

بررسی اثر وجود دیوار شمالی بر مقدار مصرف انرژی یک گلخانه یک طرفه‌ی شرقی - غربی

حسن قاسمی مبتکر^{۱*} - یحیی عجب‌شیرچی^۲ - سید فرامرز رنجبر^۳ - منصور مطلوبی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹

چکیده

امروزه گلخانه‌های کشاورزی امکان تولید محصولات کشاورزی در تمام طول فصل را فراهم کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین مشکلات گلخانه‌های کشاورزی به‌ویژه در مناطق سردسیر، نیاز به انرژی و هزینه‌ی زیاد برای گرمایش آن می‌باشد. انرژی خورشیدی به‌علت فراوانی، کاربرد آسان و نداشتن اثرات زیست‌محیطی یکی از بهترین منابع تجدیدپذیر برای گرمایش گلخانه‌ها است. در این مطالعه اثر وجود دیوار شمالی آجری با دو رویه سیمان بر میزان جذب تابش دریافتی و همچنین میزان انرژی لازم برای گرمایش یک گلخانه‌ی یک طرفه شرقی - غربی در شهرستان تبریز بررسی شد. تابش کل خورشیدی در گلخانه براساس قانون لیبو و جردن محاسبه و با استفاده از یک مدل پایا میزان انرژی لازم برای گرمایش گلخانه محاسبه شد. نتایج نشان دادند در یک روز متوسط زمستانی در صورتی که از دیوار شمالی در گلخانه استفاده شود میزان تابش کل دریافتی روزانه حدود ۱۴٪ کاهش می‌یابد، اما به خاطر کاهش تلفات تابشی و افزایش مقاومت حرارتی دیوار شمالی مصرف انرژی به میزان ۳۲٪ کاهش می‌یابد. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از یک گلخانه‌ی یک طرفه با دیوار شمالی آجری با دو رویه‌ی سیمانی استفاده و ارزیابی‌ها در یک روز زمستانی صورت گرفت. مقایسه بین نتایج مدل با داده‌های تجربی نشان داد که میانگین درصد خطای مدل برابر با ۲/۳۴٪ می‌باشد که این حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل ارائه شده در تخمین انرژی مورد نیاز گلخانه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، دیوار شمالی، گلخانه‌ی یک طرفه، مدل حرارتی پایا، مصرف انرژی

مقدمه

مورد توجه است، انرژی خورشیدی است (Ajayi et al., 2014). یکی از مهم‌ترین کاربردهای انرژی خورشیدی در کشاورزی استفاده از آن برای گرمایش گلخانه‌های کشاورزی می‌باشد.

گلخانه به‌عنوان یک ساختاری است که مناسب‌ترین شرایط محیطی را برای حداکثر رشد و نمو گیاه در زمانی که در محیط آزاد امکان رشد و نمو گیاه وجود ندارد، فراهم می‌آورد (Sethi and Sharma, 2008). امروزه با استفاده از گلخانه‌های کشاورزی امکان تولید محصولات کشاورزی در خارج از فصل تولید فراهم آمده است. یکی از چالش‌های بزرگ گلخانه‌های کشاورزی در فصل سرما بحث گرمایش آن می‌باشد. نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که هزینه گرمایش گلخانه در حدود ۳۰٪ کل هزینه‌های جاری گلخانه است (Santamouris et al., 1994).

روش‌های متعددی برای کاهش مصرف انرژی در گلخانه‌ها گزارش شده است. در این زمینه مطالعاتی در زمینه افزایش میزان تابش دریافتی گلخانه، کاهش تلفات حرارتی از گلخانه و افزایش ذخیره‌سازی انرژی انجام شده است. در برخی از مطالعات برای کاهش

انرژی نقش مهم و محوری در توسعه و پیشرفت ملت‌ها ایفا می‌کند و در طول سال‌های متوالی ثابت شده است که میزان در دسترس بودن انرژی، به‌عنوان یک عنصر محوری در توسعه هر کشور مطرح است. مسائل توسعه پایدار که در ارتباط با تولید و توزیع انرژی می‌باشد یکی از موضوعات مهم مورد بحث است (Ajayi et al., 2010). دلیل این امر استفاده وسیع از سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای برای تولید انرژی در سراسر دنیاست که اثرات منفی این منابع برای محیط‌زیست و انسان تأیید شده است. رویکرد جدید انرژی در حال حاضر اساساً در جهت تشویق استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. یکی از منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر که در سراسر دنیا

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
۴- استادیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
(Email: mr.mobtaker@yahoo.com) * نویسنده مسئول:

2012). بنابراین هدف از این مطالعه بررسی اثر وجود دیوار شمالی بر میزان جذب تابش دریافتی و همچنین میزان انرژی لازم برای گرمایش یک گلخانه یک طرفه شرقی - غربی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در شهرستان تبریز با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب برابر $38^{\circ}18'$ شرقی، $38^{\circ}10'$ شمالی و ارتفاع از سطح دریا برابر با 1364 متر (براساس داده‌های اداره کل هواشناسی) انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در یک گلخانه یک طرفه شرقی - غربی با دیوار شمالی آجری با دو رویه سیمانی واقع در ساختمان شماره ۲ دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. اسکلت اصلی گلخانه، آهنی و پوشش آن شیشه به ضخامت 4 mm بود (شکل ۱). با استفاده از روابط ارائه شده در پژوهش‌های پیشین و با توجه به مقادیر F_n و F_i که ناشی از وجود دیوار شمالی در گلخانه مورد مطالعه است، تعادل انرژی در بخش‌های مختلف گلخانه محاسبه شد. این روابط بر اساس فرض‌های زیر نوشته شد (Sethi and Sharma, 2007; Sethi, 2009):

(a) از ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی دیوارها و سقف گلخانه صرف‌نظر شد، (b) خواص حرارتی گیاهان سبز مشابه خواص حرارتی آب فرض شد، (c) از خاصیت جذب و ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی هوای داخل گلخانه صرف‌نظر شد، (d) تبادل گرمایی تابشی بین دیوارها و سقف گلخانه به علت اثر ناچیز نادیده گرفته شد، (e) جریان انتقال حرارت به صورت یک بعدی فرض شد و (f) انتقال حرارت از خاک سطحی به خاک عمقی گلخانه به صورت پایا در نظر گرفته شد.

محاسبه‌ی تعادل انرژی در گیاهان گلخانه

بخشی از انرژی تابشی ورودی که به داخل گلخانه به سطح گیاهان می‌رسد در فرآیندهای مختلفی مصرف می‌شود. این فرآیندها شامل: تبخیر و تعرق، افزایش دمای گیاه، همرفت بین گیاه و هوای محیط گلخانه و تابش بین گیاه و هوای محیط گلخانه می‌باشد. برای نوشتن معادله تعادل انرژی در گیاهان از رابطه‌ی (۱) استفاده شد (Sethi and Sharma, 2007).

برای محاسبه تابش کل خورشیدی در سطح خارجی پوشش گلخانه از مقادیر اندازه‌گیری شده شار تابش در سطح افق استفاده شد و بر اساس قانون لیو و جردن تابش کل خورشیدی در سطح خارجی پوشش محاسبه شد. بدین منظور از رابطه (۲) تا (۶) استفاده شد (Duffie and Beckman, 2013; Al-Helal et al., 2016):

تلفات حرارتی در شب از صفحات حرارتی^۱ استفاده شده است (Ghosal and Tiwari, 2004; Shukla et al., 2008). همچنین در برخی دیگر از مطالعات گلخانه‌های با شکل‌های مختلف از نظر میزان تابش دریافتی باهم مقایسه شده‌اند تا بهترین گلخانه از نقطه نظر میزان تابش دریافتی انتخاب شود (Kendirli, 2006; Kumari et al., 2007; Sethi, 2009). در مطالعه‌ای که در کشور هند انجام شد، اثر شکل گلخانه بر میزان تابش دریافتی و انرژی مصرفی گلخانه بررسی شد. نتایج نشان دادند گلخانه نیمه‌دوطرفه در استفاده از انرژی خورشیدی بیشترین بازدهی را داراست (Singh and Tiwari, 2010). در مطالعه دیگری در کشور مراکش از مواد تغییر فاز دهنده (PCM)^۲ واقع در دیوار شمالی یک گلخانه شرقی - غربی به منظور ذخیره انرژی مازاد روز برای استفاده در ساعات سرد شب استفاده شد (Berroug et al., 2011). در کشور تونس، از یک گلخانه خیمه‌ای شکل شرقی - غربی برای خشک کردن فلفل قرمز و انگور استفاده شد. در این مطالعه برای افزایش میزان تابش خورشیدی دریافتی از یک کلکتور صفحه تخت استفاده شد (ELkhadraoui et al., 2015).

یکی از روش‌های مورد استفاده برای افزایش جذب تابش خورشیدی و کاهش تلفات حرارتی، استفاده از دیوار شمالی آجری در گلخانه‌های شرقی - غربی است (Jain and Tiwari, 2002; Jain and Tiwari, 2003). نتیجه بررسی‌ها نشان داده است که با عایق کردن دیوار شمالی، می‌توان در هزینه‌های گرمایش گلخانه حدود 30% صرفه‌جویی نمود (Gupta and Chandra, 2002). به‌طور کلی دیوار شمالی آجری برای دو هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یکی جاذب انرژی خورشیدی و دیگری به‌عنوان منبع ذخیره‌ی حرارت و عایق (Chen et al., 2006). مطالعات زیادی در زمینه توزیع تابش در داخل گلخانه‌ها و اثر دیوار شمالی بر کاهش تلفات تابشی انجام شده است (Tiwari et al., 2003; Gupta and Tiwari, 2005; Gupta et al., 2012). در این مطالعات با استفاده از مفهوم کسر تابش خورشیدی که به دیوار شمالی برخورد می‌کند (F_n) و کسر تابش خورشیدی کل (F_i) توزیع تابش خورشیدی و کسری از تابش خورشیدی ورودی به داخل گلخانه که برای گرمایش و فعل و انفعالات داخلی گلخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به موارد ذکر شده، وجود دیوار شمالی تأثیر به‌سزایی در جذب تابش دریافتی و کاهش تلفات حرارتی و تابشی گلخانه دارد. اثر دیوار به‌خصوص در گلخانه‌های کوچک و همچنین گلخانه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا بسیار مشهود است (Gupta et al., 2012).

1- Thermal screen

2- Phase change material



شکل ۱- نمایی از گلخانه مورد استفاده

Fig. 1. Schematic of the experimental greenhouse

$$\alpha_p \tau S_t (1 - (F_t, F_n)) = M_p C_p \frac{dT_p}{dt} + A_p h_{pr} (T_p - T_r) + A_p h_r (T_p - T_r) \quad (1)$$

$$h_p = 2.8 + 3(v) \quad (8)$$

$$h_r = F_{pr} \epsilon_p \sigma (T_p^2 + T_r^2) (T_p + T_r) \quad (9)$$

$$P(T) = \left[\exp \left(20.386 - \frac{5132}{T} \right) \right] \times 133.3 \quad (10)$$

محاسبه‌ی تعادل انرژی در کف گلخانه

بخشی از انرژی ورودی به داخل گلخانه به کف آن می‌رسد و از طریق کف زمین تلف می‌شود. برای نوشتن معادله‌ی تعادل انرژی برای کف زمین باید توجه کرد که بخشی از تابش رسیده به گلخانه جذب گیاهان شده که باید در معادلات منظور شود. برای این منظور با توجه به اینکه نرخ انتقال حرارت به خاک عمقی در شرایط پایا در نظر گرفته شده است، از رابطه (۱۱) استفاده شد (Kumar and Tiwari, 2006; Sethi, 2009).

محاسبه‌ی تعادل 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 رابطه‌ی (۱۲) استفاده شد (Ghosal and Tiwari, 2006):

$$\alpha_g (1 - \alpha_p) \tau S_t (1 - (F_t, F_n)) = A_g h_b (T_{x=0} - T_0) + A_g h_a (T_{x=0} - T_r) \quad (11)$$

$$A_p h_{pr} (T_p - T_r) + A_p h_r (T_p - T_r) + A_g h_a (T_{x=0} - T_r) + (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_p) (1 - (F_t, F_n)) \tau S_t + \rho_w F_n \tau S_t + \rho_c (F_t - F_n) \tau S_t \pm Q_p = M_a C_a \frac{dT_r}{dt} + (A_c U_{tc} + A_w U_{tw}) (T_r - T_a) + h_d A_d (T_r - T_a) + E_v \quad (12)$$

استفاده شد. با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان روابط (۱۳) تا (۱۵) را محاسبه کرد:

$$S_i(t) = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) \rho R_r \quad (2)$$

$$S_t = \sum S_i(t) A_i \quad (3)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} \quad (4)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (5)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (6)$$

مقادیر F_n و F_t در رابطه (۱)، با استفاده از روش تحلیل سه‌بعدی سایه در اتوکد محاسبه شدند (Ghasemi-Mobtaker et al., 2015). برای این کار ابتدا شکل سه‌بعدی گلخانه در محیط نرم‌افزار اتوکد رسم شد و با شبیه‌سازی موقعیت زاویه‌ای خورشید در هر زمان، مساحت سایه گلخانه محاسبه شد. مقدار F_n برابر با مساحت سایه دیواره شمالی تقسیم بر مساحت کل گلخانه و سایه آن می‌باشد. همچنین فاکتور F_t برابر با مساحت سایه کل گلخانه تقسیم بر مساحت گلخانه و سایه آن می‌باشد. پارامترهای h_r و h_{pr} در رابطه (۱)، با استفاده از روابط (۷) تا (۱۰) محاسبه شدند (Sethi, 2009):

$$h_{pr} = h_p + \frac{0.016 h_p [P(T_p) - \gamma_r P(T_r)]}{T_p - T_r} \quad (7)$$

محاسبه‌ی دمای هوای گلخانه

برای محاسبه‌ی دمای هوای گلخانه از روابط (۱)، (۱۱) و (۱۲)

با جایگذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۲) (صرف نظر از خاصیت ظرفیت گرمایی هوا) رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آید که برای محاسبه‌ی دمای هوای گلخانه استفاده شد. همچنین روابط مورد استفاده در معادلات در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

$$T_{x=0} = \frac{\alpha_g(1-\alpha_p)\tau S_t(1-(F_t-F_n))+A_g(h_a T_r+h_b T_o)}{A_g(h_a+h_b)} \quad (13)$$

$$T_{x=0}-T_r = \frac{\alpha_g(1-\alpha_p)\tau S_t(1-(F_t-F_n))+A_g h_b(T_o-T_r)}{A_g(h_a+h_b)} \quad (14)$$

$$A_g h_a(T_{x=0}-T_r)=[\alpha_g(1-\alpha_p)\tau S_t(1-(F_t-F_n))+A_g h_b(T_o-T_r)]H_g \quad (15)$$

$$T_r = \frac{A_p T_p(h_{pr}+h_r)+(UA)_g T_o+Q_p-E_v+a_1 \tau S_t+T_a(A_c U_{tc}+A_w U_{tw}+A_d h_d)}{A_p(h_{pr}+h_r)+Z} \quad (16)$$

روابط (۱۷) تا (۱۹) به دست آمد (Sethi and Sharma, 2007):

برای محاسبه‌ی دمای گیاه از رابطه (۱) استفاده شد و با قرار دادن مقدار T_r به دست آمده از رابطه (۱۶) در این رابطه و ساده‌سازی

$$\frac{dT_p}{dt} + a T_p = f(t) \quad (17)$$

$$a = \frac{(UA)_{pa}}{M_p C_p} \quad (18)$$

$$f(t) = \frac{\alpha_p \tau S_t(1-(F_t-F_n))+H_p[(UA)_g T_o+(\tau S_t \alpha_1)+T_a(A_c U_{tc}+A_w U_{tw}+A_d h_d)+Q_p]}{M_p C_p} \quad (19)$$

میزان انرژی مازاد مورد نیاز برای تأمین دمای مطلوب گیاه به شکل روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه شدند:

با استفاده از رابطه (۲۳) میزان انرژی مازاد برای حفظ دمای مطلوب گیاهان در داخل گلخانه دارای دیوار شمالی محاسبه شد. از آنجایی که هدف این مطالعه بررسی اثر دیوار شمالی بر مقدار انرژی مصرفی گلخانه یک طرفه می‌باشد، روابط (۱)، (۱۱) و (۱۲) برای یک گلخانه‌ی یک طرفه‌ی فاقد دیوار شمالی نیز نوشته شدند تا مقایسه‌ی بین مصرف انرژی انجام پذیرد. روابط (۲۴) تا (۲۶) برای گلخانه فاقد دیوار شمالی استفاده شد (Sethi and Sharma, 2007; Sethi, 2009).

روش تجربی

برای حل معادلات از نرم‌افزار EES استفاده شد. همچنین مقادیر ثابت جدول ۲ به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند (Sethi, 2009). برای اعتبارسنجی یک گلخانه یک طرفه شرقی - غربی (طول، عرض و ارتفاع گلخانه به ترتیب برابر با ۴/۸، ۳/۲ و ۲/۴ متر) با دیوار شمالی استفاده و اندازه‌گیری‌ها در یک شبانه روز کامل زمستانی انجام و پارامترهای مورد نیاز به دقت اندازه‌گیری شدند. در تمامی ساعات آزمایش، میزان تابش خورشید در سطح افق با استفاده از تابش‌سنج مدل (مدل TES-1333R، رنج اندازه‌گیری $W m^{-2}$ ۰-۲۰۰۰، دقت اندازه‌گیری $\pm 10 W m^{-2}$ و تفکیک‌پذیری $1 W m^{-2}$)، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دما از سنسورهای مدل SHT11 استفاده شد. این سنسور قابلیت اندازه‌گیری همزمان دما و رطوبت را دارد. بازه

جدول ۱ - پارامترهای مورد استفاده در معادلات

Table 1- Parameters used in equations

$H_g = \frac{A_g h_a}{A_g(h_a+h_b)}$	$\alpha_{ge} = \alpha_g(1-\alpha_p)$
$(UA)_g = \frac{A_g h_a A_g h_b}{A_g h_a + A_g h_b}$	$Z = A_c U_{tc} + A_w U_{tw} + A_d h_d + ($
$(UA)_{pa} = \left[\frac{1}{A_p(h_{pr}+h_r)} + \frac{1}{Z} \right]^{-1}$	$\alpha_{peff} = (1-\alpha_g)(1-\alpha_p)(1-(F_t-F$
$\alpha_1 = \rho_c(F_t-F_n) + \rho_w F_n + \alpha_{ge}(1-(F_t-F_n))I$	$H_p = \frac{A_p(h_{pr}+h_r)}{A_p(h_{pr}+h_r)+Z}$

با فرض اینکه تابش خورشیدی^۱، دمای محیط، $f(t)$ و ضرایب انتقال حرارت در فاصله زمانی t تا t (فاصله یک ساعته) ثابت و همچنین دمای گیاه در لحظه $t=0$ برابر T_{po} در نظر گرفته شود، جواب رابطه دیفرانسیل (۱۷) به فرم رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود (Singh and Tiwari, 2000):

$$T_p = \frac{\overline{f(t)}}{a} (1-e^{-at}) + T_{po} e^{-at} \quad (20)$$

این رابطه دمای لحظه‌ای گیاه را نشان می‌دهد. برای تعیین دمای متوسط گیاه در فاصله زمانی یک ساعته و همچنین محاسبه میزان انرژی لازم برای تأمین دمای مطلوب گلخانه و گیاه باید از این رابطه در فاصله زمانی t تا t میانگین گرفت که این کار از طریق انتگرال‌گیری انجام شد (Singh and Tiwari, 2010):

در نهایت با استفاده از رابطه (۲۱) مقادیر دمای متوسط گیاه و

اندازه‌گیری دما برای این سنسور در محدوده ۰/۰-۴۰/۰ تا ۱۲۳/۸°C و دقت آن در محدوده دمایی ۰°C-۵۰°C در حد ۰/۵°C است.

$$\bar{T}_p = \frac{1}{t} \int_0^t T_p \, dT = \frac{\overline{f(t)}}{a} \left(1 - \frac{(1-e^{-at})}{at} \right) + T_{po} \frac{(1-e^{-at})}{at}$$

$$= \frac{\alpha_p \tau S_t (1-F_t) + H_p [(UA)_g T_0 + \tau S_t \alpha_1 + T_a (A_c U_t + A_d h_d) + Q_p]}{(UA)_{pa}} \left(1 - \frac{(1-e^{-at})}{at} \right) + T_{po} \frac{(1-e^{-at})}{at}$$
(۲۱)

$$\bar{T}_p = \frac{[\alpha_p (1 - (F_t - F_n)) + H_p \alpha_1] \tau S_t + H_p (UA)_g T_0 + H_p T_a (A_c U_{tc} + A_w U_{tw} + A_d h_d) + H_p Q_p}{(UA)_{pa}}$$
(۲۲)

$$Q_p = \frac{\bar{T}_p (UA)_{pa} - [\alpha_p (1 - (F_t - F_n)) + H_p \alpha_1] \tau S_t - H_p (UA)_g T_0 - H_p T_a (A_c U_{tc} + A_w U_{tw} + A_d h_d)}{H_p}$$
(۲۳)

$$\alpha_p \tau S_t (1-F_t) = M_p C_p \frac{dT_p}{dt} + A_p h_{pr} (T_p - T_r) + A_p h_r (T_p - T_r)$$
(۲۴)

$$\alpha_g (1 - \alpha_p) \tau S_t (1-F_t) = A_g h_b (T_{x=0} - T_0) + A_g h_a (T_{x=0} - T_r)$$
(۲۵)

$$A_p h_{pr} (T_p - T_r) + A_p h_r (T_p - T_r) + A_g h_a (T_{x=0} - T_r) + (1 - \alpha_g) (1 - \alpha_p) (1 - F_t) \tau S_t + \rho_c F_t \tau S_t + Q_p = M_a C_a \frac{dT_r}{dt} + U_{tc} A_c (T_r - T_a) + h_d A_d (T_r - T_a) + E_v$$
(۲۶)

جدول ۲- مقادیر ثابت مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل

Table 2- Constants used for the validation of thermal model

پارامتر Parameter	مقدار Value	پارامتر Parameter	مقدار Value
A _c	31.25	T ₀	17
A _g	15.36	U _{tc}	6.4
A _w	11.52	U _{tw}	0.2
A _d	1.67	α _g	0.75
A _p	Ag×LAI	α _p	0.4
C _a	1009	γ _r	0.55
C _p	4190	ε _p	0.7
F _{pr}	1	σ	5.67×10 ⁻⁸
h _a	2.8	ρ	0.3
h _b	1	ρ _c	0.06
h _d	10.57	ρ _w	0.09

گرمکن‌ها برحسب kWh اندازه‌گیری شد. برای تعیین دقت و اعتبار روش به کار رفته، شاخص‌های آماری میانگین درصد خطا (MPE)، میانگین خطا (MBE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) مورد استفاده قرار گرفته و مقادیر انرژی مازاد مورد استفاده و پیش‌بینی شده مقایسه شدند. بدین منظور روابط (۲۷) تا (۳۰) استفاده شد.

سرعت باد با استفاده از سرعت‌سنج نوع پره‌ای (ST-8894)، دقت ۰/۱ m s⁻¹، دقت قرائت ۰/۰۱ m s⁻¹ و در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان انرژی مازاد، از یک سیستم حرارتی الکتریکی مجهز به هشت گرمکن الکتریکی W ۷۵۰ و یک ترموستات ۶ kW استفاده شد. برای توزیع دمایی یکسان هوا در داخل گلخانه، گرمکن‌ها در قسمت‌های مختلف تعبیه شدند. با روشن و خاموش کردن گرمکن‌ها توسط ترموستات دمایی هوای گلخانه در محدوده دمایی تنظیم شده متعادل شد. با استفاده از یک برنامه میکروکنترلر، مدت زمان‌هایی که گرمکن‌ها روشن بوده‌اند ثبت شد. همچنین برای افزایش دقت، میزان برق مصرفی با استفاده از یک کنتور جریان متناوب تکفاز با قابلیت ثبت مقدار برق مصرفی

- 1- Mean Percentage Error
- 2- Mean Bias Error
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Correlation coefficient

جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد در یک روز زمستانی در شهرستان تبریز گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی با ابعاد مذکور MJ ۲۶۱ انرژی تابشی دریافت می‌کند. در صورتی که دیوار شمالی وجود داشته باشد تابش کل روزانه حدود ۱۴٪ کاهش می‌یابد (۲۲۴ MJ). البته باید توجه داشت که همه تابش ورودی به داخل گلخانه مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و بخش اعظم آن از طریق پوشش گلخانه به صورت همرفتی به بیرون تلف می‌شود (Taki et al., 2016). همچنین با توجه به فاکتورهای F_n و F_t بخشی از تلفات به صورت تلفات تابشی است که وجود دیوار شمالی باعث کاهش آن می‌شود. در ساعات شب دیوار شمالی به صورت یک عایق عمل کرده و باعث کاهش تلفات حرارتی گلخانه می‌شود. در بسیاری از مطالعات استفاده از دیوار شمالی به منظور کاهش تلفات تابشی در روز و افزایش مقاومت حرارتی در شب گزارش شده است (Gupta and Chandra, 2002; Chen et al., 2006). پس لازم است اثر دیوار بر میزان مصرف انرژی بررسی شود.

$$MPE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{e_{i,c} - e_{i,m}}{e_{i,m}} \right) \times 100 \quad (27)$$

$$MBE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (e_{i,c} - e_{i,m}) \quad (28)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (e_{i,c} - e_{i,m})^2 \right]^{0.5} \quad (29)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^k (e_{i,c} - e_{c,ave})(e_{i,m} - e_{m,ave})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^k (e_{i,c} - e_{c,ave})^2][\sum_{i=1}^k (e_{i,m} - e_{m,ave})^2]}} \quad (30)$$

نتایج و بحث

تابش خورشیدی کل ساعتی در دسترس در داخل گلخانه که براساس داده‌های بلند مدت تابش در سطح افق و با استفاده از قانون لیو و جردن محاسبه شده در سه ماه ژانویه، فوریه و دسامبر، که پایین‌ترین دما و تابش را در بین ماه‌های سال به خود اختصاص داده بودند برای گلخانه یک‌طرفه بدون دیوار شمالی و با دیوار شمالی

جدول ۳- میزان تابش دریافتی (وات) گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی

Table 3- Received Solar radiation (W) of a single span greenhouse in east-west orientation

زمان Time	یک‌طرفه (بدون دیوار شمالی)			یک‌طرفه (با دیوار شمالی)		
	Single span (without north wall)			Single span (with north wall)		
	ژانویه January	فوریه February	دسامبر December	ژانویه January	فوریه February	دسامبر December
7	0	3838	0	0	3648	0
8	4686	5924	2030	4283	5296	1707
9	9654	9493	5866	8674	8499	4956
10	11662	11685	9045	10294	10406	7735
11	11495	12738	10526	9844	11278	8974
12	11064	11558	10707	9317	9934	9070
13	9138	10781	10142	7495	9204	8586
14	6645	9021	8622	5330	7633	7312
15	3639	5497	5919	2839	4488	5004
16	948	2413	2122	731	1917	1794
17	0	432	0	0	341	0

گلخانه‌ها کافی بوده، بلکه لازم بوده تا برای تعدیل دما از سیستم تهویه استفاده شود. در این مطالعه فرض شده است که این مقدار انرژی از سیستم تهویه به بیرون تلف شده و هیچ سیستم انبارشی برای ذخیره این انرژی برای مصرف در ساعات سرد شب وجود ندارد. همچنین عدد صفر در جدول ۴ به این معناست که انرژی خورشیدی برای گرمایش کافی بوده و نیازی به انرژی مازاد وجود ندارد. نتایج نشان داد گلخانه یک‌طرفه بدون دیوار شمالی در یک شبانه روز کامل در فصل زمستان به طور متوسط MJ ۳۱۳/۸ انرژی مصرف می‌کند. همچنین در زمان مذکور گلخانه با دیوار شمالی به‌طور متوسط MJ

در جدول ۴ مقدار متوسط انرژی مورد نیاز برای گرمایش گلخانه یک‌طرفه شرقی- غربی در دو حالت با دیوار شمالی و بدون دیوار شمالی در سه ماه ژانویه، فوریه و دسامبر نشان داده شده است. این محاسبات براساس متوسط دمایی و تابش روزانه طولانی مدت شهر تبریز ثبت شده در سازمان هواشناسی شهرستان تبریز انجام شد (داده‌های دما مربوط به بازه زمانی ۲۲ ساله و داده‌های تابش مربوط به بازه زمانی ۵ ساله بود). دمای گیاه در روز ۲۵°C و در شب ۱۵°C در نظر گرفته شد. البته لازم به ذکر است که در برخی ساعات نزدیک ظهر خورشیدی انرژی تابش خورشیدی، نه تنها برای گرمایش

۲۱۰/۸ انرژی مصرف می‌کند. به عبارت دیگر وجود دیوار شمالی باعث کاهش مصرف انرژی به میزان ۳۲٪ می‌شود.

جدول ۴- میزان انرژی مورد نیاز (مگاژول) برای گرمایش گلخانه یک‌طرفه شرقی - غربی

Table 4- Energy requirement (MJ) to keep the greenhouse warm in single span in east-west orientation

زمان Time	یک‌طرفه (بدون دیوار شمالی)			یک‌طرفه (با دیوار شمالی)		
	Single span (without north wall)			Single span (with north wall)		
	ژانویه January	فوریه February	دسامبر December	ژانویه January	فوریه February	دسامبر December
1	20.5	16.4	15.8	15.2	12.1	11.7
2	20.7	16.6	16.0	15.3	12.2	11.8
3	20.9	16.8	16.1	15.5	12.4	11.9
4	20.6	16.1	15.5	15.2	11.9	11.4
5	20.4	15.4	14.9	15.0	11.4	11.0
6	20.1	14.6	14.4	14.8	10.8	11.1
7	18.8	21.4	13.1	13.9	0.8	9.7
8	21.7	9.1	19.4	6.0	0.0	12.7
9	4.7	0.0	7.4	0.0	0.0	5.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	19.5	5.3	11.1	10.3	0.2	3.4
16	26.9	17.3	21.5	18.7	11.0	11.8
17	18.3	23.2	13.6	13.5	17.0	10.0
18	18.8	14.1	14.1	13.9	10.4	10.4
19	19.2	14.5	14.4	14.1	10.7	10.6
20	19.6	14.8	14.8	14.4	10.9	10.9
21	19.9	15.2	15.1	14.7	11.2	11.1
22	20.1	15.6	15.3	14.8	11.5	11.3
23	20.3	15.9	15.5	15.0	11.7	11.4
24	20.4	16.2	15.7	15.0	12.0	11.6
مجموع Sum	378.8	278.4	283.8	255.3	178.3	199.0

در ساعات شب بعد از غروب خورشید دمای هوای گلخانه 15°C تنظیم شد و میزان انرژی مصرفی اندازه‌گیری شد. در شکل ۴ مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده انرژی مورد نیاز ساعتی برای تأمین دمای مطلوب گیاهان گلخانه با دیوار شمالی نشان داده شده است. نتایج نشان داد در مدت زمانی که گرمکن‌ها روشن بوده‌اند (ساعت ۱۷ بعد از ظهر تا ساعت ۹ صبح روز بعد) مقدار MJ $152/3$ kWh (۴۲/۳) انرژی برای گرمایش گلخانه و حفظ دمای 15°C لازم بوده است.

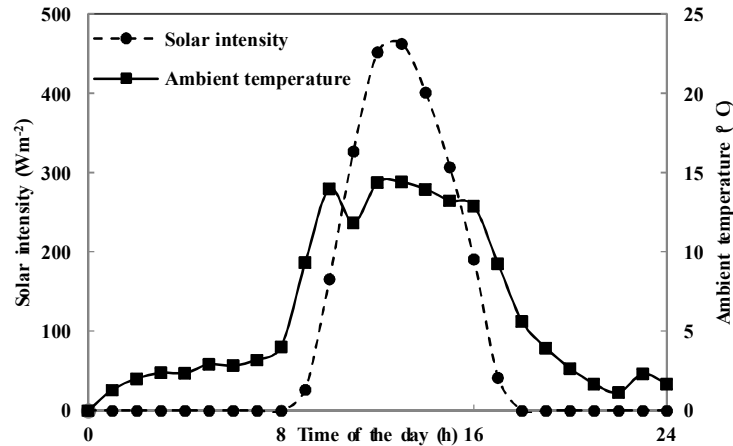
نتایج مدل ارائه شده نشان داد در مدت زمان مذکور میزان انرژی مورد نیاز MJ $145/4$ kWh (۴۰/۴) می‌باشد که حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل ارائه شده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل ارائه شده میزان انرژی مورد نیاز را کمتر از میزان مصرف شده تخمین می‌زند. دلیل این موضوع این است که بخشی از گرمای گلخانه به‌صورت تلفات تابشی به محیط انتقال می‌یابد که در این مدل از آن‌ها صرف‌نظر شده است. همچنین در ساعات اول شب مقادیر

در شکل ۲ تغییرات ساعتی دمای محیط و تابش کل خورشیدی در سطح افق در روز آزمایش نمایش داده شده است. در روز آزمایش ($1394/09/09$) متوسط دمای محیط $6/4^{\circ}\text{C}$ با بیشینه $14/38^{\circ}\text{C}$ و کمینه $1/13^{\circ}\text{C}$ ثبت شد. همچنین بیشینه تابش کل خورشیدی در سطح افق برابر با $463/2 \text{ Wm}^{-2}$ و در ساعت ۱۳ ثبت شد. تغییرات ساعتی تابش کل خورشیدی در سطح خارجی پوشش گلخانه و همچنین تابش کل ورودی به داخل گلخانه با دیوار شمالی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد در روز آزمایش بیشترین میزان تابش کل خورشیدی ورودی به داخل گلخانه برابر با 985 W می‌باشد.

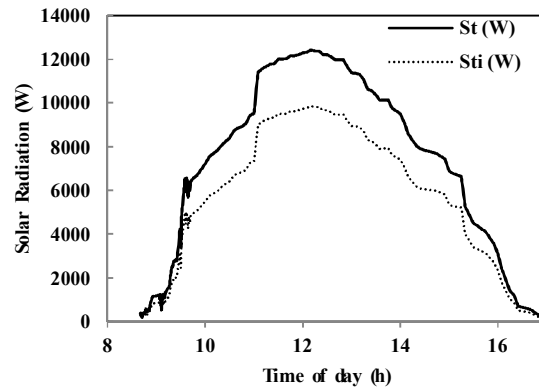
با استفاده از یک کنترلر جریان متناوب تک‌فاز میزان انرژی مصرف شده در فواصل زمانی یک ساعته ثبت شد. نتایج نشان داد که میزان تابش خورشیدی در روز آزمایش برای تأمین دمای مطلوب کافی بوده و نیازی به انرژی مازاد نبود. حتی در ساعات نزدیک ظهر خورشیدی لازم بود برای تعدیل دمای هوای گلخانه تهویه انجام شود.

افزایش دقت مدل لازم است تا مدل‌های دقیق‌تر دینامیکی که شامل تمامی تبدلات گرمایی تابشی بین دیوارها و سقف گلخانه توسعه داده شود.

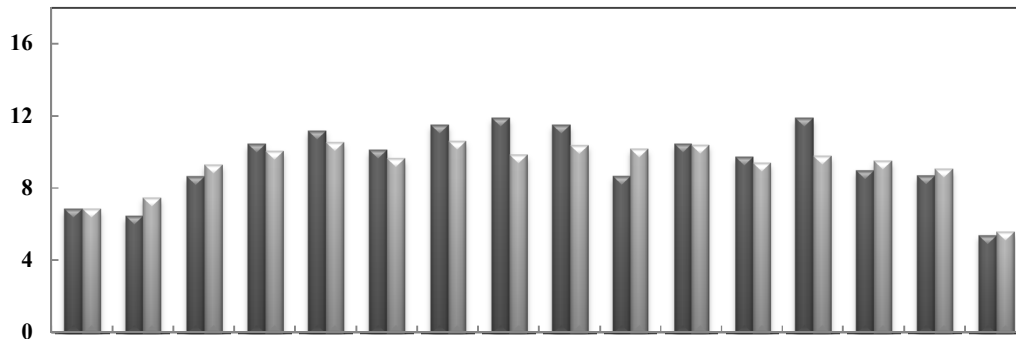
اندازه‌گیری شده کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده به‌دست آمد. چرا که بخشی از گرمای مورد نیاز از انرژی ذخیره شده در اجزای گلخانه که در طول روز از تابش خورشید حاصل شده است، تأمین می‌شود. برای



شکل ۲- دمای محیط و تابش کل خورشیدی در سطح افق در یک روز زمستانی
 Fig. 2. Ambient temperature and solar intensity at the horizon in a typical winter day



شکل ۳- تابش کل خورشیدی در بیرون (S_t) و داخل سطح پوشش گلخانه (S_{ti})
 Fig. 3. Total solar radiation at the outside (S_t) and inside (S_{ti}) of the greenhouse cover

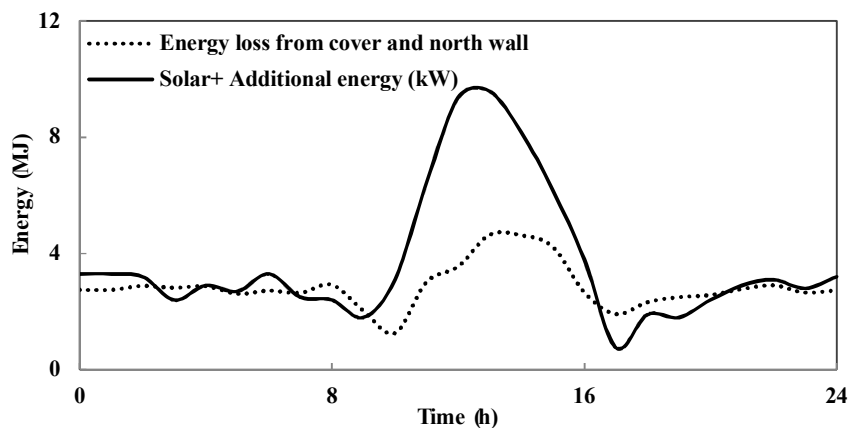


شکل ۴- مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده انرژی مورد نیاز گلخانه مورد مطالعه

Fig. 4. Measured and predicted values of additional energy requirement of greenhouse

در پژوهش‌های پیشین گزارش شده است که بخش عمده‌ای از تابش خورشیدی که به داخل گلخانه می‌رسد از طریق پوشش گلخانه به بیرون تلف می‌شود (Abdel-Ghany and Al-Helal, 2011). در شکل ۵ مجموع انرژی نهاده به گلخانه (انرژی تابش خورشیدی و انرژی گرمایشی گرمکن‌ها) و همچنین مجموع تلفات حرارتی از پوشش شیشه‌ای و دیوار شمالی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلفات در بیشتر مواقع کمتر از انرژی نهاده است. دلیل این موضوع این است که بخشی از تلفات به صورت تلفات تابشی می‌باشد که در این مطالعه از آن صرف‌نظر شده است که لازم است برای افزایش دقت مدل تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام پذیرد.

برای تعیین دقت مدل ارائه شده، شاخص‌های آماری میانگین درصد خطا، میانگین خطا، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی محاسبه شدند. ضریب همبستگی مدل برابر با 0.79 به‌دست آمد که حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل می‌باشد. میانگین درصد خطا برای مدل برابر با 2.34% به‌دست آمد. به عبارت دیگر خطای مدل برای تخمین زدن میزان انرژی مورد نیاز در حدود 2.34% است. همچنین میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر با 0.43 MJ و 1.32 MJ محاسبه شد. در مطالعه‌ای که در کشور هند انجام شد، با استفاده از یک مدل پایا میزان انرژی مازاد گلخانه‌های مختلف پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد که خطای مدل حرارتی ارائه شده برابر 11.32% می‌باشد و همبستگی ضعیفی بین داده‌های مدل و نتایج تجربی وجود دارد (Singh and Tiwari, 2010).



شکل ۵- کل انرژی افزوده به گلخانه (تابشی + مازاد) و تلفات از پوشش و دیوارشمالی

Fig. 5. Total energy inputs in greenhouse (Solar+ Additional) and energy loss from cover and north wall

نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه مقایسه میزان تابش دریافتی و همچنین میزان انرژی لازم برای گرمایش یک گلخانه یک‌طرفه شرقی - غربی در دو حالت بدون دیوار شمالی و با دیوار شمالی بود. مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. در یک روز زمستانی در شهرستان تبریز گلخانه یک‌طرفه شرقی - غربی مورد مطالعه MJ ۲۶۱ انرژی تابشی دریافت می‌کند. در صورتی که دیوار شمالی آجری باشد تابش کل خورشیدی دریافتی روزانه MJ ۲۲۴ می‌باشد.

۲. گلخانه یک‌طرفه با دیوار شمالی در یک روز کامل در فصل زمستان به‌طور متوسط MJ ۲۱۰/۸ انرژی مصرف می‌کند که این مقدار انرژی ۳۲٪ کمتر از مصرف انرژی گلخانه فاقد دیوار شمالی است.

۳. میزان انرژی مورد نیاز برای حفظ دمای مطلوب گیاهان در روز آزمایش برای گلخانه یک‌طرفه شرقی - غربی MJ ۱۵۲/۳ (kWh) ۴۲/۳ ثبت شد. مقایسه این مقدار با نتایج مدل MJ ۱۴۵/۴ نشان داد میانگین درصد خطای مدل برابر با ۲/۳۴٪ می‌باشد که این حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل ارائه شده در تخمین انرژی مورد نیاز گلخانه می‌باشد.

همچنین بخشی از گرمای گلخانه از طریق رسانش به خاک عمقی تلف می‌شود. لازم به توضیح است علی‌رغم در نظر نگرفتن تلفات تابشی که از سطح پوشش گلخانه به آسمان انجام می‌شود، این مدل با دقت خوبی می‌تواند مقدار انرژی مصرفی گلخانه را پیش‌بینی کند.

در طول روز انرژی نهاده بسیار بیشتر از تلفات گرمایی به‌دست آمد که این انرژی مازاد از طریق تهویه به بیرون تلف شد. نکته دیگری که از این نمودار مشهود است تغییرات این دو پارامتر در اوایل شب است. به‌طوری که مشاهده می‌شود، در شب تلفات بیشتر از انرژی نهاده است. همان‌طور که اشاره شد دلیل آن این است که در این زمان بخشی از گرمای مورد نیاز از انرژی ذخیره شده در اجزای گلخانه، حاصل شده از تابش خورشیدی در دسترس، تأمین می‌شود. برای افزایش دقت مدل لازم است مدل دینامیکی دقیق‌تری ارائه گردد و تأثیر پارامترهای مؤثر در مصرف انرژی به دقت بررسی شود. همچنین لازم است با ارائه مدل‌های دینامیکی و دقیق، مصرف انرژی در بازه‌های زمانی کوچکتری بررسی شود.

علائم و اختصارات			
جرم کل گیاهان در گلخانه (kg)	M_p	مساحت پوشش گلخانه (m^2)	A_c
فشار جزئی بخار اشباع (Pa)	P	مساحت درب گلخانه (m^2)	A_d
میزان توان اضافه یا دفع شده از گلخانه (W)	Q_p	مساحت کف گلخانه (m^2)	A_g
نسبت بین تابش مستقیم بر روی سطح شیب‌دار و سطح افقی (-)	R_b	مساحت هر یک از دیواره‌ها یا سقف‌ها (m^2)	A_i
ضریب دید صفحه نسبت به آسمان (-)	R_d	سطح کل گیاهان داخل گلخانه (m^2)	A_p
ضریب دید صفحه نسبت به زمین (-)	R_r	مساحت دیوار شمالی (m^2)	A_w
شار تابش خورشیدی کل در صفحه شیب‌دار (Wm^{-2})	$S_{r(t)}$	گرمای ویژه هوا ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	C_a
شار تابش خورشیدی کل در پوشش گلخانه (W)	S_t	گرمای ویژه گیاه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	C_p
دمای محیط ($^{\circ}C$)	T_a	متوسط انرژی مازاد محاسبه شده	$e_{c,ave}$
دمای گیاه ($^{\circ}C$)	T_p	i امین انرژی مازاد محاسبه شده	$e_{i,c}$
دمای هوای گلخانه ($^{\circ}C$)	T_r	i امین انرژی مازاد اندازه‌گیری شده	$e_{i,m}$
دمای کف گلخانه ($^{\circ}C$)	$T_{x=0}$	متوسط انرژی مازاد اندازه‌گیری شده	$e_{m,ave}$
دمای سالیانه خاک زیرین ($^{\circ}C$)	T_0	نرخ انرژی مبادله شده از تهویه (W)	E_v
ضریب کلی انتقال حرارت از پوشش گلخانه ($Wm^{-2}K^{-1}$)	U_{tc}	ضریب دید بین گیاه و گلخانه (-)	F_{pr}
ضریب کلی انتقال حرارت از دیوار شمالی ($Wm^{-2}K^{-1}$)	U_{tw}	کسر تابش فرودی به دیوار شمالی (-)	F_n
سرعت باد (ms^{-1})	v	کسر تابش خورشیدی کل (-)	F_t
ضریب جذب زمین (-)	α_g	ضریب انتقال همرفتی بین زمین و هوای داخل گلخانه ($Wm^{-2}K^{-1}$)	h_a
ضریب جذب گیاه (-)	α_p	ضریب انتقال حرارت بین کف گلخانه و خاک عمقی ($Wm^{-2}K^{-1}$)	h_b
زاویه شیب صفحه ($^{\circ}$)	β	ضریب انتقال حرارت از درب به محیط ($Wm^{-2}K^{-1}$)	h_d
رطوبت نسبی (-)	γ_r	ضریب انتقال همرفتی بین گیاه و هوای داخل گلخانه ($W m^{-2} K^{-1}$)	h_p
ضریب گسیل گیاه (-)	ϵ_p	ضریب کلی انتقال تبخیری و همرفتی از سطح گیاه به هوای داخل گلخانه ($W m^{-2} K^{-1}$)	h_{pr}
زاویه برخورد تابش به صفحه شیب‌دار ($^{\circ}$)	θ_i	داخل گلخانه ($W m^{-2} K^{-1}$)	h_r
زاویه برخورد تابش به صفحه افقی ($^{\circ}$)	θ_z	ضریب انتقال تابشی بین گیاه و هوای داخل گلخانه ($W m^{-2} K^{-1}$)	I_b
ضریب بازتابش زمین (-)	ρ	شار تابش مستقیم ($W m^{-2}$)	I_d
ضریب بازتابش پوشش گلخانه (-)	ρ_c	شار تابش پخش ($W m^{-2}$)	M_a
ضریب بازتابش دیوار شمالی (-)	ρ_w	جرم هوای داخل گلخانه (kg)	
ثابت استفان-بولتزمن ($Wm^{-2}K^{-4}$)	σ		
ضریب عبور پوشش (-)	τ		

References

1. Abdel-Ghany, A. M., and I. M. Al-Helal. 2011. Solar energy utilization by a greenhouse: General relations. *Renewable Energy* 36: 189-196.
2. Ajayi, O. O., O. D. Ohijeagbon, C. E. Nwadialo, and O. Olasope. 2014. New model to estimate daily global solar radiation over Nigeria. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 5: 28-36.
3. Ajayi, O. O., R. O. Fagbenle, J. Katende, J. O. Okeniyi, and O. A. Omotosho. 2010. Wind Energy Potential for Power Generation of a Local Site in Gusau, Nigeria. *International Journal of Energy for a Clean Environment* 11(1-4): 99-116.
4. Al-Helal, I. M., S. A. Waheeb, A. A. Ibrahim, M. R. Shady, and A. M. Abdel-Ghany. 2016. Modified thermal model to predict the natural ventilation of greenhouses. *Energy and Buildings*. 99: 1-8.
5. Berroug, F., E. K. Lakhala, M. El Omaria, M. Faraji, and H. El Qarniac. 2011. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings* 43 (11): 3027-3035.
6. Chen, W., W. Lue, and B. Lue. 2006. Numerical and experimental analysis of heat and moisture content transfer in a lean-to greenhouse. *Energy and Buildings* 38: 99-104.
7. Duffie, J. A., and W.A. Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, fourth edition. John

- Wiley & Son, New Jersey.
8. ELkhadraoui, A. S. Kooli, I. Hamdi, and A. Farhat. 2015. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy* 77: 1-8.
 9. Ghasemi-Mobtaker, H., Y. Ajabshirchi, S. F. Ranjbar, M. Matloobi, and C. Amini. 2015. Determining of total solar fraction and solar fraction for north wall of different-shaped greenhouses using Auto-CAD software. *ISESCO Journal of Science and Technology*. In press.
 10. Ghosal, M. K., and G. N. Tiwari. 2004. Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy* 76 (5): 603-613.
 11. Ghosal, M. K., and G. N. Tiwari. 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy Conversion and Management* 47 (13-14): 1779-1798.
 12. Gupta, A., and P. Chandra. 2002. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy* 27: 777-794.
 13. Gupta, R., and G. N. Tiwari. 2005. Modeling of energy distribution inside greenhouse using concept of solar fraction with and without reflecting surface on north wall. *Building and Environment* 40: 63-71.
 14. Gupta, R., G. N. Tiwari, A. Kumar, and Y. Gupta. 2012. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. *Energy Buildings* 47: 27-34.
 15. Jain, D., and G. N. Tiwari. 2002. Modeling and optimal design of evaporative cooling system in controlled environment greenhouse. *Energy Conversion and Management* 43(16): 2235-2250.
 16. Jain, D., and G. N. Tiwari. 2003. Modeling and optimal design of ground air collector for heating in controlled environment greenhouse. *Energy Conversion and Management* 44 (8): 1357-1372.
 17. Kendirli, B., 2006. Structural analysis of greenhouses: a case study in Turkey. *Building and Environment* 41: 864-871.
 18. Kumar, A., and G.N. Tiwari. 2006. Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: An experimental validation. *Solar Energy* 80 (9): 1135-1144.
 19. Kumari, N., G. N. Tiwari and M. S. Sodha. 2007. Performance Evaluation of Greenhouse having Passive or Active Heating in Different Climatic Zones of India. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* IX: 1-19.
 20. Santamouris, M., A. Argiriou, and M. Vallindras. 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar Energy* 52 (5): 371-378.
 21. Sethi, V. P. 2009. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy* 83: 21-38.
 22. Sethi, V. P., and S. K. Sharma. 2007. Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system. *Solar Energy* 81 (6) 723-741.
 23. Sethi, V. P., and S. K. Sharma. 2008. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy* 82 (9): 832-859.
 24. Shukla, A., G. N. Tiwari, and M. S., Sodha. 2008. Experimental study of effect of an inner thermal curtain in evaporative cooling system of cascade greenhouse. *Solar Energy* 82 (1): 61-72.
 25. Singh, R. D., and G. N. Tiwari. 2010. Energy conservation in the greenhouse system: A steady state analysis. *Energy* 35 (6): 2367-2373.
 26. Singh, R. D., and G. N. Tiwari. 2000. Thermal heating of controlled environment greenhouse: a transient analysis. *Energy Conversion and Management* 41 (5): 505-522.
 27. 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.
 28. Tiwari, G. N., A. Gupta, and R. Gupta. 2003. Evaluation of solar fraction on north partition wall for various shapes of solarium by Auto-Cad. *Energy and Buildings* 35 (5): 507-514.

Investigating the Effect of a North Wall on Energy Consumption of an East-West Oriented Single Span Greenhouse

H. Gh. Mobtaker^{1*}- Y. Ajabshirchi²- S. F. Ranjbar³- M. Matloobi⁴

Received: 27-12-2015

Accepted: 06-07-2016

Introduction

Greenhouse is a structure which provides the best condition for the maximum plants growth during the cold seasons. In cold climate zones such as Tabriz province, Iran, the greenhouse heating is one of the most energy consumers. It has been estimated that the greenhouse heating cost is attributed up to 30% of the total operational costs of the greenhouses. Renewable energy resources are clean alternatives that can be used in greenhouse heating. Among the renewable energy resources, solar energy has the highest potential around the world. In this regard, application of solar energy in greenhouse heating during the cold months of a year could be considerable. The rate of thermal energy required inside the greenhouse depends on the solar radiation received inside the greenhouse. Using a north brick wall in an east-west oriented greenhouse can increase the absorption of solar radiation and consequently reduces the thermal and radiation losses. Therefore, the main objective of the present study is to investigate the effect of implementing of a north wall on the solar radiation absorption and energy consumption of an east-west oriented single span greenhouse in Tabriz.

Materials and Methods

This study was carried out in Tabriz and a steady state analysis was used to predict the energy consumption of a single span greenhouse. For this purpose, thermal energy balance equations for different components of the greenhouse including the soil layer, internal air and plants were presented. For investigating the effect of the north wall on the energy consumption, the F_t and F_n parameters were used to calculate the radiation loss from the walls of the greenhouses. These factors were determined using a 3D-shadow analysis by Auto-CAD software. An east-west oriented single span greenhouse which has a north brick wall and is covered with a single glass sheet with 4 mm thickness was applied to validate the developed models. The measurements were carried out on a sunny winter day (November 30, 2015). The hourly variations of solar radiation on a horizontal surface were measured to calculate the total solar radiation received by the greenhouse using the Liu and Jordan equations. For heating of a greenhouse in nighttime, an electrical heater was used while an additional required energy was measured using a single phase meters. The inside and ambient temperatures of the air were recorded using SHT11 temperature sensors. A computer-based program of EES (engineering equations solver) was developed to solve the energy balance equations. Different statistical indicators were used to predict the accuracy of the presented models.

Results and Discussion

The obtained results showed that in winter months the greenhouse without the north brick wall can receive 14% more solar radiation than the greenhouse with a north brick wall. On the other hand, the use of a north wall in the greenhouses can reduce the radiation and thermal loss from north wall. To maintain the temperature at 25 °C in day-time and 15 °C in night-time, the additional required energy was calculated for greenhouse with and without north brick wall. The results indicated that the total energy requirement to keep the plants warm was 313.8 MJ in greenhouse without north brick wall and 210.8 MJ in greenhouse with the north brick wall. In other word, use of the north brick wall in the greenhouse can contribute to reduce energy consumption by 32%. Comparisons between the predicted and measured results showed a fair agreement for greenhouse energy requirements. The correlation coefficient and mean percentage error for this model were determined to be 0.79 and -2.34%, respectively. Due to the small values, the radiative exchange within greenhouse cover and the sky

1- Ph.D student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz

4- Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(*- Corresponding Author Email: mr.mobtaker@yahoo.com)

was neglected. Therefore, the results of the presented model showed fewer values in comparison with the experimental results. It can be concluded from the final results that a considerable amount of the incident radiation has been lost to the ambient by convection from the cover of the greenhouse (glass walls and north walls).

Conclusions

In the present study, the effect of north brick wall on solar radiation absorption and energy consumption of a single span greenhouse located in Tabriz was investigated. Results showed that use of north brick wall in an east-west oriented single span greenhouse leads to a reduction of 14% in solar radiation absorbed by the greenhouse. The results indicated that use of the north brick wall in the greenhouse can decrease energy consumption by 32%. There was a fair agreement between the experimental and theoretical results with the calculated correlation coefficient and mean percentage error of 0.79 and -2.34%, respectively.

Keywords: Energy consumption, North wall, Single span greenhouse, Solar radiation, Steady state model