



شبیه‌سازی انرژی، انرژی و اقتصادی یک گلخانه نیمه خورشیدی با راستی‌آزمایی تجربی

بهزاد محمدی^۱، سید فرامرز رنجبر^{۱*}، یحیی عجب‌شیرچی^۲، لیلی گروسی فرشی^۱، سیما باهری اسلامی^۱

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲

کلمات کلیدی:

گلخانه نیمه‌خورشیدی
تبخیر و تعرق گیاه
نابودی انرژی
هزینه واحد هوا

خلاصه: در این مطالعه با استفاده از نرم افزار متلب، مدل‌سازی دینامیکی یک گلخانه نیمه‌خورشیدی از دیدگاه انرژی، انرژی و اقتصادی برای اولین بار در ایران، با توجه به مستندات علمی منتشر شده، انجام شده است. این مدل‌سازی با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق گیاه، دمای چهار نقطه متفاوت از داخل گلخانه نیمه‌خورشیدی را پیش‌بینی کرده است. جهت راستی‌آزمایی مدل ترمودینامیکی این شبیه‌سازی، از داده‌برداری انجام شده از گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده در شهر تبریز استفاده شده است. داده‌های ثبت شده در طول آزمایش، اختلاف دمای قابل ملاحظه $19/5^{\circ}\text{C}$ بین هوای داخلی گلخانه و هوای بیرون را نشان داده است. مقادیر متوسط $97/5\%$ ، 87% ، $61/08\%$ ، $213/4^{\circ}\text{C}$ و $2/1^{\circ}\text{C}$ برای توابع خطای ضریب تبیین، درصد کارایی، درصد میانگین خطای مطلق، مجموع مربعات خطا و ریشه متوسط مربعات خطا نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی حرارتی می‌باشد. علاوه‌براین در این پژوهش، مقادیر نابودی انرژی در فرآیندهای انتقال حرارت گلخانه مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به اینکه تولید شرایط دمایی مناسب برای رشد گیاه به عنوان هدف اقتصادی این مطالعه در نظر گرفته شده است، هزینه واحد هوای داخلی گلخانه برای بازه زمانی یک دقیقه بررسی گردیده است. با افزایش نرخ بهره از 10% به 20% ، هزینه واحد هوای داخل گلخانه تقریباً دو برابر شده است. استفاده از شیشه‌های دوجداره توانسته است نابودی انرژی را تا $45/36\%$ کاهش دهد.

۱- مقدمه

کشت گلخانه‌ای به عنوان یک روش کارا و محبوب برای پرورش محصولات کشاورزی، قادر است نسبت به روش کشاورزی مزرعه‌ای تا ده برابر تولیدات کشاورزی را افزایش دهد. در بین فرآیندهای مختلف گلخانه جهت به‌دست آوردن محصول، گرمایش و سرمایش گلخانه یکی از عملیات انرژی‌بر این روش می‌باشد. بالا رفتن استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تامین انرژی مورد نیاز گرمایش گلخانه، اثرات نامطلوب بسیاری بر روی محیط زیست داشته است. در این میان، انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع پایان‌ناپذیر، پاک و قابل دسترس می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های متداول مورد استفاده در گلخانه، باشد که قابلیت ذخیره‌سازی خوبی دارد. اخیراً مطالعات بسیاری بر روی استفاده از انرژی خورشیدی برای گرمایش گلخانه توسط محققان صورت پذیرفته است.

کیان^۱ و همکاران [۱] با استفاده از یک شبیه‌سازی ریاضی، رفتار گرمایی یک گلخانه با گرمایش توسط کلکتور هیبریدی را مورد

1 Kıyan

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

پژوهش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که اتصال یک سیستم گرمایش سنتی گلخانه با یک سیستم کلکتور هیبریدی، علیرغم بالا رفتن زمان برگشت هزینه، می‌تواند کارایی سیستم را بالاتر ببرد. کندلی^۲ و کالدلیس^۳ [۲] با پیشنهاد یک گلخانه گرمایش زمین‌خورشیدی، نشان دادند که سیستم پیشنهادی، کارایی حرارتی و اقتصادی گلخانه را توسط کمینه کردن مصرف سوخت فسیلی، افزایش می‌دهد. ضیاپور و هشترودی [۳] برای گلخانه مورد مطالعه‌شان مدلی را ارائه کردند که در آن از سقف شیشه‌ای محدب مجهز به یک کلکتور لوله‌ای مواد تغییر فاز دهنده^۴ جهت ذخیره انرژی استفاده شده بود. آن‌ها در این تحقیق با استفاده از الگوریتم تکاملی، مقدار بهینه $7/5\text{ cm}$ برای شعاع لوله کلکتور و مقدار بهینه 17 لیتر برای حجم ماده تغییر فاز دهنده به‌دست آوردند. عملکرد دیواره شمالی بلوکی در گلخانه‌های خورشیدی، ضریب ذخیره حرارت، ضریب معیار حرارتی کل و مقاومت

2 Kondili

3 Kaldellis

4 Phase Change Material (PCM)



گلخانه‌ای را آشکار نماید. ییلدیزهان^۷ و تاکی [۱۰] از برآورد انرژی جمعی استفاده کردند تا بازده فرآیند پرورش گوجه فرنگی را بهبود دهند آن‌ها ادعا کردند که این روش می‌تواند باعث ارتقای پرورش محصول، مصرف انرژی و تابش دی‌اکسیدکربن در نقاط مختلف ترکیه شود. مبتکر و همکاران [۱۱] به بررسی حرارتی نگهداشت انرژی خورشیدی در یک گلخانه خورشیدی پرداخته و با استفاده از نتایج تجربی آن را راستی‌آزمایی کردند. آن‌ها در این پژوهش شش ساختار رایج مورد استفاده در گلخانه‌های خورشیدی را مورد ارزیابی قرار داده و توانایی آن‌ها در جذب انرژی خورشیدی را با هم مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساختار یک طرفه با دیوار شمالی عایق شده و در جهت شرقی-غربی می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد. ضریب تصحیح و درصد خطای میانگین به ترتیب مقادیر ۰/۷۹ و ۲/۳۴٪ به‌دست آمد. مبتکر^۸ و همکاران [۱۲] به مطالعه اثر وجود دیوار شمالی آجری با دو رویه سیمان بر میزان جذب تابش دریافتی و همچنین میزان انرژی لازم برای گرمایش یک گلخانه ی یک طرفه شرقی-غربی در شهرستان تبریز پرداختند. آن‌ها تابش کل خورشیدی در گلخانه براساس قانون لیو و جردن محاسبه کرده و با استفاده از یک مدل پایا میزان انرژی لازم برای گرمایش گلخانه را به‌دست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد که 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.

همانطور که اشاره شد توانایی گلخانه‌های خورشیدی جهت استفاده حداکثری از انرژی رایگان خورشید برای تولید محصولات مقرون به صرفه‌تر و پربازده و همچنین ذخیره انرژی خورشیدی در فصول گرم برای استفاده در فصول سرد بدون استفاده از سیستم‌های گرمایش کمکی، گلخانه‌های خورشیدی را تبدیل به سیستم‌های جذاب برای تولید محصولات کشاورزی نموده است. با توجه به مستندات علمی منتشر شده، آنالیز جامع گلخانه نیمه‌خورشیدی شامل تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی با استفاده از مدل دینامیکی در این مطالعه برای اولین بار در ایران انجام شده است. مخصوصاً اینکه، اطلاعات بسیار اندکی در زمینه ارزیابی تجربی گلخانه‌های نیمه‌خورشیدی از دیدگاه

حرارتی کل دیواره شمالی توسط ژانگ^۱ و همکاران [۴] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها گزارش کردند که این سیستم از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی کارایی بهتری دارد. جودی^۲ و فرهان^۳ [۵] از یک هیتر هوایی جهت گرمایش یک ساختار گلخانه‌ای استفاده کردند آن‌ها نشان دادند که جریان هوای $0/012 \text{ kg/s/m}^2$ می‌تواند حدود ۸۴٪ از حرارت مصرفی روزانه را تولید نماید. علاوه‌براین برای نگهداشت گلخانه در دمای 18°C ، نرخ جریان جرمی هوا از کلکتور از kg/s/ $0/006 \text{ m}^2$ تا $0/012 \text{ kg/s/m}^2$ تغییر می‌کند. همانطور که بیان گردید، برای به‌دست آوردن محصولات مقرون به صرفه‌تر، گلخانه‌های خورشیدی به سمت استفاده حداکثری از انرژی‌های تجدیدپذیر حرکت می‌کنند. با این همه اختلافات معناداری در مصرف انرژی و دوره برگشت هزینه بین گلخانه بسته ایده‌آل و گلخانه‌های سنتی وجود دارد [۶]. چن^۴ و همکاران [۷] یک دیوار تهویه‌ای فعال-غیرفعال با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پیشنهاد کردند که فاکتورهای کلیدی مانند عملکرد لایه میانی دیوار، شرایط دمایی داخلی و رشد گیاهان مورد ارزیابی قرار گرفت. روش مورد بررسی آن‌ها، افزایش در ظرفیت ذخیره حرارتی دیواره، افزایش در ظرفیت آزادسازی حرارتی و افزایش ارتفاع گیاه و ماندگاری محصول را نشان داد. اوزتورک^۵ [۸] برای تامین حرارت مورد نیاز یک گلخانه 180 m^2 بر اساس انرژی نهان ذخیره شده در ماده از واکس پارافین به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده استفاده نمود. او اثرات فاکتورهای مختلف بر روی کارایی انرژی و انرژی را مورد بررسی قرار داد و مقادیر ۴۰٪ و ۴/۲٪ به ترتیب برای کارایی انرژی و انرژی به‌دست آمدند. هپباسلی^۶ [۹] عملکرد یک گلخانه با سه روش گرمایش مختلف را مورد مطالعه و مقایسه قرار داد که این سه روش عبارتند از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی عمودی که از انرژی خورشیدی کمک می‌گیرد، یک بویلر بیومس چوبی و یک بویلر گاز طبیعی. بازده انرژی کل برای روش‌های ذکر شده به ترتیب ۰/۸۳٪، ۲/۹۰٪ و ۰/۷۹٪ به‌دست آمد. آنالیز انرژی و بحث در مورد کیفیت انرژی می‌تواند دید شفاف و وسیع در مورد هزینه‌ها و مدیریت فرآیندهای پیچیده ارائه دهد و روش‌های موثر در پرورش محصول

- 1 Zhang
- 2 Joudi
- 3 Farhan
- 4 Chen
- 5 Öztürk
- 6 Hepbasli

7 Yildizhan
8 Mobtaker

اینکه نسبت به تکنولوژی‌های سنتی آثار محیط‌زیستی و اتلاف انرژی کمتری داشته باشند. مطالعاتی که در زمینه گرمایش گلخانه انجام شده‌اند نشان می‌دهند که بیش از ۳۰٪ انرژی مصرفی در گلخانه‌های کشاورزی صرف گرمایش گلخانه می‌شود [۱۳]. همچنین شکل و جهت یک گلخانه می‌تواند نقش بسزایی در میزان جذب انرژی خورشیدی داشته باشد در این راستا، در مطالعه حاضر، برای گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده، ساختاری در نظر گرفته شده است که مناسب‌ترین گزینه ممکن برای رسیدن به هدف ذکر شده باشد (شکل ۱). بنابراین شش ساختار پرکاربرد برای گلخانه‌های نیمه‌خورشیدی شامل (دو طرفه، نیمه دو طرفه، خیمه‌ای، تونلی و کوانست) مورد ارزیابی قرار گرفتند [۱۱] تا میزان جذب انرژی خورشید و کارایی گرمایی آن‌ها باهم مورد مقایسه گیرند همچنین داده‌های هواشناسی اداره هواشناسی شهر تبریز بین سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت ساختار یکطرفه شرقی-غربی انتخاب گردید. همه ساختارهای مورد مطالعه در جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی مورد تحلیل قرار گرفتند ضمن اینکه برای همه ساختارها طول و عرض و ارتفاع و شرایط آب و هوایی یکسان در نظر گرفته شد. علاوه بر این، در ساختار به کار رفته در این مطالعه از دیوار شمالی برای ذخیره انرژی در طول روز استفاده شده است. همچنین، برای تامین انرژی حرارتی گلخانه در طول شب، تجهیزات گرمایش کمکی الکتریکی نصب شده‌اند. بنابراین به سه دلیل ذکر شده در بالا (استفاده از مناسب‌ترین ساختار برای جذب انرژی خورشیدی، استفاده از دیوار شمالی برای

انرژی و انتقال جرم وجود دارد. این تحقیق تلاشی جهت پر کردن این خلا می‌باشد. شبیه‌سازی دینامیکی ابتکاری مورد استفاده در این مطالعه جهت آنالیز انتقال حرارت و بخار بین اجزای داخل گلخانه، ارزیابی نابودی انرژی در طول فرآیندهای انتقال جرم و حرارت و ارائه پیشنهادات اقتصادی بر اساس نتایج انرژی‌واکنش‌میک، به کار رفته است. یک گلخانه به مساحت 15 m^2 در تبریز ساخته شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده از این گلخانه راستی‌آزمایی گردیده است. علاوه بر این، برای برآورد عملکرد و دقت شبیه‌سازی انجام شده، از توابع آماری کمک گرفته شده است. مولفان بر این باورند که نتایج این شبیه‌سازی که توسط مشاهدات تجربی راستی‌آزمایی شده است می‌تواند روند بومی‌سازی و مقرون به صرفه کردن گلخانه‌های نیمه‌خورشیدی را شتاب بخشیده و آن‌ها را جایگزین گلخانه‌های سنتی نماید.

۲- شرح مساله و روش حل

۲-۱- فرآیند داده‌برداری تجربی از گلخانه نیمه‌خورشیدی

یک گلخانه نیمه‌خورشیدی در شهر تبریز (عرض جغرافیایی $38^{\circ}10'00''$ ، طول جغرافیایی $46^{\circ}18'00''$ و ارتفاع 1364 متر از سطح دریا) با مساحت 15 m^2 و حجم 24 m^3 و با دیواره‌های شیشه‌ای به ضخامت 4 mm طراحی و ساخته شد. محققان تلاش کرده‌اند تا به ارزیابی فاکتورهای پیردازند که در طراحی گلخانه‌های خورشیدی جهت جذب حداکثری انرژی خورشید نقش اساسی دارند ضمن

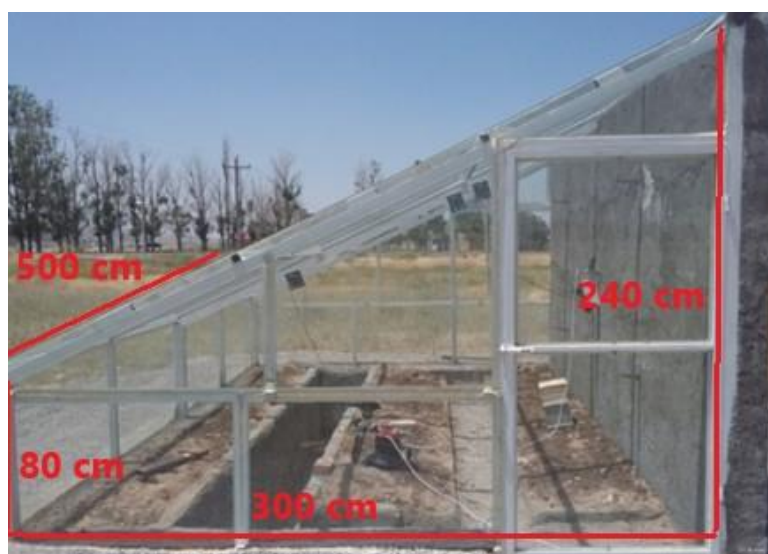


Fig. 1. Selected greenhouse structure for present study

شکل ۱. ساختار گلخانه‌ای ساخته شده برای مطالعه حاضر



Fig. 2. Location of temperature and relative humidity sensors installed at the greenhouse
 شکل ۲: موقعیت سنسورهای SHT11 و TES1333 نصب شده در گلخانه

و TES1333 را نشان می‌دهد. علاوه بر این سرعت باد بیرون گلخانه توسط سرعت‌سنج با رنج ۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. تمام مقادیر اندازه‌گیری شده توسط داده‌نگار CR5000 هر یک دقیقه ثبت گردید.

۲-۲- ارزیابی خطای شبیه‌سازی با استفاده از توابع آماری

آنالیز آماری جهت برآورد میزان خطای شبیه‌سازی حرارتی استفاده شده است. این خطاها می‌توانند از ناشی از روابط تجربی به کار رفته در معادلات انتقال جرم و حرارت، مفروضات شبیه‌سازی، مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای دماها و رطوبت اجزای گلخانه و محیط و ساده‌سازی‌های شبیه‌سازی ناشی شوند. توابع آماری که مورد استفاده در منابع علمی برای برآورد خطاهای شبیه‌سازی همچون ضریب تبیین^۱، درصد کارایی^۲، درصد میانگین خطای مطلق^۳، مجموع مربعات خطا^۴ و ریشه متوسط مربعات خطا^۵ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]:

در این توابع d_r نشان‌دهنده Z امین جز از خروجی نمونه Z ام، نشان‌دهنده جز حاصل از شبیه‌سازی برای نمونه Z ام، تعداد متغیرهای خروجی و d و p به ترتیب به عنوان متوسط همه خروجی‌های مقادیر

ذخیره انرژی خورشیدی و نصب تجهیزات گرمایش کمکی الکتریکی) ساختار مورد استفاده در این پژوهش، "نیمه خورشیدی" نامیده شده است. در این گلخانه نیمه‌خورشیدی داده‌برداری‌های انجام شده با کاشت کلم انجام گردید. برخی مفروضات در نظر گرفته شده در این مطالعه به قرار زیر هستند:

پنجره‌ها در تمام طول آزمایش بسته بوده و غیر از نشستی از دیواره‌ها هیچ تهویه‌ای در نظر گرفته نشده است. تبخیر و تعرق گیاه در نظر گرفته شده است. اجزای گلخانه بصورت یکپارچه و با دمای یکنواخت فرض شده‌اند. خاک گلخانه هیچ‌گونه تبخیری ندارد. هوای داخل گلخانه، انرژی خورشید را جذب یا منعکس نمی‌کند. اثرات دی‌کسیدکربن در نظر گرفته نشده است.

فرآیند داده‌برداری در تاریخ ۹۶/۰۹/۰۹ از ساعت ۹:۰۰ تا ساعت ۱۷:۰۰ انجام شد و کلم به عنوان نمونه آزمایش در نظر گرفته شد. در طول آزمایش، هوا نیمه‌بری و بدون باران بود. ابتدا برای اندازه‌گیری دما و رطوبت در نقاط مختلف داخل و خارج گلخانه، یازده سنسور SHT11 نصب گردید. سپس با متوسط‌گیری از اندازه‌گیری‌های انجام شده، دمای هوای داخل گلخانه، گیاه، خاک و پوشش گلخانه به دست آمد. میزان تابش خورشید توسط تابش‌سنج نوع TES1333 با رنج کارکرد ۴۰۰-۱۱۱۰ نانومتر روی یک سطح صاف اندازه‌گیری شد. شکل ۲ گلخانه مورد مطالعه بعد از نصب سنسورهای SHT11

- 1 Coefficient of determination (R2)
- 2 Model Efficiency (EF)
- 3 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)
- 4 Total Sum of Squared Error (TSSE)
- 5 Root Mean Squared Error (RMSE)

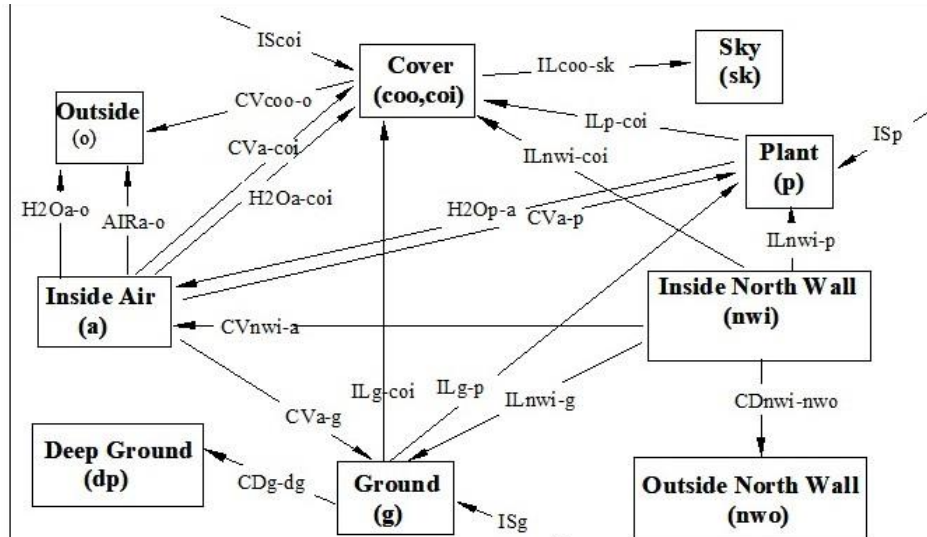


Fig. 3. Schematic of thermodynamic of the system by significant heat/mass transfers

شکل ۳: شماتیکی از ترمودینامیک سیستم گلخانه نیمه خورشیدی با جریان‌های جرم و آنتالپی

که در آن n تعداد اندازه‌گیری‌ها و X_m مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد.

انحراف استاندارد از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_m - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7)$$

بنابراین عدم قطعیت از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$U = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

۳-۲- مدل‌سازی

شکل ۳ ترمودینامیک یک سیستم گلخانه نیمه خورشیدی که شامل جریان‌های جرم و آنتالپی (قانون اول ترمودینامیک) و فرآیندهای نابودی انرژی (قانون دوم ترمودینامیک) است را به طور خلاصه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است فرآیندهای انتقال حرارت داخل گلخانه شامل امواج بلند (IL), امواج کوتاه (IS), همرفتی (CV), جابه‌جایی (CD), بخار آب مثل تبخیر و تعرق گیاه و تقطیر (H_2O) و هوای خشک (AIR) می‌باشد. در این راستا معادلات تعادل انرژی، انرژی، آگزرژی و اکونومیک استخراج شده برای گلخانه نیمه خورشیدی توسط نرم‌افزار متلب برای بازه‌های زمانی یک دقیقه حل شده‌اند. جدول ۱ پارامترهای طراحی و مقادیر اولیه برخی متغیرهایی را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی به کار رفته، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی می‌باشد. ایده‌آل‌ترین مدل شبیه‌سازی هنگامی بدست می‌آید که مقادیر ریشه متوسط مربعات خطا، درصد میانگین خطای مطلق، مجموع مربعات خطا، کمینه و مقادیر ضریب تبیین و درصد کارایی، بیشینه باشد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})(p_j - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2 \times \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

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

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{d_j - p_j}{d_j} \right| \times 100 \quad (3)$$

$$TSSE = \sum_{j=1}^n (d_j - p_j)^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - p_j)^2}{n}} \quad (5)$$

علاوه بر این، گلخانه نیمه خورشیدی مورد مطالعه سه روز متوالی (از ۹۶/۹/۹ تا ۹۶/۹/۱۱) از ساعت ۹:۰۰ تا ساعت ۱۷:۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت تا آنالیز عدم قطعیت بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده صورت پذیرد. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_m}{n} \quad (6)$$

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ورودی [۱۶-۲۱]

Table 1. Input parameter values

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۰۰۴ m	l_f	۰/۹۵	E_{coi}	۱۵ m ²	A_g
۸۲/۰۰۳ s/m	R_{min}	۰/۹۵	E_{coo}	۱۵ m ²	A_p
۲۴ m ³	V_a	۰/۷	E_{mw}	۱۵ m ²	A_{sc}
۹/۷۵ m ³	V_g	۰/۸	E_{sk}	۱۷ m ²	A_{coi}
۰/۰۳ m ³	V_{sc}	۰/۴۷۲	F_{g-p}	۱۷ m ²	A_{coo}
۰/۰۶ m ³	V_{co}	۰/۵۲۵	F_{g-sc}	۱۰۰۰ J/kg.K	$c_{p,a}$
۰/۰۹ m/s	v_a	۰/۸	F_{g-coi}	۴۱۸۶ J/kg.K	c_{p,H_2O}
۰/۹	η_{vhr}	۰/۵۲۸	F_{g-nwi}	۱۵۰۰ J/kg.K	$c_{p,sc}$
۰/۰۱۷	$\eta_{rd,coi}$	۰/۴۷۲	F_{p-sc}	۸۰۰ J/kg.K	$c_{p,g}$
۰/۳۳۱	$\eta_{rd,g}$	۰/۴۷۲	F_{p-nwi}	۸۴۰ J/kg.K	$c_{p,coi}$
۰/۲۵۸	$\eta_{rd,p}$	۰/۵۲۸	F_{p-coi}	۸۴۰ J/kg.K	$c_{p,coo}$
$\times 10^8$					
۵/۶۷۰۵۱ W/m ² .K ⁴	σ	۰/۵۲۸	F_{p-nwi}	۰/۰۰۰۴ m	d_{co}
۲۲۶۰۰۰۰ j/kg	r_w	۱	F_{sc-coi}	۰/۶۵ m	d_g
۱/۲۹ kg/m ³	ρ_a	۰/۵۲۸	$F_{nwi-coi}$	۰/۰۰۲ m	d_{sc}
۱۴۰۰ kg/m ³	ρ_g	۰/۸۶	F_{coo-sk}	۰/۲۵ m	d_{mw}
۲۵۰۰ kg/m ³	ρ_{co}	۱	f_a	۰/۷	E_g
۲۰۰۰ kg/m ³	ρ_{sc}	۱	LAI	۰/۴۷۲	E_p
		۰/۸۹	Le	۰/۹	E_{sc}

توسط معادله بالا محاسبه می‌گردند.

شیشه‌های عایق^۱ (بصورت شیشه‌های دو جداره با فضای خلا یا گازی) می‌توانند جهت کاهش اتلافات حرارتی در گلخانه مورد استفاده قرار گیرند. واحدهای شیشه‌های دو جداره^۲ معمولاً به ضخامت mm ۳ تا mm ۱۰ ساخته می‌شوند. در مدل دینامیکی به کار رفته در این شبیه‌سازی، نوعی از شیشه‌های دو جداره با ضخامت شیشه mm ۴ و با فاصله گازی mm ۱۲، با شیشه تک‌جداره مورد مقایسه قرار گرفته است. ضریب انتقال حرارت یک واحد شیشه دو جداره شامل شیشه تمیز با فضای پر شده از هوا با فاصله mm ۱۲ برابر $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ می‌باشد [۲۲ و ۲۳].

حرارت منتقل شده توسط انتقال حرارت جابه‌جایی بین اجزای گلخانه (Q_{g-dg} و $Q_{nwi-mwo}$) توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$Q_{c-d} = A_c \times (\lambda_{A-B} / d_c) \times (T_c - T_d) \quad (14)$$

۲-۳-۱- معادلات انرژی

معادلات دیفرانسیل درجه اول به کار رفته برای دمای هوای داخل گلخانه (T_a)، خاک (T_g)، گیاه (T_p) و پوشش داخلی گلخانه (T_{coi}) به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۴ و ۱۹-۲۰]:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{Q_{a-g} - Q_{a-p} - Q_{a-coi} - Q_{nwi-mwo}}{\rho_a \times c_{p-a} \times V_a} \quad (9)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{Q_{rd-g} - Q_{a-g} - Q_{g-p} - Q_{g-coi} - Q_{g-dg}}{(0.7 \times \rho_g \times c_{p-g} + 0.2 \times \rho_{H_2O} \times c_{p-H_2O} + 0.1 \times \rho_a \times c_{p-a}) \times V_g} \quad (10)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{Q_{rd-p} + Q_{a-p} + Q_{coi-p} + Q_{g-p} - Q_{H_2O,p-a}}{\rho_p \times c_{p-p} \times V_p} \quad (11)$$

$$\frac{dT_{coi}}{dt} = \frac{Q_{rd-coi} + Q_{a-coi} + Q_{H_2O,a-coi} + Q_{g-coi} - Q_{coi-p} - Q_{coo-o} - Q_{coo-sky}}{\rho_{coi} \times c_{p-coi} \times V_{coi}} \quad (12)$$

انتقال حرارت جابه‌جایی صورت گرفته بین اجزای داخلی گلخانه به صورت زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$Q_{A-B} = A_{AB} \times \alpha_{A-B} (T_A - T_B) \quad (13)$$

بنابراین انتقال حرارت‌های Q_{a-p} ، Q_{a-g} ، Q_{a-coi} و Q_{coo-o}

1 IG
2 IGUs

که در آن A_p نشان دهنده مساحت سطح کل برگ‌های گیاه و $\kappa_{H_2O,p-a}$ نشان‌دهنده ضریب انتقال جرم بخار آب از گیاه به هوای داخل می‌باشد که بصورت رابطه زیر قابل بیان است [۲۵]. علاوه بر این، $C_{H_2O,s,p}$ غلظت اشباع بخار آب در دمای گیاه و $C_{H_2O,a}$ غلظت بخار آب در دمای هوای داخل گلخانه می‌باشد.

$$\kappa_{H_2O,p-a} = \frac{1}{R_{b-H_2O} + \frac{R_{cut} \times R_{s-H_2O}}{R_{cut} + R_{s-H_2O}}} \quad (19)$$

که در آن R_{cut} مقاومت برشی برگ و برابر $m/s \times 2000$ و R_{s-H_2O} مقاومت روزنه‌ای برگ در مقابل پخش قطرات آب می‌باشد که توسط رابطه (۱۷) به دست می‌آید [۲۵]. علاوه بر این R_{b-H_2O} مقاومت لایه مرزی برگ در مقابل پخش قطرات آب است که با رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد [۲۵]:

$$R_{s-H_2O} = R_{min} \times f_l \times f_{TC} \times f_{CO_2} \times f_{H_2O} \quad (20)$$

که در آن R_{min} کمترین مقاومت داخلی گیاه گلخانه‌ای می‌باشد که برابر $82/0.33 \text{ m/s}$ و فاکتور CO_2 است که برابر یک می‌باشد. f_l ، f_{TC} و f_{H_2O} به ترتیب نشان دهنده فاکتور تشعشع، فاکتور دما و فاکتور H_2O می‌باشند. این فاکتورها در جدول ۲ آورده شده است.

$$R_{b-H_2O} = \frac{1174 \sqrt{I_f}}{(I_f \times |T_p - T_a| + 207 v_a^2)^{1/4}} \quad (21)$$

جدول ۲: فرمول فاکتورهای محاسبه مقاومت [۲۵]

Table 2. Formulation of dependency factors for stomata resistance calculation

فاکتور	فرمول
f_l	$\frac{I_{p-g}}{2LAI} + 4.3$ $\frac{I_{p-g}}{2LAI} + 0.54$ $[I_{p-g} = (0.0089 - 0.023\beta_{g-ls})I_{in}]$ $\beta_{g-ls} = 0.58]$
f_{TC}	$1 + 0.005(T_p - T_0 - 33.6)^2$ $[T_0 = 273.15]$
f_{H_2O}	$\frac{4}{\sqrt[4]{1 + 255e^{-0.5427\Delta_{pp-H_2Om}}}}$ $[\Delta_{pp-H_2Om} = 0.01(p_{p-H_2Os} - p_{a-H_2O})]$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطوح مختلف در یک گلخانه (α_{A-B}) می‌تواند توسط روابط موجود در مرجع [۱۹] مورد محاسبه قرار گیرد.

تابش طول موج بلند جذب شده توسط پوشش داخلی گلخانه (Q_{rd-coi})، خاک (Q_{rd-g}) و گیاه (Q_{rd-p}) توسط معادله زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$Q_{rd-x} = A_x \times \eta_{rd-x} \times I_{in} \quad (15)$$

که در این رابطه I_{in} از تابش اندازه‌گیری شده توسط تابش‌سنج TES۱۳۳۳ به دست می‌آید.

انتقال حرارت تشعشعی صورت گرفته بین اجزای گلخانه (Q_{g-coi})، Q_{coi-p} ، $Q_{coo-sky}$ و Q_{g-p} به صورت زیر به دست می‌آید [۲۰]:

$$Q_{E-F} = A_E \times E_E \times E_F \times F_{E-F} \times \sigma(T_E^4 - T_F^4) \quad (16)$$

که در آن T_{sky} از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$T_{sky} = 0.0552(T_0)^{1.5} \quad (17)$$

بیشترین آب تبخیر شده از سطح گیاه در طول رشد گیاه ناشی از پدیده تبخیر و تعرق می‌باشد بنابراین به دست آوردن نرخ تبخیر و تعرق گیاه در فرآیند کشت، بسیار مهم می‌باشد. استنقلی [۲۵] رابطه‌ای جهت به دست آوردن نرخ جریان جرم بخار آب از گیاه به هوای اطراف در فرآیند تبخیر و تعرق گیاه معرفی کرد:

$$\phi_{mH_2O,p-a} = \max\{A_p \times \kappa_{H_2O,p-a} (C_{H_2O,s,p} - C_{H_2O,a}), 0\} \quad (18)$$

که در آن v_0 ، A_s و f_a به ترتیب نشان‌دهنده مساحت سطح جانبی گلخانه، سرعت جریان باد در بیرون و ضریب نشتی هوا می‌باشند. ضریب نشتی هوا برای یک گلخانه تازه تاسیس برابر یک می‌باشد. بنابراین انتقال حرارت صورت گرفته توسط هوای خشک به دلیل نشتی هوا از داخل گلخانه به بیرون توسط معادله زیر قابل محاسبه است [۲۷]:

$$Q_{a-o} = (1 - op_{vhr} \times \eta_{vhr}) \times \rho_a \times c_{p-a} \times \phi_{leak,a-o} (T_a - T_o) \quad (28)$$

که در آن ρ_a ، η_{vhr} ، op_{vhr} و c_{p-a} به ترتیب نشان‌دهنده فاکتور استفاده از سیستم تهویه با قابلیت بازیافت حرارت داخلی، فاکتور بازده تهویه، چگالی هوا و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشند.

نرخ جریان جرم بخار آب از گیاه به هوای داخل گلخانه به دلیل نشتی هوا با معادله زیر محاسبه می‌گردد [۱۷]:

$$\phi_{mH_2O,a-o} = \phi_{leak,a-o} (C_{H_2O,a} - C_{H_2O,o}) \quad (29)$$

که در آن $C_{H_2O,a}$ و $C_{H_2O,o}$ به ترتیب نشان‌دهنده غلظت بخار آب در هوای داخل و خارج گلخانه می‌باشد.

حرارت نهان منتقل شده توسط بخار آب از هوای داخل گلخانه به بیرون به دلیل نشتی هوا از معادله زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$Q_{H_2O,a-o} = r_w \times \phi_{mH_2O,a-o} \quad (30)$$

۲-۳-۲- معادلات انرژی

انرژی، ماکزیمم کار بالقوه ممکن یک سیستم جهت رسیدن به تعادل با حالت مرده می‌باشد [۲۸]. نابودی انرژی در فرآیند انتقال حرارت از سیستم A به سیستم B توسط انتقال حرارت جابجایی، همرفتی، تابش امواج بلند و انتقال جریان جرم هوا از داخل به خارج گلخانه به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۹]:

$$EX_d = -QT_e \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) \quad (31)$$

که در آن Q، T_A ، T_B و T_e به ترتیب نشان‌دهنده انتقال حرارت از دمای T_A به T_B ، دمای جسم A، دمای جسم B و دمای محیط می‌باشند.

نابودی انرژی در اثر فرآیند تقطیر آب بر روی پوشش داخلی

که در آن l_f و v_a به ترتیب نشان‌دهنده عرض متوسط برگ و سرعت باد داخل گلخانه می‌باشند.

فرآیند تقطیر باعث می‌شود که بخار آب از هوای داخل گلخانه به قطرات آب بر روی پوشش داخلی سقف گلخانه تبدیل گردند. نرخ جریان جرم این فرآیند از معادله زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$\phi_{mH_2O,a-coi} = \max \{ A_{coi} \times \kappa_{H_2O,a-coi} (C_{H_2O,a} - C_{H_2Os,coi}), 0 \} \quad (22)$$

که در آن A_{coi} مساحت سطح پوشش گلخانه و $\kappa_{H_2O,a-coi}$ ضریب انتقال جرم بخار آب از هوای داخل گلخانه به پوشش داخلی گلخانه می‌باشند که توسط رابطه (۱۰) بدست می‌آید [۲۶] و $C_{H_2Os,coi}$ غلظت اشباع بخار آب در دمای پوشش گلخانه و $C_{H_2O,a}$ غلظت بخار آب در دمای هوای داخل گلخانه می‌باشند.

$$\kappa_{H_2O,a-coi} = \frac{\alpha_{a-coi}}{\rho_a \times c_{p-a} \times Le^{2/3}} \quad (23)$$

که در آن α_{a-coi} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از هوای داخل گلخانه به پوشش داخلی گلخانه را نشان می‌دهد و Le عدد لوییس می‌باشد که مقدار آن ۰/۸۹ می‌باشد [۱۸].

$$\alpha_{a-coi} = 3 \times |T_a - T_{coi}|^{1/2} \quad (24)$$

حرارت نهان منتقل شده از گیاه به هوای داخل گلخانه به دلیل تبخیر و تعرق گیاه و حرارت نهان منتقل شده از هوای داخل گلخانه به پوشش داخلی گلخانه توسط معادله زیر محاسبه می‌گردند [۱۸] و [۲۵]:

$$Q_{H_2O,p-a} = r_w \times \phi_{mH_2O,p-a} \quad (25)$$

$$Q_{H_2O,a-coi} = r_w \times \phi_{mH_2O,a-coi} \quad (26)$$

که در آن r_w حرارت تبخیر آب و مقدار آن برابر J/kg $2/26 \times 10^6$ می‌باشد.

پنجره‌ها در تمام طول آزمایش بسته بوده و هیچ‌گونه تهویه‌ای از پنجره‌ها و درها صورت نمی‌گیرد با این همه، همیشه مقداری نشتی از درها و پنجره‌ها وجود دارد که مقدار جریان ناشی از نشتی هوا از معادله زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$\phi_{leak,a-o} = A_s (8.3 \times 10^{-5} + 3.5 \times 10^{-5} v_0 \times f_a) \quad (27)$$

۲-۳-۳ معادلات اقتصادی

طراحی اقتصادی یک سیستم بر این اساس صورت می‌گیرد که با کمترین هزینه و با در نظر گرفتن محدودیت‌های تکنیکی، اقتصادی و قانونی، بالاترین کارایی ممکن برای سیستم تحت شرایط اجتماعی، اکولوژیکی و نژادی به‌دست آید. تحلیل اگزروزواکونومیک می‌تواند هزینه برگشت‌ناپذیری‌ها را محاسبه نماید. در واقع، تحلیل میزان نابودی اگزروزوی اجزای یک سیستم همراه هزینه آن‌ها می‌تواند روشی را جهت بهینه کردن یک سیستم ارائه دهد [۳۱].

پارامترهای زیر جهت ارزیابی اقتصادی گلخانه نیمه‌خورشیدی در نظر گرفته شده‌اند:

عمر اجزای گلخانه به جز پوشش گلخانه ۱۰ سال در نظر گرفته شده است.

عمر پوشش گلخانه ۵ سال در نظر گرفته شده است.

ساعات کاری گلخانه نیمه‌خورشیدی بصورت شبانه‌روزی در نظر گرفته می‌شود.

از 15 m^2 مساحت گلخانه، کشت در 50% آن (7.5 m^2) صورت گرفته است که معادل $9/36$ گیاه در هر مترمربع می‌باشد. بقیه مساحت گلخانه برای مسیر رفت‌وآمد و تعبیه تجهیزات کمکی گرمایش در نظر گرفته شده است.

40% سرمایه‌گذاری اولیه به عنوان ارزش تجهیزات متروکه گلخانه نیمه‌خورشیدی در نظر گرفته می‌شود [۳۲].

در پژوهش حاضر، هزینه مرجع مربوط به سال ۲۰۱۲ برای اجزای گلخانه نیمه‌خورشیدی [۳۳] در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ هزینه مرجع ساخت‌وساز، تجهیزات کمکی (مانند تجهیزات داده‌برداری، تجهیزات گرمایش کمکی)، نمونه کاشت شده و انرژی غیرخورشیدی (انرژی الکتریکی) آورده شده است.

در تحلیل اگزروزواکونومیک، هزینه محاسبه شده در سال مرجع باید نسبت به زمان اصلی کاربرد تجهیزات به‌روزرسانی شود [۳۱]:

$$\text{Original cost} = \frac{\text{Cost index for the year when the original cost was obtained}}{\text{Cost index for the reference year}} \times \text{Cost at reference year} \quad (40)$$

در مطالعه حاضر، ایندکس هزینه سوئیت و مارشال جهت تبدیل هزینه‌های سال مرجع به سال اصلی مورد استفاده قرار گرفته است

گلخانه و تبخیر و تعرق گیاه از معادله زیر به‌دست می‌آید [۲۹]:

$$EX_d = -n_i RT_e \ln\left(\frac{P_{i,A}}{P_{i,B}}\right) \quad (32)$$

که در آن n_i ، $p_{i,A}$ و $p_{i,B}$ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد مول گونه A، فشار جزئی گونه A و B می‌باشد. در گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده سعی شده است تمام درها و پنجره‌ها بسته نگه داشته شوند با این همه مقداری تهویه ناخواسته از داخل به خارج و بالعکس از نشتی‌های موجود اتفاق می‌افتد و مقداری بخار آب جابه‌جا می‌گردد میزان نابودی اگزروزوی در اثر این جابه‌جایی بخار آب از معادله زیر به‌دست می‌آید [۲۹]:

$$EX_d = -RT_e (n_{i,A} - n_{i,B}) \ln\left(\frac{P_{i,A}}{P_{i,B}}\right) \quad (33)$$

مفهوم بخار آب در تهویه مطبوع، جهت محاسبه اگزروزوی هوای داخلی گلخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد در این راستا، هوای داخلی گلخانه به‌صورت ترکیبی از هوای خشک و بخار آب در نظر گرفته می‌شود بنابراین اگزروزوی هوای داخلی گلخانه با محاسبه اگزروزوی گرمایی و اگزروزوی دیفیوژنال هوا در طول بازه زمانی یک دقیقه مورد محاسبه قرار می‌گیرد [۳۰]:

$$EX_{a,th} = c_p^* (T_a - T_0) - T_0 (c_p^* \log\left(\frac{T_a}{T_0}\right) - R^* \log\left(\frac{P_a}{P_0}\right)) \quad (34)$$

$$EX_{a,dif} = T_0 [R^* \log\left(\frac{1+Y}{1+Y} \frac{\omega_0}{\omega}\right) + CR_a \omega \log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)] \quad (35)$$

$$c_p^* = c_{p-a} + \omega c_{p-v} \quad (36)$$

$$R^* = R_a + \omega R_v \quad (37)$$

$$Y = \frac{M_{air}}{M_{H_2O}} \quad (38)$$

$$\omega = 0.622 \left(\frac{P_{H_2O,a}}{P_a - P_{H_2O,a}} \right) \quad (39)$$

شرایط مرجع در نظر گرفته شده در این مطالعه برای محاسبه اگزروزوی، دما (T_e) و فشار (P_e) بیرون می‌باشد. بنا به محاسبات برنچارت^۱ و همکاران [۲۹]، مرجع انتخابی برای محاسبه اگزروزوی هوای داخلی گلخانه تنها تاثیر اندکی بر روی نتایج ارزیابی اگزروزوی خواهد داشت.

1 Bronchart

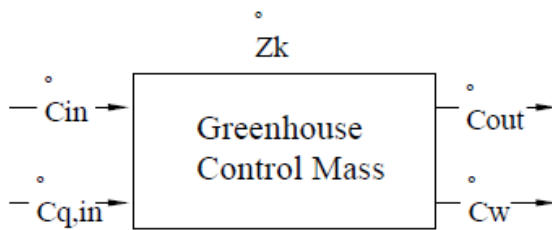


Fig. 4. The flowchart of the cost flow in the greenhouse as a control mass for every time step

شکل ۴: شماتیک جریان هزینه برای جرم کنترل گلخانه در هر بازه زمانی یک دقیقه‌ای

بر مبنای این رابطه، حاصل جمع نرخ هزینه کار خروجی و سایر انرژی‌های خروجی برابر حاصل جمع نرخ هزینه‌های تمام انرژی‌های ورودی به علاوه نرخ سرمایه‌گذاری اولیه به علاوه نرخ هزینه انرژی ورودی توسط حرارت می‌باشد. در آزمایش‌های انجام شده، داده‌برداری از ساعت ۹:۰۰ تا ۱۷:۰۰ انجام گردید ضمن اینکه آنالیزهای انرژی، انرژی و اقتصادی در بازه‌های زمانی یک دقیقه انجام گرفت. در آزمایش مورد تحلیل، به دلیل کافی بودن انرژی خورشیدی برای بالا بردن دمای هوای داخل گلخانه از تجهیزات گرمایش کمکی استفاده نگردید ضمن اینکه هیچ تبادل کاری صورت نگرفت بنابراین:

$$\dot{C}_{q,in} = 0 \quad (44)$$

$$\dot{C}_w = 0 \quad (45)$$

بنابراین رابطه (۴۳) بصورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\dot{C}_{in} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{out} \quad (46)$$

اگر رابطه (۴۶) برای هر بازه زمانی نوشته شود به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\dot{C}_{n,in} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{n,out} \quad (47)$$

با توجه به این نکته که نرخ هزینه ورودی یک مرحله همان نرخ هزینه خروجی مرحله قبلی می‌باشد بنابراین رابطه (۴۷) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\dot{C}_{n-1,out} + \dot{Z}_k = \dot{C}_{n,out} \quad (48)$$

از آنجایی که در این مطالعه، تامین هوای مطلوب با دما و رطوبت مناسب برای گلخانه، جهت تحلیل انرژی و اکونومیک به عنوان هدف در نظر گرفته شده است بنابراین با حذف فاکتور زمان در رابطه (۴۸)

Table 3. The greenhouse expenses details according 2012 reference cost data

جدول ۳. مقادیر هزینه مرجع برای قسمت‌های مختلف گلخانه

اجزاء	هزینه مرجع در سال ۲۰۱۲ (دلار)
سازه	۶۵۱۰
تجهیزات جانبی	۱۷۸۰
تجهیزات داده‌برداری	۳۵۰
سیستم گرمایش	۱۸۰
سایر	۲۳۰۰
نیروی کار	۱۱۰
نمونه‌های آزمایش	۰
انرژی غیرخورشیدی	۰
کل	۱۱۲۳۰

[۳۴]. بر این اساس ایندکس‌های در نظر گرفته شده برای سال مرجع (۲۰۱۲ میلادی) و سال اصلی (پاییز ۹۶ معادل ۲۰۱۷ میلادی) به ترتیب برابر ۱۸۸۹/۴ و ۲۴۱۱/۴ می‌باشد.

سرمایه‌گذاری اولیه برای هر کدام از تجهیزات، با معادله زیر قابل تبدیل به نرخ هزینه در بازه زمانی یک دقیقه می‌باشد [۳۵]:

$$\dot{Z}_k = CRF \times \frac{\phi_r}{N \times 3600} \times Z_k \quad (41)$$

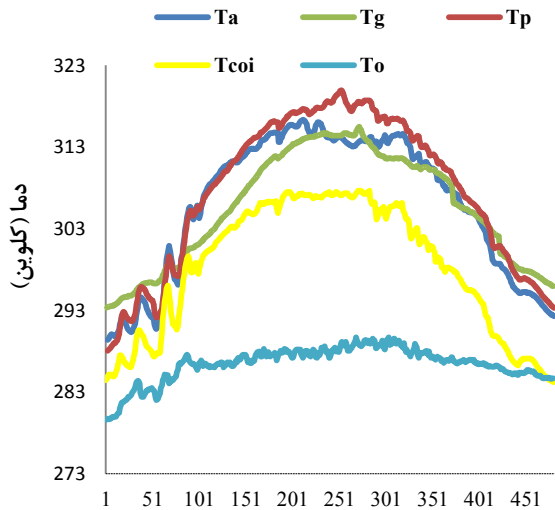
که در آن N تعداد ساعات سالانه کارکرد گلخانه، Z_k هزینه سرمایه‌گذاری در سال اصلی، ϕ_r فاکتور تعمیرات (که معمولاً برابر ۱/۰۶ در نظر گرفته می‌شود) و CRF فاکتور بازبایی سرمایه می‌باشد که توسط معادله زیر به دست می‌آید [۳۵]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (42)$$

که در آن i نشان‌دهنده نرخ بهره (در این مطالعه بین ۰/۱۰ و ۰/۲۰ در نظر گرفته شده است) و n عمر مفید گلخانه (۵ برای پوشش گلخانه و ۱۰ برای سایر اجزای گلخانه در نظر گرفته شده است) می‌باشد.

شکل ۴ شماتیکی از جریان هزینه برای جرم کنترل گلخانه نیمه‌خورشیدی در هر بازه زمانی یک دقیقه‌ای را نشان می‌دهد. در این مطالعه معادله بالانس هزینه برای سیستم گلخانه به صورت زیر تعریف شده است:

$$\bar{C}_{in} + \bar{C}_{q,in} + \bar{Z}_k = \bar{C}_w + \bar{C}_{out} \quad (43)$$



زمان (دقیقه)

Fig. 5. Changes of the experimental temperatures of the greenhouse parts and the outside air

شکل ۵: تغییرات دمای اجزای گلخانه و هوای بیرون در بازه‌های زمانی یک دقیقه‌ای

انرژی از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی بین پوشش داخلی گلخانه و سایر اجزای داخلی گلخانه می‌گردد.

همانطور که قبلاً بیان شد، یک گلخانه ایده‌آل گلخانه‌ای است که شرایط دمایی بهتری را برای پرورش محصول فراهم نماید در این راستا، با توجه به اینکه متوسط دمای هوای داخلی گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده ۳۳ درجه سانتی‌گراد (حدود ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای هوای بیرون) می‌باشد این اختلاف دمای قابل ملاحظه نشان‌دهنده عملکرد مناسب ساختار انتخاب شده برای گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده می‌باشد.

همچنین اختلاف دمای اندک بین گیاه، خاک و هوای داخلی گلخانه نشان می‌دهد که انتقال حرارت بین اجزای گلخانه به‌خوبی انجام می‌شود. بنابراین ساختار پیشنهاد شده برای گلخانه به دلیل یکنواختی دما در نقاط مختلف، برای پرورش محصول مناسب می‌باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که دمای گیاه غالباً از دمای هوای داخل گلخانه بالاتر می‌باشد این موضوع باعث جلوگیری از تقطیر بخار آب بر روی گیاه شده و از بسیاری از امراض گیاهی همچون بوتریتیس و لیت بلایت ممانعت می‌گردد.

شبیه‌سازی ساختار گلخانه‌ای نیمه‌خورشیدی در نرم‌افزار متلب برای بازه‌های زمانی یک دقیقه انجام گرفته است. شکل ۶ مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقادیر ثبت شده از داده‌برداری‌های انجام شده در تاریخ ۹۶/۹/۹ برای دماهای هوای

داریم:

$$C_{n-1,out} + Z_{k,n} = C_{n,out} \quad (49)$$

که در آن C_{n-1} و C_n نشان دهنده هزینه کل بازه‌های زمانی n ام و $n-1$ ام می‌باشند و هزینه کل یک بازه زمانی است که به صورت معادله زیر قابل بیان است:

$$Z_{k,n} = 60 \times Z_k \quad (50)$$

هزینه ورودی برای بازه زمانی اول ($n=1$) بین $t=0$ s تا $t=60$ s (صفر می‌باشد چرا که از هوای اتمسفر استفاده شده است بنابراین:

$$Z_{k,1} = C_{1,out} \quad (51)$$

از طرفی انرژی هوای مرطوب برای هر بازه زمانی در بخش ۲-۳-۲ محاسبه گردید بنابراین هزینه واحد هوای گلخانه برای بازه زمانی اول به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$60 \times Z_k = c_{1,out} EX_1 \rightarrow c_{1,out} = \frac{60 Z_k}{EX_1} \quad (52)$$

و به صورت کلی، هزینه واحد هوای گلخانه برای بازه‌های زمانی بعدی با رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$c_{n,out} = \frac{C_{n-1,out} + 60 Z_k}{EX_n} \quad (53)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تحلیل انرژی و انرژی

شکل ۵ تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده دمای اجزای گلخانه و هوای بیرون در بازه‌های زمانی یک دقیقه از ساعت ۹:۰۰ تا ساعت ۱۷:۰۰ را نشان می‌دهد.

در گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده، به دلیل استفاده از شیشه تک لایه برای پوشش گلخانه، اختلاف دمای دو طرف شیشه قابل صرف‌نظر می‌باشد بنابراین استفاده از شیشه تک لایه برای پوشش گلخانه باعث اختلاف دمای قابل ملاحظه بین هوای داخل گلخانه و قسمت داخلی پوشش گلخانه می‌گردد. این اختلاف دما باعث اتلاف

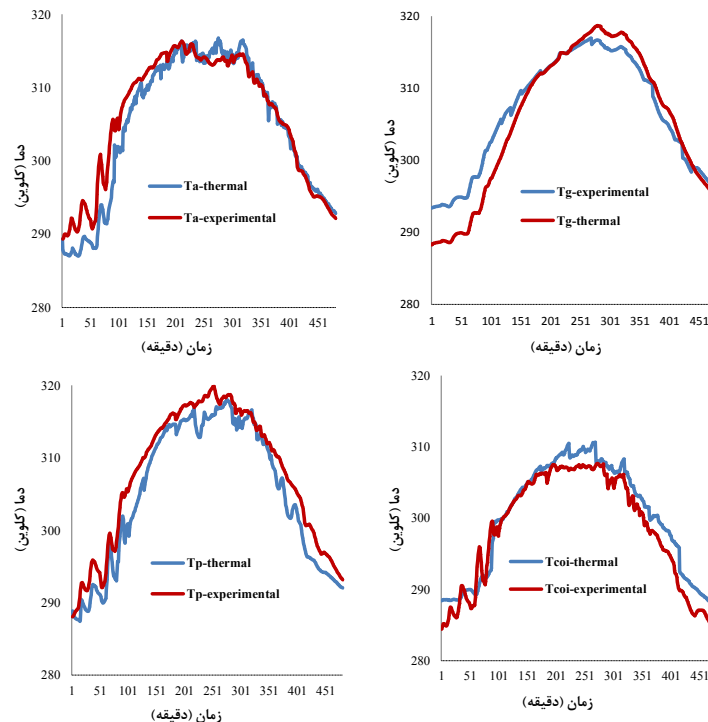


Fig. 6. Thermal modeling results and experimental data recorded from constructed greenhouse

شکل ۶: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی

جدول ۴: نتایج آنالیز آماری دقت شبیه‌سازی دینامیکی در مقایسه با داده‌برداری‌های تجربی

Table 4. Statistical evaluation results

ضریب تبیین (%)	درصد کارایی (%)	درصد میانگین خطای مطلق (%)	مجموع مربعات خطا (°C)	ریشه متوسط مربعات خطا (°C)	دما
۹۷/۶۲	۹۲/۴۲	۴/۹۸	۱۲۱/۶۵	۱/۶۴	T_a
۹۸/۲۴	۸۵/۶۴	۶/۶۸	۲۵۸/۳۶	۱/۸۴	T_g
۹۷/۵۱	۸۲/۳۵	۷/۱۲	۲۹۴/۳۲	۲/۳۶	T_p
۹۶/۴۳	۸۷/۵۸	۵/۵۴	۱۷۹/۲۹	۲/۲۱	T_{coi}

رز از ماه می ۲۰۰۷ تا آوریل ۲۰۰۸ مورد مقایسه قرار گرفت. در این مطالعه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توافق خوبی با مقادیر تجربی در طول روز نشان داد. به‌طوری‌که ریشه متوسط مربعات خطا بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی به ترتیب در زمستان و تابستان برای دمای هوای داخلی گلخانه $1/8\text{ }^{\circ}\text{C}$ و $1/3\text{ }^{\circ}\text{C}$ و برای گیاه $1/9\text{ }^{\circ}\text{C}$ و $1/6\text{ }^{\circ}\text{C}$ به‌دست آمد. همانطور که از جدول ۴ دیده می‌شود مقدار ریشه متوسط مربعات خطا در این مطالعه از $1/64\text{ }^{\circ}\text{C}$ تا $2/36\text{ }^{\circ}\text{C}$ متغیر می‌باشد.

شارما^۲ و همکاران [۳۷] در دهلی مدل دینامیکی را جهت پیش‌بینی دمای هوای داخلی گلخانه و دمای گیاه در نقاط مختلف گلخانه در ماه دسامبر توسعه دادند. در این پژوهش تاثیر و اهمیت

داخلی گلخانه، گیاه، خاک و پوشش داخلی گلخانه برای بازه‌های زمانی یک دقیقه را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶، بین نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده از گلخانه نیمه‌خورشیدی هماهنگی خوبی وجود دارد. در این خصوص، برای نشان دادن میزان دقت شبیه‌سازی عددی، ارزیابی آماری انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

در پژوهشی در کشور زیمبابوه توسط ماشونجوا^۱ و همکاران [۳۶]، شبیه‌سازی دینامیکی یک گلخانه جهت پیش‌بینی دما و رطوبت نسبی هوای داخلی یک گلخانه انجام گرفت و نتایج حاصله با پارامترهای اندازه‌گیری شده از یک گلخانه تجربی با کشت گل

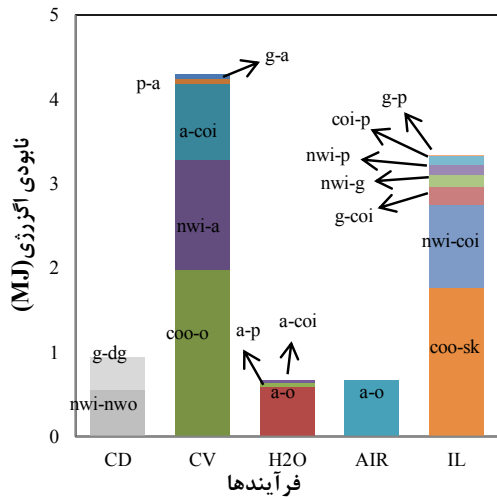


Fig. 7. Exergy destruction values in different heat and mass transfer processes

شکل ۷: نابودی انرژی کل به تفکیک فرآیندهای مختلف انتقال حرارت و جرم

سمت بیرونی پوشش گلخانه ($EX_{d,CV,coo-o}$)، این اختلاف دما باید کاهش یابد. در این خصوص، شیشه دو جداره‌ای با فاصله هوایی به عنوان پوشش گلخانه به کار برده شد تا انتقال حرارت از طریق پوشش گلخانه کاهش یابد. شیشه عایق به کار گرفته شده با ضخامت شیشه ۴ mm برای هر جداره و فاصله ۱۲ mm هوا عملکرد قابل قبولی نشان داد. نتایج نشان داد که با استفاده از این تکنیک، نابودی انرژی $EX_{d,CV,coo-o}$ به اندازه ۵۲٪ کاهش یافت. چرا که استفاده از این روش باعث کاهش اختلاف دمای بین هوای بیرون و پوشش بیرونی گلخانه می‌شود. علاوه بر این، استفاده از شیشه عایق به کار گرفته شده باعث کاهش نابودی انرژی بین هوای داخل گلخانه و پوشش داخلی گلخانه ($EX_{d,CV,a-coi}$) و همچنین کاهش نابودی انرژی در فرآیند انتقال حرارت تابشی از طریق امواج بلند بین پوشش خارجی گلخانه و آسمان ($EX_{d,IL,coo-sky}$) شد. این کاهش نابودی انرژی‌ها به آن دلیل اتفاق می‌افتد که پوشش دو جداره گلخانه با فاصله هوایی، به عنوان عایق بین هوای داخل گلخانه و هوای بیرون عمل می‌کند بنابراین، پوشش داخلی گلخانه گرمتر و پوشش خارجی سردتر می‌ماند. عملکرد شیشه عایق به کار گرفته شده در کاهش نابودی انرژی در فرآیندهای مختلف در جدول ۶ آمده است.

در فرآیند تهویه، دو نوع جریان انرژی، هوای داخل گلخانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد: اتلاف انرژی ناشی از انتقال هوای خشک و اتلاف انرژی ناشی از انتقال بخار آب [۲۹]. علاوه بر این همانطور که در شکل ۷ مشخص است اتلاف انرژی همراه با هوای خشک و بخار

فاکتورهایی همچون نشتی هوا، ظرفیت گرمایی گیاه کاشت شده بر روی دما و رطوبت هوای داخلی گلخانه و گیاه مورد تحلیل قرار گرفت و مقدار خطای مطلق ۱۰٪ بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده محاسبه گردید.

دو^۱ و همکاران [۳۸] به صورت تجربی و تئوری عملکرد گلخانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند که گرمایش آن توسط سیستم لوله‌های ناقل حرارت صورت می‌گرفت. آن‌ها نشان دادند که ارتفاع و قدرت سیستم گرمایش و میزان اتلافات حرارتی گلخانه تاثیر بسزایی بر روی عملکرد گلخانه دارد. خطای مطلق حدود ۲۰٪ بین نتایج تئوری و مقادیر تجربی به دست آمد.

با توجه به دو مطالعه اشاره شده و مقایسه خطاهای به دست آمده در آن‌ها با جدول ۴، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه برای گلخانه نیمه‌خورشیدی قابل اعتماد می‌باشد [۳۷ و ۳۸].

علاوه بر این، نتایج آنالیز عدم قطعیت (جدول ۵) نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده در طول آزمایش‌ها جهت برآورد دقت مدل‌سازی حرارتی، قابل قبول می‌باشد.

شکل ۷ مقادیر نابودی انرژی در حین فرآیندهای انتقال حرارت و جرم در گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود نابودی انرژی مربوط به انتقال حرارت جابجایی بیشتر از سایر فرآیندهای انتقال حرارت و جرم می‌باشد. این به دلیل اختلاف دمای بالای دمای هوای بیرون و دمای طرف بیرون پوشش گلخانه می‌باشد بنابراین برای کاهش نابودی انرژی ناشی از انتقال حرارت جابجایی بین هوای بیرون و

جدول ۵: نتایج آنالیز عدم قطعیت

Table 5. The uncertainty analysis results

تجهیزات اندازه‌گیری	عدم قطعیت (U)
SHT11 (T_a)	$\pm 0.243K$
SHT11 (T_g)	$\pm 0.425K$
SHT11 (T_p)	$\pm 0.387K$
SHT11 (T_{coi})	$\pm 0.311K$
SHT11 (RH_a)	$\pm 0.263RH^1$
SHT11 (RH_o)	$\pm 0.314RH$
TES1333 (I_{in})	$\pm 1.230W/m^2$
ST8894 (v_o)	$\pm 0.098m/s$

جدول ۶: عملکرد شیشه عایق به کار گرفته شده در کاهش نابودی انرژی کل

Table 6. Double layer glass impacts on the exergy destructions associated with different processes

فرآیند انتقال حرارت	درصد کاهش نابودی انرژی با استفاده از شیشه عایق به کار گرفته شده
$EX_{d,CV,coo-o}$	۵۲٪
$EX_{d,CV,a-coi}$	۵۱٪
$EX_{d,IL,coi-sky}$	۴۷٪
$EX_{d,IL,mwi-coi}$	۳۵٪
$EX_{d,IL,g-coi}$	۳۲٪
$EX_{d,IL,p-coi}$	۳۱٪

آب در طول فرآیند تهویه ناشی از نشتی از درها و پنجره‌ها صورت می‌گیرد بنابراین درزگیری و برطرف کردن نشتی‌های درها و پنجره‌ها و دیوارها می‌تواند تا حدود زیادی جلوی اتلافات انرژی را بگیرد. و در نهایت اینکه، شکل ۷ نشان می‌دهد که نابودی انرژی مربوط به تقطیر بخار آب بر روی پوشش داخلی گلخانه ($EX_{d,H_2O,a-coi}$) و تبخیر و تعرق گیاه ($EX_{d,H_2O,a-p}$) تنها ۰/۱٪ از کل نابودی انرژی در سیستم را تشکیل می‌دهد که قابل صرف نظر می‌باشد.

۳-۲- نتایج تحلیل اقتصادی

شکل ۸ هزینه واحد هوای داخل گلخانه برای بازه‌های زمانی یک دقیقه (از دقیقه اول تا دقیقه ۴۸۰) برای نرخ بهره‌های متفاوت با استفاده از رابطه (۴۹) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روند نمودار هزینه واحد هوای داخل گلخانه در اکثر نقاط صعودی می‌باشد این به آن خاطر است که هزینه کل خروجی بازه زمانی n-۱ به عنوان

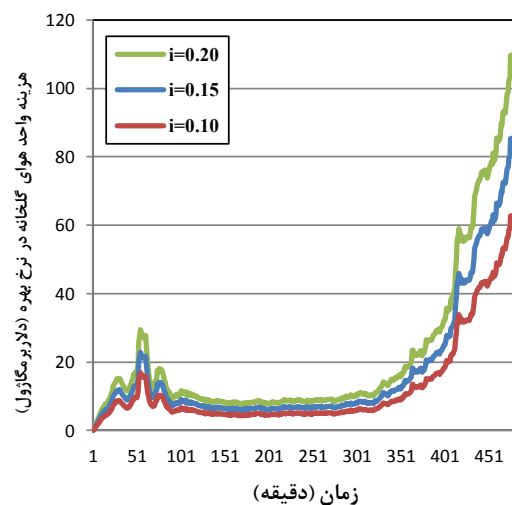


Fig. 8. Air unit cost at time steps of n=1 to n=480 for different interest rates

شکل ۸: هزینه واحد هوای داخل گلخانه از دقیقه اول تا دقیقه ۴۸۰ با نرخ بهره‌های مختلف

هزینه کل ورودی بازه زمانی n در نظر گرفته می‌شود با این همه برای بازه‌های زمانی ۵۰ تا ۱۰۰ دقیقه، نمودار هزینه واحد هوا به دلیل افزایش شدید در دمای هوای داخل گلخانه (شکل ۶) و متعاقباً افزایش انرژی آن، نزولی می‌باشد. علاوه بر این، برای بازه‌های زمانی ۱۰۰ تا ۳۰۰ دقیقه، نمودار هزینه واحد هوا تقریباً صاف می‌باشد که این نشان‌دهنده این مطلب است که در این بازه زمانی، پارامترهای هزینه سرمایه‌گذاری کل و انرژی هوای داخل گلخانه به یک نسبت افزایش می‌یابند و بر یکدیگر غالب نیستند. همچنین، برای بازه‌های زمانی ۴۰۰ تا ۴۸۰ دقیقه، نمودار هزینه واحد هوا به شدت صعودی می‌باشد که این نشان می‌دهد که در این بازه زمانی علی‌رغم افزایش هزینه سرمایه‌گذاری کل، دمای هوای داخل گلخانه و متعاقباً انرژی آن در حال کاهش می‌باشد.

بر اساس شرایط اقتصادی، به کار بردن نرخ بهره‌های متفاوت ۱۰٪ تا ۲۰٪ می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌ای در هزینه هوای داخل گلخانه ایجاد نماید. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بهره از ۱۰٪ به ۲۰٪، هزینه واحد هوای داخل گلخانه در دقیقه انتهایی آزمایش از ۶۴ MJ/\$ تا ۱۱۲ MJ/\$ افزایش می‌یابد. بنابراین نرخ بهره می‌تواند اثر مهمی بر روی قیمت تمام شده محصولات کشاورزی داشته باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش، عملکرد یک مدل‌سازی دینامیکی ابتکاری از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی را مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی انجام شده قادر است دمای هوای داخل گلخانه، گیاه، خاک و پوشش داخلی گلخانه را پیش‌بینی کند. همه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ترمودینامیکی با مقادیر اندازه‌گیری شده از گلخانه نیمه‌خورشیدی ساخته شده در شهر تبریز مورد مقایسه قرار گرفت. داده‌برداری‌ها در تاریخ ۹۶/۹/۹ از ساعت ۹:۰۰ تا ۱۷:۰۰ انجام گردید و کلم به عنوان نمونه کاشت شده مورد استفاده قرار گرفت. و یافته‌های زیر بدست آمد:

اختلاف دمای قابل ملاحظه $19/5^{\circ}C$ بین هوای داخل گلخانه و هوای بیرون گلخانه نیمه‌خورشیدی نشان داد که ساختار انتخاب شده برای گلخانه، در جذب انرژی خورشید در روزهای سرد پاییز بسیار کارا بوده است.

IS آنتالپی انتقالی با تابش امواج کوتاه (J)
 \dot{C} نرخ هزینه (S/\$)
 I_{p-g} حرارت جذب شده توسط گیاه (W/m^2)
 C هزینه واحد هوا ((\$/J))
 M_{air} جرم مولی هوای خشک (kg/mol)
 CD آنتالپی انتقالی با انتقال حرارت هدایتی (J)
 M_{air} جرم مولی بخار آب (kg/mol)
 CRF فاکتور بازبایی سرمایه (-)
 n جریان جرمی گونه‌ها (mol)
 CV آنتالپی انتقالی با انتقال حرارت جابجایی (J)
 op_{vhr} ضریب تهویه بازبایی حرارتی (-)
 $C_{H_2O,a}$ غلظت بخار آب در دمای گلخانه (kg H₂O/s)
 P فشار (Pa)
 $C_{H_2O,o}$ غلظت بخار آب در دمای بیرون ((kg H₂O/s))
 $P_{H_2O,s,p}$ فشار بخار اشباع (N/m^2)
 $C_{H_2O,s,p}$ غلظت اشباع بخار آب در دمای گیاه ((kg H₂O/s))
 $P_{H_2O,a}$ فشار بخار هوای داخل گلخانه (N/m^2)
 $C_{H_2O,s,coi}$ غلظت اشباع بخار آب دمای پوشش داخلی گلخانه (kg H₂O/s)
 P_i فشار جزئی (-)
 d ضخامت (m)
 Q انتقال حرارت (J)
 E ضریب صدور (-)
 R مقاومت (S/m)
 $EX_{a,dif}$ انرژی دیفیوژنال هوای داخل گلخانه (J)
 R_a ثابت گازها برای هوای خشک (J/K.mol)
 $EX_{a,th}$ انرژی اگزرژی حرارتی هوای داخل گلخانه (J)
 R_v ثابت گازها برای بخار آب (J/K.mol)
 EX_d انرژی اگزرژی (J)
 r_w حرارت تبخیر آب (J/K.mol)
 F فاکتور دید (-)
 T دما (K)
 f فاکتور وابستگی برای محاسبه R_{s-H_2O} (-)
 t زمان (s)
 f_a فاکتور نشی (-)

یکنواختی دمای هوای داخل گلخانه، شرایط مناسبی را برای پرورش گیاه فراهم کرد.

مقایسه مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، هماهنگی خوبی بین آن‌ها نشان داد به طوری که متوسط مقدار محاسبه شده برای توابع آماری درصد میانگین خطای مطلق و ریشه متوسط مربعات خطا به ترتیب برابر ۶/۸٪ و ۲/۱C° بود.

مشاهده گردید که نابودی اگزرژی ناشی از انتقال حرارت جابجایی و تابش امواج بلند در بین سایر فرآیندها، دارای بیشترین مقدار نابودی اگزرژی می‌باشد.

استفاده از شیشه دو جداره با فاصله هوایی به عنوان پوشش گلخانه، میزان انتقال حرارت از داخل گلخانه به خارج از آن و همچنین نابودی اگزرژی را کاهش داد. با این تکنیک، نابودی اگزرژی کل در گلخانه نیمه‌خورشیدی مورد مطالعه به اندازه ۴۵/۳۶٪ کاهش یافت.

نابودی اگزرژی ناشی از تقطیر و تبخیر و تعرق گیاه بسیار اندک و قابل صرف نظر بود.

ارزیابی اقتصادی گلخانه نشان داد که هزینه واحد هوای داخل گلخانه با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

فراهم کردن شرایط دمایی مناسب برای هوای داخل گلخانه جهت پرورش گیاه، به عنوان هدف ارزیابی اقتصادی این پژوهش قرار گرفت. در این راستا، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای ساختن گلخانه و تجهیزات نصب شده، بیشترین سهم را در هزینه واحد هوای گلخانه داشت. چرا که در این پژوهش، هیچ‌گونه سیستم گرمایش غیرخورشیدی به کار گرفته نشد.

نگاه دقیق‌تر به نمودار هزینه واحد هوای گلخانه نشان داد که با افزایش ۵۰٪ در نرخ بهره از ۱۰٪ تا ۱۵٪، افزایش ۳۶٪ در هزینه واحد هوای گلخانه حاصل می‌شود.

علائم انگلیسی

A مساحت، m^2
 i نرخ بهره (-)
 AIR آنتالپی منتقل شده با هوای خشک، J
 IL آنتالپی انتقالی با تابش امواج بلند (J)
 C هزینه، \$

حرارت	q	حجم (m^3)	V
دیفیوژنال	dif	H_2O آنتالپی انتقالی با بخار آب (J)	
تابش	rd	Z_k سرمایه‌گذاری اولیه (\$)	
محیط	e	I تابش خورشیدی (W/m^2)	
پرده حرارتی	sc	\dot{Z}_k نرخ سرمایه‌گذاری اولیه (S/\$)	
خاک داخل گلخانه	g		
آسمان	sk		
H_2O آب			
گرمایی	th	α ضریب انتقال حرارت جابجایی ($K.W/m^2$)	
ورودی	in	Δ_{pp-H_2O} کسر اشباع بخار آب در دمای گیاه (mbar)	
خروجی	out	ρ چگالی، kg/m^3	
leak نشتی		η_{vhr} بازدهی بازیابی تهویه (-)	
vhr بازیابی حرارت تهویه		λ ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.K$)	
جرم	m	ϕ_r فاکتور تعمیرات (-)	
کار	w	η_{rd} ضریب جذب تابش امواج کوتاه (-)	
		v سرعت باد (m/s)	
		ϕ دبی جریان حجمی (s/m^2)	
		β_{g-ls} ضریب انعکاس امواج کوتاه زمین (-)	
		ϕ_m نرخ جریان جرمی (kg/s)	
		ω رطوبت مطلق (کیلوگرم بخار/کیلوگرم هوا)	
		v سرعت باد (m/s)	
		β_{g-ls} ضریب انعکاس امواج کوتاه زمین (-)	

علائم یونانی

منابع و مراجع

- [1] M. Kıyan, E. Bingöl, M. Melikoğlu, A. Albostan, Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink, Energy Conversion and Management, 72 (2013) 147-155.
- [2] E. Kondili, J. Kaldellis, Optimal design of geothermal-solar greenhouses for the minimisation of fossil fuel consumption, Applied Thermal Engineering, 26(8-9) (2006) 905-915.
- [3] B.M. Ziapour, A. Hashtroudi, Performance study of an enhanced solar greenhouse combined with the phase change material using genetic algorithm optimization method, Applied Thermal Engineering, 110 (2017) 253-264.
- [4] J. Zhang, J. Wang, S. Guo, B. Wei, X. He, J. Sun, S. Shu, Study on heat transfer characteristics of straw block wall in solar greenhouse, Energy and Buildings, 139 (2017) 91-100.
- [5] K.A. Joudi, A.A. Farhan, Greenhouse heating by solar air heaters on the roof, Renewable energy, 72 (2014) 406-414.
- [6] A. Vadiee, V. Martin, Energy analysis and

زیرنویس

هوای داخل	a
دیواره شمالی	nw
هوا	air
دیواره شمالی داخلی	nwi
پوشش داخلی	coi
دیواره شمالی خارجی	nwo
پوشش خارجی	coo
هوای بیرون	o
نابودی آگرژی	De
گیاه	p
عمق زمین	dg

- [18] J. Stoffers, Tuinbouwtechnische aspecten van de druppelprofieling bij kasverwarmings-buis, Intern rapport IMAG_DLO, Wageningen, (1989).
- [19] R. Van Ooteghem, Optimal control design for a solar greenhouse, systems and control, Wageningen: Wageningen University, (2007).
- [20] G. Van Straten, G. van Willigenburg, E. van Henten, R. van Ooteghem, Optimal control of greenhouse cultivation, CRC press, 2010.
- [21] C. Von Zabeltitz, Heating, in: Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates, Springer, 2011, pp. 285-311.
- [22] M. Glover, G. Reichert, Convective gas-flow inhibitors, in, Google Patents, 1994.
- [23] T.C. Jester, Twentieth-century building materials: History and conservation, Getty Publications, 2014.
- [24] K.A. Joudi, A.A. Farhan, A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse, Energy Conversion and Management, 91 (2015) 76-82.
- [25] C. Stanghellini, Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management, IMAG, 1987.
- [26] G.P. Bot, Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model, Landbouwhogeschool te Wageningen, 1983.
- [27] T. De Jong, Natural ventilation of large multi-span greenhouses, De Jong, 1990.
- [28] M.J. Moran, H.N. Shapiro, D.D. Boettner, M.B. Bailey, Fundamentals of engineering thermodynamics, John Wiley & Sons, 2010.
- [29] F. Bronchart, M. De Paepe, J. Dewulf, E. Schrevels, P. Demeyer, Thermodynamics of greenhouse systems for the northern latitudes: Analysis, evaluation and prospects for primary energy saving, Journal of environmental management, 119 (2013) 121-133.
- [30] D.E.R. Kenneth Wark, Thermodynamics McGraw-Hill series in mechanical engineering, ISBN-13: 978-0071168533 (1999) 954
- [31] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, M.J. Moran, Thermal design and optimization, John Wiley & Sons, 1996.
- [32] V. Sethi, S. Sharma, Experimental and economic thermoeconomic assessment of the closed greenhouse—The largest commercial solar building, Applied Energy, 102 (2013) 1256-1266.
- [7] C. Chen, H. Ling, Z.J. Zhai, Y. Li, F. Yang, F. Han, S. Wei, Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses, Applied energy, 216 (2018) 602-612.
- [8] H.H. Öztürk, Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating, Energy Conversion and Management, 46(9-10) (2005) 1523-1542.
- [9] A. Hepbasli, A comparative investigation of various greenhouse heating options using exergy analysis method, Applied Energy, 88(12) (2011) 4411-4423.
- [10] H. Yildizhan, M. Taki, Assessment of tomato production process by cumulative exergy consumption approach in greenhouse and open field conditions: Case study of Turkey, Energy, 156 (2018) 401-408.
- [11] H.G. Mobtaker, Y. Ajabshirchi, S.F. Ranjbar, M. Matloobi, Solar energy conservation in greenhouse: Thermal analysis and experimental validation, Renewable Energy, 96 (2016) 509-519.
- [12] H.G. Mobtaker, et al., Investigation of north wall impact on energy consumption of east-west greenhouse, Agricultural machinery, 7(48) (2017) 350-363. In Persian.
- [13] M.J. Gupta, P. Chandra, Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control, Energy, 27(8) (2002) 777-794.
- [14] S. Zarifneshat, A. Rohani, H.R. Ghassemzadeh, M. Sadeghi, E. Ahmadi, M. Zarifneshat, Predictions of apple bruise volume using artificial neural network, Computers and electronics in agriculture, 82 (2012) 75-86.
- [15] S.A. Bell, A beginner's guide to uncertainty of measurement, (2001).
- [16] H. De Zwart, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, De Zwart, 1996.
- [17] A. Defant, F. Defant, Physikalische Dynamik der Atmosphäre, Akad. Verl.-Ges., 1958.

- [36] E. Mashonjowa, F. Ronsse, J.R. Milford, J. Pieters, Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model, *Solar Energy*, 91 (2013) 381-393.
- [37] P. Sharma, G. Tiwari, V. Sorayan, Temperature distribution in different zones of the micro-climate of a greenhouse: a dynamic model, *Energy conversion and management*, 40(3) (1999) 335-348.
- [38] J. Du, P. Bansal, B. Huang, Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system, *Applied energy*, 93 (2012) 268-276.
- study of a greenhouse thermal control system using aquifer water, *Energy Conversion and Management*, 48(1) (2007) 306-319.
- [33] D.P. Lambe, S.A. Adams, E.T. Paparozzi, Estimating construction costs for a low-cost Quonset-style greenhouse, (2012).
- [34] E. Indicators, Marshall&Swift equipment cost index, *Chemical engineering*, 68 (2011).
- [35] P. Ahmadi, I. Dincer, Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant, *Applied Thermal Engineering*, 31(14-15) (2011) 2529-2540.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

B. Mohammadi, F. Ranjbar, Y. Ajabshirchi, L. Garousi Farshi, S. Baheri Eslami, *TEnergy, Exergy and Economic Analysis of a Semi-solar Greenhouse with Experimental Validation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1677-1694.

DOI: [10.22060/mej.2020.17093.6518](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17093.6518)

