طراحی و پیاده‌سازی سامانه کنترل فازی در یک گلخانه مدل و بررسی کارایی آن با کشت محصول ریحان

حسن مسعودی[۱*]، علیرضا توکل‌زاده[۱] و ناصر عالم‌زاده انصاری[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹)

چکیده

در این پژوهش طراحی یک سامانه کنترل فازی و ارزیابی تأثیر آن بر کنترل دما و رطوبت داخل یک گلخانه و نیز تأثیر آن بر رشد محصول مدنظر بود. بدین‌منظور ابتدا الگوریتم کنترل فازی طراحی شده و در محیط نرم‌افزار Fuzzy Tech پیاده‌سازی شد. پس از آماده‌سازی گلخانه‌های مدل و شاهد، تجهیزات کنترل فازی شامل بوردهای الکترونیکی، حسگرهای دما، رطوبت محیط و رطوبت اطراف ریشه و نیز عملگرهای فن، بخاری، مه‌پاش و شیرهای برقی، درون گلخانه مدل نصب شد. در طی ۴۰ روز آزمایش‌ها، تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا درون و بیرون گلخانه‌ها ثبت شد. پس از آن محصول برداشت شد و برخی پارامترهای عملکردی گیاه ریحان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که گلخانه با کنترل فازی نسبت به گلخانه شاهد دارای توان بیشتری در فراهم کردن شرایط مساعد رشد گیاه است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در کنترل دمای گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۱/۳۳ و ۵/۷۱ درجه سلسیوس و در کنترل رطوبت نسبی هوای آنها برابر با ۲/۲۹ و ۱۹/۴۵ درصد به‌دست آمد که بیانگر عملکرد بهتر سامانه کنترل فازی نسبت به کنترل On/Off در تأمین دما و رطوبت مطلوب برای رشد گیاه است. از نظر درصد جوانه‌زنی، گلخانه‌های شاهد و مدل دارای عملکرد یکسانی بودند، اما از نظر سایر پارامترهای رشدی محصول، گلخانه مدل عملکرد بهتری داشت. مقادیر اندازه‌گیری شده برای وزن خشک و وزن تازه اندام‌های مختلف گیاه ریحان در گلخانه مدل نسبت به گلخانه شاهد به‌ترتیب نشان از افزایش ۵۰ و ۳۵ درصدی عملکرد محصول داشت. در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که روش کنترل فازی قادر به کنترل بهینه شرایط محیطی گلخانه‌ها است؛ از این‌رو برای استفاده در گلخانه‌های جدید پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میکروکنترلر، دما، رطوبت نسبی، محلول غذایی، عملکرد محصول

مقدمه

کنترل پارامترهای مؤثر بر رشد گیاه در گلخانه، موجب افزایش عملکرد و کاهش مصرف انرژی و نهاده‌ها و در نهایت توجیه‌پذیری هزینه اولیه خواهد داشت. گلخانه یک سیستم پیچیده است که کنترل تمام پارامترهای مرتبط با رشد گیاه توسط نیروی انسانی کاری پر خطاست. همچنین تبیین فرایند کنترلی بر پایه معادلات کلاسیک حاکم بر گلخانه کاری دشوار است. در مناطق گرمسیری به‌واسطه سطوح بالای تابش خورشید در روز، رطوبت نسبی زیاد، دمای زیاد و

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز
۲. گروه علوم باغبانی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hmasoudi@scu.ac.ir

نیز وجود نوسانات و تغییرات نامنظم این پارامترها، اجرای سامانه‌های متداول گلخانه‌ای با دشواری‌های خاصی همراه است (۱۶). خودکارسازی سامانه‌های آبیاری در گلخانه‌ها به‌دلیل قابلیت تنظیم مصرف آب، کاهش هزینه‌های کارگری و مدیریت صحیح آفات و بیماری‌ها به‌طور روزافزون اهمیت زیادی یافته است (۱۰). با توجه به اثبات توانایی سامانه‌های طراحی شده بر پایه کنترل فازی انتظار می‌رود روش کنترل فازی عملکرد مناسبی در کنترل شرایط مطلوب رشد گیاه داشته باشد. این پژوهش به بررسی تأثیر سامانه کنترل فازی شرایط محیطی یک گلخانه مدل بر عملکرد رشد محصول ریحان در آن گلخانه می‌پردازد.

پژوهش در زمینه کنترل خودکار پارامترهای مختلف گلخانه از سال‌های پایانی قرن بیستم میلادی شروع شده است (۳، ۴، ۱۶، ۱۷). در پژوهش‌های اولیه از شیوه‌های کنترل کلاسیک (On/Off , PID) و فناوری‌های سطح پایین استفاده می‌شد (۱، ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۸)، ولی در سال‌های اخیر پژوهش‌ها به سمت استفاده از شیوه‌های کنترل مدرن مانند کنترل منطق فازی (FLC) و تکنیک‌ها و فناوری‌های سطح بالا (مانند کنترل بی‌سیم و از راه دور) سوق پیدا کرده است (۸، ۱۰، ۱۴).

در پژوهش جوادی کیا (۵) یک سیستم هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای کنترل دقیق پارامترهای محیطی گلخانه طراحی و ساخته شد و عملکرد آن با سیستم‌های کنترل سنتی مقایسه شد. در این راستا از یک گلخانه مدل به ابعاد ۲/۴۸ × ۴/۹۶ و ارتفاع ۲/۱ متر با اسکلت آلومینیومی و مساحت تقریبی ۱۲/۳ متر مربع با پوشش پلی‌کربنات دو جداره استفاده شد و برای سیستم کنترلی از پنج نوع حسگر (دما، رطوبت هوا، شدت نور، غلظت CO_2 و رطوبت خاک) به تعداد ۱۰ عدد نصب شده در نقاط مشخصی در درون و بیرون گلخانه و ۷ عملگر مختلف (بخاری، پنکه تهویه، پنکه چرخش هوا، کولر، مه‌پاش، لامپ، شیر آب برقی) استفاده شد که شامل سخت‌افزارهای کنترلی از نوع میکروکنترلر AVR و یک کامپیوتر مرکزی بود. نرم‌افزار الگوریتم کنترلی فازی و On/Off در محیط برنامه‌نویسی Visual Basic تدوین شد. عملکرد سیستم کنترل فازی نسبت به سیستم سنتی بر روی شاخص‌های رشد گیاه گلخانه‌ای ریحان بررسی شد. نتایج حاصل برتری عملکرد سیستم‌های کنترل فازی نسبت به On/Off، از لحاظ کنترل دقیق پارامترهای محیطی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش عملکرد گیاه را نشان داد. صبری و همکاران (۱۵) یک شبکه هوشمند با تلفیق منطق فازی و حسگرهای بی‌سیم برای کنترل آب و هوای گلخانه (CWSAN-GH) ارائه دادند. آنها با استفاده از منطق فازی و عملگرهای مناسب دو پارامتر دما و رطوبت محیط گلخانه را در طی روز و شب کنترل کردند. نتایج نشان داد که این روش بازده زیادی داشته و مقرون به صرفه است و همچنین انعطاف‌پذیری مناسبی برای سایر عملیات کشاورزی دارد. آتیا و المدانی (۲) از چهار تکنیک کنترلی شامل PI، FLC، ANN و ANFIS برای کنترل و شبیه‌سازی آب و هوای گلخانه در Matlab و Simulink استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترلر ANFIS به‌دلیل سرعت پاسخ زیاد و مؤثر بودن برای کنترل دمای درون گلخانه مناسب‌تر است. محمد و حامد (۹) برای کنترل آب و هوای گلخانه از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی– فازی (ANFIS) استفاده کردند. برای غلبه بر مقدار زیاد عدم قطعیت و بهبود عملکرد سیستم، از الگوریتم ژنتیک به‌منظور تطبیق پارامترهای کنترلی همچون تعداد و شکل توابع عضویت استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که معماری کنترل پیشنهادی، علیرغم شرایط محیطی با تغییرات مداوم و پیچیدگی در گیاهان، قادر به کنترل بدون اشکال است. کنترلر پیشنهاد شده در مقایسه با دیگر کنترلرهای سنتی دارای عملکرد بهتری بود.

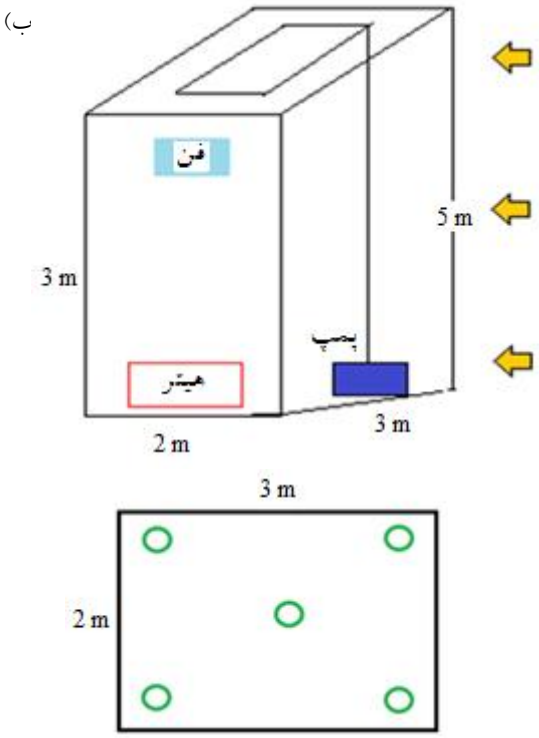
هدف اصلی این پژوهش کنترل پارامترهای محیطی گلخانه (شامل دما و رطوبت نسبی هوا) به‌منظور افزایش بهره‌وری محصول با به‌کارگیری سامانه کنترل فازی برای مدل‌سازی بهتر شرایط پیچیده گلخانه بود. با حصول لحظه‌ای پارامترها و الگوریتم فازی طراحی شده انتظار می‌رود این سامانه بتواند شرایط محیطی گلخانه را در مطلوب‌ترین حالت برای رشد گیاه نگه دارد. در پژوهش‌های بررسی شده پیشین، الگوریتم فازی در رایانه پیاده‌سازی شده است، ولی در این پژوهش الگوریتم فازی بر روی میکروکنترلر پیاده‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

چگونگی عملکرد سامانه کنترلی طراحی شده در این پژوهش

(الف)

ب)

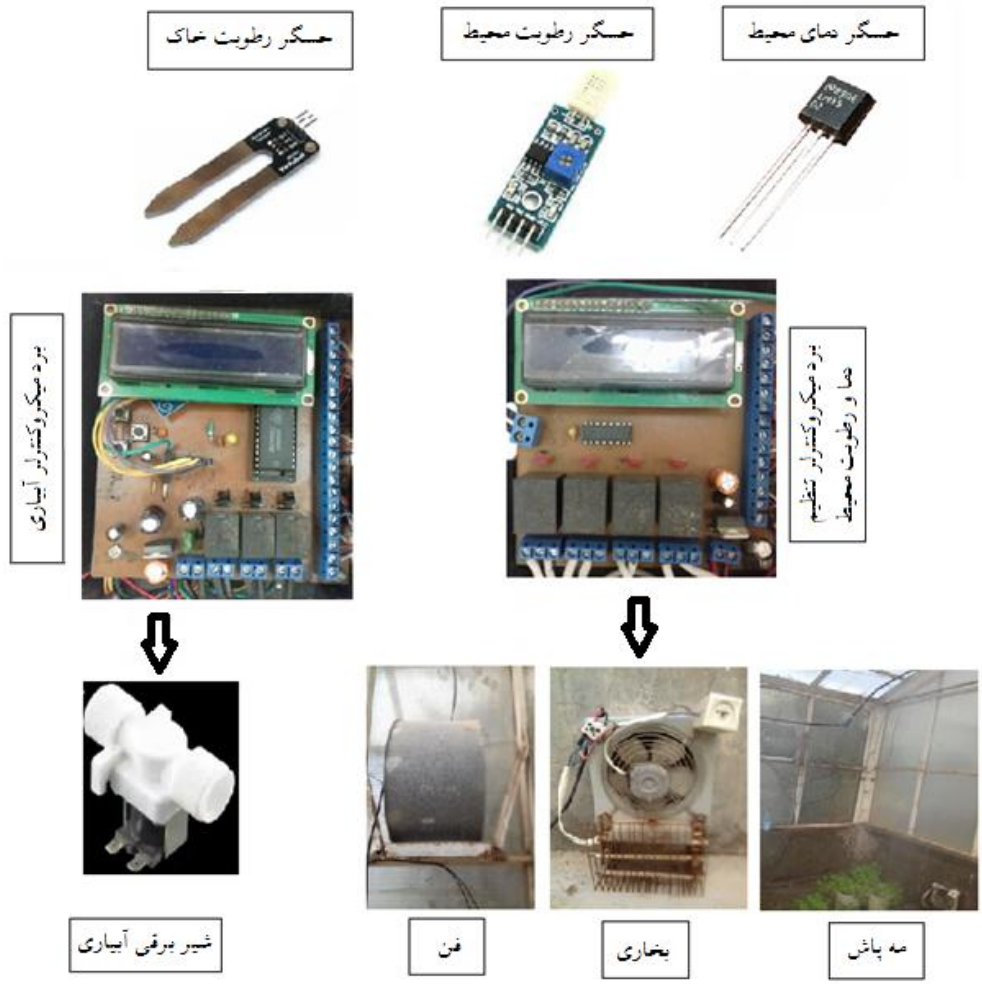


شکل ۱. الف) گلخانه مدل و ب) مکان قرارگیری عملگرها و گلدان‌ها درون آن

بدین صورت بود که ابتدا دما و رطوبت درون گلخانه مدل به‌صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شد، و همچنین به‌صورت همزمان رطوبت اطراف ریشه گیاه تعیین می‌شد. سپس الگوریتم کنترل فازی بر اساس مقادیر دما و رطوبت گلخانه، عملگرها را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کرد که دما و رطوبت درون گلخانه در محدوده مقدار مطلوب تثبیت شد. همچنین از روی مقادیر رطوبت اطراف ریشه، مقدار محلول غذایی مورد نیاز گیاه تعیین می‌شد.

گلخانه مدل به عرض ۲ متر، طول ۳ متر و ارتفاع ۳ تا ۵ متر، با استفاده از پوشش پلاستیکی در گوشه‌ای از گلخانه اصلی جدا شده و به دقت درزبندی شد تا با محیط اطراف حداقل تبادل دمایی و رطوبتی را داشته باشد (شکل ۱- الف) و گوشه دیگری از گلخانه اصلی به عنوان گلخانه شاهد در نظر گرفته شد. همچنین مکان قرارگیری آنها به‌صورتی انتخاب شد که از نظر میزان تابش خورشید دارای شرایط مشابهی باشند. مطابق شکل (۱- ب) در هر کدام از گلخانه‌ها در چهار نقطه کناری و در وسط سه گلدان و در مجموع ۱۵ گلدان قرار داده شد.

در گلخانه مدل به‌منظور پایش پارامترهای محیطی از پنج سری حسگرهای دما (از نوع LM۳۵ ساخت کشور چین) و رطوبت هوا (از نوع HR۲۰۲ ساخت کشور چین) و رطوبت خاک (از نوع YL۱۰۰ ساخت کشور چین) استفاده شد. تمامی حسگرها پیش از استفاده به‌منظور قرائت مقدار دقیق پارامتر مورد نظر واسنجی شدند. برای کنترل شرایط محیطی از عملگرهای فن (یک فن پنجره‌ای با توان ۰/۵ اسب بخار و سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ساخت کارخانه موتوژن)، هیتر (یک بخاری برقی سه المنتی) و مه‌پاش (یک پمپ آب با توان نیم اسب بخار که آب را با فشار مناسب از تعداد ۱۰ نازل به‌صورت پودری خارج می‌کرد) استفاده شد. همچنین پنج شیر برقی (از نوع ۱/۲ اینچ TOL-۰۰۰۱۸ با ولتاژ راه اندازی ۲۲۰ ولت که توانایی عبور سه لیتر مایع در یک دقیقه را دارد) برای کنترل رطوبت اطراف ریشه در گلخانه مدل مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۲).



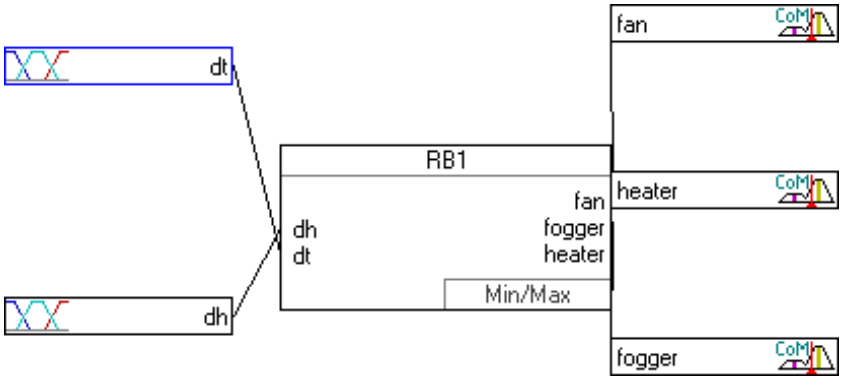
شکل ۲. شماتیک اجزاء سخت‌افزاری استفاده شده در گلخانه مدل

برای پردازش داده‌های حس‌گرها و اجرای الگوریتم کنترل فازی، یک بورد الکترونیکی با میکروکنترلر از نوع AVR و پردازنده ATMEG ۱۲۸ طراحی و ساخته شد (شکل ۲). این بورد دارای ۱۰ ورودی مجزا برای اخذ داده‌های ۱۰ حسگر دما و رطوبت بود. ورودی‌ها به‌وسیله یک جمع‌کننده (Multiplexer) به‌صورت جفت خوانده شده و به میکروکنترلر ارسال می‌شد. همچنین در قسمت خروجی این بورد سه رله قرار داده شد که هر کدام مختص به یک عملگر بود و با توجه به فرمان ارسالی از سوی میکروکنترلر، عمل‌گرهای فن، هیتر یا مه‌پاش را روشن یا خاموش می‌کرد. این بورد دارای یک حافظه جانبی از نوع میکرو اس دی (Micro SD) و یک RTC بود که اطلاعات ارسالی از حسگرها به همراه تاریخ و زمان دقیق قرائت، هر سه دقیقه یک بار در آن ذخیره می‌شد (۱۳).

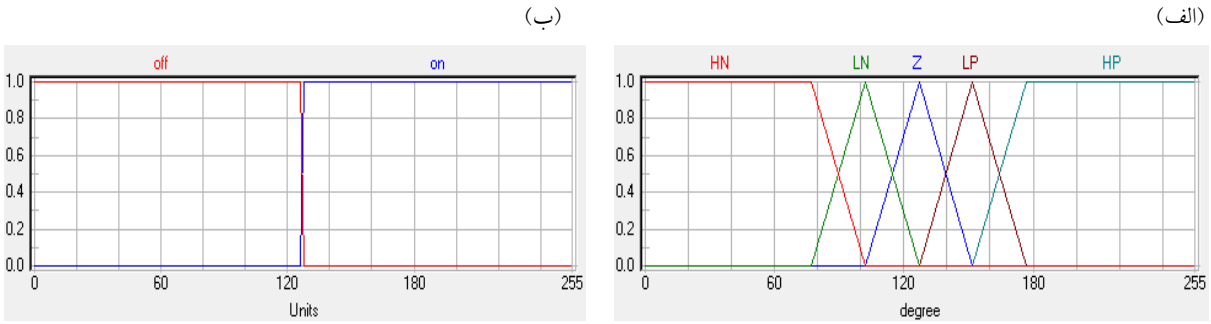
الگوریتم کنترل فازی

مطابق شکل (۳) ورودی‌های الگوریتم کنترل فازی شامل دما به درجه سلسیوس و رطوبت به درصد بوده و خروجی‌ها شامل عملگرهای فن، گرم کن برقی و مه‌پاش بودند. با توجه به دما و رطوبت محیط و مقایسه آن با دما و رطوبت مناسب تعیین شده در قواعد فازی هر کدام از عملگرها در زمان مورد نیاز، شرایط محیطی مطلوب را در گلخانه فراهم می‌آورند. از غیرفازی‌سازی مرکز ثقل و موتور استنتاج مینیمم ممدانی در پیاده‌سازی سیستم کنترل فازی استفاده شد.

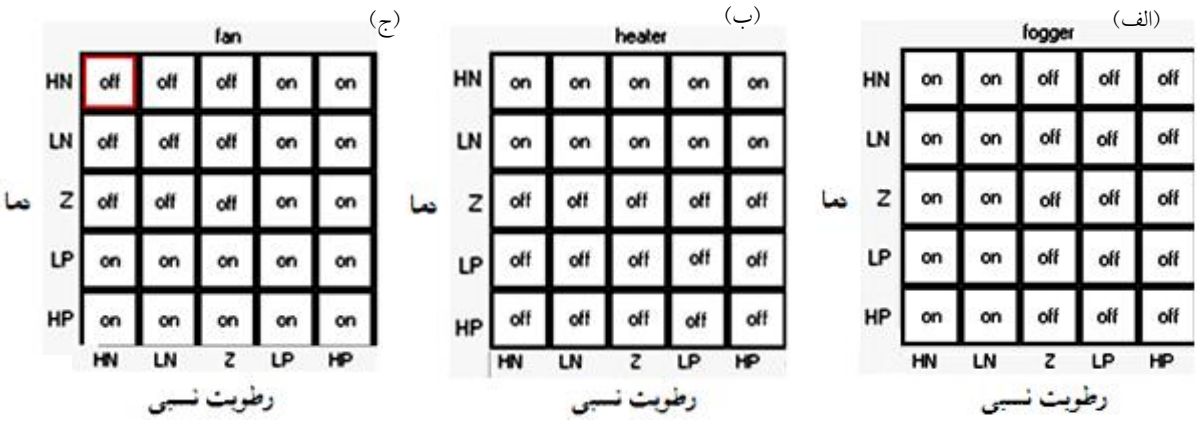
سیستم کنترل فازی موردنظر در محیط نرم‌افزار تخصصی



شکل ۳. سیستم کنترل فازی طراحی شده برای کنترل دما و رطوبت درون گلخانه مدل



شکل ۴. الف) توابع عضویت ورودی‌های کنترلر فازی و ب) توابع عضویت خروجی‌های کنترلر فازی



شکل ۵. قواعد نوشته شده برای الف) مه‌پاش، ب) گرم‌کن برقی و ج) فن

فازی تک (Fuzzy tech) پیاده‌سازی شد، سپس با کمک این نرم‌افزار کدهای C قابل استفاده در نرم‌افزار کد ویژن (Code vision) تولید شدند و در برنامه رایانه‌ای میکروکنترلر بورد کنترل دما و رطوبت محیط گلخانه مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۴) توابع عضویت پارامترهای ورودی (شامل دما و رطوبت محیط) و خروجی (شامل وضعیت فن، گرم‌کن و مه‌پاش) و شکل (۵) قواعد فازی استفاده شده در الگوریتم کنترل فازی را نشان می‌دهند.

کنترل رطوبت اطراف ریشه در گلخانه مدل

از آنجا که محلول‌دهی مستقل از عوامل محیطی دیگر در گلخانه است و با توجه به تعداد زیاد ورودی‌ها، بورد آبیاری جداگانه

(الف)

(ب)

شکل ۶. چگونگی قرارگیری گلدان‌ها در الف) گلخانه مدل و ب) گلخانه شاهد

ساخته شد (شکل ۲). در این بورد از یک میکروکنترلر AVR مدل Atmega ۱۶ استفاده شد (۱۳). این بورد دارای پنج ورودی از حسگرهای رطوبت خاک بود. خروجی این بورد دارای شش رله بود که پنج رله برای پنج شیر برقی و یک رله برای پمپ آب استفاده شد. با روشن شدن هر یک از رله‌های آبیاری، رله مربوط به پمپ نیز روشن می‌شد. الگوریتم کنترل رطوبت خاک شامل دستورات لازم برای تزریق محلول غذایی به بوته‌ها بود. مقدار مطلوب رطوبت نسبی در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شد (۵). در صورتی که مقادیر ارسال شده از حسگرهای طوبت خاک از مقدار مطلوب کمتر بود، پمپ تزریق محلول غذایی روشن شده و شیر مربوطه در حالت باز قرار می‌گرفت و تا رسیدن به رطوبت ۸۰ درصد محلول‌دهی ادامه پیدا می‌کرد. شوری (EC) در تمام محلول غذایی در طول آزمایش یکسان و حدود ۲/۵ تا ۳ دسی‌زیمنس بر متر بود و زمانی که گیاه به آب نیاز داشت همراه آن محلول غذایی به خاک داده می‌شد. از این رو مقدار EC محلول در اطراف ریشه در سرتاسر آزمایش تقریباً ثابت بود. ضمناً هفته‌ای یکبار با آب خالص گیاه آبیاری می‌شد تا نمک‌های تجمع یافته در اطراف گیاه از دسترس ریشه خارج شود.

کشت محصول در گلخانه مدل و شاهد

از بستر کوکوپیت برای کاشت گیاه ریحان استفاده شد. ۳۰ گلدان ۹ لیتری در نظر گرفته شد که هر کدام پس از شست‌وشو اولیه با کوکوپیت پر شدند (شکل ۶- الف). ۱۵ عدد از گلدان‌ها برای کاشت محصول در گلخانه شاهد و ۱۵ عدد نیز برای گلخانه مدل استفاده شد. برای هر گلدان تعداد ۲۰ عدد بذر ریحان در نظر گرفته شد. تا زمان رویش جوانه‌ها، بذور تنها به‌وسیله آب تصفیه شده سه بار در روز آبیاری شدند. پس از ظهور اولین برگ حقیقی مقدار درصد جوانه‌زنی برای هر گلدان محاسبه شد و سپس تعداد گیاه در هر گلدان به ۱۰ عدد کاهش داده شد و تا زمان برداشت، محلول غذایی به گیاهان داده شد. خوشبختانه در کلیه مراحل رشد محصول هیچ گونه اثری از آفات و بیماری‌ها در گیاهان مشاهده نشد.

از زمان کاشت تا جوانه‌زنی به مدت چهار روز تغذیه گیاهان با آب صورت گرفت و پس از آن تغذیه گیاه با محلول غذایی جونز ۲۰۰۱ (۶) که مطابق جدول (۱) شامل عناصر ماکرو و میکرو مورد نیاز رشد گیاه بود، انجام گرفت. بدین‌منظور ابتدا محلول استوک هر نمک به‌صورت جداگانه آماده شد، سپس با نسبت مشخصی در مخزن اصلی با همدیگر مخلوط شد. کلیه نمک‌ها از شرکت سپاهان رویش، ایران خریداری شدند. ترکیب مورد استفاده از نمک‌ها و غلظت عناصر آنها به شرح جدول (۱) تعیین شده است. محلول غذایی با توجه به غلظت عناصر مورد نیاز محاسبه شده، با استفاده از نمک‌های موجود تولید شده و مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. ترکیب محلول غذایی جونز ۲۰۰۱ برای تغذیه ریحان

عناصر پر مصرف	غلظت عناصر (ppm)	عناصر کم مصرف	غلظت عناصر (ppm)
N	۱۴۰	Mn	۰/۶۲
P	۶۲	Cu	۰/۰۵
K	۱۵۰	Zn	۰/۰۹
Mg	۵۰	B	۰/۴۴
Ca	۱۳۰	Mo	۰/۰۳
S	۷۰	Fe	۲/۵

به‌منظور تعیین تأثیر استفاده از سامانه کنترل فازی در گلخانه مدل بر رشد محصول، همزمان محصول ریحان در یک گلخانه شاهد که دما و رطوبت آن به‌صورت On/Off کنترل می‌شد، کاشته شد (شکل ۶- ب). پارامترهای کنترلی در گلخانه شاهد شامل دما، رطوبت و آبیاری و عملگرهای مربوط به آن شامل فن و پد خنک کننده، بخاری گازی و تایمر آبیاری بود که به‌صورت On/Off کنترل شدند. در این سیستم دما ۲۸ درجه سلسیوس با پسماند ۱ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ درصد با پسماند ۱۰ درصد تعیین شد. برای انجام آبیاری در گلخانه شاهد از یک تایمر برای روشن کردن پمپ آب استفاده شد. در کل دوره رشد آبیاری به‌صورت روزانه و در دو نوبت انجام شد و در هر بار آبیاری پمپ به مدت ۱۵ دقیقه روشن بود.

ارزیابی عملکرد سامانه کنترل فازی

برای تعیین عملکرد سامانه کنترل فازی در تنظیم دما و رطوبت گلخانه، تغییرات دما و رطوبت نسبی درون گلخانه مدل در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول تغییرات دما و رطوبت در چند روز مورد بررسی قرار گرفت و در حالت دوم تغییرات میانگین دمایی و رطوبت کل دوره کشت گیاه ریحان مورد بررسی قرار گرفت. اختلاف دمای ثبت شده و دمای مطلوب میانگین به‌عنوان خطا در نظر گرفته شد و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RSME) از رابطه (۱) برای آنها محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(t_d - t_a)^2}{n}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه t_d دما یا رطوبت مطلوب و t_a دما یا رطوبت واقعی و n تعداد نمونه‌ها در بازه زمانی انتخاب شده است.

همچنین برای مقایسه کارایی سامانه کنترل فازی و تأثیر آن بر رشد محصول ریحان، صفاتی مانند درصد جوانه‌زنی، طول و قطر ساقه، و همچنین وزن خشک و تازه اندام‌های مختلف گیاه (ریشه، ساقه، برگ و کل) در طی رشد و پس از اتمام دوره رشد (گذشت ۴۰ روز از زمان کاشت) اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی شاخص‌های عملکردی گیاه ریحان از آزمون *t*-student در نرم‌افزار SPSS ۲۳ استفاده شد. همچنین نمودارهای مقایسه‌ای در نرم‌افزار MS Excel ۲۰۱۳ رسم شد.

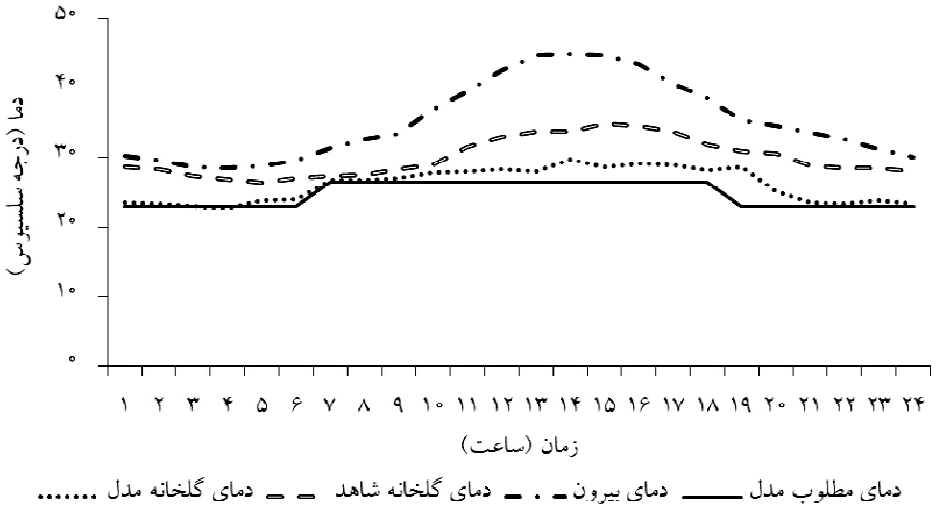
نتایج و بحث

تغییرات روزانه دما

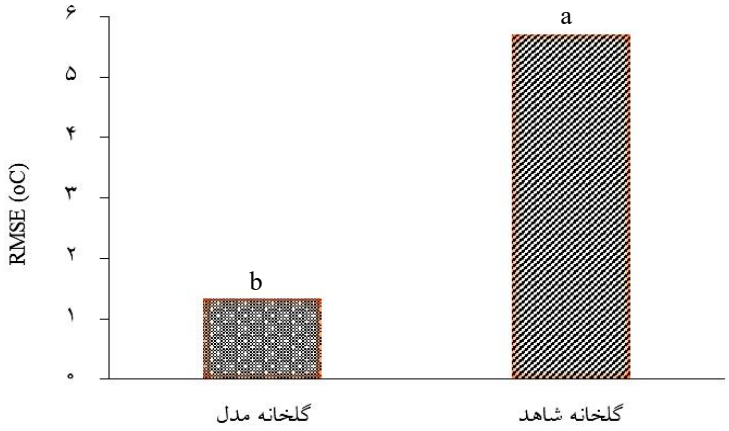
مطابق شکل (۷) سیستم کنترل فازی در گلخانه مدل توانایی مناسبی در کنترل دمای گلخانه در طی یک شبانه‌روز داشته و در زمان‌هایی هم، قادر به کنترل دما در بازه تعیین شده نبوده است که ممکن است به‌دلیل درزهای احتمالی موجود در ساختار گلخانه مدل و دمای بیش از حد محیط بیرون باشد. از مقایسه نمودارها مشخص است که سیستم کنترلی موجود در گلخانه مدل، توان بیشتری در کنترل دما نسبت به گلخانه شاهد داشته و البته دامنه تغییرات دمای آن کمتر بوده است.

تغییرات دما در دوره رشد گیاه ریحان

با توجه به مقدار RMSE تغییرات دما در گلخانه مدل در طی



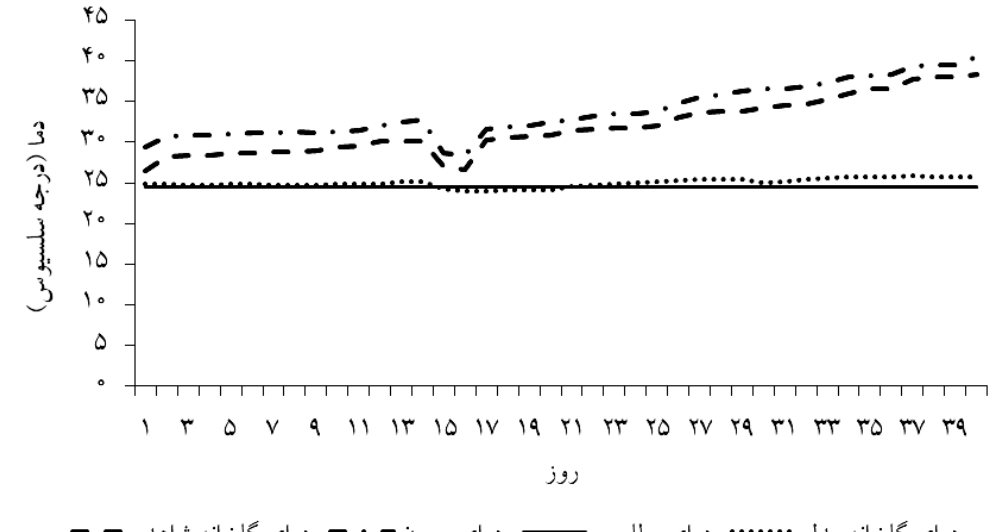
شکل ۷. نمودار تغییرات دمای گلخانه در طول یک روز تصادفی



شکل ۸. مقایسه شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای دمای گلخانه‌های شاهد و مدل؛ حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار بین مقادیر در سطح ۱ درصد است.

دوره رشد محصول که برابر با ۱/۳۳ درجه سلسیوس است (شکل ۸) می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد سیستم کنترل فازی گلخانه مدل در طول دوره رشد برای کنترل دما مؤثر بوده و در طول دوره رشد گیاه، دمای درون گلخانه تقریباً مقداری نزدیک به مقدار مطلوب داشته است. با افزایش دمای محیط بیرون در دماهای نزدیک به ۴۰ درجه سلسیوس از کارایی سیستم کاسته شده است که به نظر می‌رسد با پوشش درزهای احتمالی موجود تا حدودی قابل کنترل باشد. تغییرات دما در گلخانه شاهد دارای مقدار RMSE برابر با ۵/۷۱ درجه سلسیوس بود که بزرگ‌تر از مقدار گلخانه مدل بوده و با آن تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که گلخانه مدل عملکرد بهتری در کنترل دمای مطلوب داشته است.

مطابق شکل (۹) روند تغییرات دما در طول دوره رشد در گلخانه شاهد به روند کلی تغییرات دمای محیط بسیار شبیه و وابسته است که دلیل آن می‌تواند عملکرد ضعیف سیستم کنترلی آن و همچنین وجود راه‌های متعدد هدرروی گرما در گلخانه شاهد باشد. ولی در گلخانه کنترل شده با منطق فازی تغییرات دما در طی آزمایش‌ها از دمای مطلوب پیروی می‌کند که نشان می‌دهد سامانه کنترل فازی بخوبی توانسته است دمای درون گلخانه مدل را در حد مطلوب نگه دارد.



شکل ۹. مقایسه دمای گلخانه‌های مدل و شاهد با مقدار مطلوب دما در طول دوره رشد گیاه ریحان

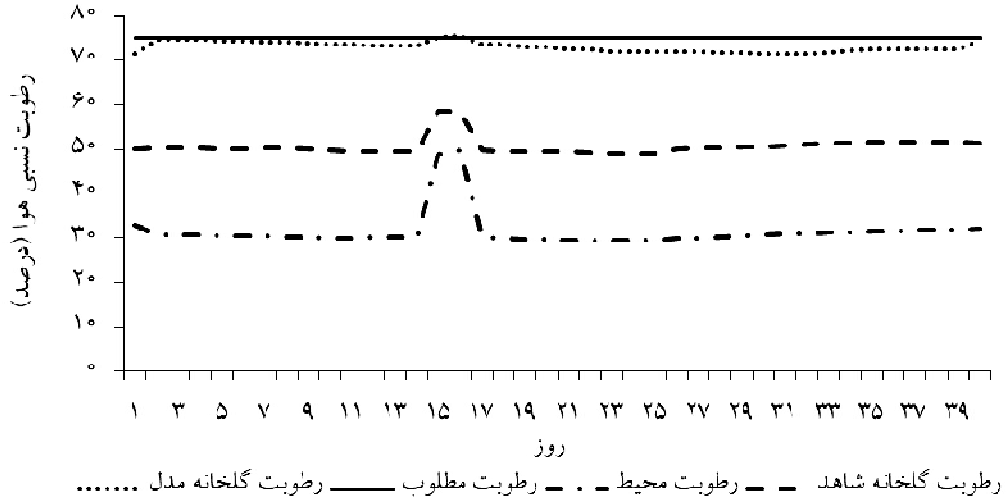
شکل ۱۰. نمودار تغییرات رطوبت نسبی هوا در طول یک روز تصادفی

تغییرات روزانه رطوبت نسبی هوا

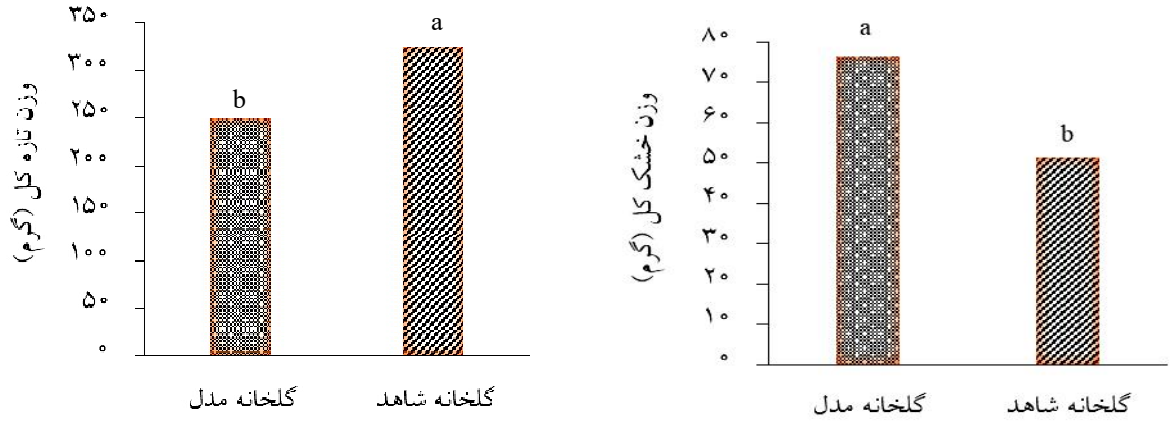
مطابق شکل (۱۰) سیستم کنترل فازی در گلخانه مدل توانایی نسبتاً مناسبی در کنترل رطوبت نسبی هوا در گلخانه داشته است. لازم به‌ذکر است از آنجایی که کران بالایی بازه رطوبت مطلوب به‌عنوان معیار در نظر گرفته شد، پایین قرارگرفتن نمودار رطوبت گلخانه مدل منطقی و قابل توجیه است. البته وجود درزها در گلخانه و همچنین ضعف سیستم مه‌پاش عواملی هستند که ممکن است بر عملکرد سیستم تأثیر منفی گذاشته و مانع از به حداکثر رسیدن مقدار رطوبت در گلخانه مدل شده باشند.

تغییرات رطوبت نسبی هوا در دوره رشد گیاه ریحان

روند تغییرات رطوبت نسبی هوا، میانگین روزانه در کل دوره رشد گیاه ریحان برای دو گلخانه شاهد و مدل، همچنین رطوبت نسبی هوای بیرون و مطلوب در شکل (۱۱) آورده شده است.



شکل ۱۱. مقایسه رطوبت نسبی هوای گلخانه‌های مدل و شاهد با مقدار مطلوب آن در طول دوره رشد گیاه ریحان



شکل ۱۲. مقایسه وزن تازه و خشک کل محصول ریحان در گلخانه‌های مدل و شاهد؛
حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار بین مقادیر در سطح ۱ درصد است.

تغییرات رطوبت نسبی هوا در گلخانه مدل از مقدار مطلوب و در گلخانه شاهد از مقدار رطوبت بیرون پیروی کرده است. مقدار RMSE رطوبت (که بیانگر اختلاف رطوبت ثبت شده و رطوبت مطلوب به‌عنوان خطا است) برای گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۲/۲۹ و ۱۹/۴۵ درصد به‌دست آمد که تفاوت آنها در سطح یک درصد معنی‌دار بود. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد سیستم کنترل فازی گلخانه مدل در طول دوره رشد برای کنترل رطوبت مؤثر بوده و در طول دوره رشد گیاه، رطوبت درون گلخانه مدل تقریباً نزدیک به مقدار مطلوب بوده است.

نتایج به‌دست آمده در مورد کنترل دما و رطوبت گلخانه با نتایج پژوهش صبری و همکاران (۱۵) همخوانی دارد که نشان دادند کنترل منطق فازی بازده زیادی داشته، مقرون به صرفه بوده و همچنین انعطاف‌پذیری مناسبی برای سایر عملیات کشاورزی دارد.

نتایج عملکرد رشد گیاه ریحان

مطابق شکل (۱۲) وزن خشک و تازه محصول در گلخانه مدل در تمام تکرارها افزایش داشته است. مجموع میانگین‌های وزن

جدول ۲. مقایسه پارامترهای رشدی گیاه ریحان در دو گلخانه مدل و شاهد

شاخص مورد ارزیابی	درجه آزادی	اختلاف میانگین	مقدار t	P
وزن خشک ریشه	۸	۱/۱۸	۰/۰۶۷	۰/۰۰۳**
وزن خشک ساقه	۸	۴/۰۸	۴/۷۸	۰/۰۰۱**
وزن خشک برگ	۸	۹/۸۸	۵/۳۴	۰/۰۰۱ **
وزن خشک کل	۸	۱۸/۱۸	۱/۸۰۶	۰/۰۰۱**
وزن تازه ریشه	۸	۱/۷۵	۱/۲۷۵	۰/۲۳۸ ns
وزن تازه ساقه	۸	۴۸/۸۷	۱۱/۰۲۱	۰/۰۰۸ **
وزن تازه برگ	۸	۵۸۲	۴/۴۳۲	۰/۰۲ *
وزن تازه کل	۸	۸/۲۹۶	۷/۷۶۶	۰/۰۰۱**
طول ساقه	۲۹۸	۱/۸۶۶	۱۰/۵۹۳	۰/۰۰۰**
قطر ساقه	۲۹۸	۰/۰۷۴۴	۳/۴۰۴	۰/۰۰۱**
درصد جوانه‌زنی	۸	۱/۶	۰/۸۸۵	۰/۴۱۷ns

** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد- * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد- ns: غیرمعنی‌دار

خشک کل بوته‌ها در گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۲۲۹/۶۵ و ۱۵۳/۹۸ گرم و مجموع میانگین‌های وزن تازه کل بوته‌ها در گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۱۶۲۸/۱۳ و ۱۲۴۵/۹۶ گرم به‌دست آمد. مقایسه مقادیر وزن خشک و تازه ریشه، ساقه، برگ و کل در دو گلخانه با آزمون t-student در جدول (۱) نشان از معنی‌داری تفاوت این مقادیر در سطح یک درصد دارد. نتایج کلی این مقایسه نشان داد که کنترل گلخانه با سامانه کنترل فازی تا ۵۰ درصد منجر به افزایش عملکرد گیاه در حالت خشک و ۳۵ درصد در حالت تازه می‌شود. تولید ماده خشک در گیاه ریحان به سرعت در گرمای هوا به‌ویژه در زمانی که رطوبت و شرایط رشد نسبتاً بهتر فراهم باشد، رخ می‌دهد. در این پژوهش برای کاهش گرمای گلخانه از سیستم فن و پد استفاده شد، که برای کاهش دما از تهویه نسبتاً سریع و گردش تند هوا بهره می‌برد. اما گردش هوا به جز کاهش دما، مقدار بیشتری CO_2 نیز در اختیار گیاه قرار می‌دهد و تبخیر رطوبت از سطح برگ و انتقال مواد بیشتر از منطقه ریشه به برگ‌ها را در پی دارد. این فرایندها باعث تجمع بیشتر مقدار ماده خشک در گیاه شده، ولی رطوبت از سطح گیاه طی گردش هوا بیشتر از ذخیره آن از دست می‌رود و چنین اتفاقی سبب تفاوت بین ماده خشک ذخیره‌ای و وزن تازه گیاه می‌شود. از آنجایی که سیستم کنترل فازی قابلیت بیشتری در کنترل رطوبت مورد نیاز گیاه در حد بهینه داشت، رشد سریع‌تر اتفاق افتاده و مقدار تجمع ماده خشک و تازه بیشتر از سیستم معمول به دست آمد.

در گلخانه مدل نسبت به گلخانه شاهد طول ساقه‌ها، قطر ساقه‌ها و درصد جوانه‌زنی افزایش یافت. میانگین طول ساقه برای گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۲۷/۴۹ و ۲۵/۳۹ سانتی‌متر، میانگین قطر ساقه برای گلخانه‌های مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۰/۶۹ سانتی‌متر و میانگین جوانه‌زنی برای گلخانه مدل و شاهد به‌ترتیب برابر با ۹۱/۴ و ۸۹/۸ درصد به‌دست آمد. مطابق جدول (۲)، اختلاف طول ساقه و قطر ساقه در دو گلخانه در سطح یک درصد معنی‌دار شد، ولی اختلاف درصد جوانه‌زنی در دو گلخانه معنی‌دار نیست. نتایج پژوهش جوادی‌کیا (۵) برتری عملکرد سیستم‌های کنترل فازی نسبت به On/Off، از لحاظ کنترل دقیق پارامترهای محیطی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و

افزایش عملکرد گیاه را نشان داد که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

گلخانه تحت کنترل منطق فازی با توجه به کنترل لحظه‌ای و تنظیم دقیق‌تر پارامترهای مختلف کنترلی توانست تا حد قابل قبولی ضمن کنترل دما و رطوبت نسبی درون گلخانه در حد مطلوب، افزایش عملکرد محصول ریحان را به همراه داشته باشد. این افزایش عملکرد محصول ریحان بیانگر میزان اهمیت کنترل عوامل دما و رطوبت نسبی هوا در حین فرایند کشت محصول است. هر چند در شرایط نامناسب زمان کشت در این پژوهش، در گلخانه شاهد نیز محصول به عمل آمد. انتخاب سیستم بهینه توسط زارع با توجه به صرفه اقتصادی و مقدار مصرف انرژی امری ضروری است. با این وجود صرف هزینه برای کنترل دقیق گلخانه با توجه به افزایش عملکرد محصول مقرون به صرفه است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب اعتبار ویژه پژوهشی (به شماره قرارداد ۹۶/۳/۰۲/۱۶۶۷۰) در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان مقاله از مدیر محترم گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز و کلیه عزیزانی که در انجام این پژوهش آنها را یاری کرده‌اند، سپاسگزاری می‌کنند.

منابع مورد استفاده

1. Ameur, S., M. Laghrouche and A. Adane. 2001. Monitoring a greenhouse using a microcontroller-based meteorological data-acquisition system. Renew. Energ. 24: 19–30.
2. Atia, D. M. and H. T. El-madany. 2017. Analysis and design of greenhouse temperature control using adaptive neuro-fuzzy inference system. J. Electr. Syst. Inf. Tech. 4: 34–48.
3. Chalabi, Z. S., B. J. Bailey and D. J. Wilkinson. 1996. A real-time optimal algorithm for greenhouse heating. Comput. Electron. Agr. 15: 1-13.
4. Hoon Jae, S., K. Kyung Man, K. Kwang Hyun and H. Weon Sik. 1995. A study on the automatic measurement and control system for greenhouse environment. RDA J. Agr. Sci. 37(2): 681-686.
5. Javadikia, P. 2010. Design, Implementation and evaluation of intelligent system based on fuzzy logic controller for greenhouse automation. Ph.D thesis. University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi).
6. Jones, J. B. 2011. Hydroponic Handbook: How Hydroponic Growing Systems Work. North Charleston SC, USA.
7. Marhaenanto, B. and G. Singh. 2002. Development of a computer-based greenhouse environment controller. Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources. 13-15 March 2002, Iguacu Falls, Brazil. Pages: 136-146.
8. Marhaenanto, B., P. Soni and V. M. Salokhe. 2013. Development of an internet-based greenhouse control system. Int. Agr. Eng. J. 22(2): 72-83.
9. Mohamad, S. and I. A. Hameed. 2018. A GA-based adaptive neuro-fuzzy controller for greenhouse climate control system. Alexandria Eng. J. 57(2): 773-779.
10. Najafi, A., A. Shahidi and M. R. Ardame. 2015. Development of a greenhouse automation system with remote control software. First National Congress on Iran's Irrigation and Drainage. 13-14 May 2015, Mashhad, Iran. (In Farsi).
11. Omid M. and A. Shafaei. 2004. Investigation of temperature and humidity variations within a greenhouse using a computer-based data acquisition system. Pajouhesh & Sazandegi. 64: 67-73. (In Farsi).
12. Omid M. and A. Shafaei. 2005. A computer-based control system for greenhouse environment: Part I- Design and Implementation of system. J. Agr. Eng. Res. 6(23): 1-20. (In Farsi).

13. Rahafrooz, A. 2005. AVR Microcontrollers and Their Applications. Nas Scientific and Cultural Institute, Tehran. (In Farsi).
14. Rahali, A., H. Alami and A. Hilli. 2015. Design and implementation of a system for monitoring and remote control of a greenhouse climate parameters. J. Automat. Contr. Eng. 3(5): 425-427.
15. Sabri, N., S. A. Aljunid, R. B. Ahmad, A. Yahya, R. Kamaruddin and M. S. Salim. 2011. Wireless sensor actor network based on fuzzy inference system for greenhouse climate control. J. Appl. Sci. 11: 3104-3116.
16. Seminar, K. B., H. Suhardiyanto, D. Tooy, T. Kozai and H. Murase. 1998. Design and implementation of a computer-based control system for greenhouse in tropical regions. Proceedings of 3rd IFAC-CIGR Workshop. Chiba, Japan. Pages: 43-48.
17. Wagner S. W., F. Forcella and W. B. Voorhees. 1999. Converting an existing greenhouse control system from pneumatics to PC. ASAE/CSAE Annual Int. Meeting. Ontario, Canada. Paper No. 995013.
18. Zarei, G. and A. Azizi. 2016. Design, implementation and evaluation of a central unit for controlling climatic conditions in the greenhouse. J. Sci. Tech. Greenh. Cult. 6(4): 47-62. (In Farsi).

Design and Development of a Fuzzy Logic Controller in Greenhouse and Evaluation of Its Performance by Basil Planting

H. Masoudi[1*], A. R. Tavakolzadeh[1] and N. Alemzadeh Ansari[2]

(Received: 21 September 2019; Accepted: 9 January 2020)

Abstract

In this research, the ability of a fuzzy logic control (FLC) system in providing optimal temperature and humidity inside greenhouse and the effect of FLC on the growth parameters of basil plant were aimed. At first, the FLC algorithm was implemented in Fuzzy Tech software. Second, two small, separated and isolated spaces were prepared as model and control greenhouses. Then, the FLC equipment were installed inside model greenhouse, including temperature, humidity and soil moisture sensors along with a fan, a heater, a fogger system and electric valves as actuators. During 40 days experiments, temperature and humidity changes inside and outside of the greenhouse were recorded. Finally, the basil plants were harvested and some growth parameters of the crop were measured. The results showed that the FLC greenhouse was more capable than the control greenhouse in providing the plant's growth conditions. The root mean square errors (RMSE) of temperature were 1.33 and 5.71 ºC, and of humidity were 2.29 and 19.45% in FLC and control greenhouses, respectively, which indicates better performance of FLC than On/Off control for providing optimum temperature and humidity for plant's growth. Both greenhouses had the same performance at germination percentage, but the FLC greenhouse had better performance at other growth parameters. The measured values for dry and fresh weights of basil plant in the FLC greenhouse showed 50 and 35% increase in the yield, respectively, compared to the control greenhouse. In general, the results of this study showed that the fuzzy control method is able to optimally control the environmental conditions of greenhouses; so it is recommended for use in new greenhouses.

Keywords: Microcontroller, Temperature, Relative humidity, Nutrition solution, Crop performance.

1. Dept. of Biosystems Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Dept. of Hort. Sci., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
* Corresponding Author, Email: hmasoudi@scu.ac.ir