

ارزیابی مدل‌های ریاضی انتقال حرارت و رگرسیون چندگانه در پیش‌بینی متغیرهای داخلی گلخانه نیمه‌خورشیدی

مرتضی تاکی^۱ - یحیی عجب‌شیرچی^۲ - سید فرامرز رنجبر^۳ - عباس روحانی^{۴*} - منصور مطلوبی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

در کشاورزی مدرن نقش گلخانه به‌عنوان ابزاری برای افزایش میزان کمیت و کیفیت محصول کشت شده، بسیار حائز اهمیت است. شرایط داخلی گلخانه معمولاً بسیار پیچیده و تابع برخی عوامل داخلی و بیرونی است که معمولاً تخمین آن‌ها به‌درستی امکان‌پذیر نیست. هدف از اجرای این تحقیق، تخمین دمای هوای داخلی (T_a) و دمای سقف گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی با استفاده از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و رگرسیون چندگانه است. گلخانه مورد نظر با توجه به انواع مرسوم منطقه و براساس دریافت بیش‌ترین میزان انرژی خورشیدی در تمام فصول سال طراحی و ساخته شد. از برخی عوامل داخلی از جمله دمای هوا، سقف، خاک و برخی عوامل بیرونی از جمله دمای هوای محیط، سرعت باد و شدت تابش خورشید روی سقف گلخانه، به‌عنوان ورودی‌های مدل رگرسیونی استفاده شد. نتایج نشان داد که کارایی مدل رگرسیونی در تخمین پارامترهای موردنظر بیش‌تر از مدل حرارتی است. ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل حرارتی در تخمین پارامترهای (T_a) و (T_{in}) به‌ترتیب معادل ۱/۵۵ و ۶/۵۴ برابر بیش‌تر از مقادیر این شاخص برای مدل رگرسیونی بود. همچنین مقدار شاخص ویلموت (W) و فاکتور کارایی مدل (EF) برای مدل حرارتی در تخمین پارامترهای فوق به‌ترتیب معادل ۰/۰۱۳ و ۰/۲۲۰، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۴۱ کم‌تر از مقادیر مشابه مدل رگرسیونی بود که نشان از عدم تطبیق مناسب داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی توسط مدل حرارتی است. پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌ها از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در تخمین متغیرهای داخلی گلخانه استفاده شود و نتایج به‌دست آمده با مقادیر مشابه دو مدل فوق، مقایسه گردد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، کارایی مدل، گلخانه نیمه‌خورشیدی، مدل‌سازی

- ۱- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، اهواز
 - ۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه تبریز
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز
 - ۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد
 - ۵- استادیار گروه باغبانی دانشگاه تبریز
- *- نویسنده مسئول:
(Email: arohani@um.ac.ir)

| Nomenclature اختصارات | | | | | |
|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|-------------------------------|--|
| $\Phi_{win} \{m^3 s^{-1}\}$ | Outlet air flow rate through the air conditioning system نرخ جریان هوای خروجی از گلخانه توسط سیستم تهویه | $\dots_{a-ri} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$ | Heat transfer coefficient between inside air and roof ضریب انتقال حرارت مابین هوای گلخانه و سقف | $\dots_a \{kgm^{-3}\}$ | Density of air چگالی هوا |
| $Q_{s-ri} \{W\}$ | Heat transfer from soil to roof انتقال حرارت تابشی بین سقف گلخانه و خاک | $\dots_{ri-o} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$ | Heat transfer coefficient from roof to outdoor air ضریب انتقال حرارت مابین هوای بیرون گلخانه با سقف گلخانه | $c_{p-a} \{Jkg^{-1} K^{-1}\}$ | Air specific heat capacity ظرفیت گرمایی ویژه هوا |
| $\Gamma_{a-s} \{Wm^{-2} K^{-1}\}$ | Heat transfer coefficient between air and soil ضریب انتقال حرارت بین هوای گلخانه و خاک | $E_{sk} \{-\}$ | Emission coefficient for sky ضریب انتشار نور توسط آسمان | $f_a \{-\}$ | Infiltration factor ضریب نشتی گلخانه |
| $\epsilon_o \{ms^{-1}\}$ | Outdoor wind speed سرعت باد در خارج از گلخانه | $F_{ri-sk} \{-\}$ | View factor from roof to sky فاکتور دید بین سقف گلخانه و آسمان | $A_r \{m^2\}$ | Surface area of roof مساحت سطح سقف گلخانه |
| $I_{roof} \{Wm^{-2}\}$ | Solar radiation intensity on the roof شدت تابش خورشید روی سقف | $A_{nw} \{m^2\}$ | Surface area of north wall مساحت سطح دیواره شمالی گلخانه | $V_r \{m^3\}$ | Volume of greenhouse roof حجم سقف گلخانه |
| $T_{nw-o} \{K\}$ | Outside north wall temperature دمای قسمت بیرونی دیواره شمالی | $\dots_{nw} \{Wm^{-1} K^{-1}\}$ | North wall thermal conductivity ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره شمالی | $Q_{a-s} \{W\}$ | Heat transfer between inside air and soil انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و خاک |
| $T_{nw-in} \{K\}$ | Inside north wall temperature دمای قسمت داخلی دیواره شمالی | $dnw \{m\}$ | Thickness of north wall ضخامت دیواره شمالی گلخانه | $Q_{a-o} \{W\}$ | Heat transfer from indoor air to outdoor air انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و محیط بیرون |
| $T_a \{K\}$ | Indoor air temperature دمای هوای گلخانه | $c_{p-r} \{Jkg^{-1} K^{-1}\}$ | Specific heat capacity of roof (glass) ظرفیت گرمایی ویژه سقف گلخانه | $\Phi_{leak} \{m^3 s^{-1}\}$ | Transferred air flow rate to outdoor air due to leakage جریان هوای منتقل شده از طریق نشتی |
| $T_{ri} \{K\}$ | Roof temperature دمای هوای سقف گلخانه | $Q_{a-ri} \{W\}$ | Heat transfer from indoor air to roof انتقال حرارت همرفتی بین هوای گلخانه و سقف | $Q_{rd-ri} \{W\}$ | absorption of shortwave radiation by greenhouse roof جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط سقف گلخانه |
| $T_s \{K\}$ | Soil temperature (upper layer) دمای قسمت بیرونی خاک گلخانه | $\dots_{ri-is} \{-\}$ | Absorption coefficient of shortwave radiation by roof ضریب جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط سقف گلخانه | $V_a \{m^3\}$ | Volume of greenhouse air حجم هوای گلخانه |
| $T_{ss} \{K\}$ | Soil temperature (subsoil layer) دمای قسمت عمقی خاک گلخانه | $E_s \{-\}$ | Emission coefficient for soil ضریب انتشار نور توسط خاک | $\dots_r \{kgm^{-3}\}$ | Density of roof (Glass) چگالی سقف گلخانه (شیشه) |
| $T_{sk} \{K\}$ | Sky temperature دمای آسمان | $E_{ri} \{-\}$ | Emission coefficient for roof ضریب انتشار نور توسط سقف گلخانه | $\dagger \{Wm^{-2} K^{-4}\}$ | Stefan-Boltzmann constant ضریب ثابت استفان بولتزمن |
| | | | | $F_{s-ri} \{-\}$ | View factor from soil to roof فاکتور دید بین خاک و سقف گلخانه |

مقدمه

ساخت گلخانه‌های کشاورزی معمولاً مبتنی بر مدل‌سازی اولیه فرآیند انتقال حرارت و جرم می‌باشد که متأسفانه در این راستا تحقیقات بسیار اندکی انجام گرفته است. مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت داخل گلخانه، از دهه ۶۰ میلادی شروع شد. مدل‌های اولیه بسیار ساده و در عین حال پر خطا بودند. مدل مورد استفاده در هر گلخانه باید به قدری عمومی و قابل فهم باشد که بتوان در مقیاس تجاری و به صورت آسان از آن استفاده کرد. این در حالی است که این مدل‌ها باید به طور نسبی کامل باشند تا بتوانند وقایع حرارتی مهم داخل گلخانه را به طور کامل نشان دهند (Alonso et al., 2012).

تلاش‌های اولیه برای توسعه مدل‌های مختلف تنها به ارائه انواع ساده به منظور محاسبه میزان گرمای مورد نیاز و همچنین نرخ تهویه

مصرف بی‌رویه انرژی در اکثر گلخانه‌های ایران باعث افزایش قیمت تمام شده محصول، آلودگی محیط‌زیست و هدر رفت منابع با ارزش فسیلی طی دهه‌های گذشته شده است. در این راستا تحقیقات بسیاری در مورد بررسی مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن در گلخانه‌های کشاورزی انجام شده است (Abdi et al., 2012; Banaeian et al., 2011; Taki et al., 2013; Canakci and Akinci, 2006; Omid et al., 2011). در اکثر تحقیقات صورت گرفته، نهاده سوخت مصرفی بیش‌ترین سهم از کل نهاده‌های اولیه را در بر می‌گیرد. یکی از دلایل اصلی مصرف بی‌رویه این نهاده در گلخانه‌های ایران، پوشش و اسکلت نامناسب و غیرعلمی در انواع گلخانه‌های مرسوم ایرانی است. ابتدایی‌ترین اصول مهندسی در

حرارت به‌منظور تخمین دمای گلخانه‌ای یک‌طرفه با شیب سقف ۲۶/۶ درجه در کشور عراق استفاده شد (Joudi and Farhan, 2015). نتایج نشان داد که مدل مورد استفاده قادر است دمای هوا و خاک گلخانه را به‌ترتیب با خطای مطلق بین ۸ تا ۱۳٪ پیش‌بینی کند. با توجه به موارد فوق، هدف از این مقاله مقایسه بین مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و مدل‌های رایج رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف یک گلخانه نیمه‌خورشیدی تحقیقاتی ساخته شده در دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز است. مقایسه بین این دو نوع مدل نیمه‌تجربی و ریاضی می‌تواند به‌درستی میزان خطا در هر دو نوع مدل را مشخص کرده و در آینده مورد استفاده طراحان و سازندگان گلخانه‌های پیشرفته قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

انتخاب نوع گلخانه و محل اجرای تحقیق

گلخانه در حالت کلی از نظر دریافت انرژی خورشیدی می‌تواند به انواع خورشیدی و یا مرسوم دسته‌بندی شود. در گلخانه‌های خورشیدی معمولاً انتخاب بهترین نوع گلخانه از نظر دریافت انرژی خورشیدی بارزترین شاخص است. مواردی از قبیل افزودن صفحه حرارتی داخلی و خارجی^۵، کاهش میزان تلفات انرژی داخلی، انتخاب بهترین جنس از نظر دریافت و تلفات انرژی، افزودن منابع جاذب انرژی خورشیدی (از جمله دیوار شمالی^۶، کلکتور زمینی^۷، آبخوان زیرزمینی^۸ و سایر منابع)، استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌منظور تأمین نیاز حرارتی گلخانه در فصل زمستان و در نهایت تأمین تمامی نیازهای حرارتی گلخانه از منابع تجدیدپذیر می‌تواند یک گلخانه مرسوم را به سمت گلخانه خورشیدی سوق دهد (Vadiei and Martin, 2013). در این تحقیق چون چندین عامل از مشخصه‌های یک گلخانه خورشیدی (بهترین شکل و جهت، دیواره سیمانی شمالی و صفحه حرارتی (انواع پلاستیکی منعطف‌شونده یا سخت) به یک گلخانه مرسوم افزوده شد، لذا گلخانه مورد استفاده یک گلخانه نیمه‌خورشیدی محسوب می‌شود (شکل ۱).

این تحقیق در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و محل ساختمان بیوانرژی و بازیافت دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز واقع در جاده باسمنج انجام گرفت. بدین منظور در ابتدا از انواع طرح‌های متداول و مرسوم گلخانه در منطقه (شکل ۲)، بهترین آن‌ها با توجه به دریافت حداکثری میزان تابش خورشید براساس داده‌های مربوط به ایستگاه هواشناسی شهرستان تبریز (میزان تابش) و با در نظر گرفتن

گلخانه‌ها معطوف بود که همگی مدل‌های پایا^۱ بوده و دقت پایینی داشتند (Morris, 1956; Mccune and Stipe, 1960; Walker, 1965). در طبقه‌بندی دوم، برخی از تحقیقات معطوف به بررسی اثرات ساختار گلخانه، محل قرارگیری، جهت قرارگیری و فاکتورهای گرم‌کردن و خنک‌کاری گلخانه شد (Chandra, 1976; Simpkins, 1979; Chandra and Albright, 1978). تحقیقات بعدی بیش‌تر معطوف به مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه با توجه به پارامترهای داخلی و بیرونی و در نظر گرفتن جزئیات بیش‌تر شد. مدل‌سازی گلخانه از سال ۱۹۸۵ با سرعت بیش‌تری پیشرفت کرد. این نوع مدل‌ها معمولاً با نام نویسندگان مقاله مشهور هستند و به‌ترتیب عبارتند از (Willits et al., 1985; Fuller et al., 1987; Hollmuller and Lachal, 1998; Buchholz et al., 2006; Heuvelink and Bakker, 2008; Hoes and Desmedt, 2008; Van Straten et al., 2011). مدل‌های فوق معمولاً با اعتبارسنجی در انواع گلخانه‌ها و براساس کم‌ترین میزان خطا پیشنهاد می‌شوند. از نرم‌افزارهای TRANSYS، Fortran و همچنین متلب^۲ برای حل عددی یا ریاضی معادلات انتقال حرارت و جرم در مدل‌های فوق استفاده می‌شود. در تحقیقی به ارائه روابط عمومی انتقال حرارت به‌منظور مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای گنبدی شکل در کشور عربستان پرداخته شد (Abdel Ghany and Helal, 2011). در این تحقیق گلخانه‌ای پلاستیکی به مساحت ۳۴ مترمربع ساخته و فرآیند انتقال حرارت بین گیاه، پوشش، خاک و هوای داخل گلخانه مدل‌سازی شد. همچنین نرخ تبخیر و تعرق گیاه به‌صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که اگر شاخص سطح برگ^۳ برای گیاه گوجه‌فرنگی کم‌تر از ۱/۵ باشد، میزان خطای مدل حدود ۱/۷٪ خواهد بود و اگر شاخص سطح برگ بیش‌تر از ۵ باشد، خطا تا حدود ۰/۷٪ کاهش خواهد یافت. از کل تابش خورشیدی ورودی به گلخانه، حدود ۱۰٪ آن صرف تبخیر و تعرق گیاه شده بود (شاخص سطح برگ معادل سطح برگ گیاه به سطح زمینی است که توسط گیاه اشغال شده است). در تحقیق دیگری در کشور هند از مدل‌های تجربی انتقال حرارت و روش شبه‌پایا به‌منظور تخمین دمای یک گلخانه‌ی مجهز به کلکتور هوایی تحت استفاده شد (Nayak and Tiwari, 2006). نتایج نشان داد که مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE) مدل حرارتی در تخمین دمای گلخانه در شرایط مختلف بین ۷/۰۵ تا ۱۷/۵۸ درصد قابل تغییر است. این درحالی است که ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۷ متغیر بود. در تحقیق دیگری از مدل‌های انتقال

5- Inside and outside thermal screen

6- North wall

7- Ground collector

8- Ground aquifer

1- Steady state models

2- MATLAB

3- Leaf area index (LAI)

4- Root Mean Square Error (RMSE)

بین هوای داخل گلخانه و قسمت داخلی سقف و همچنین بین هوای گلخانه و خاک توسط روابط موجود در جدول ۱ حاصل می‌شود. مقادیر ضریب انتقال حرارت همرفتی () نیز در جدول ۱ آورده شده است.

فاکتور Q_{a-o} اشاره به فرآیند تهویه در گلخانه نیمه‌خورشیدی دارد که مقدار آن توسط رابطه (۲) مشخص می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{a-o} = \dots \times c_{p-a} \times \{ T_a - T_o \} \quad (2)$$

در رابطه فوق، مقدار Φ_{a-o} توسط رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$\Phi_{a-o} = A_s (8.3 \times 10^{-5} + 3.5 \times 10^{-5} v_o \times f_a) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، v_o مقدار سرعت باد در خارج از گلخانه و f_a فاکتور نفوذ^۴ و بدون بعد می‌باشد. فاکتور نفوذ برای گلخانه‌های تازه ساخت معمولاً عدد یک در نظر گرفته می‌شود (Vadice, 2011). در این تحقیق چون تمام تلاش بر این بود که رفتار گلخانه شبیه به گلخانه‌های بسته و تقریباً خورشیدی مورد بررسی قرار گیرد و از طرفی به دلیل عدم کشت گیاه، در طول آزمایش در پیچه‌های تهویه باز نشدند، بنابراین نرخ جریان هوای عبوری از طریق پنجره گلخانه صفر در نظر گرفته شد.

پارامتر $Q_{nwi-nwo}$ یا میزان تلفات ناشی از هدایت دیواره شمالی با محیط بیرون از رابطه (۴) به دست می‌آید (Van Straten et al., 2011):

$$Q_{nwi-nwo} = A_{nw} \times \left\{ \frac{dnw}{dnw} (T_{nwo} - T_{nwi}) \right\} \quad (4)$$

دیواره شمالی در گلخانه مورد نظر از جنس آجر با روکش سیمان است به قطر ۲۵ سانتی‌متر که به منظور جلوگیری از تلفات بیش از حد از دیواره شمالی در فصل زمستان (قسمت بیرونی دیواره شمالی به دلیل عدم دریافت نور در طول روز، همیشه اختلاف دمای زیادی با قسمت داخلی دارد که عایق کاری این دیواره در فصل زمستان و براساس منابع می‌تواند تا بیش از ۲۰٪ از تلفات هدایتی دیواره به محیط بیرون بکاهد) ساخته شده است. در رابطه (۴)، T_{nwo} و T_{nwi} به ترتیب دمای داخل و بیرون دیواره شمالی است که توسط حسگر دما (SHT11) در چندین نقطه جمع‌آوری شد و سپس از مقادیر به دست آمده میانگین‌گیری به عمل آمد.

نرخ تغییرات زمانی دمای سقف داخل گلخانه نیمه‌خورشیدی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Van Straten et al., 2011):

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{nl-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{\dots \times c_{p-r} \times V_r} \quad (5)$$

در رابطه (۵) پارامتر Q_{a-ri} (رجوع به جدول ۱) اشاره به میزان جذب انرژی خورشیدی توسط سقف گلخانه دارد که توسط رابطه ۶

شیب سقف (انتخاب این شیب براساس ارتفاع اوج گلخانه، دیواره‌های جانبی و میزان دریافت حداکثری نور خورشید بود) انتخاب شد. بر اساس نتایج اولیه تخمین میزان دریافت انرژی خورشیدی، گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی (گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر) در مقایسه با متوسط تابش دریافتی سالیانه سایر گلخانه‌ها، ۹٪ تابش قابل استفاده بیش‌تری دریافت می‌کند. همچنین میزان دریافت انرژی خورشیدی این ساختار در فصول سرد (پاییز و زمستان) نسبت به سایر گلخانه‌ها ۱۱/۵٪ بیش‌تر است.

در این تحقیق به دلیل کار در فصل تابستان و نیاز به برودت بالای گلخانه، از کشت در محیط گلخانه خودداری شد و رفتار گلخانه شبیه به حالت گلخانه بسته در نظر گرفته شد (یعنی از بازکردن پنجره تهویه گلخانه در طول آزمایش خودداری شد که این کار سبب بالا رفتن دمای گلخانه در اواسط روز می‌شد). این گلخانه دارای مساحت کف ۱۵/۳۶ مترمربع، حجم ۲۶/۴ مترمکعب، مساحت سقف ۱۷/۷ مترمربع، مساحت دیواره جنوبی ۳/۸۴ مترمربع، مساحت دیواره شمالی ۱۱/۵۲ مترمربع و دیواره‌های غربی و شرقی هر کدام ۵/۱۲ مترمربع است. اسکلت گلخانه مورد نظر فلزی است و نوع پوشش آن در سقف به صورت شیشه سکوریت به ضخامت ۴ میلی‌متر و دیواره‌ها از شیشه معمولی به ضخامت ۴ میلی‌متر است که به صورت شرقی- غربی ساخته شده است.

معادلات انتقال حرارت در گلخانه نیمه‌خورشیدی

بزرگترین و مهمترین منبع تولید انرژی در هر گلخانه امواج کوتاه نور خورشید است و انتقال حرارت در گلخانه به سه حالت همرفت^۱، هدایت^۲ و تابش^۳ صورت می‌گیرد که در این بین انتقال حرارت از طریق همرفت بزرگترین نقش در اتلاف انرژی داخلی هر گلخانه را بر عهده دارد (Ntinis et al., 2014). به عنوان نمونه فرآیندهای کلی انتقال حرارت و جرم در گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. در این مقاله، مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت در دو منطقه یک گلخانه نیمه-خورشیدی یعنی هوای داخلی و سقف گلخانه دنبال می‌شود.

نرخ تغییرات زمانی دمای هوای داخل گلخانه نیمه‌خورشیدی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Van Straten et al., 2011):

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nwo}}{\dots \times c_{p-a} \times V_a} \quad (1)$$

مقادیر فاکتورهای Q_{a-s} و Q_{a-ri} یعنی انتقال حرارت همرفتی

- 1- Convection
- 2- Conduction
- 3- Raddiation

$$r_{ni-o} = 2.8 + 1.2V_o \quad \forall V_o < 4 \quad (9)$$

$$r_{ni-o} = 2.5V_o^{0.8} \quad \forall V_o \geq 4$$

پارامتر Q_{ni-sk} یا تلفات ناشی از تابش امواج بلند از سقف گلخانه به آسمان (موجود در رابطه (۵)) توسط رابطه (۱۰) به دست می‌آید (Van Straten *et al.*, 2011):

$$Q_{ni-sk} = A_r \times E_{ni} \times E_{sk} \times F_{ni-sk} \times \dagger (T_{ni}^4 - T_{sk}^4) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، T_{sk} اشاره به دمای آسمان در نقاط دوردست می‌کند که از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود (Joudi and Farhan, 2015):

$$T_{sk} = 0.0552(T_o)^{1.5} \quad (11)$$

مقادیر ثابت روابط و همچنین مقادیر مربوط به ساختار گلخانه در جدول ۲ آورده شده است. به منظور حل دستگاه معادلات فوق از نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۰۹ استفاده شد. بدین منظور برای مدل‌سازی یا به عبارتی تخمین ریاضی مقادیر دمای خاک و هوای گلخانه، مقدار اولیه این دماها به روابط فوق اضافه شد.

مشخص می‌شود:

$$Q_{nl-ni} = A_r \times y_{ni-Is} \times I_{roof} \quad (6)$$

به منظور جمع‌آوری داده‌های مربوط به I_{roof} ، از تابش‌سنج مدل TES 133 هم‌راستا با شیب گلخانه استفاده شد. داده‌ها در چند منطقه گلخانه به‌طور هم‌زمان جمع‌آوری شد و نهایتاً در هر زمان از مقادیر مربوطه میانگین‌گیری به عمل آمد.

در رابطه (۵)، مقدار متغیر Q_{s-ni} یا انتقال حرارت تابشی بین خاک و قسمت داخلی سقف گلخانه توسط رابطه (۷) مشخص می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{s-ni} = A_s \times E_s \times E_{ni} \times F_{s-ni} \times \dagger (T_s^4 - T_{ni}^4) \quad (7)$$

در رابطه (۵)، پارامتر Q_{ni-o} اشاره به میزان تلفات ناشی از جریان همرفتی بیرون با سقف گلخانه دارد که از رابطه (۸) حاصل می‌شود (Van Ooteghem, 2007):

$$Q_{ni-o} = A_r \times r_{ni-o} (T_{ni} - T_o) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، r_{ni-o} یا ضریب همرفتی بین هوای بیرون و سقف گلخانه با توجه به سرعت باد بیرون (V_o) از رابطه (۹) به دست می‌آید (Vadiei, 2011):

جدول ۱- روابط مربوط به محاسبه مقدار Q_{a-s} و Q_{a-ni} در گلخانه نیمه‌خورشیدی (Vadiei, 2011)

Table 1- Equation for calculate the Q_{a-ni} and Q_{a-s} in semi-solar greenhouse (Vadiei, 2011)

| معادله Equation | ضریب انتقال حرارت همرفتی Conductive heat transfer coefficient $r (Wm^{-2}K^{-1})$ |
|---|---|
| $Q_{a-ni} = A_r \times r_{a-ni} (T_a - T_{ni})$ | $r_{a-ni} = 3 T_a - T_{ni} ^{1/3}$ |
| $Q_{a-s} = A_s \times r_{a-s} (T_a - T_s)$ | $r_{a-s} = 1.7 T_a - T_s ^{1/3} \quad \forall T_a < T_s$ |
| | $r_{a-s} = 1.3 T_a - T_s ^{0.25} \quad \forall T_a \geq T_s$ |



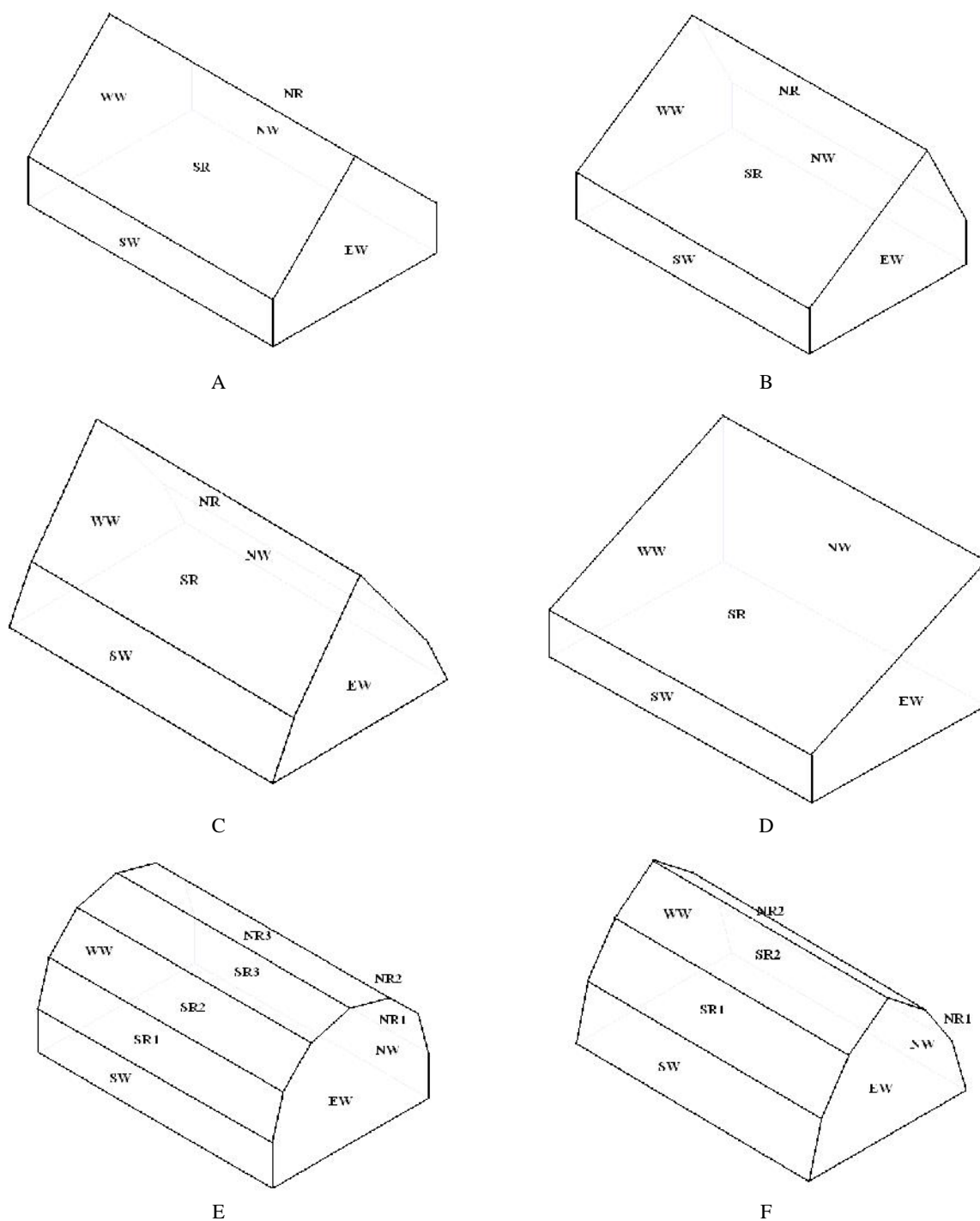
(A)



(B)

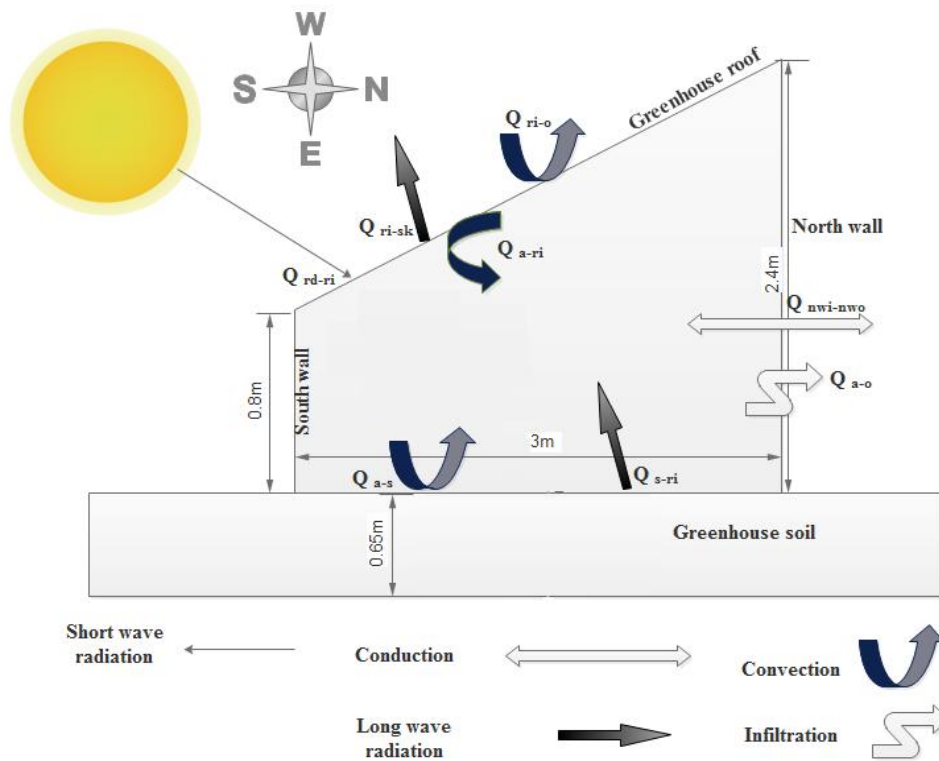
شکل ۱- گلخانه نیمه‌خورشیدی مجهز به دیواره شمالی سیمانی (A و B از دو زاویه کناری)

Fig.1. Semi-solar greenhouse equipped by cement north wall (A and B from two sides)



شکل ۲- انواع گلخانه‌های مرسوم مورد استفاده در این تحقیق (A: دوطرفه، B: نیمه‌دوطرفه، C: خیمه‌ای، D: نیمه‌خورشیدی، E: تونلی، F: کوانست، SW: دیواره جنوبی، SR: سقف جنوبی، NW: سقف شمالی، EW: دیواره شرقی، WW: دیواره غربی)

Fig.2. Typical greenhouse shapes used in this research (A: Even span, B: Uneven span, C: Vinery, D: Semi-solar, E: Arch and F: Quonset, SW= South Wall, SR= South Roof, NR= North Roof, NW= North Wall)



شکل ۳- فرآیندهای کلی انتقال حرارت در گلخانه نیمه-خورشیدی در دو فاز
 Fig.3. The heat transfer mechanism in the semi-greenhouse in two phase

جدول ۲- مقادیر ثابت روابط و همچنین پارامترهای ساختاری گلخانه نیمه-خورشیدی

Table 2- Constant values of equations and structural factors of semi-solar greenhouse

| Definition تعریف | Name عنوان | Value مقدار | Definition تعریف | Name عنوان | Value مقدار |
|--|----------------------------------|----------------|---|------------------------------|--------------------|
| Absorption coefficient of shortwave radiation by roof ضریب جذب امواج کوتاه خورشیدی توسط قسمت گلخانه | $\gamma_{ri-ls} \{-\}$ | 0.0173 | Density of air چگالی هوا | $\rho_a \{kgm^{-3}\}$ | 1.21 |
| Emission coefficient for soil ضریب انتشار نور توسط خاک | $E_s \{-\}$ | 0.7 | Specific heat capacity of air ظرفیت گرمای ویژه هوا | $c_{p-a} \{Jkg^{-1}K^{-1}\}$ | 1000 |
| Emission coefficient for sky ضریب انتشار نور توسط آسمان | $E_{sk} \{-\}$ | 0.8 | Infiltration factor ضریب نشتی گلخانه | $f_a \{-\}$ | 1 |
| View factor from roof to sky فاکتور دید بین سقف گلخانه و آسمان | $F_{ri-sk} \{-\}$ | 0.86 | Surface area of roof مساحت سطح سقف گلخانه | $A_r \{m^2\}$ | 17.7 |
| Surface area of north wall مساحت سطح دیواره شمالی گلخانه | $A_{nw} \{m^2\}$ | 11.52 | Volume of greenhouse roof حجم سقف گلخانه | $V_r \{m^3\}$ | 0.0708 |
| North wall thermal conductivity ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره شمالی | $\lambda_{nw} \{Wm^{-1}K^{-1}\}$ | 0.397 | Volume of greenhouse air حجم هوای گلخانه | $V_a \{m^3\}$ | 26.4 |
| Thickness of north wall ضخامت دیواره شمالی گلخانه | $dnw \{m\}$ | 0.25 | Density of roof (Glass) چگالی سقف گلخانه (شیشه) | $\rho_r \{kgm^{-3}\}$ | 2500 |
| Specific heat capacity of roof (glass) ظرفیت گرمای ویژه سقف گلخانه (شیشه) | $c_{p-r} \{Jkg^{-1}K^{-1}\}$ | 840 | Stefan-Boltzmann constant ضریب ثابت استفان بولتزمن | $\dagger \{Wm^{-2}K^{-4}\}$ | 5×10^{-8} |
| Emission coefficient for roof ضریب انتشار نور توسط سقف گلخانه | $E_{ri} \{-\}$ | 0.95 | View factor from soil to roof فاکتور دید بین خاک و سقف | $F_{s-ri} \{-\}$ | 0.8 |

$$EF = \frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2 - \sum_{j=1}^n (p_j - d_j)^2}{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2} \quad (14)$$

$$W = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n [d_j - p_j]^2}{\sum_{j=1}^n [(p_j - \bar{d}) + (d_j - \bar{d})]^2} \quad (15)$$

در روابط (۱۲) تا (۱۵)، d_j ، p_j ، \bar{d} ، \bar{p} ، \bar{d} زامین داده از خروجی واقعی، p_j ، \bar{p} زامین داده از خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل حرارتی، \bar{d} متوسط کل داده‌های واقعی و n تعداد کل داده‌هاست. از بین مدل‌های برازش شده مدلی بهترین است که دارای کم‌ترین مقادیر خطای MAPE و RMSE و بیش‌ترین مقدار عملکرد از شاخص‌های EF و W باشد.

نتایج و بحث

در شکل ۴ (الف) و (ب) میزان دریافت نور خورشید به‌طور ساعتی و دقیقه‌ای روی سقف گلخانه و خارج از گلخانه روی سطح تراز شده زمین نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، پس از عبور از ظهر خورشیدی (تقریباً بعد از ساعت ۱۲) میزان دریافت انرژی روی سقف از میزان دریافت روی سطح آزاد بیش‌تر است که این به دلیل شیب سقف گلخانه است (۲۶/۵۷ درجه). نتیجه این اشکال به‌وضوح میزان درستی محاسبه شیب سقف گلخانه از نظر دریافت حداکثر میزان انرژی خورشیدی در طی روز را نشان می‌دهد. در تحقیقی میزان دریافت و تلفات انرژی در پنج نوع ساختار معمول گلخانه‌ای در کشور هند بررسی شد (Singh and Tiwari, 2010). نتایج نشان داد که گلخانه نیمه دوطرفه با شیب سقف ۲۰ درجه هم از نظر دریافت و هم تلفات انرژی بهترین نوع ساختار است. این گلخانه برای ثابت نگه‌داشتن دما در طول یک روز نیاز به ۲۲۶ مگاژول انرژی داشت که مقدار ۱۲۸ مگاژول آن توسط نور خورشید و مابقی آن توسط سوخت‌های فسیلی به‌دست می‌آمد. معمولاً در مناطقی که در نیم‌کره شمالی قرار می‌گیرند شیب سقف متمایل به سمت جنوب با زاویه‌ای در حدود ± 10 درجه نسبت به عرض جغرافیایی منطقه می‌تواند بیش‌ترین میزان دریافت انرژی را حاصل کند.

در تحقیق حاضر، از رگرسیون چندگانه به‌منظور ایجاد مقایسه با نتایج حاصل از مدل حرارتی استفاده شد. بدین منظور متغیرهای مستقل مدل رگرسیونی برای تشخیص دمای هوای داخل گلخانه

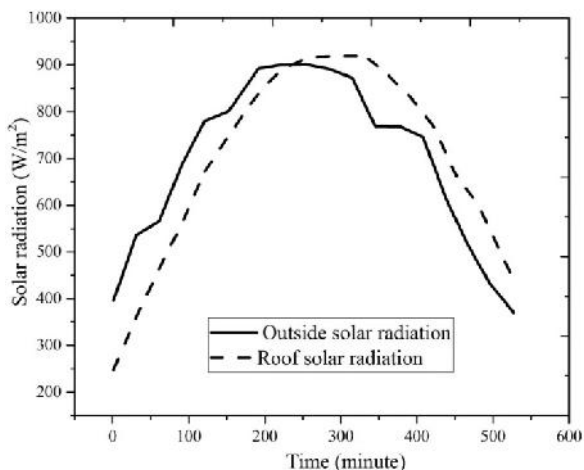
به‌منظور برداشت داده‌های دما از گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد نظر از حسگرهای دما مدل SHT 11 ساخت شرکت CMOS آمریکا استفاده شد. این حسگر از دو نوع حسگر دما و رطوبت مجزا تشکیل شده که خروجی آن‌ها به یک مدل ۱۴ بیتی آنالوگ به دیجیتال متصل شده است. دقت این حسگر در جمع‌آوری دما و رطوبت به‌ترتیب ± 0.4 درجه سانتی‌گراد و ± 3 درصد است. این حسگرها همراه با بورد میکروکنترلر^۱ در قسمت‌های مورد نظر از گلخانه قرار گرفتند و براساس برنامه‌نویسی انجام شده به‌صورت دقیقه‌ای داده‌های دما و رطوبت مربوطه را برداشت می‌کردند. محل نصب حسگرهای تشخیص دما و رطوبت هوای داخلی گلخانه در چهار نقطه گلخانه بود که پس از ضبط داده‌ها از آن‌ها میانگین‌گیری به‌عمل آمد. همچنین حسگر خاک گلخانه، در چند نقطه سطح خاک گلخانه نصب شد و درنهایت از تمامی حسگرها میانگین‌گیری به‌عمل آمد. شبیه به این حالت برای حسگر تشخیص دمای سقف گلخانه اتفاق افتاد. به‌منظور برداشت داده‌های تابش در خارج از گلخانه، در ارتفاع یک متری و تراز شده زمین، از تابش‌سنج مدل TES1333 استفاده شد. این نوع تابش‌سنج قادر است داده‌های تابش در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر را بادقتی در حدود ۵٪ برداشت کند. همچنین داده‌های مربوط به شدت تابش خورشید روی سقف گلخانه و داخل گلخانه نیز برداشت گردید. سرعت باد در خارج از گلخانه نیز توسط بادسنج مدل YK-2004AH در ارتفاعی حدود دو متر از سطح زمین با دقتی در حدود ± 0.1 متر بر ثانیه برداشت شد. به‌منظور برداشت دمای هوای محیط بیرون نیز از حسگر SHT11 استفاده شد. این حسگر در محفظه‌ای خاص (که در آن جریان آزاد هوا برقرار باشد) و در ارتفاع دو متری سطح زمین قرار گرفت و به‌صورت دقیقه‌ای دما و رطوبت هوای بیرون را ضبط می‌کرد. به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل حرارتی در پیش‌بینی دمای هوا، خاک و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی، از معیارهای متوسط قدرمطلق خطا^۲ (MAPE)، ریشه متوسط مربعات خطا^۳ (RMSE)، درصد کارایی مدل^۴ (EF) و شاخص بازنگری شده ویلموت^۴ (W) بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل حرارتی و مقادیر واقعی آن‌ها استفاده شد (Vadiei, 2011; Taki et al., 2016):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{d_j - p_j}{d_j} \right| \times 100 \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - p_j)^2}{n}} \quad (13)$$

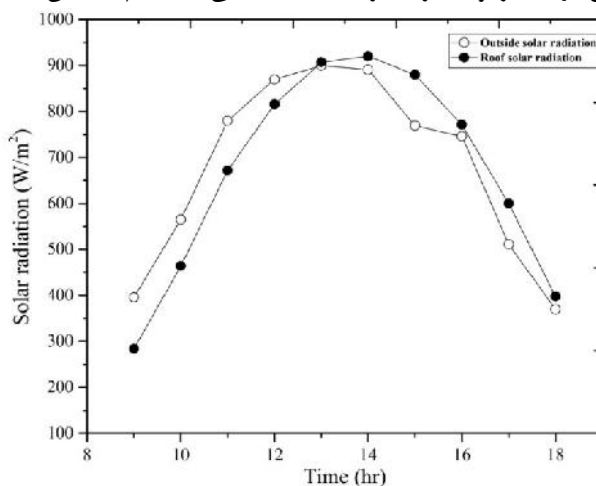
- 1- Microcontroler
- 2- Mean Absolute Percentage Error
- 3- Model efficiency
- 4- Willmott facto

مقدار دمای هوای داخل گلخانه، ابتدا مقادیر اولیه مربوط به دمای هوا و سقف در روابط قرار داده شد و سپس در مرحله بعدی مقادیر ثانویه توسط روابط سنجیده شد و این کار تا پایان ادامه یافت؛ به همین دلیل در صورت بروز خطایی جزئی در هر مرحله، این خطا در مراحل بعدی با خطاهای ایجاد شده جمع شد و در نهایت در اعداد تخمین زده شده، نمایان شد.



(ب)

B



(الف)

A

شکل ۴- دریافت ساعتی (الف) و دقیقه‌ای (ب) انرژی تابشی خورشید روی سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی و محیط بیرون در تاریخ ۱۳۹۴/۰۴/۹

Fig.4. Hourly (A) and minute (B) solar radiation absorption on the roof of semi-solar greenhouse and outdoor surface 30/07/2015

تجدیدپذیر برای گرمایش گلخانه استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت هریک از فاکتورهای ورودی در نتایج خروجی مدل رگرسیونی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که قسمت الف این شکل نشان می‌دهد، دمای خاک بیش‌ترین تأثیر را بر دمای هوای پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی دارد و این نتیجه قابل انتظار است؛ چون در مدل‌های حرارتی رابطه بین دمای خاک با دمای هوا به‌صورت معادله همرفتی (Q_{a-s}) است و مقدار آن همیشه منفی (یعنی انرژی از خاک به هوا منتقل می‌شود) و عددی نسبتاً بزرگ است. قسمت ب این شکل به وضوح نشان می‌دهد که دمای هوای داخل گلخانه بیش‌ترین اثر را بر دمای سقف تخمین زده شده توسط مدل رگرسیونی دارد و دلیل آن رابطه همرفتی هوای داخل گلخانه با سقف شیشه‌ای (Q_{a-n}) است.

در تحقیق دیگری رفتار گلخانه‌ای مرسوم و مجهز به لوله‌های حرارتی با توجه به مدل‌های حرارتی مورد مدل‌سازی قرار گرفت (Du *et al.*, 2012). نتایج حاصل از مدل حرارتی نشان داد که دمای هوای داخل گلخانه و همچنین دمای لایه‌رویی خاک گلخانه بین بازه $\pm 20\%$ اطراف مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده این دو پارامتر در حال تغییر است. این میزان تغییرات با توجه به نتیجه‌گیری نویسندگان در

شامل: دمای خاک (T_s)، دمای سقف (T_{ri})، شدت تابش دریافتی روی سقف (I_r) و دمای هوای بیرون (T_o) در نظر گرفته شد. برای تخمین (T_{ri}) از دمای هوای داخل گلخانه (T_a)، دمای هوای بیرون، سرعت باد بیرون از گلخانه (V_o) و شدت تابش دریافتی روی سقف استفاده شد در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی متغیرهای مورد نظر توسط مدل حرارتی، از مقادیر اولیه هر متغیر استفاده شد. یعنی به هنگام تخمین

به‌منظور بررسی دقیق اثر استفاده از مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه بر نتایج به‌دست آمده، میزان ضریب همبستگی بین داده‌های به‌دست آمده با نتایج واقعی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۳ مقادیر ضریب همبستگی و همچنین ضرایب رگرسیون خطی برای تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد، میزان همبستگی بین داده‌های واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی بیش‌تر از مدل حرارتی است. نتایج این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش‌ها نشان از بیش‌تر بودن دقت حاصل از مدل حرارتی مورد استفاده دارد. در تحقیقی به مدل‌سازی حرارتی گلخانه‌ای مجهز به صفحه حرارتی و آبخوان زیرزمینی پرداخته شد (Shukla *et al.*, 2006). تخمین دمای هوای گلخانه در دو منطقه آن توسط مدل حرارتی نشان از دقت پایین این مدل و رابطه ضعیف بین داده‌های پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی داشت ($r=0.81$, $r=0.87$). میزان خطای مدل مورد استفاده برای تخمین دمای هوا در دو منطقه گلخانه به‌ترتیب معادل $9/7\%$ و $10/2\%$ درصد بود. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تغییرات دمای هوای گلخانه در صورت عدم استفاده از منبع گرم‌کننده بسیار شدیدتر از زمانی است که از منابع فسیلی یا

حد قابل قبول برای مدل‌های حرارتی است.

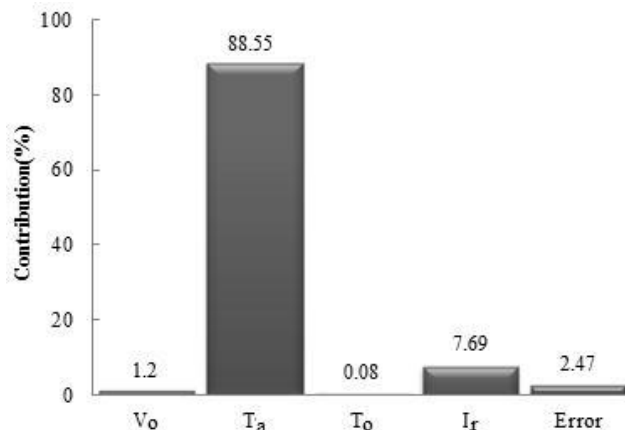
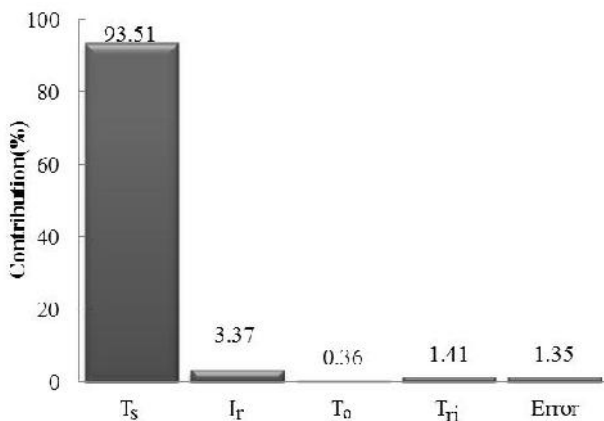
جدول ۳- معادلات حرارتی و رگرسیونی همراه با ضریب همبستگی به‌منظور تخمین دمای هوا و سقف

Table 3- Heat and regression equations to predict inside air and roof temperature

| پارامتر Parameter | مدل Model | معادلات رگرسیونی و حرارتی Regression and heat equation | r |
|----------------------|---------------------------|---|-------|
| T _a | مدل رگرسیونی Reg model | $T_a = 10.98 + (0.3599 \times T_s) - (0.0196 \times I_r) - (0.2003 \times T_o) + (0.7581 \times T_{ri})$ | 0.992 |
| | مدل حرارتی Heat model | $\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nwo}}{r_a \times c_{p-a} \times V_a}$ | 0.961 |
| T _{ri} | مدل رگرسیونی Reg model | $\ln T_{ri} = 2.9963 - (0.09128 \times v_o) + (0.0099 \times T_a) + (0.00721 \times T_o) + (0.000357 \times I_r)$ | 0.975 |
| | مدل حرارتی Heat model | $\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{rd-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{r_r \times c_{p-r} \times V_r}$ | 0.944 |

مدل‌های حرارتی استفاده از روابط نیمه‌تجربی-نیمه‌ریاضی است. محیط داخلی گلخانه به‌دلیل پیچیدگی‌های زیاد و سروکار داشتن با موجود زنده و همچنین تبخیر و تعرق گیاه همیشه با روابط ریاضی و تخمین دقیق پارامترها دچار مشکل بوده است. روابط مورد استفاده به‌طور طبیعی دارای خطای نهفته هستند و ترکیب این روابط با یکدیگر سبب افزایش این خطاها شده و کاهش دقت را در پی خواهد داشت. استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری نیز به‌دلیل داشتن خطاهای طراحی و همچنین خطا در لحظه اندازه‌گیری به کاهش دقت نتیجه نهایی می‌افزایند (Vadiei, 2012).

از مدل شبکه عصبی و مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی درصد رطوبت و دمای هوای داخلی گلخانه‌ای در مراکش استفاده شد (Dariouchy *et al.*, 2009). از رطوبت هوای بیرون از گلخانه، شدت تابش خورشید در سطح افق، جهت و سرعت باد و دمای هوای خروجی به‌عنوان متغیرهای ورودی و دما و درصد رطوبت داخلی گلخانه به‌عنوان خروجی استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد شبکه عصبی از مدل‌های رگرسیونی هم بیشتر است. میزان ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی برای دمای هوا و رطوبت داخلی گلخانه به‌ترتیب معادل ۰/۹۶۵ و ۰/۹۷۸ گزارش شد. یکی از دلایل افزایش میزان خطا در



شکل ۵- اثر فاکتورهای ورودی بر دمای هوا (سمت چپ) و دمای سقف (سمت راست) پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی

Fig.5. Effect of input variables on inside air (left) and roof temperature (right) predicted by multiple regression

واریانس و توزیع آماری هر دو سری داده دلالت دارد. هر فرض در سطح احتمال ۹۵ درصد به کمک پارامتر Pvalue آزمایش گردید. بنابراین اگر *p* محاسبه شده برای هر مقایسه بیشتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر را نمی‌توان رد کرد (Rohani *et al.*, 2011). به‌ترتیب

برای بررسی بیش‌تر قابلیت مدل حرارتی و روش رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی، میانگین و واریانس مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط هر دو مدل، از نظر آماری مقایسه گردید. در این جا فرض صفر، بر تساوی میانگین،

تخمین (T_{ii}) با مقادیر مشابه در مدل رگرسیون کاملاً باهم متفاوتند. جدول ۵ معیارهای عملکردی دو نوع مدل حرارتی و رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی را نشان می‌دهد. شاخص کارایی (EF) کارایی دو نوع مدل را برحسب عددی بین صفر تا صد محاسبه می‌کند. زمانی که درصد کارایی برابر ۱۰۰ باشد، مقدار پارامتر پیش‌بینی شده با مقدار واقعی آن برابر می‌شود و در صورتی که این عدد منفی باشد نشان از عدم کارایی مدل مورد استفاده است (Shukla et al., 2003). شاخص بازنگری شده ویلموت (W) نیز بین صفر تا یک متغیر است و مقدار یک آن بیان‌گر یکسان بودن مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده است (Willmott et al., 1985).

برای مقایسه میانگین و واریانس از آزمون t و F استفاده شد. مقادیر p مقایسه شده برای دمای هوا و سقف گلخانه در جدول ۴ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقایسه میانگین و واریانس مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده دمای هوا و سقف گلخانه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری باهم ندارند و روش رگرسیون چندگانه می‌تواند با قابلیت بالا برای تخمین پارامترهای فوق مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه میانگین برای مدل حرارتی در تخمین دمای هوای داخل گلخانه در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار نیست ولی برای (T_{ii}) هم مقایسه میانگین و هم مقایسه واریانس در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار هستند. یعنی میانگین و واریانس داده‌های حاصل از مدل حرارتی در

جدول ۴- مقایسه میانگین و واریانس برای مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه

Table 4- Comparison mean and variance between actual and predicted value for inside air and roof temperature

| Parameter پارامتر | مدل Model | نوع تحلیل آماری Statistical analysis type | |
|----------------------|----------------------------------|--|---|
| | | مقایسه میانگین Comparison of means | مقایسه واریانس Comparison of variances |
| | | T_a | مدل رگرسیونی Regression model |
| | مدل حرارتی Heat model | 0.3478 | 0.006 |
| T_{ir} | مدل رگرسیونی Regression model | 0.996 | 0.998 |
| | مدل حرارتی Heat model | 0.000 | 0.000 |

جدول ۵- معیارهای عملکردی مدل حرارتی و رگرسیون چندگانه در تخمین T_a و T_{ii}

Table 5- Performance criterion of heat and regression to predict T_a and T_{ii}

| نوع مدل Model type | معیار عملکردی Performance criterion | | | | | |
|-----------------------|--|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | MAPE (%) | RMSE (°C) | R | EF | W | |
| T_a | مدل رگرسیونی Regression model | 1.5543 | 1.7829 | 0.988 | 0.955 | 0.988 |
| | مدل حرارتی Heat model | 4.1636 | 2.7754 | 0.961 | 0.952 | 0.975 |
| T_{ir} | مدل رگرسیونی Regression model | 1.5375 | 1.0262 | 0.987 | 0.976 | 0.991 |
| | مدل حرارتی Heat model | 12.0914 | 6.7093 | 0.944 | 0.935 | 0.771 |

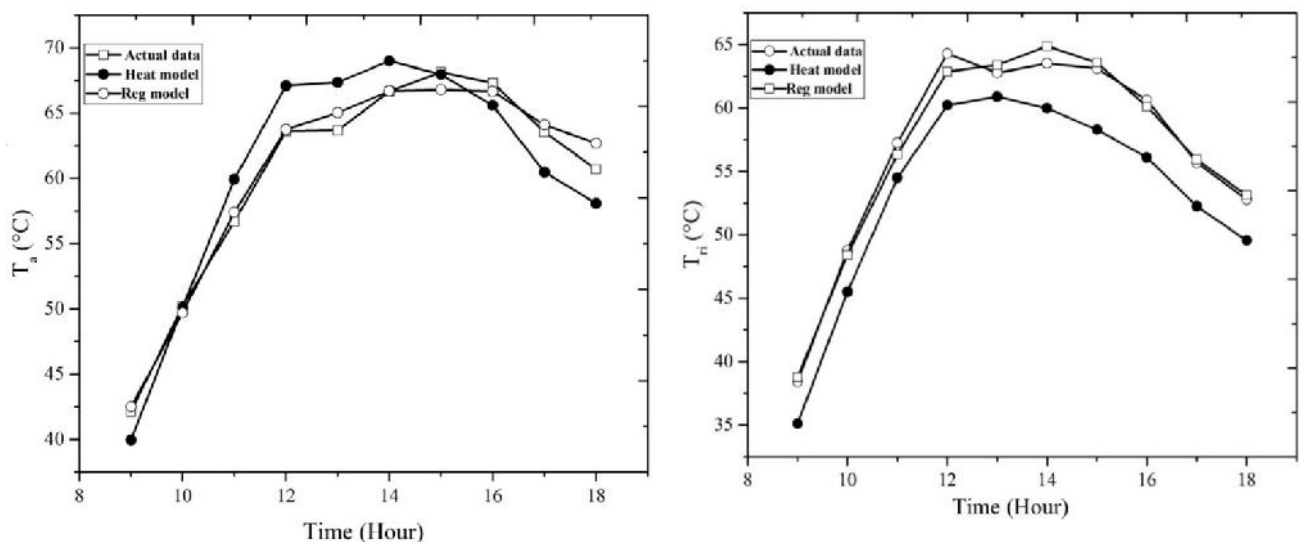
هر دو حالت بیش‌تر است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که مدل حرارتی در تخمین دمای هوای داخلی گلخانه نسبت به دمای سقف گلخانه کارایی بیش‌تری نشان داده است. یکی از دلایل این امر می‌تواند به دلیل جریان باد و عدم یکنواختی توزیع آن در تمام سطح گلخانه باشد؛ همچنین عدم اطمینان از صحت داده‌های برخی فاکتورها از جمله نوع شیشه و ضرایب ثابت مربوط به آن، ضرایب دید

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که متوسط قدر مطلق خطا (MAPE) در مدل حرارتی نسبت به رگرسیون چندگانه در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی به ترتیب حدود ۳ و ۸ برابر بیش‌تر است. همچنین شاخص کارایی مدل رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نسبت به مدل حرارتی بیش‌تر است. مقدار شاخص ویلموت (W) نیز برای مدل رگرسیونی نسبت به حرارتی در

مدل، عدم قطعیت از صحت برخی فاکتورها از جمله T_{sk} (این فاکتور به گفته برخی محققین (Zabeltitz, 2011; Van straiten *et al.*, 2011) می‌تواند بیش‌ترین اثرگذاری بر میزان خطای حاصل از مدل حرارتی در تخمین (T_{ri}) را داشته باشد)، باشد. اکثر محققین از روابط شناخته شده‌ای شبیه به رابطه (۹) و با اطلاع قبلی از میزان خطای آن استفاده می‌کنند، ولی امروزه در برخی کشورهای اروپایی از جمله هلند، از برخی وسایل پیشرفته که محصول شرکت‌های فضایی هستند برای سنجش واقعی این دما با خطای کم استفاده می‌شود (Van Ooteghem, 2007) و سایر فاکتورهای مشابه باشد. در عوض در مدل رگرسیون چندگانه تنها اطلاعات خام در اختیار گرفته می‌شود و ما فقط با دو نوع خطای مدل و خطای ذاتی داده‌ها روبه‌رو هستیم. در صورتی که پارامترهای ورودی مدل به‌درستی انتخاب شوند، به‌دلیل همبستگی بین پارامترهای داخلی گلخانه، تشخیص خروجی مناسب توسط مدل رگرسیونی، آسان و نسبت به مدل‌های حرارتی دارای خطای کم‌تری است.

بین سقف، خاک و آسمان می‌تواند عامل اثرگذار بر افزایش میزان خطای مدل و عدم هماهنگی بین نتایج واقعی و پیش‌بینی شده باشد. در شکل ۶ مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ساعتی توسط مدل حرارتی و رگرسیونی در تخمین دمای هوا و سقف گلخانه نیمه‌خورشیدی نشان داده شده است.

در تحقیقی، به مدل‌سازی شرایط داخلی گلخانه‌ای مجهز به مبدل زمینی در کشور هند پرداخته شد (Tiwari *et al.*, 2006). در این تحقیق از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت و جرم استفاده شده بود. نتایج نشان داد که میزان خطای مطلق در پیش‌بینی دمای گلخانه در حضور سیستم مبدل زمینی حدود ۵/۹٪ و در عدم حضور مبدل زمینی ۵/۵٪ است. در اکثر مقالات خطای مطلق در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه مابین ۵ تا ۲۰٪ گزارش شده است (Panwar *et al.*, 2011). در تحقیق حاضر استفاده از مدل حرارتی در کنار مدل رگرسیونی نشان از برتری مدل رگرسیونی داشت. این امر می‌تواند به‌دلیل عدم ورود خطاهای مدل حرارتی، پارامترهای ثابت



شکل ۶- مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده ساعتی دمای هوا (سمت چپ) و سقف گلخانه (سمت راست) توسط مدل حرارتی و رگرسیونی

Fig.6. Comparison between actual and predict hourly temperature values of indoor air (left) and roof of greenhouse (right) for heat and regression models.

مطالعات به قدرت شبکه‌های عصبی در تخمین برخی روابط غیرخطی بین متغیرهای داخلی گلخانه اشاره کرده‌اند. نتایج این تحقیق نیز به‌درستی نتایج سایر تحقیقات مشابه را تأیید می‌کند و لزوم استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون چندگانه در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه را تأیید می‌کند. فاکتورهای مهم در گلخانه شامل دمای هوای گلخانه، دمای سقف، دمای خاک، دمای گیاه و رطوبت هوا و خاک گلخانه است که با توجه به تحقیقات فوق در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان انتظار داشت که این فاکتورها با

امروزه تحقیقاتی زیادی در زمینه هوشمند کردن گلخانه‌ها و حرکت به سمت گلخانه‌های خورشیدی تمام بسته در جریان است که در این بین نقش هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی در تخمین پارامترهای گلخانه‌ای برجسته و قابل توجه است. در این زمینه مطالعات مختلف ولی تقریباً کم انجام شده است (He and Ma, 2010; Boaventura *et al.*, 2000; Dariouchy *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2002; Linker *et al.*, 1998). ولی تمامی این

۰/۹۴۴، ۰/۹۸۸ و ۰/۹۸۷ گزارش شد. مقدار فاکتور کارایی مدل (EF) برای مدل حرارتی در تشخیص دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۰/۹۵۲ و ۰/۹۳۵ گزارش شد که ۰/۰۰۳ و ۰/۰۴۱ کم‌تر از مقدار مشابه برای مدل رگرسیونی است. در این تحقیق متوسط قدر مطلق خطا (MAPE) برای مدل حرارتی در تشخیص دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۲/۶۷ و ۷/۸۶ برابر بیش‌تر از مقادیر مشابه برای مدل رگرسیونی گزارش شد. پیشنهاد می‌شود با توجه به صنعت رو به پیشرفت گلخانه‌سازی و استفاده از روش‌های نوین در این شاخه، اثر استفاده از ابزارهای مختلف از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های پیشرفته الگوریتم ژنتیک در تخمین پارامترهای داخلی گلخانه بررسی شود و در صورت دستیابی به نتایج بهتر، از خروجی این ابزارها برای بررسی فرآیند انتقال حرارت و جرم در گلخانه‌های کشاورزی استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به دلیل مساعدت‌های مالی در اجرای این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از زحمات Dr. Rachel Van Oothenhem استاد دانشگاه Wageningen هلند در بررسی اولیه و همچنین راهنمایی در اجرای این تحقیق کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

دقت بیش‌تری توسط این روش تخمین زده شود و سپس میزان تلفات حرارتی گلخانه توسط هدایت، همرفت و تابش محاسبه شده و تراز انرژی گلخانه در کشت یک محصول به‌درستی محاسبه شده و در محاسبات مربوط به طراحی و ساخت اولیه گلخانه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از هوش مصنوعی در گلخانه‌ها علاوه‌بر افزایش دقت محاسبات، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های نصب انواع حسگرهای دما، رطوبت و باد در گلخانه شود و هزینه‌های اولیه را تا حد قابل توجهی کاهش دهد (Linker and Seginer, 2004).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل حرارتی و رگرسیونی چندگانه به‌منظور تخمین دمای هوا و سقف گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی در محیط دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز استفاده شد. طراحی و انتخاب شکل و جهت مناسب گلخانه با توجه به بیش‌ترین میزان دریافت انرژی و انتخاب از بین مدل‌های رایج گلخانه‌ای در منطقه انجام گرفت. از مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت به‌منظور تشکیل تراز انرژی در دو منطقه گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌دلیل مجموع انواع خطاها در مدل حرارتی، مقدار نهایی داده‌ها دارای درصد خطای بیش‌تری نسبت به مدل رگرسیونی است. میزان ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و نتایج به‌دست آمده از مدل حرارتی و رگرسیونی برای تخمین دمای هوا و سقف گلخانه به ترتیب معادل ۰/۹۶۱ و

References

1. Abdel Ghany, A. M. and I. M. Helal. 2011. Solar energy utilization by a greenhouse: General relations. *Renewable Energy* 36: 189-196.
2. Abdi R., M. Taki, and M. Akbarpour. 2012. An Analysis of Energy input-output and Emissions of Greenhouse Gases from Agricultural Productions. *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 6 (3): 73-79.
3. Alonso, J. P., M. P. Garcia, M. P. Romera, and A. J. C. Ferre. 2012. Performance analysis and neural modeling of a greenhouse integrated photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 4675-4685.
4. Banaeian, N., M. Omid, and H. Ahmad. 2011. Application of Data Envelopment Analysis to Evaluate Efficiency of Commercial Greenhouse Strawberry. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 3 (3): 185-193.
5. Boaventura, L., C. Couto, and A. E. B. Ruano. 2000. A greenhouse climate multivariable predictive controller, *Acta Horticulturae* 534: 269-276.
6. Buchholz, M., R. Buchholz, and P. Jochum. 2006. Temperature and humidity control in the Watergy greenhouse. *Acta Horticulturae* 2: 719-731.
7. Canakci, M., and I. Akinci. 2006. Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy* 31 (8-9): 1243-1256.
8. Chandra, P. 1976. Predicting the effects of greenhouse orientation and insulation on energy conservation. Unpublished M.Sc. thesis. Department of Agricultural Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
9. Chandra, P., and L. D. Albright. 1978. Analytical determination of the effects of using night curtains in greenhouses Paper ASAE.
10. Dariouchy, A., E. Aassif, K. Lekouch, L. Bouirden, and G. Maze. 2009. Prediction of the intern parameters tomato greenhouse in a semi-arid area using a time-series model of artificial neural

- networks. *Measurement* 42: 456-463.
11. Du, J., P. Bansal, and B. Huang. 2012. Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system. *Applied Energy* 93: 268-276.
 12. Ferreira, P. M., E. A. Faria, and A. E. Ruano. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction. *Neurocomputing* 43 (1-4): 51-75.
 13. Fuller, R., C. Meyer, and P. Sale. 1987. Validation of a dynamic model for predicting energy use in greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering* 38: 1-14.
 14. He, F., and C. Ma. 2010. Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 71S: S19-S23.
 15. Heuvelink, E., and M. Bakker. 2008. Climate and yield in a closed greenhouse. *Acta Horticulture* 801: 1083-1092.
 16. Hoes, H., and J. Desmedt. 2008. The GESKAS project, closed greenhouse as energy source and optimal growing environment. *Acta Horticulture* 801: 1355-1362.
 17. Hollmuller, P., and B. Lachal. 1998. TRNSYS compatible moist air hypocaust model. Final report. Project number 19507. University De Geneve.
 18. Joudi, K. A., and A. Farhan A. 2015. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy conversion and management* 91: 76-82.
 19. Linker, R., and I. Seginer. 2004. Greenhouse temperature modeling: a comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Mathematics and Computers in Simulation* 65: 19-29.
 20. Linker, R., I. Seginer and P.O. Gutman. 1998. Optimal CO₂ control in a greenhouse modeled with neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 19: 289-310.
 21. McCune, W. F., and D. Stipe .1960. Electric heating for plastic greenhouses, a summary of progress report to the Texas Farm Electrification Committee. Texas A&M University, College Station, TX: Department of Agricultural Engineering.
 22. Morris, L. G. 1956. Some aspect of the control of plant environment. *Journal of agricultural engineering research* 1: 156-166.
 23. Nayak, S., and G. N. Tiwari. 2006. Energy metrics of photovoltaic/thermal and earth air heat exchanger integrated greenhouse for different climatic conditions of India. *Applied Energy* 87: 2984-2993.
 24. Ntinias, G. K., V. P. Fragos, and C. H. N. Martzopoulou. 2014. Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management* 81: 428-439.
 25. Omid, M., F. Ghobabeige, M. Delshad, and H. Ahmadi. 2011. Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis. *Energy conversion and Management* 52: 153-162.
 26. Panwar, N. L., S. C. Kaushik, and S. Kothari. 2011. Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3934-3945.
 27. Rohani, A., M. H. Abbaspour-Fard and S. Abdolapour. 2011. Prediction of tractor repair and maintenance costs using artificial neural network. *Expert Sys. Applications* 38: 8999-9007.
 28. Shukla, A., G. N. Tiwari, and M. S. Sodha. 2006. Thermal modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and an earth-air heat exchanger. *Building and Environment* 41 (7): 843-850.
 29. Shukla, M. K., R. Lal, and P. Unkefer. 2003. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. *Soil Science* 168 (3): 178-191.
 30. Simpkins, J. C., D. R. Mears, and W. J. Robert. 1979. Reducing closes in polyethylene covered greenhouses. *ASABE* 19 (4): 714-719.
 31. Singh, R. D., and G. N. Tiwari. 2010. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis. *Energy* 35: 2367-2373.
 32. Taki, M., R. Abdi, M. Akbarpour, and H. G. Mobtaker. 2013. Energy inputs – yield relationship and sensitivity analysis for tomato greenhouse production in Iran. *Agric Eng Int: CIGR Journal* 15 (1): 59-67.
 33. Taki, M., Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, A. Rohani, and M. Matloobi. 2016. Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy and Buildings* 110: 314-329.
 34. Tiwari G. N., M. A. Akhtar, A. Shukla, and M. Emran Khan. 2006. Annual thermal performance of greenhouse with an earth-air heat exchanger: An experimental validation. *Renewable Energy* 31:

- 2432-2446.
35. Vadiiee, A. 2011. Energy Analysis of the Closed Greenhouse Concept-Toward one Sustainable Energy Pathway. KTH School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology Division of Heat and Power Technology SE-100 44 STOCKHOLM.
 36. Vadiiee, A., and V. Martin. 2012. Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 5087-5100.
 37. Vadiiee, A., and V. Martin. 2013. Energy analysis and thermo economic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. *Applied Energy* 102: 1256-1266.
 38. Van Ooteghem, R. J. C. 2007. *Optimal Control Design for a Solar Greenhouse*, Systems and Control. Wageningen: Wageningen University.
 39. Van Straten, G., G. Van Willigenburg, E. Van Henten, and R. Van Oothghem. 2011. *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC press, Taylor and Francis, New York.
 40. Walker, J. N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouse. *Transactions of the American society of agricultural engineers* 8 (3): 445-448.
 41. Willits, D., P. Chandra, and M. Peet. 1985. Modeling solar energy storage system for greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering* 32: 73-79.
 42. Willmott, C., J. Ackleson, S. G. Davis, R. E. Feddema, J. J. Klink, K. M. Legates, D. R. Donnell, and C. M. Rowe. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90: 8995-9005.
 43. Zabeltitz, C. V. 2011. *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Evaluation of heat transfer mathematical models and multiple linear regression to predict the inside variables in semi-solar greenhouse

M. Taki¹ - Y. Ajabshirchi² - S. F. Ranjbar² - A. Rohani^{4*} - M. Matloobi⁵

Received: 06-08-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

Controlling greenhouse microclimate not only influences the growth of plants, but also is critical in the spread of diseases inside the greenhouse. The microclimate parameters were inside air, greenhouse roof and soil temperature, relative humidity and solar radiation intensity. Predicting the microclimate conditions inside a greenhouse and enabling the use of automatic control systems are the two main objectives of greenhouse climate model. The microclimate inside a greenhouse can be predicted by conducting experiments or by using simulation. Static and dynamic models are used for this purpose as a function of the metrological conditions and the parameters of the greenhouse components. Some works were done in past to 2015 year to simulation and predict the inside variables in different greenhouse structures. Usually simulation has a lot of problems to predict the inside climate of greenhouse and the error of simulation is higher in literature. The main objective of this paper is comparison between heat transfer and regression models to evaluate them to predict inside air and roof temperature in a semi-solar greenhouse in Tabriz University.

Materials and Methods

In this study, a semi-solar greenhouse was designed and constructed at the North-West of Iran in Azerbaijan Province (geographical location of 38°10' N and 46°18' E with elevation of 1364 m above the sea level). In this research, shape and orientation of the greenhouse, selected between some greenhouses common shapes and according to receive maximum solar radiation whole the year. Also internal thermal screen and cement north wall was used to store and prevent of heat lost during the cold period of year. So we called this structure, 'semi-solar' greenhouse. It was covered with glass (4 mm thickness). It occupies a surface of approximately 15.36 m² and 26.4 m³. The orientation of this greenhouse was East-West and perpendicular to the direction of the wind prevailing. To measure the temperature and the relative humidity of the air, soil and roof inside and outside the greenhouse, the SHT 11 sensors were used. The accuracy of the measurement of temperature was ±0.4% at 20 °C and the precision measurement of the moisture was ±3% for a clear sky. We used these sensors in soil, on the roof (inside greenhouse) and in the air of greenhouse and outside to measure the temperature and relative humidity. At a 1 m height above the ground outside the greenhouse, we used a pyranometre type TES 1333. Its sensitivity was proportional to the cosine of the incidence angle of the radiation. It is a measure of global radiation of the spectral band solar in the 400–1110 nm. Its measurement accuracy was approximately ±5%. Some heat transfer models used to predict the inside and roof temperature are according to:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-s} - Q_{a-o} - Q_{a-ri} - Q_{nwi-nvo}}{\dots_a \times c_{p-a} \times V_a} \quad (1)$$

$$\frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{Q_{rd-ri} + Q_{a-ri} + Q_{s-ri} - Q_{ri-o} - Q_{ri-sk}}{\dots_r \times c_{p-r} \times V_r} \quad (2)$$

The regression model was formed for output (T_{ri} and T_a) using four inputs for each of them according to:

1- Assistant Prof. Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Ramin Agriculture and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Ahvaz

2- Prof. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3- Associate Prof. Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz

4- Assistant Prof. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

5- Assistant Prof. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(*- Corresponding Author Email: arohani@um.ac.ir)

Inside air temperature (T_a), solar radiation on the roof (I_r), wind speed (v_o), outside air temperature (T_o).
Inside soil temperature (T_s), solar radiation on the roof, roof temperature (T_r), outside air temperature.

Results and Discussion

Results showed that solar radiation on the roof of semi-solar greenhouse was higher after noon so this shape can receive high amounts of solar energy during a day. From statistical point of view, both desired and predicted test data have been analyzed to determine whether there are statistically significant differences between them. The null hypothesis assumes that statistical parameters of both series are equal. P value was used to check each hypothesis. Its threshold value was 0.05. If p value is greater than the threshold, the null hypothesis is then fulfilled. To check the differences between the data series, different tests were performed and p value was calculated for each case. The so called *t-test* was used to compare the means of both series. It was also assumed that the variance of both samples could be considered equal. The variance was analyzed using the *F-test*. Here, a normal distribution of samples was assumed. The results showed that the p values for heat model in all 2 statistical factors (Comparison of means, and variance) is lower than regression model and so the heat model did not have a good efficient to predict T_{ri} and T_a . RMSE, MAPE, EF and W factor was calculated for to models. Results showed that heat model cannot predict the inside air and roof temperature compare to regression model.

Conclusions

This article focused on the application of heat and regression models to predict inside air (T_a) and roof (T_{ri}) temperature of a semi-solar greenhouse in Iran. To show the applicability and superiority of the proposed approach, the measured data of inside air and roof temperature were used. To improve the output, the data was first preprocessed. Results showed that RMSE for heat model to predict T_a and T_{ri} is about 1.58 and 6.56 times higher than this factor for regression model. Also EF and W factor for heat model to predict above factors is about 0.003 and 0.041, 0.013 and 0.220 lower than regression model respectively. We propose to use Artificial Neural Network (ANN) and Genetic Algorithm (GA) to predict inside variables in greenhouses and compare the results with heat and regression models.

Keywords: Heat transfer, Model efficiency, Modeling, Semi-solar greenhouse