

مدل سازی گلخانه خورشیدی انرژی خالص صفر به کمک اپن مدلیکا با هدف پرورش گیاه دارویی فیسالیس

سید نرگس صالح نژاد^{۱*}، سید رضا شمشیرگران^۲

۱- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، تهران، ایران: na.salehnejad@gmail.com

۲- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، تهران، ایران: r_shamshirgaran@sbu.ac.ir

خلاصه

با توجه به افزایش مصرف انرژی در بخش کشاورزی و پیامدهای زیست محیطی استفاده از سوخت های فسیلی، توسعه گلخانه های پایدار با حداقل وابستگی به انرژی های تجدیدناپذیر اهمیت ویژه ای یافته است. هدف این پژوهش، طراحی و ارزیابی یک گلخانه با انرژی خالص صفر مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در شرایط اقلیمی استان مازندران (شهر ساری) به منظور تولید گیاهان دارویی است. در این پژوهش، ابتدا نیازهای انرژی گلخانه شامل گرمایش، تهویه، روشنایی و آبیاری تعیین شد. سپس یک سامانه یکپارچه شامل سیستم فتوولتائیک خورشیدی، ذخیره سازی انرژی الکتریکی، گرمایش خورشیدی، تهویه طبیعی و مکانیکی و مدیریت بهینه آب باران طراحی و عملکرد آن با استفاده از نرم افزار اپن مدلیکا شبیه سازی شد. به منظور ارزیابی کارایی گلخانه، گیاه دارویی فیسالیس به عنوان نمونه ی مورد مطالعه انتخاب و شاخص های رشد گیاه بر اساس سطح برگ و شرایط دمایی-رطوبتی تحلیل گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که با طراحی مناسب سیستم فتوولتائیک و ذخیره سازی انرژی، تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه در اکثر فصول سال امکان پذیر بوده و تراز انرژی سالانه به حالت نزدیک به صفر می رسد و فیسالیس به دلیل بازده تولید بالا، امکان پذیر است.

کلمات کلیدی: گلخانه، خورشیدی، انرژی خالص صفر، تجدیدپذیر، اپن مدلیکا، دارویی

۱. مقدمه

کشاورزی سنتی به عنوان یکی از ارکان اصلی تأمین غذا، در دهه های اخیر با چالش های متعددی از جمله افزایش جمعیت، محدودیت منابع طبیعی، تغییرات اقلیمی و فشار روزافزون بر منابع آب و انرژی مواجه شده است. در این میان، کشاورزی گلخانه ای به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای کنترل این فشارها مطرح شده است. کشت گلخانه ای با ایجاد شرایط محیطی کنترل شده، ضمن افزایش تولید در واحد سطح، موجب بهینه سازی مصرف آب، کاهش مصرف سموم و آفات، و افزایش بهره وری منابع می شود و در نتیجه نقش مهمی در توسعه پایدار بخش کشاورزی ایفا می کند [۱]. با این حال، گلخانه ها از نظر مصرف انرژی، سرمایه گذاری اولیه و هزینه های بهره برداری، از پیچیده ترین و پرهزینه ترین زیرسیستم های کشاورزی به شمار می روند [۲].

کنترل شرایط محیطی گلخانه شامل دما، رطوبت نسبی، شدت و کیفیت نور، غلظت دی اکسید کربن و تهویه مناسب است که برای دستیابی به رشد بهینه گیاه ضروری می باشد. تأمین این شرایط، به ویژه در مناطق با اقلیم سرد یا گرم، نیازمند

مصرف قابل توجهی از انرژی برای سیستم‌های گرمایش، سرمایش، تهویه، روشنایی مصنوعی و تزریق دی‌اکسیدکربن است [۲]. مطالعات نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از انرژی مصرفی گلخانه‌ها، به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی اختصاص دارد و این موضوع سبب افزایش هزینه‌های تولید و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی می‌شود. برآوردها حاکی از آن است که حدود ۶۵ تا ۸۵ درصد انرژی مصرفی گلخانه‌ها و نزدیک به ۷۸ درصد هزینه‌های تولید محصول، مستقیماً به مصرف انرژی مربوط می‌شود [۳].

از سوی دیگر، انرژی یکی از مؤلفه‌های حیاتی در کل زنجیره غذایی، از تولید تا فرآوری و توزیع محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. بر اساس گزارش گروه مشورتی تحقیقات بین‌المللی کشاورزی (CGIAR)، حدود ۳۰ درصد انرژی مصرفی جهان در زنجیره غذایی مصرف می‌شود و سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای (حدود ۱۹ تا ۲۹ درصد) به این بخش اختصاص دارد که عمدتاً ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی است [۴]. پیامدهای زیست‌محیطی این روند، از جمله تخریب محیط‌زیست، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید تغییرات اقلیمی، ضرورت جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر با سوخت‌های فسیلی را بیش از پیش آشکار ساخته است.

در این راستا، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، زیست‌توده، باد و انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان گزینه‌ای پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای تأمین انرژی گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی گسترده، پتانسیل بالا و قابلیت استفاده هم‌زمان برای تولید برق و حرارت، یکی از مناسب‌ترین منابع تجدیدپذیر برای کاربردهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود. همچنین زیست‌توده و فرآورده‌های آن نظیر بیوگاز و سوخت‌های زیستی می‌توانند به‌عنوان منابع مکمل در تأمین انرژی گرمایشی گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرند [۵]. به‌کارگیری سیستم‌های فتوولتایک، کلکتورهای خورشیدی حرارتی و سامانه‌های ذخیره انرژی، امکان کاهش چشمگیر مصرف سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های بهره‌برداری را فراهم می‌سازد [۶].

در سال‌های اخیر، مفهوم گلخانه با انرژی خالص صفر* به‌عنوان رویکردی نوین در طراحی پایدار گلخانه‌ها مطرح شده است. در این نوع گلخانه‌ها، میزان انرژی مصرفی سالانه از طریق تولید انرژی تجدیدپذیر در محل جبران شده و تراز انرژی به صفر می‌رسد [۷، ۸]. این رویکرد با بهره‌گیری از طراحی بهینه سازه، عایق‌کاری مناسب، استفاده از پوشش‌های با کارایی بالا، سیستم‌های هوشمند کنترل اقلیم و به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، ضمن کاهش مصرف انرژی، پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم را تضمین می‌کند.

از سوی دیگر، گیاهان دارویی به‌عنوان یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی، نقش مهمی در تأمین سلامت جامعه و صنایع داروسازی، غذایی و بهداشتی ایفا می‌کنند. بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، حدود ۸۰ درصد جمعیت جهان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از داروهای گیاهی استفاده می‌کنند [۹] با این وجود، تغییرات اقلیمی، تخریب زیست‌گاه‌های طبیعی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، دسترسی به گیاهان دارویی با کیفیت مطلوب در طبیعت را با محدودیت مواجه کرده است [۱۰ و ۱۱]. از این‌رو، تولید کنترل‌شده گیاهان دارویی در گلخانه‌ها به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش کیفیت، کمیت و یکنواختی مواد مؤثره، اهمیت فزاینده‌ای یافته است.

با توجه به افزایش نیاز جهانی به دارو، رشد جمعیت و همچنین محدودیت‌های اقتصادی و وارداتی در تأمین مواد اولیه دارویی در کشور، توسعه گلخانه‌های پایدار و کم‌مصرف انرژی برای تولید گیاهان دارویی امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، یک گلخانه با انرژی خالص صفر با هدف تولید گیاه دارویی فیسالیس در شرایط اقلیمی منطقه جنوب شهرستان ساری در استان مازندران طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این سامانه، تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه از طریق منابع تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی و زیست‌توده مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد انرژی سیستم، شرایط رشد این گیاه دارویی و امکان تحقق تراز انرژی صفر ارزیابی شده است.

* Net Zero-Energy (NZE) Greenhouse

نوآوری این پژوهش، ارائه یک مدل جامع و یکپارچه گلخانه با انرژی خالص صفر در نرم‌افزار متن‌باز اپن‌مدلیکا شامل مدیریت هم‌زمان انرژی، آب و شرایط اقلیمی داخلی و کاربرد آن در کشت گیاه دارویی فیسالیس* در اقلیم شمال ایران است که می‌تواند به‌عنوان الگویی عملی برای توسعه کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. گلخانه خورشیدی

گلخانه خورشیدی یک سازه کشاورزی است که از مواد شفاف (معمولاً شیشه) ساخته شده و برای افزایش حجم تولید و کیفیت محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. این گلخانه‌ها با استفاده از نور خورشید محیطی را ایجاد می‌کنند که نیاز گیاهان را برآورده کند و شرایط مساعدی را برای رشد و نمو آنها ایجاد کند. در این نوع گلخانه‌ها از پنل‌های خورشیدی برای تامین برق تجهیزات گرمایشی، سیستم‌های آبیاری و تهویه مطبوع نیز استفاده می‌شود تا شرایط محیطی بهتری برای گیاهان فراهم شود. گلخانه خورشیدی پیوسته یا الصاقی مانند اتاقی است که از یک خانه یا انبار بیرون آمده است. این گلخانه‌های خورشیدی فضای مناسبی را برای نشاء کردن، کاشت گیاهان علفی یا کاشت مقادیر محدودی از گیاهان خوراکی فراهم می‌کنند. گلخانه‌های خورشیدی معمولاً دارای سیستم خورشیدی غیرفعال هستند. اما گلخانه خورشیدی غیرپیوسته یک گلخانه بزرگ با فضای کافی برای تولید تجاری گیاهان، سبزیجات یا گیاهان دارویی است. دو طرح اصلی یعنی مدل آلونکی و مدل قوسی شکل برای گلخانه‌های خورشیدی غیرپیوسته وجود دارد [۱۲]. جهت‌گیری گلخانه‌های آلونکی به گونه‌ای است که محور طولی آنها در امتداد شرق به غرب است. دیوار روبه‌جنوب باید با مواد شفاف پوشانده شود تا انرژی خورشیدی را بهینه دریافت کند، درحالی‌که دیوار روبه‌شمال برای جلوگیری از اتلاف دما باید دارای عایق‌بندی مناسب باشد [۱۳]. این جهت‌گیری در تضاد با چیدمان گلخانه‌های معمولی است که دارای سقف شمالی-جنوبی هستند و این باعث می‌شود در طول روز نور یکسانی به تمام قسمت‌های گیاهان بتابد. به منظور کاهش تاثیر پرتوهای نور غیریکنواخت در گلخانه شرقی-غربی، دیوار شمالی باید با مواد بازتابنده پوشانده یا رنگ‌آمیزی شود.

۲.۲. ویژگی‌ها و اجزای گلخانه خورشیدی انرژی خالص صفر

طراحی گلخانه با رویکرد انرژی خالص صفر (NZE) به‌گونه‌ای انجام شده است که مجموع انرژی تولیدی سالانه از منابع تجدیدپذیر، برابر یا بیشتر از میزان انرژی مصرفی گلخانه باشد. در این راستا، تمامی اجزای سازه‌ای و تأسیساتی گلخانه با هدف کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و حداقل‌سازی اتلاف حرارتی طراحی شده‌اند. ساختار گلخانه شامل اسکلت سبک، پوشش با قابلیت عبور مناسب نور و عایق‌کاری حرارتی مؤثر است. جهت‌گیری گلخانه به‌منظور بهره‌برداری حداکثری از تابش خورشیدی انتخاب شده و طراحی سازه به‌گونه‌ای است که امکان تهویه طبیعی و کاهش بار سرمایشی در فصول گرم فراهم شود. علاوه بر این، محل احداث گلخانه با در نظر گرفتن شرایط باد، دسترسی به زیرساخت‌ها و حداقل سایه‌اندازی انتخاب شده است. اهداف اصلی طراحی شامل کاهش مصرف انرژی فسیلی، تأمین پایدار انرژی از منابع تجدیدپذیر، ایجاد شرایط بهینه رشد گیاهان دارویی و کاهش اثرات زیست‌محیطی گلخانه بوده است. در این چارچوب، سیستم‌های کنترل دما، رطوبت، تهویه و روشنایی به‌صورت یکپارچه و هوشمند در نظر گرفته شده‌اند.

* *Physalis peruviana* L.

۱.۲.۲ سیستم تأمین انرژی تجدیدپذیر

سیستم فتوولتائیک به‌عنوان منبع اصلی تأمین انرژی الکتریکی گلخانه انتخاب شده و این سیستم وظیفه تأمین برق مورد نیاز تجهیزات مختلف گلخانه از جمله سیستم‌های تهویه، سرمایش، گرمایش کمکی، روشنایی و سامانه‌های کنترلی را بر عهده دارد. استفاده از انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی گسترده، سازگاری با محیط‌زیست و پتانسیل مناسب منطقه، نقش کلیدی در دستیابی به تراز انرژی صفر ایفا می‌کند. جانمایی پنل‌های خورشیدی با هدف دریافت حداکثر تابش خورشیدی در طول سال انجام شده است. پنل‌ها در محل‌هایی نصب شده‌اند که کمترین میزان سایه‌اندازی را داشته و زاویه نصب آن‌ها متناسب با عرض جغرافیایی منطقه تنظیم شده است. همچنین، فاصله و آرایش پنل‌ها به گونه‌ای طراحی شده که از افت راندمان ناشی از سایه‌زنی متقابل جلوگیری شود. مشخصات فنی پنل انتخابی برای این مجموعه تعداد ۸ پنل مطابق بازار موجود در کشور است. این مشخصات شامل توان نامی ۶۵۰ وات، راندمان تبدیل ۲۱ درصد، ولتاژ کاری ۳۹ ولت، جریان کاری ۱۷ آمپر و عمر مفید ۲۵ سال، به‌عنوان پارامترهای ورودی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم انرژی لحاظ شده‌اند. انتخاب پنل‌ها بر اساس تطابق با نیاز انرژی گلخانه و قابلیت عملکرد پایدار در شرایط رطوبت بالا انجام شده است.

۲.۲.۲ سیستم مدیریت آب

با توجه به میزان مناسب بارندگی در منطقه مورد مطالعه، سیستم جمع‌آوری آب باران به‌عنوان یکی از اجزای اصلی مدیریت پایدار منابع آب در گلخانه طراحی شده است. آب باران جمع‌آوری شده از سطح گلخانه پس از ذخیره‌سازی، برای مصارف آبیاری و سیستم سرمایش تبخیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور کاهش دمای داخلی گلخانه در فصول گرم، از سیستم سرمایش تبخیری استفاده شده است. این سیستم با مصرف حداقل انرژی الکتریکی و بهره‌گیری از آب ذخیره‌شده، نقش مؤثری در کنترل دما و ایجاد شرایط مناسب رشد گیاهان ایفا می‌کند. طراحی سیستم به گونه‌ای انجام شده که با شرایط رطوبتی منطقه سازگار باشد. سیستم آبیاری گلخانه بر اساس نیاز آبی گیاهان دارویی طراحی شده و از روش‌های بهینه مصرف آب استفاده می‌کند. هدف اصلی این سیستم، کاهش تلفات آب، افزایش یکنواختی توزیع رطوبت در بستر کشت و بهبود بهره‌وری مصرف آب است.

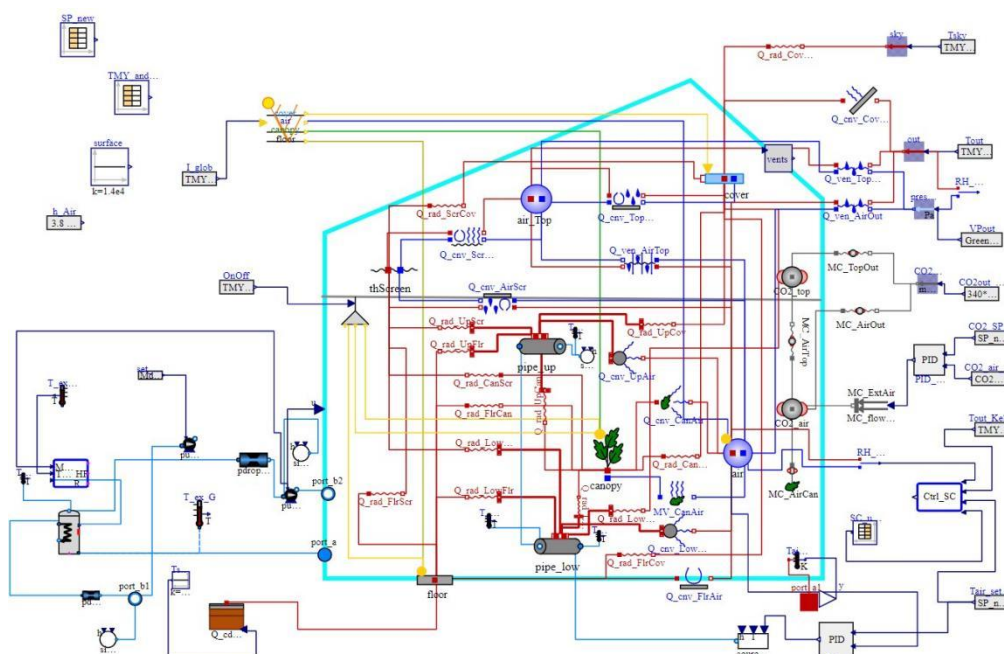
۳.۲.۲ گیاه مورد مطالعه

در این پژوهش، گیاه دارویی و اقتصادی فیسالیس به‌منظور ارزیابی عملکرد گلخانه با انرژی خالص صفر انتخاب شد. انتخاب این گیاه به دلیل ارزش اقتصادی بالا، قابلیت کشت گلخانه‌ای و تفاوت در نیازهای اقلیمی آن‌ها صورت گرفته است. فیسالیس از خانواده Solanaceae بوده، به شرایط دمایی و رطوبت نسبی بالا نیاز دارد و از این‌رو، گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی توان سیستم گلخانه در تأمین شرایط پایدار اقلیمی محسوب می‌شود. شرایط بهینه رشد برای فیسالیس، دامنه دمایی مناسب ۱۸ °C تا ۲۸ °C و رطوبت نسبی ۶۰ تا ۸۰ درصد لحاظ گردیده است. این مقادیر به‌عنوان ورودی در طراحی سیستم‌های کنترل اقلیم و مدل‌سازی انرژی گلخانه استفاده شده‌اند.

۳. مدل‌سازی گلخانه خورشیدی با نرم‌افزار اپن‌مدلیکا

نرم‌افزار اپن‌مدلیکا به دلیل متن‌باز بودن یکی از نرم‌افزارهای محبوب در مدل‌سازی و شبیه‌سازی شرایط پایا و گذرا برای سامانه‌های انرژی است که استفاده از آن در سال‌های اخیر رو به گسترش است. جامعیت این نرم‌افزار در استفاده از کتابخانه‌های متعدد و همزمان، همراه با قابلیت شی‌گرای آن در مدل‌سازی توانمندی این نرم‌افزار را در شبیه‌سازی رفتار

سامانه‌های انرژی بالا برده است. به همین دلیل برای شبیه‌سازی گلخانه خورشیدی از این نرم‌افزار استفاده شده است. تصویر مدل ایجاد شده در نرم‌افزار این مدلیکا در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- تصویر مدل گلخانه خورشیدی انرژی خالص صفر در نرم‌افزار این مدلیکا

بخش‌های اصلی طراحی گلخانه شامل موارد زیر هستند:

- ۱- طراحی خورشید
- ۲- طراحی پوشاننده گلخانه و اسکلت آن
- ۳- سیر حرارتی
- ۴- مشخصات هوا و غلظت دی‌اکسید کربن
- ۵- مشخصات گیاه
- ۶- ونت یا دریچه تهویه
- ۷- سیستم حرارتی
- ۸- قسمت خاک

در مدل‌سازی به دلیل شرایط محیطی تصمیم بر آن شد تا از گلخانه نیمه‌دوطرفه استفاده شود. این گلخانه دارای یک سقف شیب‌دار روبه جنوب با زاویه شیب بین ۴۵ تا ۵۵ درجه است. همچنین دیوار جنوبی از دیوار شمالی بلندتر است. معمولاً دیوار جنوبی را با مواد شفاف و دیوار شمالی را با مصالح ساختمانی می‌سازند. ارتفاع تاج این گلخانه بین ۲ تا ۳ متر است. دوسوم عرض گلخانه را سقف جنوبی و یک‌سوم را سقف شمالی پوشش می‌دهد. گلخانه طراحی شده، در بخش مسطح قسمت جنوبی زمینی به مساحت ۵۰ مترمربع در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که گلخانه نیمه‌دوطرفه به دلیل روبه جنوب بودن زمین و استفاده حداکثری از نور خورشید برای گلخانه و تأسیسات خورشیدی انتخاب شد.

ابعاد این گلخانه ۴ متر در ۱۰ متر در نظر گرفته شده و از آنجایی که اسکلت گلخانه به دلیل مرطوب بودن آب و هوای منطقه و لزوم استحکام بیشتر، از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شد ضریب جذب انرژی خورشیدی برای اسکلت همان

مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار انتخاب شده است. ضریب بازتاب تشعشعات مرئی برای بستر کشت بر اساس خاک انتخاب شده و مواد تشکیل‌دهنده آن مقدار ۰.۰۹ در نظر گرفته شده است. ضریب عبور و بازتاب نور مرئی برای بخش کاور گلخانه بر اساس همان نوری انتخاب شده که برای فتوسنتز (PAR)* مورد نیاز است و این نور ۴۵ تا ۶۰ درصد تابش خورشیدی را تشکیل می‌دهد (۱۴).

در گلخانه یک‌طرفه زاویه سقف به سمت جنوب ۸/۳۰ درجه بر اساس زاویه استاندارد در نظر گرفته شد. این عدد با استفاده از قواعد مثلثاتی و در نظر گرفتن زاویه ۵۰ درجه در سمت جنوب به دست آمد. زاویه شیب سقف نسبت به افق برای به دست آوردن مساحت کاور در بخش سقف استفاده می‌شود.

فیسالیس یا عروسک پشت‌پرده[†] گیاهی است که به راحتی در اکثر شرایط آب و هوایی سازگار می‌شود و می‌تواند سال‌ها در همان مکان تولید شود. در کلمبیا گیاهان دارویی بیش از ۲۰ سال تحت خاک‌ورزی حفاظت‌شده کشت می‌شوند. کلمبیا بزرگترین تولیدکننده فیسالیس است. این گیاه ۱ تا ۱/۵ متر ارتفاع دارد و اگر هرس شود این ارتفاع به ۲ متر هم می‌رسد. این گیاه متعلق به خانواده بادمجانیان است و به دلیل ارزش اقتصادی در سطح وسیعی کشت می‌شود. برای شبیه‌سازی گیاه، از مشخصات فیزیکی گیاه شامل شاخص سطح برگ[‡] (LAI) استفاده شده که در فیسالیس این عدد برابر ۵/۴ و بیشترین میزان آن بعد از گذشت ۷۵ روز از روز کاشت، ۵/۱۱ خواهد بود [۱۴]. همچنین برای ضریب گرمای ویژه عدد ۱۲۰۰ ژول بر کلون در هر مترمربع از مساحت برگ گیاه در نظر گرفته شد.

در این مدلیکا یک مدل پیش‌فرض برای بررسی عملکرد تولید یک محصول غیردارویی و محاسبه اثرات آب و هوای داخلی بر رشد این محصول و در نتیجه بر ماده خشک برداشت‌شده وجود دارد. اگرچه رشد محصول مربوط به فتوسنتز است، اکثر مدل‌های گیاهی موجود مستقیماً این دو را با عدم وجود بافر کربوهیدرات مرتبط می‌کنند. در نمودار شکل ۲ الگوریتم تولید محصول در این مدلیکا مشاهده می‌شود.

در مرحله بعدی توازن رطوبت و حرارت میان اجزایی که با هوا در ارتباط هستند برقرار می‌شود. در ابتدا باید ارتباط میان هوا و گیاه برقرار شود که برای این کار از دو المان رطوبت و حرارت گیاه استفاده می‌شود. دمای مطلوب برای رشد گیاه فیسالیس حدود ۲۰ °C است و این دما برای زمان جوانه‌زنی و میوه‌دهی گیاه نیز مناسب است [۱۵]. در نتیجه این دما به عنوان دمای گیاه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس داده‌های هواشناسی تابش متوسط خورشید در منطقه مورد مطالعه به دست آمد و با در نظر گرفتن ضریب جذب و بازتاب، میزان تابش ۹۵۰ وات بر مترمربع به مدل داده شد. همچنین برای غلظت دی‌اکسید کربن از مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد.

خاک مورد نیاز برای کشت فیسالیس باید خاک رسی-شنی با زه‌کشی مناسب و دارای بافت دانه‌دار و pH بین ۵/۵ تا ۶/۸ و سرشار از مواد آلی برای تغذیه گیاه باشد. این خاک نباید قبلاً برای کاشت گیاهان گونه بادمجانیان، سیب‌زمینیان یا سولاناسه[§] (مانند گوجه‌فرنگی، فلفل دلمه‌ای و سیب‌زمینی) استفاده شده باشد و یا از خاک نوع غرقابی باشد [۱۶].
با در نظر گرفتن موارد بالا، معادله انتقال حرارت از پوشش‌های جانبی، سقف و کف زمین به شرح زیر است:

$$q_s = C_s \times (q_1 + q_2 + q_3 + \dots) = C_s \sum_{i=0}^n q_i \quad (1)$$

$$\rho \times c_p \times V \times \frac{dT}{dt} = \sum \dot{Q}_L + \sum \dot{Q} + P_{sun} + P_{light} \quad (2)$$

در این معادله‌ها P_{sun} تابش موج کوتاه از خورشید، P_{light} روشنایی مصنوعی، $\dot{Q}$ و $\dot{Q}_L$ جریان گرمای محسوس هدایت از

* Photosynthetically Active Radiation

† Physalis peruviana or ground cherry

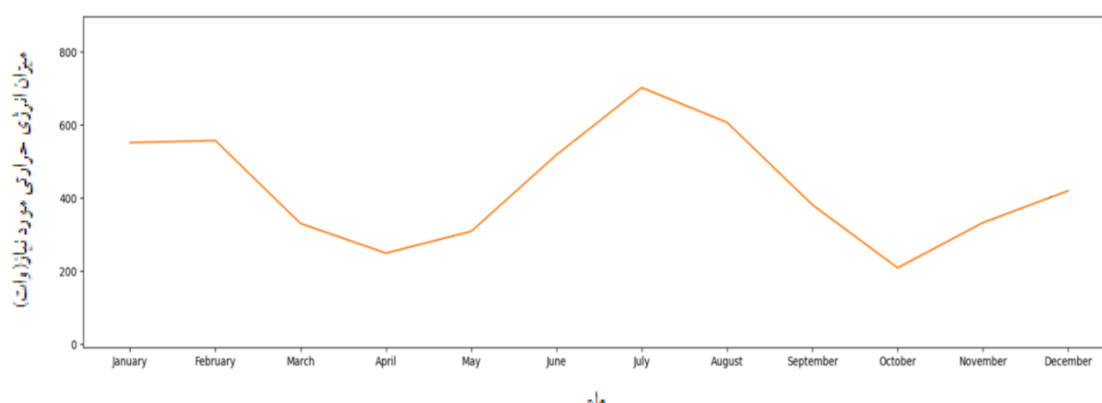
‡ Leaf area index

§ Solanaceae

طریق خاک و جریان گرمای پنهان و C_p ضریب گرمای ویژه و ρ چگالی است. C_S ضریب اصلاح تأثیر اسکلت سازه بر روی پوشش است که از جدول مخصوص به دست می‌آید و q_i مقدار جریان انتقال حرارت از هر سطح است.

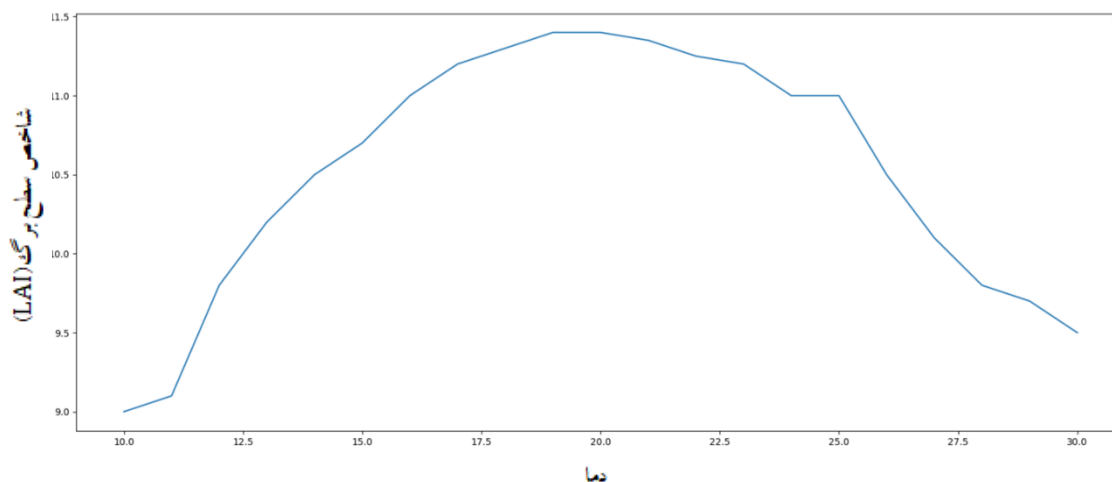
۴. نتایج و بحث

احداث گلخانه با انرژی خالص صفر در شرایط اقلیمی استان مازندران از نظر فنی و عملی امکان‌پذیر ارزیابی می‌شود. پتانسیل مناسب تابش خورشیدی، شرایط اقلیمی معتدل و امکان استفاده از سیستم‌های تهویه طبیعی، بستر مناسبی برای توسعه چنین گلخانه‌هایی فراهم می‌کند. مطابق با نتایج به دست آمده با تعیین دقیق نیازهای انرژی گلخانه در بخش‌های تهویه، گرمایش، روشنایی و آبیاری و طراحی مناسب سیستم‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر، می‌توان بخش عمده انرژی مورد نیاز گلخانه را به صورت پایدار تأمین کرد. شکل ۲ میزان انرژی متوسط مورد نیاز گلخانه طراحی شده را نشان می‌دهد که ترسیم نمودار آن بر اساس داده‌های خروجی از مدل ایجاد شده در اپن‌مدلیکا است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری سامانه‌های کنترل هوشمند نقش مؤثری در کاهش اتلاف انرژی و تثبیت شرایط اقلیمی داخلی ایفا می‌کند.



شکل ۲- متوسط انرژی حرارتی مورد نیاز برای گیاه فیسالیس در هر ماه

همان‌طور که در نمودار بالا مشاهده می‌شود، میزان انرژی حرارتی مورد نیاز در گلخانه با میزان تابش در ارتباط است زیرا تابش خورشید باعث افزایش دما می‌شود و افزایش دما در تابستان باعث افزایش مصرف انرژی بیشتر و در زمستان باعث کاهش مصرف آن می‌شود. شکل ۳ نحوه تأثیرپذیری حداکثر شاخص سطح برگ فیسالیس را بر اساس دما نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار شاخص سطح برگ برحسب دما برای گیاه فیسالیس

گیاه دارویی فیسالیس به سرما حساس است و به دمای معتدل و گرم نیاز دارد. بنابراین نمودار فیسالیس در دمای بین ۱۸ تا ۲۰ در محدوده مناسب رشد قرار دارد.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد سیستم نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی قابلیت کاهش چشمگیر مصرف انرژی فسیلی و افزایش بهره‌وری انرژی در گلخانه را دارد.

مطابق با نتایج به دست آمده با تعیین دقیق نیازهای انرژی گلخانه در بخش‌های تهویه، گرمایش، روشنایی و آبیاری و طراحی مناسب سیستم‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر، می‌توان بخش عمده انرژی مورد نیاز گلخانه را به صورت پایدار تأمین کرد. استفاده هم‌زمان از پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌سازی برق و راهکارهای کاهش بار حرارتی منجر به بهبود تراز انرژی سالانه گلخانه می‌شود. همچنین، به‌کارگیری سیستم‌های کنترل هوشمند نقش مؤثری در کاهش اتلاف انرژی و تثبیت شرایط اقلیمی داخلی ایفا می‌کند.

نتایج حاصل، راهنمای مناسبی برای کشاورزان، طراحان گلخانه و سیاست‌گذاران حوزه کشاورزی در جهت کاهش مصرف انرژی، مدیریت بهینه منابع آب و توسعه کشت گیاهان دارویی با ارزش افزوده بالا فراهم می‌کند. همچنین، استفاده از رویکرد انرژی خالص صفر می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، حفاظت از محیط‌زیست و حرکت به‌سوی کشاورزی هوشمند و پایدار ایفا نماید.

۶. مراجع

1. Ravishankar, E., Booth, R.E., Saravitz, C., Sederoff, H., Ade, H.W. and O'Connor, B.T. (۲۰۲۰), "Achieving Net Zero Energy Greenhouses by Integrating Semitransparent Organic Solar Cells," *Joule*, ۴(۲), pp ۴۹۰-۵۰۶.
2. Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S. and Yildizhan, H. (۲۰۲۱), "Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, ۴۳, pp ۱-۱۲.
3. Hassanien, R.H.E., Li, M. and Dong Lin, W. (۲۰۱۶), "Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۵۴, pp



۹۸۹-۱۰۰۱.

- 4.Omid, M., Ghojabeige, F., Delshad, M. and Ahmadi, H. (۲۰۱۱), "Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis," *Energy Conversion and Management*, ۵۲, pp ۱۵۳-۱۶۲.
- 5.Siew, Y.Y., Zareisedehizadeh, S., Seetoh, W.G., Neo, S.Y., Tan, C.H. and Koh, H.L. (۲۰۱۴), "Ethnobotanical survey of usage of fresh medicinal plants in Singapore," *Journal of Ethnopharmacology*, ۱۵۵(۳), pp ۱۴۵۰-۱۴۶۶.
- 6.Younessi-Hamzekhanlu, M., Ozturk, M., Jafarpour, P. and Mahna, N. (۲۰۲۲), "Exploitation of next generation sequencing technologies for unraveling metabolic pathways in medicinal plants: A concise review," *Industrial Crops and Products*, ۱۷۸, pp ۱-۱۴.
- 7.Shan, Z.J., Ye, J.F., Hao, D.C., Xiao, P.G., Chen, Z.D. and Lu, A.M. (۲۰۲۱), "Distribution patterns and industry planning of commonly used traditional Chinese medicinal plants in China," *Plant Diversity*, ۴۳, pp ۱-۱۰.
- 8.Franklin, S. and Roberts, C. (۲۰۱۴), "Chapter 1. What Is PGD?," *Born Made*, pp ۲۵-۷۴.
- 9.O'Connor, P. (۲۰۱۳), "A General Introduction to Biomass Utilization Possibilities," *Biomass Utilization Possibilities*, ۱, pp ۱-۲۰.
10. Vengadesan, E. and Senthil, R. (۲۰۲۰), "A review on recent development of thermal performance enhancement methods of flat plate solar water heater," *Solar Energy*, ۲۰۶, pp ۹۳۵-۹۶۱.
11. Torshizi, M.V. and Hosseini Mighani, A. (۲۰۱۷), "Application of Solar in Agricultural System," *Application of Solar in Agricultural System*, pp ۱-۱۰.
12. Boccalatte, A., Fossa, M. and Sacile, R. (۲۰۲۱), "Modeling, Design and Construction of a ZeroEnergy PV Greenhouse for Applications in Mediterranean Climates," *Thermal Science and Engineering Progress*, ۲۵, pp ۱-۱۰.
13. Tsafaras, I., et al. (۲۰۲۱), "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions," *Agricultural Water Management*, ۲۵۰, pp ۱-۱۲.
14. Katzin, D., van Henten, E.J. and van Mourik, S. (۲۰۲۲), "Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions," *Agricultural Systems*, ۱۹۸, pp ۱-۱۵.
15. Diego, M.L., Fischer, G. and Ulrichs, C. (۲۰۱۰), "Growth of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants affected by salinity," *Journal of Applied Botany and Food Quality*, ۸۳(۲), pp ۱۷۵-۱۸۱.
16. زاده، ف.ج.ع.پ. (۱۳۹۰), "زیست‌توده و انرژی الکتریسیته ناشی از آن," *نخستین همایش بیوانرژی ایران*, pp ۱-۱۰.