

شبیه‌سازی رفتار حرارتی یک گلخانه یک‌طرفه با استفاده از مدل دینامیکی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 استادیار، گروه مهندسی باغبانی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

حسن قاسمی‌مبتکر*
یحیی عجب‌شیرچی
سیدفرامرز رنجبر
منصور مطلوبی

چکیده

یکی از بهترین اقدامات جهت ایجاد شرایط بهینه رشد گیاهان در داخل گلخانه ارائه مدل‌های دقیق برای کنترل شرایط داخلی گلخانه است. در این مطالعه با استفاده از مدل ریاضی میزان تابش کل خورشیدی (مستقیم، پخش و بازتابش شده از زمین) عبوری از پوشش یک گلخانه یک‌طرفه بدون گیاه واقع در دانشگاه تبریز محاسبه شد. همچنین با توسعه یک مدل دینامیکی انتقال گرما، دماهای داخلی گلخانه شامل دمای هوای گلخانه، دمای سطح خاک و دمای سطح داخلی گلخانه پیش‌بینی شد. ورودی‌های مدل شامل پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده و خواص ترموفیزیکی اجزای گلخانه بود. نتایج نشان داد که تبادل گرمایی سطح خاک بیشترین اثر را بر تغییرات دمایی هوای داخل گلخانه دارد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده‌های اندازه‌گیری نشان داد برای هوای داخلی گلخانه، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده همبستگی بالایی وجود دارد. ضریب همبستگی و میانگین درصد خطا برای این مدل به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۳/۶۲٪ به دست آمد. همچنین میانگین درصد خطا برای این داده‌ها ۳/۶۲٪ به دست آمد نتایج همچنین نشان داد بخش اعظم تابش ورودی به داخل گلخانه از طریق تابش و همرفت به بیرون تلف می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل دینامیکی، گلخانه یک‌طرفه، تابش خورشیدی، دمای هوای گلخانه.

A Dynamic Model for Simulation of Thermal Behavior in Single Span Greenhouse

H. Ghasemi Mobtaker
Y. Ajabshirchi
S. F. Ranjbar
M. Matloobi

Biosystems Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Biosystems Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Horticultural engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

One of the best ways to provide optimum conditions to the crop is the development of accurate greenhouse models for inside environment control. In this study a mathematical model was developed for computing transmitted total solar radiation (beam, diffused and ground reflected), for the single span greenhouse, without crops, was performed in Tabriz University. Also a dynamic model was developed to predict the all internal temperatures of the greenhouse including greenhouse inside air, soil surface and north wall temperature. The input parameters of the model were the measured meteorological conditions and the thermo-physical properties of the greenhouse components. Results showed that soil surface heat exchange has a positive contribution to the internal air temperature. Comparisons between the predicted and measured results showed close agreement for greenhouse air temperature. The correlation coefficient and mean percentage error for this model were calculated as 0.99 and -3.62%, respectively. Results also showed a considerable amount of the incident radiation was lost to outside the greenhouse by convection and radiation.

Keywords: Dynamic model, Single span greenhouse, Solar radiation, Greenhouse air temperature.

۱- مقدمه

بررسی اقلیم داخلی گلخانه می‌پردازند، فهم دقیقی از عناصر گلخانه را فراهم آورده و کنترل آن را به بهترین شکل ممکن فراهم می‌آورد [۲]. پیش‌بینی شرایط داخلی گلخانه و امکان استفاده از سیستم‌های کنترل خودکار، دو هدف اصلی مدل‌های شبیه‌سازی شده هستند. مدل‌های شبیه‌سازی شده به دو صورت پایا و دینامیک ارائه می‌شوند و با استفاده از داده‌های هواشناسی و پارامترهای طراحی، شرایط گلخانه را پیش‌بینی می‌کنند [۳]. مدل‌های دینامیک به علت دقت بالای آنها نسبت به مدل‌های پایا بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مدل‌های پایا و دینامیکی زیادی برای شبیه‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ها ارائه شده است. تراگو و همکاران [۴] الگوریتمی توسعه دادند که به وسیله آن شرایط پویای گلخانه را به‌منظور بهینه کردن شرایط گلخانه پرورش گوجه‌فرنگی در ایالت کبک کانادا پیش‌بینی کنند. معادلات آنها شامل معادلات تعادلی گرمای محسوس برای محاسبه

امروزه با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و کاهش زمین‌های قابل کشت، استفاده از گلخانه‌های کشاورزی به شدت در حال گسترش است. کنترل شرایط داخلی گلخانه نه تنها رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه عامل مهمی در کنترل آفات و بیماری‌های داخل گلخانه است. مهم‌ترین عواملی که شرایط داخلی گلخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند شامل دمای هوای داخل گلخانه، دمای خاک، رطوبت نسبی، شدت نور در داخل گلخانه و غلظت گاز دی‌اکسید کربن است [۱].

مدل‌های شبیه‌سازی شده از شرایط داخلی گلخانه و گیاه می‌تواند ما را در طراحی بهترین گلخانه برای هر شرایط اقلیمی یاری رساند و امکان مدیریت عناصر داخلی آن را به بهترین شکل ممکن فراهم آورد. استفاده از مدل‌های پیشگو که با استفاده از داده‌های هواشناسی به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mr.mobtaker@yahoo.com

میزان انرژی گرمایی لازم برای گرمایش، معادلات تعادلی گرمای نهان که به صورت تغییر در مقدار بخار آب گلخانه در نظر گرفته شد و همچنین موازنه جرم دی‌اکسید کربن که برای محاسبه عملکرد میوه و سرعت تزریق CO₂ استفاده می‌شود، بود. نتایج نشان داد مدل ارائه شده با بیشینه خطای ۳٪ قادر به پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر است. عبدالغنی و کوزای [۵] برای پیش‌بینی دمای هوا، خاک، گیاه، پوشش و همچنین میزان رطوبت نسبی گلخانه، یک مدل شبه‌سازی دینامیکی ارائه دادند. این مدل همچنین قادر به پیش‌بینی تبخیر و تعرق گیاه نیز بود. ورودی‌های این مدل شامل شرایط محیطی و خواص ترمودینامیکی و فیزیکی اجزای گلخانه بود. برای اعتبارسنجی مدل از یک گلخانه شمالی-جنوبی با پوشش شیشه استفاده شد و آزمایشات در یک روز تابستانی انجام شد. مقایسه نتایج مدل و نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشان داد که مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر است.

سنگار و کوتاری [۶] از یک گلخانه تونلی شکل برای پرورش گیاهان استفاده کرده و با استفاده از مدل‌های ریاضی به پیش‌بینی و بررسی پارامترهای داخل گلخانه پرداختند. گلخانه در جهت شرقی-غربی بوده و با پوشش پلی‌اتیلن پوشانده شده بود. نتایج نشان داد در شرایطی که تابش خورشیدی زیاد و دمای محیط پایین است، تغییرات در دمای هوای گلخانه بیشتر از شرایطی است که دمای محیط بالا و تابش خورشیدی کم است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی با داده‌های مدل نشان داد که مدل به خوبی قادر به پیش‌بینی دمای هوای داخل گلخانه است. روابط عمومی میزان انرژی جذب شده در اجزای گلخانه و همچنین میزان انرژی اتلاف شده به محیط بیرون توسط عبدالغنی و الهلال [۳] بررسی شد. این روابط با در نظر گرفتن تمام فعل و انفعالات موجود که در بین اجزای گلخانه انجام می‌شود، بررسی شد و گلخانه به‌عنوان یک کلکتور در نظر گرفته شد که شامل صفحه جذب (خاک گلخانه) و محیط نیمه شفاف (پوشش گلخانه، هوای داخل آن و پوشش گیاهی) بود. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از یک گلخانه با پوشش پلاستیکی که با سیستم فن و صفحه مرطوب خنک می‌شد، استفاده شد. آنها گزارش کردند که مدل ارائه شده قادر به تعیین میزان انرژی جذب شده در اجزای گلخانه و همچنین میزان تلف شده است.

ماشونجوا و همکاران [۲] برای مدل‌سازی گلخانه رز در زمبابوه، از یک مدل پویا که قبلاً برای بررسی محیط گلخانه گوجه‌فرنگی در اروپا ارائه شده بود استفاده کردند. این مدل شامل معادلات مختلفی بود که بر اساس تعادل انرژی در لایه‌های مختلف گلخانه بنا شده است. ورودی‌های مدل شامل شدت تابش خورشیدی، دمای محیط بیرون و ضریب انتقال پوشش گلخانه و خروجی‌های مدل شامل دمای اجزای گلخانه بود. برای اعتبارسنجی مدل از یک گلخانه تجاری که در آن گل رز کاشته شده بود استفاده شد. نتایج نشان داد بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از مدل همبستگی بالایی وجود دارد. جودی و فرهان [۱] برای پیش‌بینی دمای هوای گلخانه مدل دینامیکی ارائه کردند که شامل معادلات تراز انرژی در پنج زیر بخش بود. این زیر بخش‌ها شامل پوشش، هوای داخل، سطح خاک و دو لایه خاک زیرین گلخانه بود. ورودی‌های مدل شامل داده‌های هواشناسی و پارامترهای ترمو فیزیکی گلخانه بود. نتایج نشان داد بین داده‌های حاصل از پیش‌بینی مدل و

اندازه‌گیری تجربی همبستگی بالایی وجود دارد.

هدف از این مطالعه پیش‌بینی دمای هوای گلخانه با استفاده از شبه‌سازی رایانه‌ای می‌باشد. بدین منظور مدلی شامل معادلات تعادل انرژی در قسمت‌های مختلف گلخانه شامل پوشش، هوا داخل، دیواره شمالی و سطح خاک گلخانه ارائه شد. برای اعتبارسنجی مدل از یک گلخانه یک‌طرفه شرقی-غربی، با دیواره شمالی آجری استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه در شهرستان تبریز انجام شد. طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا در این شهر براساس داده‌های اداره کل هواشناسی به ترتیب برابر ۴۸°۱۸' شرقی، ۳۸°۱۰' شمالی و ۱۳۶۴ متر می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در یک گلخانه یک‌طرفه شرقی-غربی که دیواره شمالی آن آجری بود انجام شد. اسکلت اصلی گلخانه از آهن و سطح آن با شیشه به ضخامت ۴ mm پوشانده شده بود. شکل (۱) نمای گلخانه را نشان می‌دهد. برای شبه‌سازی رفتار گرمایی، گلخانه به چهار زیر بخش شامل پوشش، هوای داخل، دیواره شمالی و سطح خاک گلخانه تقسیم شد و معادلات تعادل انرژی در هر یک از این زیر بخش‌ها نوشته شد. این معادلات با فرض‌های زیر نوشته شد:

- گلخانه بدون گیاه در نظر گرفته شد.
- از خاصیت جذب و گسیل انرژی تابشی هوای داخل گلخانه صرف نظر شد.
- از تبخیر سطح خاک گلخانه چشم‌پوشی شد.

۲-۱- معادلات تعادل انرژی در پوشش گلخانه

معادلات تعادل در پوشش شامل جذب تابش خورشیدی در پوشش، تبادل تابشی با آسمان، تبادل تابشی با سطح خاک گلخانه و دیواره شمالی، تبادل همرفتی با هوای داخل و تبادل همرفتی با هوای محیط است. بدین منظور از رابطه (۱) استفاده شد:

$$M_c C_c \frac{dT_c}{dt} = q_{sc} + q_{r,c}^{net} + q_{co,r-c} - q_{co,c-a} \quad (1)$$

تابش خورشیدی جذب شده در پوشش شامل جذب تابش در سطح بیرونی پوشش و جذب تابش بازتابش شده از سطح خاک و دیواره شمالی در سطح داخلی پوشش می‌باشد و با استفاده از رابطه (۱-۱) محاسبه شد:

$$q_{sc} = \alpha_c S_t + \alpha_{ct} S_{tt} ((1 - F_t)(1 - \alpha_g) + F_n(1 - \alpha_w)) \quad (1-1)$$

برای محاسبه میزان تابش حرارتی خالص در پوشش گلخانه از رابطه (۲-۱) استفاده شد. در بسیاری از مطالعات از این تبادل تابشی صرف‌نظر شده است [۷-۹]. در این رابطه تبادل تابشی سطح بیرونی پوشش با آسمان و تبادل تابشی سطح داخلی پوشش با سطح داخلی دیواره شمالی و سطح خاک گلخانه در نظر گرفته شده است. برای محاسبه تبادل تابشی سطح داخلی پوشش با سطح داخلی دیواره شمالی و سطح خاک گلخانه از مفهوم مقاومت سطح در برابر تابش استفاده شد. بدین منظور با استفاده از شکل (۲) و روابط (۱-۲-۱) تا (۱-۲-۵) آهنگ انتقال آهنگ خالص تابشی از سطوح محاسبه شد. باید توجه داشت که مقدار مثبت Q_c به مفهوم این است که سطح انرژی از دست می‌دهد و مقدار منفی آن به این معناست که سطح انرژی دریافت می‌کند [۱۰].

$$\begin{aligned} Q_w &= \frac{E_{bw} - J_w}{R_w}, \\ E_{bc} &= \epsilon_c \sigma T_c^4, \\ E_{bg} &= \epsilon_g \sigma T_g^4, \\ E_{bw} &= \epsilon_w \sigma T_{wi}^4 \end{aligned} \quad (2-2-1)$$

$$q_{r.c}^{net} = -[\sigma A_c (\epsilon_c T_c^4 - \alpha_{ct} \epsilon_{sky} T_{sky}^4)] - Q_c \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{E_{bc} - J_c}{R_c}, \\ Q_g &= \frac{E_{bg} - J_g}{R_g} \end{aligned} \quad (1-2-1)$$



شکل ۱- نمایی از گلخانه مورد استفاده در مطالعه

سایر روابط که در رابطه (۱) معرفی شدند به صورت زیر محاسبه

شدند [۵]:

$$q_{co,r-c} = A_c h_{co,r-c} (T_r - T_c) \quad (3-1)$$

$$q_{co,c-a} = A_c h_{co,c-a} (T_c - T_a) \quad (4-1)$$

$$T_{sky} = 0.0552(T_a)^{1.5}, \quad T_a \text{ in } (K) \quad (5-1)$$

$$h_{co,r-c} = 1.95(T_r - T_c)^{0.3}, \quad (T_c - T_r) \leq 11.1 \text{ } ^\circ C \quad (6-1)$$

$$h_{co,c-a} = 0.95 + 6.76(V)^{0.49}, \quad T_c > T_a \text{ and } V \leq 6.3 \text{ ms}^{-1} \quad (7-1)$$

۲-۲- معادلات تعادل انرژی در دیواره شمالی

معادلات تعادل در دیواره شمالی شامل جذب تابش خورشیدی در دیواره شمالی، تبادل تابشی با آسمان، تبادل تابشی با سطح خاک گلخانه و پوشش، تبادل همرفتی با هوای داخل و تبادل همرفتی با هوای محیط است. بدین منظور از رابطه (۲) استفاده شد:

$$M_w C_w \frac{dT_{wi}}{dt} = q_{sw} + q_{r,w}^{net} + q_{co,r-w} - q_{co,w-a} \quad (2)$$

هر یک از زیر بخش‌های رابطه (۲) با استفاده از روابط (۱-۲) تا (۶-۲) محاسبه شدند [۱۱-۱۳]. همچنین در این روابط فاکتور کسر تابش خورشیدی فرودی به دیواره شمالی با استفاده از تحلیل سه بعدی سایه محاسبه شد [۱۴ و ۱۵].

$$q_{sw} = \alpha_w F_n S_{ti} \quad (1-2)$$

$$q_{r,w}^{net} = -[\sigma A_w (\epsilon_w T_{wo}^4 - \alpha_{wt} \epsilon_{sky} T_{sky}^4)] - Q_w \quad (2-2)$$

$$q_{co,r-w} = A_w h_{co,r-w} (T_r - T_{wi}) \quad (3-2)$$

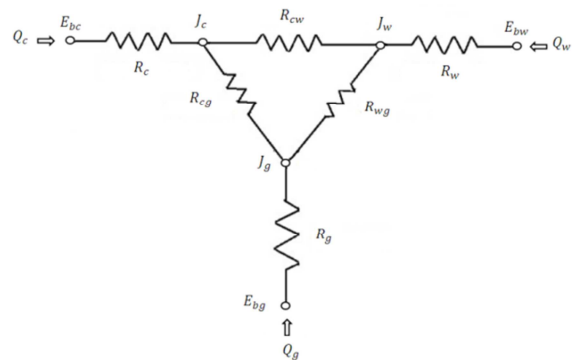
$$q_{co,w-a} = A_w h_{co,w-a} (T_{wo} - T_a) \quad (4-2)$$

$$h_{co,r-w} = 2.8 \quad (5-2)$$

$$h_{co,w-a} = 1.42 \left(\frac{T_{wo} - T_a}{x} \right)^{0.25} \quad (6-2)$$

۳-۲- معادلات تعادل انرژی در خاک

بخش اعظم تابش خورشیدی به سطح خاک گلخانه می‌رسد و از طریق گرم شدن خاک باعث گرمایش گلخانه می‌شود. معادلات تعادل



شکل ۲- شبکه تابش مربوط به سطوح داخلی پوشش و دیواره شمالی و سطح خاک گلخانه

$$\begin{aligned} \frac{E_{bc} - J_c}{R_c} + \frac{J_w - J_c}{R_{cw}} + \frac{J_g - J_c}{R_{cg}} &= 0, \\ \frac{E_{bg} - J_g}{R_g} + \frac{J_c - J_g}{R_{cg}} + \frac{J_w - J_g}{R_{wg}} &= 0 \end{aligned} \quad (3-2-1)$$

$$\frac{J_c - J_w}{R_{cw}} + \frac{J_g - J_w}{R_{wg}} + \frac{E_{bw} - J_w}{R_w} = 0,$$

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{1 - \epsilon_c}{A_c \epsilon_c}, \\ R_g &= \frac{1 - \epsilon_g}{A_g \epsilon_g}, \end{aligned} \quad (4-2-1)$$

$$\begin{aligned} R_w &= \frac{1 - \epsilon_w}{A_w \epsilon_w}, \\ R_{cw} &= \frac{1}{A_c F_{c-w}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{cg} &= \frac{1}{A_c F_{c-g}}, \\ R_{wg} &= \frac{1}{A_w F_{w-g}}, \end{aligned} \quad (5-2-1)$$

مساحت 0.25 m^2 در دیواره غربی تعبیه شد. شیب سقف این گلخانه $26/6^\circ$ نسبت به سطح افق، ارتفاع دیواره شمالی $2/4 \text{ m}$ بود و ارتفاع دیواره کوچک جنوبی $0/8 \text{ m}$ بود. مساحت کل پوشش گلخانه برابر با $42/77 \text{ m}^2$ بود که $31/25 \text{ m}^2$ آن با شیشه 4 mm و باقی با مساحت $11/52 \text{ m}^2$ با استفاده از دیواره آجری سفالی با دو رویه سیمان (دیواره شمالی) پوشیده شد. شدت تابش خورشید در سطح افق با استفاده از دستگاه تابش‌سنج (مدل TES 1333، رنج اندازه‌گیری Wm^{-2} $0-2000$ و دقت قرائت 1 Wm^{-2}) به فاصله زمانی نیم ساعت اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روابط ریاضی، میزان تابش مستقیم، پخش و بازتابش شده از زمین که به سطوح شیب‌دار گلخانه می‌رسد محاسبه شد. برای محاسبه میزان تابش عبوری از پوشش شیشه‌ای از قانون فرنل و بویگر استفاده شد [۸ و ۱۷].

دمای هوای گلخانه، پوشش شیشه‌ای، سطح خاک، دیواره شمالی در داخل و خارج گلخانه و دمای محیط با استفاده از حسگر دمایی به فاصله زمانی ۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری دمای محیط در ارتفاع یک متری و در داخل یک جعبه چوبی انجام شد. برای اندازه‌گیری دما از حسگرهای مدل SHT11 استفاده شد. رنج اندازه‌گیری دما برای این حسگر در محدوده $0/5-40/0^\circ\text{C}$ می‌باشد و دقت آن در محدوده دمایی $0/5-50/0^\circ\text{C}$ در حد $0/5^\circ\text{C}$ است. این سنسور قابلیت اندازه‌گیری همزمان دما و رطوبت را دارد و از دقت فوق العاده بالایی برخوردار است. هر کدام از این حسگرها به‌طور جداگانه و با استفاده از برنامه میکروکنترلر طوری تنظیم شدند که در فاصله زمانی خواسته شده به صورت هم‌زمان دما و رطوبت را اندازه گرفته و ثبت کنند.

۳- نتایج و بحث

شدت تابش خورشیدی در یک روز تابستان در سطح افق و با استفاده از تابش‌سنج اندازه‌گیری شد و با استفاده از روابط ریاضی، میزان تابش کل ورودی به داخل گلخانه محاسبه شد. شکل (۳) میزان تابش دریافتی کل و همچنین تابش ورودی در هریک از دیواره‌ها و سقف گلخانه یک‌طرفه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش عمده تابش دریافتی گلخانه از طریق سقف جنوبی اتفاق می‌افتد. نتایج نشان دادند در این نوع گلخانه به‌طور متوسط حدود 72% تابش دریافتی از سقف جنوبی جذب می‌شود. همچنین دیواره جنوبی کمترین میزان جذب را به خود اختصاص داده بود (حدود 7%). گوپتا و تیواری [۱۸] گزارش کردند که سقف‌های جنوبی گلخانه کوانتس شکل و به‌خصوص سقف بالایی بیشترین تابش خورشیدی را شرایط آب و هوایی هند دریافت می‌کنند.

در شکل (۴) تغییرات دمایی محیط و اجزای داخلی گلخانه در یک روز تابستان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در برخی موارد داده‌ها با نوسان همراه است که ناشی از خطای وسایل اندازه‌گیری می‌باشد. نتایج نشان داد با افزایش شدت تابش خورشیدی دمای هوای داخل گلخانه، دمای سطح خاک و دمای سطح داخلی دیواره شمالی افزایش می‌یابد و به بیشینه خود در حدود ساعت ۱۳ می‌رسد. ماکزیمم دمای محیط در روز آزمایش $36/1^\circ\text{C}$ و بیشینه دمای هوای داخلی گلخانه $65/6^\circ\text{C}$ ثبت شد که حاکی از اختلاف

در سطح خاک شامل جذب تابش خورشیدی در سطح خاک، تبادل تابشی با دیواره شمالی و پوشش، تبادل همرفتی با هوای داخل و تبادل رسانش با خاک عمقی است. بدین منظور از رابطه (۳) استفاده شد [۱۴ و ۱۶]:

$$M_g C_g \frac{dT_g}{dt} = q_{sg} + q_{r,g}^{net} - q_{co,g-r} - q_{kg} \quad (3)$$

$$q_{sg} = \alpha_g (1 - F_t) S_{ti} \quad (1-3)$$

$$q_{r,g}^{net} = -Q_g \quad (2-3)$$

$$q_{co,g-r} = A_g h_{co,g-r} (T_g - T_r) \quad (3-3)$$

$$q_{kg} = \frac{k_g A_g (T_g - T_0)}{z} \quad (4-3)$$

$$h_{co,g-r} = 2.8 \quad (5-3)$$

۲-۴- معادلات تعادل انرژی در هوای گلخانه

برای تعیین دمای هوای گلخانه که مهم‌ترین فاکتور در طراحی گلخانه می‌باشد، باید تمامی روابط حاکم بین اجزای گلخانه و هوا را در نظر گرفت. بدین منظور در این مطالعه از رابطه (۴) استفاده شد:

$$M_r C_a \frac{dT_r}{dt} = q_{co,g-r} - q_{co,r-w} - q_{co,r-c} \quad (4)$$

برای حل معادلات (۱) تا (۴) از نرم‌افزار متلب (Matlab R2009a) استفاده شد. مقادیر اندازه‌گیری شده دما در شروع آزمایش به‌عنوان مقادیر اولیه مدل در نظر گرفته شد و مقادیر پیش‌بینی شده در هر مرحله به‌عنوان مقادیر اولیه مرحله بعد مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌بینی‌ها در هر ۵ دقیقه انجام شد و در این فاصله زمانی مقادیر دما و تابش ثابت فرض شد. همچنین مقادیر ثابت جدول (۱) به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد.

جدول ۱- مقادیر ثابت به عنوان ورودی در مدل

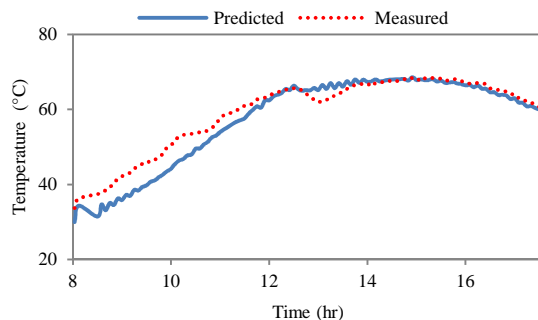
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A_c	۳۱/۲۵	M_g	۷۳۶۰
A_g	۱۵/۳۶	M_r	۲۶/۱۸
A_w	۱۱/۵۲	M_w	۲۷۷۷/۵
C_a	۱۰۰۹	z	۰/۵
C_c	۸۴۰	α_c	۰/۱۰
C_g	۸۸۰	α_{ct}	۰/۹۵
C_w	۷۹۵	α_g	۰/۸۶
F_{c-g}	۰/۳۹	α_w	۰/۹۱
F_{c-w}	۰/۲۷	α_{wt}	۰/۸۵
F_{g-c}	۰/۷۹	ϵ_c	۰/۹۴
F_{w-g}	۰/۲۸	ϵ_g	۰/۹۳
k_g	۱	ϵ_{sky}	۰/۱
M_c	۵۳۷/۸۲	ϵ_w	۰/۹۴

۲-۵- اندازه‌گیری‌های تجربی

اندازه‌گیری‌ها در یک روز گرم تابستان در یک گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی واقع در ساختمان شماره ۲ دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد (شکل ۱). اسکلت اصلی گلخانه با استفاده از پروفیل آهنی ساخته شد و برای اتصالات از جوش استفاده شد. درب گلخانه در سمت شرق گلخانه به مساحت $1/67 \text{ m}^2$ و محفظه تهویه آن به

دارد. ضریب همبستگی برای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده دمای هوای داخلی گلخانه ۰/۹۹ به‌دست آمد. همچنین میانگین درصد خطا برای این داده‌ها ۳/۶۲٪ به‌دست آمد که حاکی از دقت بالای مدل ارائه شده برای دمای هوای داخلی گلخانه می‌باشد. شاخص‌های میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای این داده‌ها به ترتیب برابر با $1/22^{\circ}\text{C}$ و $3/19^{\circ}\text{C}$ به‌دست آمد. جودی و فرمان [۱] مدلی برای تخمین دمای داخلی گلخانه ارائه کردند. آنها گزارش کردند که میانگین درصد خطا برای مدل آنها ۸٪ است. در مطالعه دیگری ماشونجوا و همکاران [۲] برای مدل‌سازی گلخانه از یک مدل دینامیک استفاده کردند و با استفاده از پارامترهای گلخانه و داده‌های هواشناسی دمای هوای داخلی گلخانه را تخمین زدند. مقدار میانگین خطا برای مدل آنها برای تابستان و زمستان به ترتیب برابر با $1/3^{\circ}\text{C}$ و $1/8^{\circ}\text{C}$ به‌دست آمد.

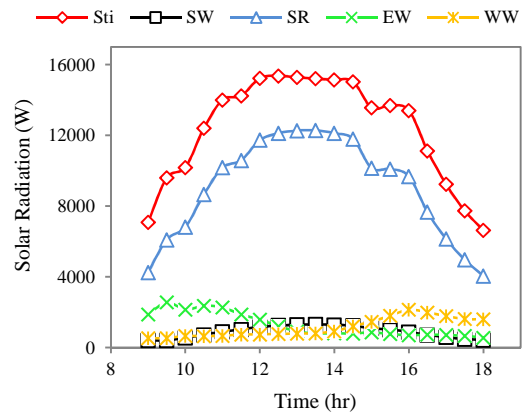
نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی دمای سطح داخلی دیواره شمالی از دقت کمتری نسبت به دمای هوای داخلی گلخانه برخوردار بود. همچنین درصد خطا برای این داده‌ها ۷/۵۴٪ به‌دست آمد. همچنین شاخص‌های میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای این داده‌ها به ترتیب برابر با $5/58^{\circ}\text{C}$ و $8/83^{\circ}\text{C}$ به‌دست آمد. یکی از دلایل این خطا به دلیل مشخص نبودن دقیق میزان تابش فرودی به دیواره شمالی است. همان‌طور که اشاره شد در این مطالعه برای تعیین توزیع تابش در داخل گلخانه و محاسبه کسر تابش خورشیدی فرودی به دیواره شمالی از تحلیل سه بعدی سایه استفاده شد. این روش در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵ و ۱۹]. این روش بر پایه شبیه‌سازی کامپیوتری است بنا شده است و لازم است با اندازه‌گیری‌های دقیق میزان تابش در دیواره و کف گلخانه، مقدار دقیق آن تعیین شود.



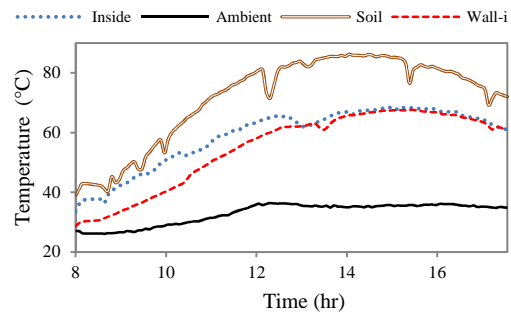
شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دمای هوای داخل گلخانه در مدت آزمایش

در مورد دمای خاک گلخانه نتایج مدل رضایت‌بخش نبود. البته برای داده‌های این دما شاخص ضریب همبستگی بالا بود (۰/۹۶). اما حاکی از تشخیص روند تغییرات دمای خاک توسط مدل است. اما خطای مدل بالا به‌دست آمد (میانگین خطا حدود $1/4^{\circ}\text{C}$). همان‌طور که در بخش (۲-۳) هم اشاره شد، بخشی از تابش رسیده به سطح خاک از طریق رسانش به خاک عمقی تلف می‌شود. در این مطالعه با توجه به عدم وجود امکانات لازم، برای تعیین دمای خاک زیرین از اعداد گزارش شده در دیگر مطالعات استفاده شد که به نظر می‌رسد مناسب شرایط این مطالعه نیست و لازم است مطالعات دقیق‌تری بر

درجه حدود 30°C بین این دو دماست.



شکل ۳- میزان تابش عبوری از قسمت‌های مختلف گلخانه در طول روز



شکل ۴- دمای اندازه‌گیری شده هوای محیط، هوای داخل گلخانه، سطح خاک و سطح داخلی دیواره شمالی در مدت آزمایش

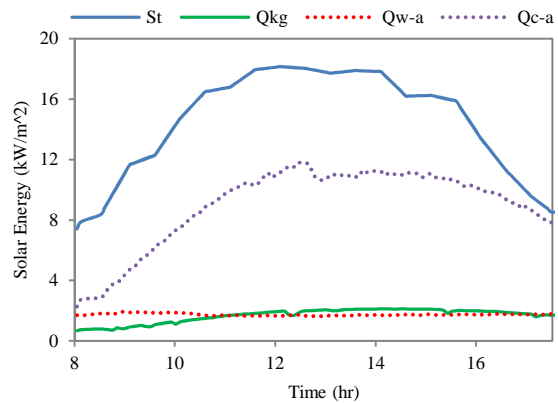
بیشینه دمای هوای داخل گلخانه حدود 66°C بود که در ساعت ۱۳ اتفاق افتاد. همان‌طور که در منابع ذکر شده است برخورد امواج کوتاه خورشیدی به سطح خاک باعث افزایش دمای آن شده و این گرما از طریق تابش و همرفت باعث گرمایش هوای گلخانه می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مطالعه دمای خاک گلخانه بالاترین دما را طی آزمایش داشت. همچنین اختلاف دمایی خاک و دمای هوای داخل گلخانه به‌طور متوسط 13°C بود که این اختلاف در ساعات ظهر که اوج تابش خورشیدی وجود داشت بیشترین بود. نتایج همچنین نشان داد برای گلخانه مورد مطالعه اختلاف دمایی هوای داخل گلخانه و دمای هوای محیط به‌طور متوسط 26°C بود.

برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی گلخانه از مفاهیم انتقال گرما استفاده شد و با استفاده از ورودی‌های تابش خورشیدی در سطح افق، دمای هوای محیط، دمای سطح بیرونی دیواره شمالی، دمای شیشه و سرعت باد و همچنین برخی مقادیر ثابت گلخانه، میزان دمای هوای داخلی گلخانه، دمای سطح خاک و دمای سطح داخلی دیواره شمالی پیش‌بینی شد. نتایج شبیه‌سازی رفتار حرارتی گلخانه نشان داد که مدل ارائه شده به خوبی قادر به پیش‌بینی دمای هوای داخل گلخانه و دمای سطح داخلی دیواره شمالی می‌باشد.

در شکل (۵) مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای دمای هوای داخلی گلخانه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده وجود

روی دمای خاک عمقی صورت پذیرد.

شکل (۶) تلفات در قسمت‌های مختلف گلخانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تلفات از پوشش گلخانه اتفاق می‌افتد (Qc-a). نتایج نشان داد که حدود ۶۱٪ از تابش خورشیدی ورودی به داخل گلخانه از طریق پوشش گلخانه به بیرون تلف می‌شود. این اتلاف حرارت به صورت همرفت از سطح پوشش و همچنین تبادل تابشی با آسمان است. تلفات از دیواره شمالی و همچنین از کف گلخانه به خاک عمقی بخش کمتری از تلفات را شامل می‌شود. نتایج نشان داد که تلفات از دیواره شمالی و کف گلخانه به ترتیب ۱۱٪ و ۱۲٪ از کل تابش ورودی را به خود اختصاص داده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش اعظم تلفات از طریق پوشش گلخانه اتفاق می‌افتد. استفاده از پردهای حرارتی داخلی یا خارجی می‌تواند عامل مهمی در کاهش این تلفات به‌خصوص در شب‌های سرد زمستان و کاهش میزان انرژی مصرفی در گلخانه‌های کشاورزی باشد. در مطالعه‌ای که در کشور عربستان انجام شد سهم تلفات از پوشش یک گلخانه که حاوی گیاه بود حدود ۳۳/۵٪ عنوان شد. همچنین در این مطالعه گزارش شد که حدود ۳۷٪ از تابش ورودی به داخل گلخانه در گیاهان جذب می‌شود و تنها ۱٪ از کل تابش ورودی در هوای گلخانه جذب می‌شود [۳].



شکل ۶- تلفات حرارتی از قسمت‌های مختلف گلخانه در مدت آزمایش

۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این مطالعه ارائه یک مدل دینامیکی برای شبه‌سازی انتقال گرما و تخمین دماهای داخلی گلخانه شامل دمای هوای گلخانه، دمای سطح خاک و دمای سطح داخلی گلخانه بود. بدین منظور معادلات تعادل انرژی در هر یک از این بخش‌های گلخانه نوشته شد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد.

- در گلخانه مورد مطالعه بیشترین تابش خورشیدی از سقف جنوبی جذب می‌شود؛ به‌طوری که حدود ۷۲٪ تابش دریافتی در طول روز از این قسمت جذب می‌شود. همچنین کمترین میزان جذب تابش از دیواره جنوبی اتفاق می‌افتد (حدود ۷٪).
- اختلاف دمای هوای داخل گلخانه با هوای محیط به‌طور متوسط 26°C بود که این اختلاف مخصوصاً در ساعات نزدیک ظهر خورشیدی که تابش خورشیدی حداکثر بود ماکزیمم بود.
- نتایج شبه‌سازی نشان داد برای دمای داخلی گلخانه

همبستگی بالایی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده وجود دارد؛ به‌طوری که میانگین درصد خطای مدل ارائه شده کمتر از ۴٪ بود.

۴. بیشترین تلفات از گلخانه به بیرون از پوشش اتفاق می‌افتد؛ به‌طوری که از کل تابش خورشیدی ورودی به داخل گلخانه حدود ۶۱٪ از طریق همرفت و تلفات تابشی از سطح پوشش به بیرون تلف می‌شود.

۵- نمادهای انگلیسی

A	مساحت (m^2)
C	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
F	ضریب دید (-)
F_n	کسر تابش فرودی به دیواره شمالی (-)
E_b	توان گسیل جسم سیاه (Wm^{-2})
h_{co}	ضریب انتقال گرمای همرفتی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
J	تابندگی سطح (Wm^{-2})
k	رسانندگی گرمایی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
M	جرم (kg)
q_{co}	انتقال گرمای همرفتی (W)
q_r^{net}	میزان تابش حرارتی خالص (W)
q_{kg}	نرخ انتقال گرمای رسانشی به خاک عمقی (W)
q_{sc}	تابش خورشیدی جذب شده در پوشش (W)
q_{sg}	تابش خورشیدی جذب شده در خاک (W)
q_{sw}	تابش خورشیدی جذب شده در دیواره شمالی (W)
Q	نرخ انتقال گرمای تابشی از سطح (W)
R	مقاومت سطح در برابر تابش (m^{-2})
S_t	شار تابش خورشیدی کل در سطح خارجی پوشش (W)
S_{ti}	شار تابش خورشیدی کل در داخل گلخانه (W)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
t	زمان (S)
V	سرعت باد (ms^{-1})
t	زمان (S)
x	ضخامت دیواره شمالی (m)
z	عمق خاک (m)

نمادهای یونانی

α_c	ضریب جذب پوشش به تابش خورشیدی (-)
α_{ct}	ضریب جذب پوشش به تابش حرارتی (-)
α_g	ضریب جذب خاک به تابش خورشیدی (-)
α_w	ضریب جذب دیواره شمالی به تابش خورشیدی (-)
α_{wt}	ضریب جذب دیواره شمالی به تابش حرارتی (-)
ϵ	ضریب گسیلندگی (-)
σ	ثابت استفان-بولتسمان ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

زیر نویس‌ها

a	هوای محیط
c	پوشش گلخانه
g	کف گلخانه
r	هوای داخل گلخانه

2367–2373, 2010.

- [10] Singh G., Singh P. P., Lubana P.P. S., and Singh K. G., Formulation and validation of mathematical model of microclimate in a greenhouse, *Renew Energy*, Vol. 31, pp. 1541–1560, 2006.
- [11] Ghosal M. K., and Tiwari G. N., Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse, *Energy Convers Manage*, Vol. 47, pp. 1779–1798, 2006.
- [12] Tanwanichkul B., Thepa S., and Rordprapat W., Thermal modeling of the forced convection Sandwich Greenhouse drying system for rubber sheets, *Energy Convers Manage*, Vol. 74, pp. 511–523, 2013.
- [13] Singh R. D., and Tiwari G. N., Thermal heating of controlled environment greenhouse: a transient analysis, *Energy Convers Manage*, vol. 41, pp. 505–522, 2000.
- [14] Tiwari G. N., Din M., Shrivastava N. S. L., Jain D., and Sodha M. S., Evaluation of solar fraction ($F_{r,n}$) for north wall of a controlled environment greenhouse: an experimental validation, *Int J Energy Res*, Vol. 26, pp. 203–215, 2002.
- [15] Gupta R., Tiwari G. N., Kumar A., and Gupta Y., Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD, *Energy Buildings* Vol. 47, pp. 27–34, 2012.
- [16] Chou S. K., Chau K. J., Ho J. C., and Ooi C. L., On the study of an energy-efficient greenhouse for heating and dehumidification application, *Appl Energy*, Vol. 77, pp. 355–373, 2004.
- [17] Duffie J. A., and Beckman W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, fourth edition, John Wiley & Son, New Jersey, 2013.
- [18] Gupta A., and Tiwari, G. N., Computer model and its validation for prediction of storage effect of water mass in a greenhouse: a transient analysis, *Energy Convers Manage* Vol. 43, pp. 2625–2640, 2002.
- [19] Mobtaker H. G., Ajabshirchi Y., Ranjbar S. F., Matloobi M., Amini C., Determining of total solar fraction and solar fraction for north wall of different-shaped greenhouses using Auto-CAD software, *ISESCO J Sci Tech*. In Press.

دیواره شمالی گلخانه	w
سطح داخلی دیواره شمالی گلخانه	wi
سطح بیرونی دیواره شمالی گلخانه	wo
آسمان	sky
خاک زیرین	0

۶- مراجع

- [1] Joudi K. A., and Farhan A. A., A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse, *Energy Convers Manage*, Vol. 91, pp. 76–82, 2015.
- [2] Mashonjowa E., Ronsse F., Milford J. R., and Pieters JG., Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model, *Sol Energy*, Vol. 91, pp. 381–393, 2013.
- [3] Abdel-Ghany A. M., and Al-Helal I. M., Solar energy utilization by a greenhouse: General relations, *Renew Energy*, Vol. 36, pp. 189–196, 2011.
- [4] Trigui M., Barrington S., and Gauthier L., A strategy for greenhouse climate control. Part I: model development, *J Agric Engine Res*, Vol. 78, pp. 407–413, 2001.
- [5] Abdel-Ghany A. M., and Kozai T., Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse, *Renew Energy*, vol. 31, pp. 1521–1539, 2006.
- [6] Sengar S. H., and Kothari S., Thermal modeling and performance evaluation of arch shape greenhouse for nursery raising, *Afr J Math Comput Sci Res*, Vol. 1, pp. 1–9, 2008.
- [7] Sethi V. P., and Sharma S. K., Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system, *Sol Energy*, Vol. 81, pp. 723–741, 2007.
- [8] Sethi V. P., On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation, *Sol Energy*, vol. 83, pp. 21–38, 2009.
- [9] Singh R. D., and Tiwari G.N., Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis, *Energy*, vol. 35, pp.