبات استفاده شد.



شکل ۹. سیستم پردازشگر، حسگر دما و رطوبت استفاده شده در سالن های گلخانه

### معیارهای خطا

اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده، به کمک معیارهای خطای ارائه شده در روابط ۱۰ تا ۱۳ بدست آمد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا (CV(RMSE))، میانگین خطای بایاس نرمال شده (NMBE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب در روابط ۱۰-۱۳ نشان داده شده است. CV (RMSE) و NMBE در دستورالعمل ASHRAE 2014:14 برای اندازه‌گیری عدم قطعیت مدل‌سازی پیشنهاد شده است.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$CV(RMSE)\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

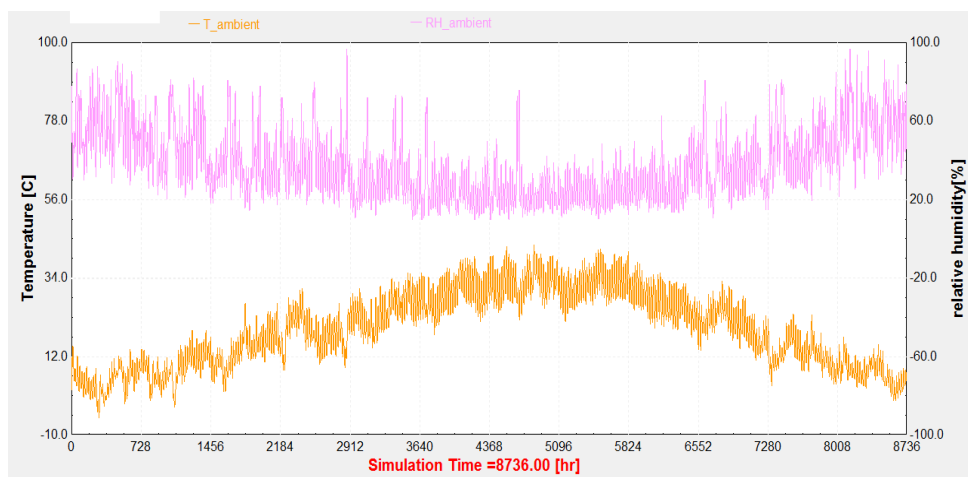
$$NMBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i)} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که:  $y_i$ ،  $\hat{y}_i$ ،  $\bar{y}$  و  $n$  به ترتیب مقدار داده تجربی، مقدار داده شبیه‌سازی شده، میانگین داده‌های تجربی و تعداد داده‌ها می‌باشد.

### شرایط آب و هوایی

شکل ۱۰ دمای و رطوبت نسبی هوای محیط (شهر پاکدشت) با طول و عرض جغرافیای  $51/657888$  E،  $35/441406$  N که با استفاده از نرم افزار meteornorm7.3 بدست آمده را نشان می دهد. اطلاعات آب و هوا شناسی نشان می دهد کمترین دمای محیط ۲ - درجه سلسیوس و بیشترین دمای محیط ۴۰ درجه سلسیوس و کمترین مقدار رطوبت نسبی در تابستان بین ۲۰ الی ۳۵ درصد و ۴۵ الی ۷۵ درصد در زمستان می باشد.



شکل ۱۰. دما و رطوبت نسبی محیط (شهر پاکدشت) در طول یک سال

### نتایج و بحث

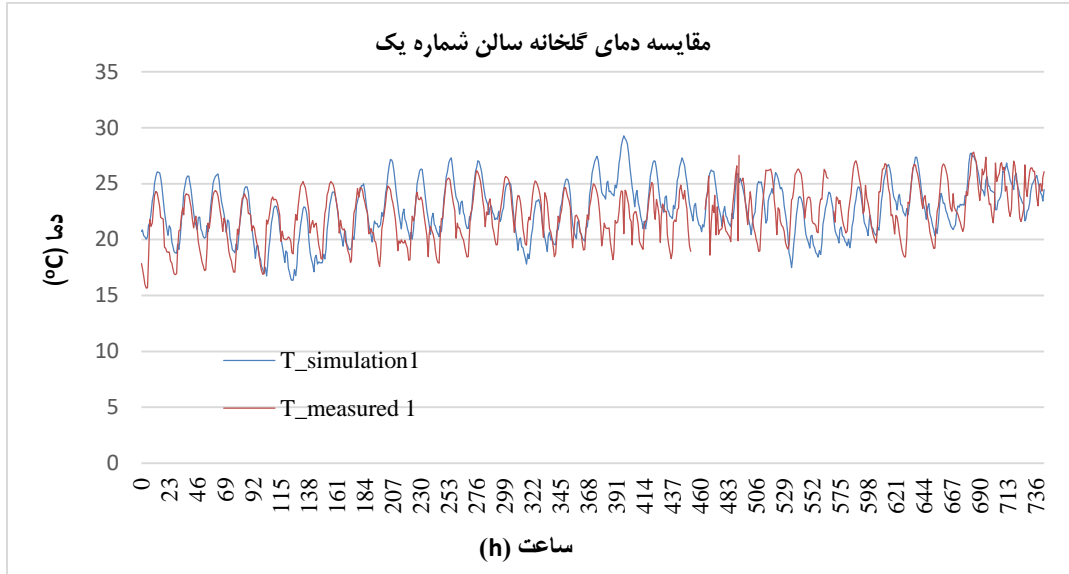
پیش بینی و اندازه گیری نیاز گرمایی یک گلخانه برای رشد یک محصول خاص از اصول اساسی طراحی آن به حساب می آید که بایستی دارای اعتبار کافی باشد. در این بخش نتایج حاصل از مقایسه دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه‌ی شبیه سازی شده با داده‌های اندازه گیری شده و خطای داده‌ها مورد بدست آمد. موازنه انرژی برای هر دو سالن گلخانه اندازه گیری و میزان انرژی مصرفی و انرژی خورشیدی جذب شده به تفکیک هر ماه بررسی شد.

#### اعتبار تجربی

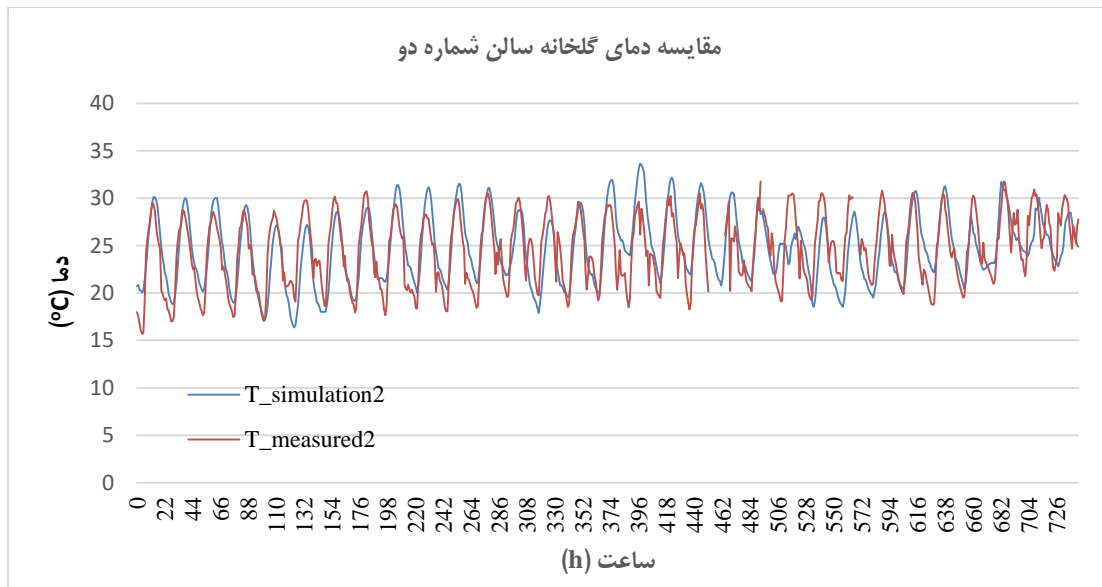
نتایج مقایسه نمودار دما و رطوبت نسبی گلخانه سالن شماره یک و دو با داده‌های اندازه گیری شده برای یک ماه (تیر ماه سال ۱۴۰۲، ۲۲ جانوری تا ۲۲ جولای سال ۲۰۲۳) در شکل های ۱۱ الی ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ و ۱۲ شکل ۱۱ T\_simulation1 دمای شبیه سازی شده و T\_measured1 دمای اندازه گیری شده می باشد.

همان طور که شکل ۱۳ و ۱۴ نشان می دهد خطای RSME برای رطوبت نسبی سالن شماره یک و دو به ترتیب ۱۲ و ۱۲/۰۲ درصد به دست آمد. در RH\_simulation1 **Error! Reference source not found.** رطوبت نسبی شبیه سازی و RH\_measured1 رطوبت نسبی اندازه گیری شده می باشد.

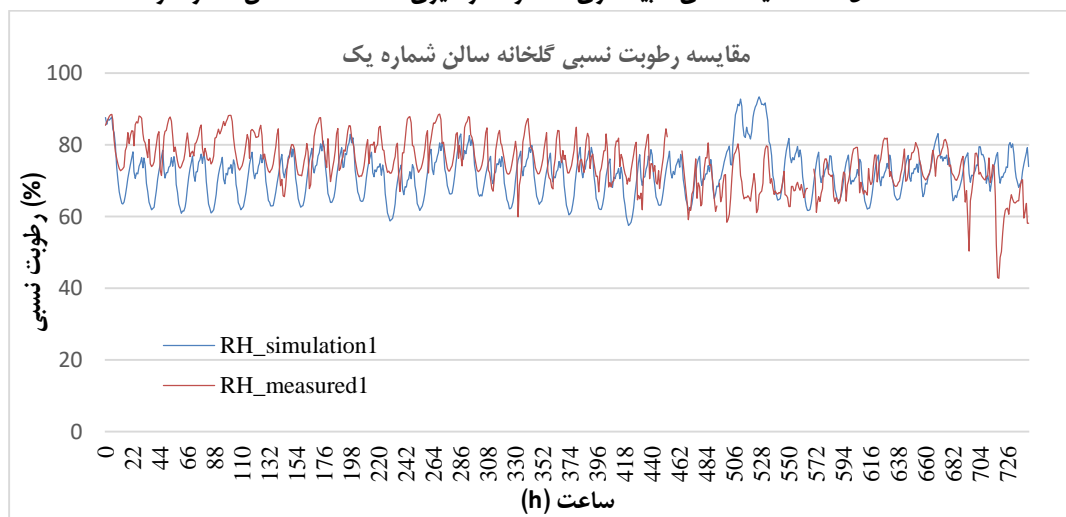
در جدول ۶ مقادیر خطای RSME، CV(RSEM) و NMBE محاسبه شده بین داده‌های اندازه گیری و شبیه سازی شده نشان داده شده است. میزان خطای هر یک از داده‌های شبیه سازی شده با داده‌های تجربی دما و رطوبت بدست آمده از مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی در جدول ۶ نشان داده شده است. خطای RSME برای دمای سالن شماره یک و دو به ترتیب ۳/۴۷ و ۳/۸۷ درجه سلسیوس به دست آمد. این خطا مربوط به تفرانس یک درجه مثبت و منفی حسگرهای دما بود. همچنین داده‌های شبیه سازی میانگین دمای کل سالن را نشان می دهد در حالی که حسگرهای دما، دمای چند نقطه را نشان می دهند. خطای رطوبت نیز ناشی از تفرانس مثبت و منفی ۵ درصد حسگرهای رطوبت نسبی و افزایش رطوبت نسبی حاصل از سم پاشی، آبیاری، تهویه طبیعی گلخانه و خطای انسانی می باشد. علاوه بر عوامل مذکور قطع شدن برق گلخانه باعث عدم امکان داده برداری و اختلاف در ارسال داده‌های آنلاین می شد.



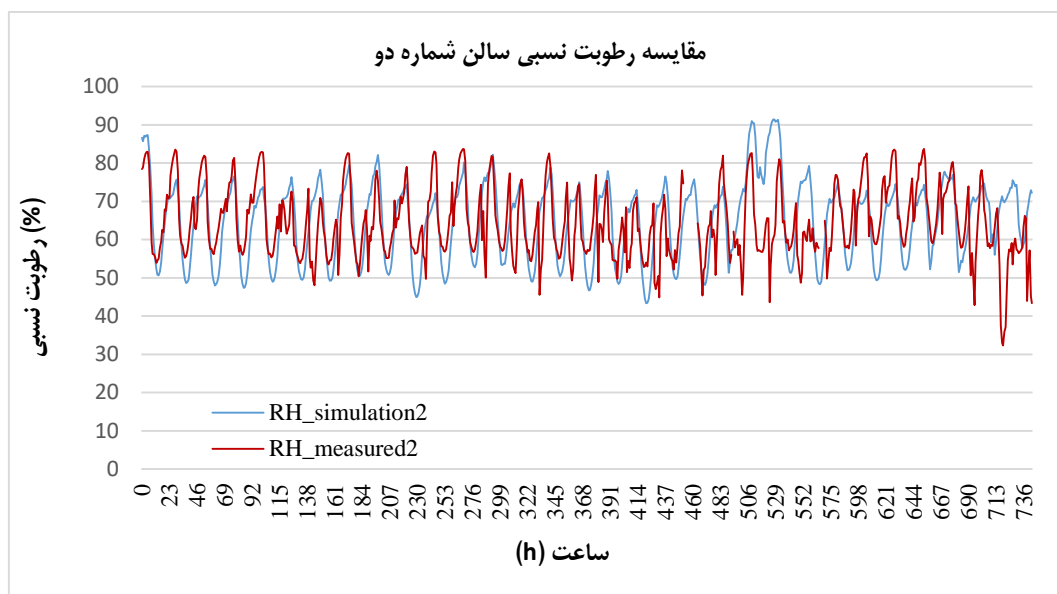
شکل ۱۱. مقایسه دمای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده گلخانه سالن شماره یک



شکل ۱۲. مقایسه دمای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده گلخانه سالن شماره دو



شکل ۱۳. مقایسه رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده گلخانه سالن شماره یک



شکل ۱۴. مقایسه رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده گلخانه سالن شماره دو

جدول ۶. مقدار خطای RSME، CV(RSEM) و NMBE محاسبه شده بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده

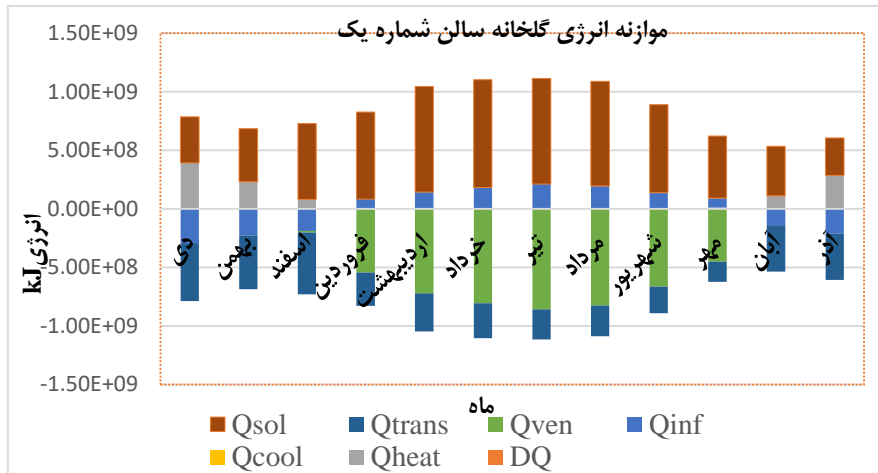
| رطوبت نسبی سالن دو | رطوبت نسبی سالن یک | دمای سالن دو | دمای سالن یک |          |
|--------------------|--------------------|--------------|--------------|----------|
| ۱۲/۰۲              | ۱۲/۰۰              | ۳/۸۷         | ۳/۴۷         | RSME     |
| ۱۶/۳۶              | ۱۶/۰۵              | ۱۶/۱۴        | ۱۶/۰۴        | CV(RSEM) |
| ۱۲/۶۸              | ۱۲/۵۱              | ۱۰/۶۴        | ۱۰/۳۷        | NMBE     |

در پژوهشی با شبیه‌سازی سه نوع گلخانه مرسوم، نیمه بسته و بسته در نرم افزار TRNSYS دما و تابش خوشید را طی ۲۴ ساعت با داده‌های تجربی مقایسه شد و نیاز حرارتی گلخانه‌ها را در نرخ‌های مختلف هوا بدست آمد (Banakar et al., 2021). Brækken et al در سال ۲۰۲۳ در بخش جنوبی اروپا با استفاده از نرم‌افزار (IDA ICE) گلخانه را شبیه‌سازی کرده و بدون اعتبار سنجی تجربی نیاز سرمایشی و گرمایشی گلخانه را مورد بررسی قرار دادند (Brækken et al., 2023).

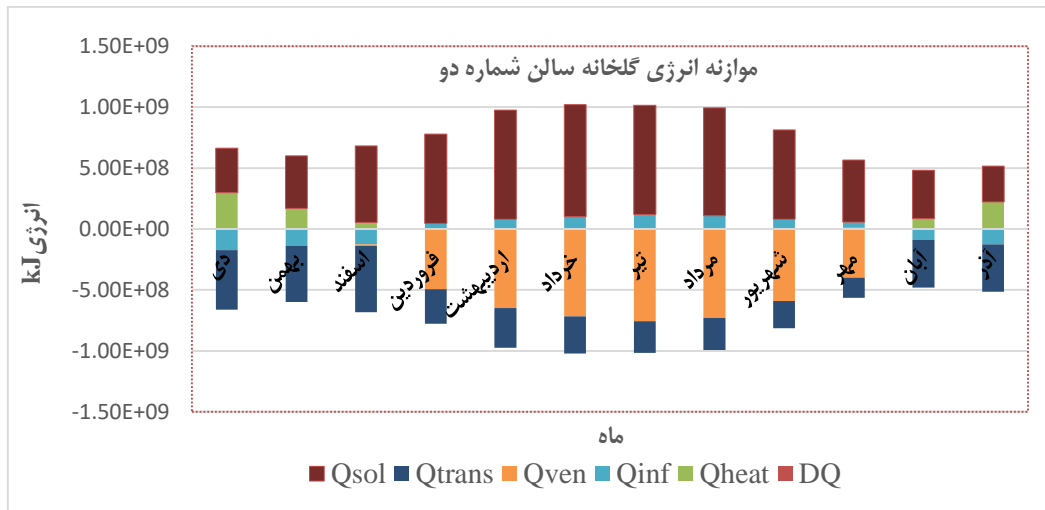
#### موازنه انرژی برای گلخانه رز مینیاتوری

نتایج موازنه انرژی گلخانه سالن شماره یک در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است بیشترین مقدار انرژی خورشیدی جذب شده در چهار ماه اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد و کمترین مقدار در ماه آذر و دی بوده است. از فروردین تا مهر گلخانه با یک سیستم سرمایشی تبخیری فن و پد دمای گلخانه را کاهش می‌داد. از آبان تا اسفند گلخانه برای تامین دمای مناسب برای رشد گیاه نیاز به سیستم گرمایشی داشت و از اواسط تا آخر اسفند نیاز به سیستم گرمایشی و سرمایشی همزمان داشت. گرمای انتقالی از دیواره‌ها در فصل زمستان به بیشترین حد رسید که بیشینه مقدار آن در دی ماه بود. انرژی انتقالی از درز و نفوذ در زمستان به دلیل دمای بیشتر گلخانه نسبت به دمای محیط منفی و در تابستان به دلیل کمتر بودن دمای گلخانه نسبت به دمای محیط به صورت مثبت نشان داده شده است. برای درک بهتر دما و رطوبت نسبی گلخانه و محیط در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

در شکل ۱۶ موازنه انرژی برای سالن شماره دو در طول یک سال به تفکیک هر ماه نشان داده شده است. باتوجه به اینکه ابعاد و مشخصه‌های هر دو گلخانه یکسان است رفتار حرارتی آنها تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشد.



شکل ۱۵. موازنه انرژی برای گلخانه سالن شماره یک در طول یک سال به تفکیک هر ماه



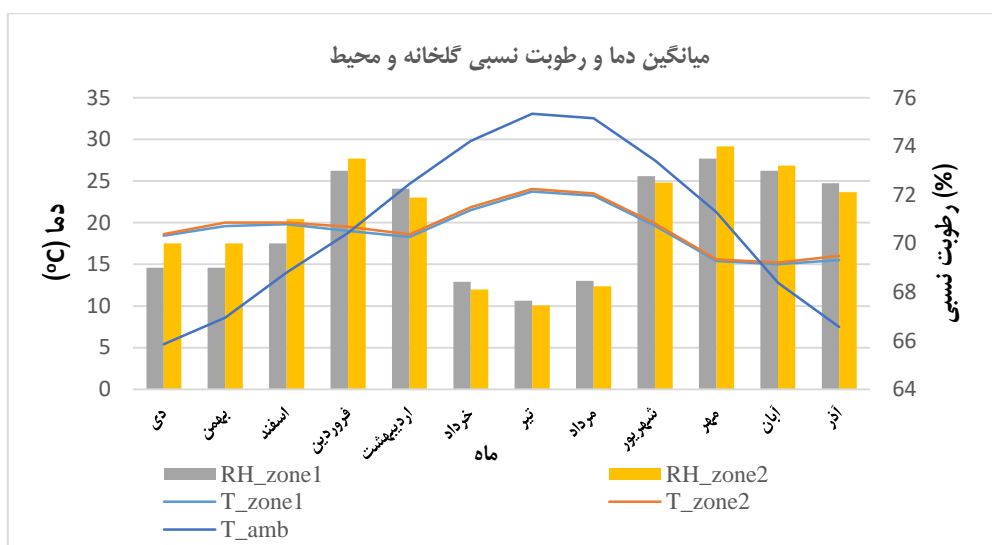
شکل ۱۶. موازنه انرژی برای گلخانه سالن شماره دو در طول یک سال به تفکیک هر ماه

مقایسه دما و رطوبت سالن‌های گلخانه و محیط در ماه‌های مختلف و زون‌های حرارتی مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. **Error! Reference source not found.** در این شکل RH\_zone1 و RH\_zone2 میانگین رطوبت نسبی گلخانه و T\_zone1، T\_amb و T\_zone2 دمای گلخانه سالنهای یک، دو و محیط می باشد. نتایج نشان می دهد که دما و رطوبت نسبی هر دو سالن گلخانه رفتاری شبیه هم دارند. کمترین میزان دمای گلخانه ۱۶ درجه سلسیوس و بیشترین مقدار آن ۲۴ درجه سلسیوس بود. کمترین میزان رطوبت نسبی گلخانه در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد به دلیل دمای بالای محیط برابر ۶۵ درصد و بیشترین مقدار رطوبت نسبی هر دو سالن گلخانه ۷۳ درصد در فروردین و مهر بود. در جدول ۷ جدول ۴. مقایسه میزان اختلاف انرژی مورد نیاز دو سالن گلخانه در طول یک سال با هم مقایسه شده است.

جدول ۴. مقایسه میزان اختلاف انرژی مورد نیاز دو سالن گلخانه در طول یک سال

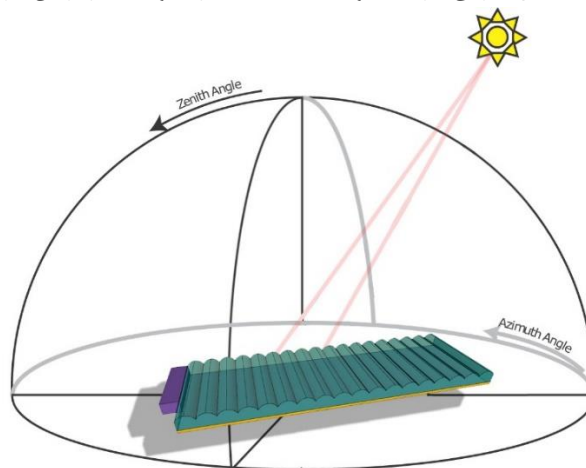
| انرژی های مختلف انتقالی به گلخانه |                            |                             |                              |                                | پارامتر       |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------|
| HEAT $\dot{Q}$<br>(GJ/year)       | INF $\dot{Q}$<br>(GJ/year) | VENT $\dot{Q}$<br>(GJ/year) | TRANS $\dot{Q}$<br>(GJ/year) | SOLGAIN $\dot{Q}$<br>(GJ/year) |               |
| ۸۸۰                               | -۱۹/۳                      | -۴۸۸۱                       | -۴۰۹۶/۷                      | ۷۸۷۸/۵                         | سالن شماره یک |
| ۸۳۵/۸                             | -۲۰/۱                      | -۴۳۴۸                       | -۴۰۹۶/۴                      | ۷۶۸۳/۸                         | سالن شماره دو |
| ۴۴/۲                              | ۰/۸                        | -۵۳۳                        | -۰/۳                         | ۱۹۴/۷                          | میزان اختلاف  |
| ۲/۴۷۱                             | ۰/۰۰۷                      | ۱۰/۹۱۹                      | ۴/۱۴۵                        | ۵/۰۲۲                          | درصد اختلاف   |





شکل ۱۷. میانگین دما و رطوبت نسبی هر دو سالن گلخانه و محیط در طول سال به تفکیک هر ماه

با وجود شکل یکسان هر دو سالن گلخانه، میزان انرژی مورد نیاز هر سالن با یکدیگر متفاوت بود. این اختلاف از دیوار شمال شرقی و جنوب غربی گلخانه ایجاد شده است. همان طور که در شکل ۱۸ مشخص است ضلع جنوب غربی گلخانه در معرض تابش نور خورشید قرار دارد اما در ضلع شمال شرقی سالن بسته بندی گلخانه با ایجاد سایه اثر تابش نور خورشید را کم می کند. میزان انرژی خورشیدی جذب شده و انرژی انتقالی از دیوارهای گلخانه در جدول ۵ مشخص شده است. دیوار جنوب غربی با اینکه مساحت یکسانی با دیوار شمال شرقی دارد اما ۱/۸۶ برابر دیوار شمال شرقی انرژی خورشیدی جذب کرده و ۱/۸ برابر آن انرژی انتقال می دهد.



شکل ۱۸. طرح شماتیک جهت گیری گلخانه مورد مطالعه و زاویه تابش خورشید نسبت به آن

جدول ۵. انرژی خورشیدی جذب شده و انرژی انتقالی از دیوارهای گلخانه

| SOLGAIN (GJ/year) $\dot{Q}$ | TRANS $\dot{Q}$ (GJ/year) | دیوارها          | سالن گلخانه |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|-------------|
| ۷۹۸/۵۱۸                     | ۸۲۷/۸۳۴                   | دیوار شمال غربی  | شماره یک    |
| ۲۵۹/۱۱۲                     | ۱۷۳/۳۰۳                   | دیوار جنوب شرقی  |             |
| ۴۸۱/۹۰۸                     | ۳۱۱/۳۳۶                   | دیوار جنوب غربی  |             |
| ۱۲۳۳۵/۴۵۳                   | ۸۲۵۷/۲۹                   | سقف              |             |
| ۷۹۸/۵۱۸                     | ۵۲۷/۸۳۴                   | دیوار شمالی غربی | شماره دو    |
| ۲۵۹/۱۱۲                     | ۱۷۳/۳۰۳                   | دیوار جنوب شرقی  |             |
| ۲۲۶/۵۹۴                     | ۱۴۵/۲۲۴                   | دیوار شمال شرقی  |             |
| ۱۲۳۳۵/۴۵۳                   | ۸۲۵۷/۲۹۰                  | سقف              |             |



## نتیجه گیری

در این تحقیق موازنه انرژی یک گلخانه واقعی در نرم افزار TRNSYS شبیه سازی شد. نتایج داده های شبیه سازی با داده های اندازه گیری شده یک گلخانه با محصول رز مینیاتوری در دو سالن مقایسه شد. موازنه انرژی برای گلخانه در طول یک سال به دست آمد. بیشترین تلفات انرژی در گلخانه به ترتیب مربوط به سیستم تهویه و دیوارها بود. جهت گیری گلخانه در عملکرد حرارتی گلخانه نقش مهمی داشت و با توجه به شرایط گلخانه و محل قرار گیری آن جهت گیری آن باید تعیین شود. خطاهای به دست آمده با معیارهای مختلف تعیین خطا با نتایج مقایسه شده قابل قبول بودند.

## منابع فارسی

کیخایی، فاطمه، زارعی، قاسم، گنجی خرم دل، ناصر، صادقی، صادق. تعیین نیازآبی ارقام گل رز در گلخانه هیدروپونیک. (۱۳۹۹). فصل نامه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۴)، ۵۳۱-۵۴۲.

## REFERENCES

- Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., & Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Conversion and Management*, 70, 163-173.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. K. (2016). Modeling of heating requirement in Chinese Solar Greenhouse. In 2016 ASABE annual international meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Information processing in agriculture*, 5(1), 33-46.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 235-244.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2020). Modeling heating demands in a Chinese-style solar greenhouse using the transient building energy simulation model TRNSYS. *Journal of Building Engineering*, 29, 101114.
- ASHRAE Handbook of Fundamentals (1989), chapter 22: Ventilation and Infiltration.
- Awani, S., Chargui, R., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2015). Performance of the coupling of the flat plate collector and a heat pump system associated with a vertical heat exchanger for heating of the two types of greenhouses system. *Energy conversion and management*, 103, 266-275.
- Baddadi, S., Bouadila, S., Ghorbel, W., & Guizani, A. (2019). Autonomous greenhouse microclimate through hydroponic design and refurbished thermal energy by phase change material. *Cleaner Production*, 211, 360-379.
- Bambara, J., & Athienitis, A. K. (2019). Energy and economic analysis for the design of greenhouses with semi-transparent photovoltaic cladding. *Renewable Energy*, 131, 1274-1287.
- Banakar, A., Montazeri, M., Ghobadian, B., Pasdarshahri, H., & Kamrani, F. (2021). Energy analysis and assessing heating and cooling demands of closed greenhouse in Iran. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 101042.
- Brækken, A., Sannan, S., Jerca, I. O., & Bădulescu, L. A. (2023). Assessment of heating and cooling demands of a glass greenhouse in Bucharest, Romania. *Thermal Science and Engineering Progress*, 41, 101830.
- Candy, S., Moore, G., & Freere, P. (2012). Design and modeling of a greenhouse for a remote region in Nepal. *Procedia Engineering*, 49, 152-160.
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2020). Effect of greenhouse design parameters on the heating and cooling requirement of greenhouses in moroccan climatic conditions. *IEEE Access*, 9, 2986-3003.
- Canakci, M., Emekli, N. Y., Bilgin, S., & Caglayan, N. (2013). Heating requirement and its costs in greenhouse structures: A case study for Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy*, 24, 483-490.

- Chen, C., Li, Y., Li, N., Wei, S., Yang, F., Ling, H., ... & Han, F. (2018). A computational model to determine the optimal orientation for solar greenhouses located at different latitudes in China. *Solar Energy*, 165, 19-26.
- Chen, J., Ma, Y., & Pang, Z. (2020). A mathematical model of global solar radiation to select the optimal shape and orientation of the greenhouses in southern China. *Solar Energy*, 205, 380-389.
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-137.
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2020). Effect of greenhouse design parameters on the heating and cooling requirement of greenhouses in moroccan climatic conditions. *IEEE Access*, 9, 2986-3003.
- Dimitropoulou, A. M. N., Maroulis, V. Z., & Giannini, E. N. (2023). A Simple and Effective Model for Predicting the Thermal Energy Requirements of Greenhouses in Europe. *Energies*, 16(19), 6788.
- Dufie, J. A., & Beckman, W. A. (1974). *Solar energy thermal processes*.
- Eguía-Oller, P., Martínez-Mariño, S., Granada-Álvarez, E., & Febrero-Garrido, L. (2021). Empirical validation of a multizone building model coupled with an air flow network under complex realistic situations. *Energy and Buildings*, 249, 111197.
- Fox, J. A., Adriaanse, P., & Stacey, N. T. (2019). Greenhouse energy management: The thermal interaction of greenhouses with the ground. *Journal of Cleaner Production*, 235, 288-296.
- Gupta, R., Tiwari, G. N., Kumar, A., & Gupta, Y. (2012). Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. *Energy and Buildings*, 47, 27-34.
- Ha, T., Lee, I. B., Kwon, K. S., & Hong, S. W. (2015). Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using Building Energy Simulation model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(6), 116-127.
- Henshaw, P. (2017). Modelling changes to an unheated greenhouse in the Canadian subarctic to lengthen the growing season. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 31-38.
- Kikhaei, Zarei, Qasim, Ganji Khoramdel, N, Sadeghi, 2021. Determination of water requirement of rose cultivars in hydroponic greenhouse. *Water Research in Agriculture*, 34(4), 531-542(In persian)
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1963). The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada. *Solar energy*, 7(2), 53-74.
- Mohsenipour, M., Ebadollahi, M., Rostamzadeh, H., & Amidpour, M. (2020). Design and evaluation of a solar-based trigeneration system for a nearly zero energy greenhouse in arid region. *Journal of cleaner production*, 254, 119990.
- Mashonjowa, E., Ronsse, F., Milford, J. R., & Pieters, J. G. (2013). Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model. *Solar Energy*, 91, 381-393.
- Mohammad, A. T., Mat, S. B., Alrubaih, M. S., & Al-abidi, A. A. (2014). Optimization of cooling load for different greenhouse models in Malaysia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(1), 42-48.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & MacCleery, B. (2014). *Greenhouse design and control* (p. 3). London, UK: CRC press.
- Rasheed, A., Kwak, C. S., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2020). Building energy, a simulation model for analyzing energy saving options of multi-span greenhouses. *Applied Sciences*, 10(19), 6884.
- Seem, J. E. (1987). *Modeling of heat in buildings*. Madison, USA, University of Wisconsin. PhD.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management*. Wageningen University and Research.
- Sabir, N., & Singh, B. (2013). Protected cultivation of vegetables in global arena: A review. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 83(2).
- Stanciu, C., Stanciu, D., & Dobrovicescu, A. (2016). Effect of greenhouse orientation with respect to EW axis on its required heating and cooling loads. *Energy Procedia*, 85, 498-504.
- Su, Y., & Xu, L. (2017). Towards discrete time model for greenhouse climate control. *Engineering in agriculture, environment and food*, 10(2), 157-170.
- Taki, M., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., Rohani, A., & Matloobi, M. (2016). Modeling and experimental validation of heat transfer and energy consumption in an innovative greenhouse structure. *Information Processing in Agriculture*, 3(3), 157-174.
- Taki, M., & Yildizhan, H. (2018). Evaluation the sustainable energy applications for fruit and vegetable



- productions processes; case study: Greenhouse cucumber production. Journal of cleaner production, 199, 164-172.
- Vadiei, A. (2011). Energy analysis of the closed greenhouse concept: Towards a sustainable energy pathway (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- Vadiei, A. (2013). Energy management in large scale solar buildings: The closed greenhouse concept (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- Villagran, E. A., Romero, E. J. B., & Bojacá, C. R. (2019). Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. Biosystems Engineering, 188, 288-304.
- Yazdani, M., & Klems, J. H. (1993). Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings.

### فهرست علائم و اختصارات

|                       |   |             |                                       |
|-----------------------|---|-------------|---------------------------------------|
| $\dot{Q}$             | نرخ انرژی، kJ                                 | In          | داخل                                  |
| dQ                    | تغییرات انرژی داخلی گلخانه، kw                | Out         | خارج                                  |
| $\dot{m}$             | نرخ جریان، kg/s                               | Amb         | محیط                                  |
| $C_{air}$             | ظرفیت گرمای ویژه، K, kJ/kg                    | Zone        | سالن گلخانه                           |
| U-value               | ضریب انتقال حرارت، $W/m^2 \cdot K$            | simulation  | شبیه‌سازی شده                         |
| g-value               | ضریب انتقال تابش خورشیدی، %                   | measured    | اندازه‌گیری شده                       |
| $\dot{Q}_{ven}$       | انرژی تهویه، $kJ/h$                           | Heat        | گرمایش                                |
| $\dot{Q}_{trans}$     | انرژی انتقالی دیواره‌ها، $kJ/h$               | Cool        | سرمایش                                |
| $\dot{Q}_{gain}$      | انرژی دریافتی گلخانه، $kJ/h$                  | Inf         | درز و نفوذ                            |
| $\dot{Q}_{solar}$     | جذب انرژی خورشیدی، $kJ/h$                     | Ven         | تهویه                                 |
| $\frac{dQ_{air}}{dt}$ | تغییر انرژی داخلی گلخانه، $kJ/h$              | Trans       | انتقالی                               |
| $\dot{Q}_{heat}$      | انرژی گرمایشی، $kJ/h$                         | Gain        | دریافتی                               |
| $\dot{Q}_{cool}$      | انرژی سرمایشی، $kJ/h$                         | sol         | تابش خورشیدی                          |
| $\dot{Q}_{inf}$       | انرژی دریافتی از درز و نشتی، $kJ/h$           | $y_i$       | مقدار داده اندازه‌گیری شده            |
| T                     | دما، °C                                       | $\bar{y}_i$ | مقدار داده شبیه‌سازی شده              |
| RH                    | رطوبت نسبی، %                                 | $\bar{y}$   | میانگین داده اندازه‌گیری شده          |
| V, wind speed         | سرعت باد، m/s                                 | K1, K2, K3  | ضرایب محاسبه درز و نفوذ               |
| $A_i$                 | مساحت سطح گلخانه، $m^2$                       | $\beta$     | زاویه شیب سطح، rad                    |
| $I_i$                 | تابش خورشید کل، $W/m^2$                       | $\theta_i$  | زاویه تابش پرتو بر یک سطح، rad        |
| $iT$                  | ضریب انتقال تابش پوشش گلخانه، $W/m^2 \cdot K$ | $\theta_z$  | زاویه اوج خورشید، rad                 |
|                       |   | $\delta$    | زاویه ساعت، rad                       |
|                       |   | $\gamma$    | زاویه انحراف خورشید نسبت به جنوب، rad |
|                       |   | $\varphi$   | زاویه عرض جغرافیایی، rad              |