

طراحی و ساخت گلخانه هیدروپونیک کشت خیار مجهز به سامانه کنترل فازی

حمید خفاجه^۱، احمد بناکار^{۲*}، سعید مینائی^۳ و مجید دلاور^۴

چکیده

برای تولید مناسب گیاه، گلخانه باید محیط کنترل‌شده‌ای با نور خورشید، درجه حرارت و رطوبت کافی باشد. به‌طور عمده شرایط رشد بهتر در گلخانه‌ها با حفظ دمای مطلوب داخلی در مقایسه با دمای خارجی به دست می‌آید. هدف از این تحقیق طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه کنترل فازی برای یک واحد گلخانه تحقیقاتی است که قابلیت اندازه‌گیری، کنترل و پایش شرایط محیطی گلخانه را داشته باشد. متغیرهای قابل کنترل در داخل گلخانه، دمای هوا، رطوبت نسبی محیط، شدت نور، میزان دی‌اکسیدکربن هوا است، که به‌طور دقیق اندازه‌گیری و نمایش داده شده و توسط عملگرهایی (سامانه گرمایش، سامانه سرمایش، تنظیم دی‌اکسیدکربن، تهویه و تنظیم رطوبت) کنترل می‌شوند. در این پژوهش، تجهیزات حرارتی و برودتی و همچنین حسگرهای مورد نیاز یک گلخانه هیدروپونیک طراحی و نصب شدند. سپس سامانه کنترل فازی با استفاده از منطق فازی طراحی شد. در ادامه، با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به شرایط محیطی مناسب گلخانه هیدروپونیک خیار، مقادیر دما، رطوبت، نور و دی‌اکسیدکربن به‌عنوان ورودی‌های فازی یک سیستم در نظر گرفته شده و قواعد سامانه فازی به‌گونه‌ای نوشته شد که شرایط محیطی گلخانه نیز بر طبق اطلاعات ورودی برای روز و شب، به‌صورت فازی تعریف شوند. نتایج حاصل از ارزیابی سامانه نشان داد که کنترل فازی به خوبی می‌تواند شرایط محیطی گلخانه را کنترل کند.

واژه‌های کلیدی: کنترل فازی، کنترل شرایط محیطی، گلخانه، هیدروپونیک.

ارجاع: خفاجه ح. بناکار ا. مینائی س. و دلاور م. ۱۳۹۹. طراحی و ساخت گلخانه هیدروپونیک کشت خیار مجهز به سامانه کنترل فازی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۹(۱): ۶۹-۸۰.

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: ah_banakar@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

مقدمه

امروزه تأمین پایدار مواد غذایی از یک سو و بحران آب و انرژی از سوی دیگر بشر را واداشته است که به دنبال افزایش تولید و بهینه کردن منابع مصرفی باشد. از جمله روش‌های پر بازده کشاورزی، تولید محصولات گلخانه‌ای بوده است (Kashi, 1998). هدف اصلی یک گلخانه بهبود شرایط محیطی برای رشد بهتر گیاهان است. در محیط گلخانه کنترل مناسب آب و هوا می‌تواند موجب بهبود بیشتری شود (Ferreira *et al.*, 2002). عوامل محیطی اصلی که در گلخانه‌ها دخیل هستند عبارت‌اند از: دما (Willits & Peet, 1993)، رطوبت نسبی هوای داخل (Körner & Challa, 2003)، کاهش فشار بخار (تبخیر) (Baker, 1990)، تعرق (Joliet & Bailey, 1994; Joliet, 1994; Stanghellini & De Jong, 1992)، نور خورشید، غلظت CO₂ (Willits & Peet, 1989)، گردش هوا (Körner & Challa, 2003) و روشنایی (Willits & Peet, 1993). امروزه سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای رایانه‌ای با توانایی‌های زیاد و قیمت مناسب برای کاربردهای مختلف در دسترس هستند. برای انجام کلیه فرآیندهای کنترلی و مدیریتی در گلخانه از این سامانه‌ها به گونه‌های مختلف می‌توان بهره‌برد (Caponetto *et al.*, 2000).

محیط گلخانه تحت تأثیر متغیرهای مختلف در داخل و خارج، شرایطی کاملاً ناپایدار دارد و به‌طور پیوسته تغییر می‌کند به‌طوری‌که کنترل بهینه این شرایط، فرآیندی پیچیده و پرهزینه است (Moreton & Rowley, 2012). در دستیابی به بهترین و کارآمدترین محیط رشد، کنترل دقیق شرایط محیط گلخانه‌ای حیاتی است. منطق فازی با هدف بررسی تجربیات غیرمستقیم دانش و استدلال به زبان انسان نزدیک است. منطق فازی یک قانون کنترلی را که اغلب مؤثر و مستقل از تحولات نظری عمده است، فراهم می‌کند. در واقع، کنترل‌کننده‌های فازی عملکرد قوی‌تری نسبت به تکنیک‌های سنتی دارند، و در شرایطی که نمونه ریاضی این فرآیند به خوبی شناخته نشده و یا زمانی که رفتار فرایند غیرخطی متفاوت است، با توجه به تجارب و تسهیل مدیریت شرایط آب و هوایی گلخانه‌های مدرن، دانش زبانی در مورد چگونگی کنترل یک فرآیند غیرخطی مانند گلخانه، ارائه می‌کند (Patil & Digambar, 2010). امید و شفیع، برای یک گلخانه به ابعاد ۴×۲ متر، و به منظور کنترل بهینه دما، رطوبت و نیز تثبیت

دی‌اکسیدکربن و آبیاری، تجهیزات کنترلی را طراحی کرده و ساخته‌اند (Omid & Shafaei, 2005). وانگ و همکاران با ترکیب فازی و شبکه عصبی یک روش کنترلی را برای محیط گلخانه معرفی کرده‌اند (Wang & Cheng, 2006). آزمایش‌ها نشان داده است که این روش کنترلی نه تنها می‌تواند شرایط فازی و عدم قطعیت محیط گلخانه را انجام دهد، بلکه پایداری و ثبات خوبی نیز دارد. سریرامن و مایورگا (Sriraman & Mayorga, 2007) برای کنترل عوامل آب و هوای گلخانه، از یک کنترل‌کننده‌ی هوشمند فازی ممدانی استفاده کرده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که این کنترل‌کننده‌ی هوشمند برای استفاده و طراحی بسیار آسان و وفق پذیر است و همچنین سریع اجرا می‌شود و ظرفیت کمی از فضای حافظه را اشغال می‌کند. ترابلسی و همکاران (Trabelsi *et al.*, 2007) برای حل غیرخطی دینامیکی شرایط محیطی گلخانه، یک مدل فازی تاکاگی-سوگنو (T-S) ارائه داده و پایداری کنترل فازی را تحلیل کرده‌اند. مارکوز و همکاران با استفاده از اندازه‌گیری متغیرهای آب و هوایی یک گلخانه، برای دمای داخلی یک مدل فازی ارائه داده‌اند (Márquez-Vera *et al.*, 2016). ریم‌بن و همکاران برای محیط داخل گلخانه یک کنترل‌کننده منطقی فازی طراحی کرده‌اند؛ نتایج شبیه‌سازی اثربخشی مدل پویای پیشنهاد شده را برای بررسی دمای هوا و رطوبت نسبی نشان می‌دهد (Ben *et al.*, 2018). وانگ و زانگ (Wang & Zhang, 2018) در تحقیقی از روش کنترل فازی تطبیقی برای باز کردن دریچه‌های هوا به منظور کنترل دمای گلخانه محصول گوجه‌فرنگی استفاده کرده‌اند؛ نتایج نشان داده‌است که روش فازی به اندازه کافی دریچه‌های هوا را می‌تواند کنترل کند. در تحقیقات گذشته به علت پیچیدگی عوامل تأثیرگذار در گلخانه کنترل‌کننده‌ها هم‌زمان تمام شرایط محیطی را کنترل نمی‌کردند به علاوه دما و رطوبت تنظیم‌شده برای شب و روز یکسان بوده است. در این تحقیق سعی شده که دما، رطوبت و دی‌اکسیدکربن گلخانه در یک سامانه فازی به‌طور هم‌زمان کنترل شوند. هدف از این تحقیق طراحی و ساخت یک سامانه کنترلی هوشمند فازی برای یک واحد گلخانه‌ی تحقیقاتی است که قابلیت اندازه‌گیری، کنترل و پایش شرایط محیطی گلخانه را داشته‌باشد. متغیرهای کنترلی داخل گلخانه شامل دمای هوا، رطوبت نسبی محیط، میزان دی‌اکسیدکربن هوا به‌طور دقیق اندازه‌گیری

۱۳۶۹ متر است. اطلاعات هواشناسی این منطقه به صورت، کمینه دما 12°C - و بیشینه سرعت هوا 90 km/h است.

جدول ۱- ابعاد و مشخصات گلخانه ساخته شده

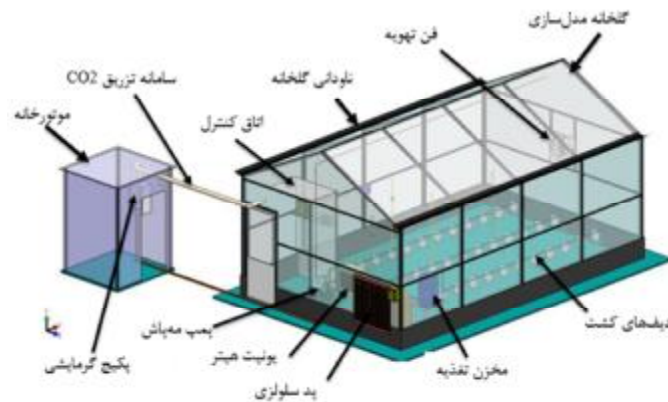
آهن گالوانیزه با سقف A شکل از نوع پیچ و مهره‌ای	نوع گلخانه
پلی کربنات دولایه (Anti-UVin on layer)	نوع پوشش
$2/44\text{ Kcal / h m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$	ضریب انتقال حرارت پوشش
۵m	عرض دهانه گلخانه
۸m	طول گلخانه
۲m	فاصله ستون‌ها
۲m	ارتفاع ستون‌ها
۳m	ارتفاع نهایی

شده و نمایش داده می‌شوند و توسط عملگرهایی (سامانه گرمایش، سامانه سرمایش، سامانه آبیاری، تنظیم دی‌اکسیدکربن، تهویه و تنظیم رطوبت) کنترل می‌شوند. به‌علاوه با توجه به نیاز متفاوت گیاه در شب، قوانین روز و شب متفاوت تعریف شده است.

مواد و روش‌ها

ساخت و نصب تجهیزات گلخانه

گلخانه تحقیقاتی مورد استفاده در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس ساخته شده است. گلخانه در 51° درجه و 10° دقیقه طول شرقی و 35° درجه و 44° دقیقه عرض شمالی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد



شکل ۱- مدل‌سازی گلخانه با نرم‌افزار سالدورکس

ظرفیت‌های مختلف دارای دمپرهای مناسب جهت هدایت هوا استفاده شد. یونیت‌هیتر دارای سه وضعیت خاموش (off)، دور کند (slow) (HS) و دور تند (Fast) (HF) است. دمای پکیج گرمایش (Temperature Wall-hung Gas boiler) از 40°C درجه سلسیوس تا 80°C درجه سلسیوس تغییر می‌کند. در این پژوهش از یک استپ موتور برای کنترل خودکار دمای پکیج استفاده شده است. دماهای ورودی یونیت‌هیتر به صورت $(T1=40, T2=60, T3=80)$ است.

سیستم خنک‌کننده گلخانه تحقیقاتی مورد مطالعه، سیستم پد (Cooling Pad) است. در طراحی سیستم فن پد، حجم هوای تبدالی یا شدت جریان هوا بر حسب مترمکعب بر دقیقه به ازای واحد سطح گلخانه، درجه حرارت موجود و مطلوب گلخانه، محل استقرار هواسازها و پدها و فاصله بین پدها و هواسازها محاسبه شده است

سیستم‌های حرارتی و برودتی

با توجه به محاسبات انجام شده در مورد بار حرارتی، سرمایش و تهویه لازم، تجهیزات مربوط نصب شد. در این پژوهش برای گلخانه تحقیقاتی با مساحت 40 m^2 (با فضایی به حجم 100 m^3) بار سرمایش و گرمایش برای محصول خیار در نظر گرفته شده است. ظرفیت سامانه گرمایشی برای تأمین نیاز گرمایشی گلخانه در سردترین شب سال 10000 کیلوکالری بر ساعت محاسبه شده است (Momeni et al., 2016). در این تحقیق برای تأمین گرمای مورد نیاز از پکیج با ظرفیت حرارتی ورودی kw 26 ، راندمان حرارتی 91% و حداکثر دمای آب مدار گرمایش 80°C و یونیت‌هیتر (unit Hitter)، آب گرم با ظرفیت حرارتی 63000 BTU/h الی 82000 BTU/h ، با میزان ظرفیت هوادهی 1350 CFM الی 2100 CFM و نصب موتورهای 900 یا 1400 دور جهت دستیابی به

است. برای جلوگیری از چکه کردن سیستم مه‌پاش بعد از قطع‌شدن توسط سیستم کنترلی یک شیر برقی ۱/۲ استفاده شد (Arbel et al., 2003). با تنظیمات مربوط به سیستم تأمین رطوبت کنترل فاز، عملگر مربوط به سیستم تأمین رطوبت می‌تواند فعال (on) یا غیرفعال (off) شود و نیز درصد رطوبت دلخواه محیط برای روشن کردن سیستم تأمین رطوبت تعیین گردد.

سامانه تزریق دی‌اکسیدکربن

مقدار دی‌اکسیدکربن موجود در هوا ۰/۳ درصد و یا حدود ۳۰۰ ppm بوده که برای فتوسنتز کافی است؛ ولی در زمستان به علت مسدود بودن گلخانه با محیط بیرون به کمترین مقدار خود می‌رسد. حد مطلوب مقدار دی‌اکسیدکربن بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ ppm است (حسن‌دخت، ۱۳۸۶) که در صورت پایین آمدن سطح آن، سامانه‌ی تزریق دی‌اکسیدکربن، این افت را جبران می‌کند. این سامانه در صورت نیاز خروجی پکیج گرمایشی را به‌وسیله یک سرو موتور دنده فلزی ایمکس مدل ES08MA به سمت گلخانه هدایت می‌کند.

حسگرها

حسگرهای استفاده شده در ساخت این سامانه شامل حسگرهای دما، رطوبت داخل و خارج گلخانه، حسگر نور داخل و خارج گلخانه و حسگر دی‌اکسیدکربن است (شکل ۲).

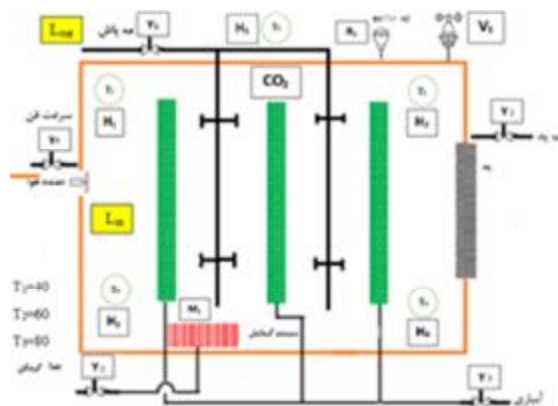
(Montazeri et al., 2019). از یک پمپ برای راه‌اندازی خنک‌کاری پد در دو وضعیت روشن (on) و خاموش (off) استفاده شد.

تهویه گلخانه

تهویه به فرآیند جایگزینی هوای داخل با هوای بیرون گفته شده که برای نیل به سه هدف اصلی انجام می‌شود. ۱. کنترل دما. ۲. کنترل رطوبت (کاهش رطوبت) ۳. تثبیت و تنظیم دی‌اکسیدکربن مورد نیاز گیاه. حداکثر تهویه در فصل تابستان مورد نیاز است (Hasandokht, 2007). به‌طور کلی در تابستان میزان تهویه باید به حدی باشد که در هر دقیقه بین ۱ تا ۱/۵ برابر حجم هوای گلخانه هوا جایگزین شود. این میزان در فصل زمستان به حداکثر ۲۰ تا ۳۰ درصد از حجم هوای گلخانه در دقیقه کاهش می‌یابد. برای سیستم تهویه گلخانه تحقیقاتی از دمنده (Fan) در دو وضعیت خاموش (off) و روشن (on) استفاده شده است.

سیستم تأمین رطوبت

در این تحقیق برای خنک‌کاری و افزایش رطوبت گلخانه از سیستم مه‌پاش (Greenhouse Fogger) استفاده شد. سیستم مه‌پاش دارای دو ردیف مه‌پاش است که بین ردیف‌های کشت نصب شده است. هر ردیف دارای ۳ نازل با فاصله‌های دو متر است. از یک الکتروپمپ با مشخصات توان ۰/۵ hp، دور ۲۸۰۰ RPM و دبی تا ۳۵ L/min و یک کلید اتوماتیک پمپ آب استریم مدل PC-19A به‌منظور استارت پمپ هنگام مصرف آب استفاده شده



شکل ۲- بلوک دیاگرام شماتیکی گلخانه تحقیقاتی

حسگر دما و رطوبت داخل و خارج گلخانه

با توجه به شکل ۲، T1 تا T4 دمای داخل و T5 دمای خارج گلخانه، H1 تا H4 میزان رطوبت داخل و H5 میزان رطوبت خارج گلخانه را اندازه‌گیری می‌کنند. حسگر دما و رطوبت استفاده شده در این تحقیق از نوع DHT22 است. حسگر DHT22 که با نام AM2302 نیز شناخته می‌شود یکی از معروف‌ترین حسگرهای سنجش دما و رطوبت بوده که خروجی دیجیتال تک سیم کالیبره شده با دقت بالا دارد. AM2302 قابلیت ارسال اطلاعات تا برد ۱۰۰ متر را داراست. بازه‌ی اندازه‌گیری رطوبت بین صفر تا ۱۰۰٪، با رزولوشن رطوبت ۵٪ تا ۲٪ و پاسخگویی رطوبت ۲ ثانیه است، بازه‌ی اندازه‌گیری دمای بین $^{\circ}\text{C} -40$ تا $^{\circ}\text{C} 125$ با رزولوشن $^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ و پاسخگویی ۲ ثانیه است.

حسگر دی‌اکسیدکربن (CO2)

حسگر دی‌اکسیدکربن K30 برای اندازه‌گیری مقدار گاز دی‌اکسیدکربن (CO2) یا گازکربنیک هوا به کار می‌رود. حسگر K30 ساخت شرکت senseair از کشور سوئد است. محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (ppm)، دقت اندازه‌گیری $\pm 3\%$ پی‌پی‌ام، دمای کارکرد ۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵-۹۵٪ و خروجی آنالوگ ۰-۵ ولت کاملاً خطی است. حسگر گاز CO2 در داخل یک جعبه به همراه یک فن برای یکنواختی جریان هوا قرار داده شد.

حسگر نور

برای اندازه‌گیری میزان نور داخل و خارج از ماژول حسگر نور (GY-302 BH1750 Digital light intensity detection) نور GY-302 استفاده شده است. محدوده خروجی داده روشنایی ۰ - ۶۵۵۳۵ لوکس و خروجی آن به صورت دیجیتال است. حسگرهای (L_{in}) و (L_{out}) برای اندازه‌گیری میزان تشعشع خورشید در داخل و خارج گلخانه نصب شد (شکل ۲). حسگر قبل از استفاده، کالیبره و ارزیابی شد.

طراحی سامانه برد کنترلی

برد سامانه کنترلی شامل برد منبع تغذیه، برد ورودی حسگرها، برد رله‌ها و برد پردازشگر اصلی است. این برد ابتدا با برنامه ++C نوشته و سپس توسط برنامه پروتئوس شبیه‌سازی و ساخته شد.

اجزای سامانه برد کنترلی

برد منبع تغذیه خطی: کار این برد تبدیل ولتاژ AC به ولتاژ ۵ ولت و ۶ آمپر DC برای استفاده حسگرها و میکروکنترلر است. از یک ترانس کاهنده ولتاژ برای ولتاژ ۲۲۰ ولت AC به ۵ ولت DC استفاده شده است.

برد رله‌ها: این برد برای قطع و وصل کردن عملگرها شامل عملگر یونیت‌هیتر، پد سرمایشی، مه‌پاش، فن هوا، سرو موتور پکیج و سرو موتور سامانه تزریق CO2 هست که فرمان از میکروکنترلر توسط سامانه فازی صادر می‌شود. جریان و ولتاژ کنتاکتورهای قدرت به ترتیب ۱۰ آمپر و ۲۵۰ ولت است.

برد پردازشگر اصلی: در پردازشگر اصلی از یک میکروکنترلر ATmega32 استفاده شده است. این برد خروجی حسگرهای دما، رطوبت، نور و دی‌اکسیدکربن را می‌خواند و وظیفه‌ی اتصال usb از برد به کامپیوتر را برای ارسال داده‌ها به برنامه فازی و اعمال فرمان‌های مناسب را به برد رله جهت قطع و وصل کردن عملگرهای سامانه کنترلی به عهده دارد. همچنین یکی دیگر از وظایف این برد اتصال صفحه‌کلید نمایشگر LCD کارکتری (4x20) است که سامانه کنترلی را در حالت فازی یا حالت دستی می‌تواند تنظیم کند. نمایشگر LCD داده‌های مربوط به حسگرهای دما، رطوبت، نور داخل و بیرون و میزان دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد.

برد ورودی حسگرها: برد شامل اتصال پنج حسگر دما و رطوبت DHT22، دو عدد حسگر نور GY_302 و یک عدد حسگر دی‌اکسیدکربن K30 است. طول کابل قابل استفاده برای حسگرهای نور و دی‌اکسیدکربن ۷۰ سانتی‌متر است. به منظور افزایش طول کابل از یک منبع جریان آینه‌ای برای تقویت و افزایش طول سیم حسگرها استفاده شد.

توسعه سامانه کنترلی فازی برای کنترل شرایط محیطی

در این تحقیق شرایط محیطی گلخانه شامل: دما، رطوبت و دی‌اکسیدکربن کنترل می‌شود. طراحی یک کنترل‌کننده‌ی فازی با انتخاب متغیرهای زبانی، وضعیت فرآیند، متغیرهای ورودی و خروجی آغاز می‌شود. گام بعدی، انتخاب مجموعه‌ای از قوانین زبانی و نوع فرآیند استدلالی فازی است. یک‌بار قوانین تنظیم می‌شود، پس از استنتاج، باید مجموعه فازی و مقدار خروجی تعیین و یک

نسبتاً زیاد "۲۱-۲۵ °C" (Temperature Small Heat) (TSH)، زیاد "۲۵-۳۰ °C" (Temperature Heat (TH))، خیلی زیاد" بالاتر از ۳۰ °C" (Temperature Very Heat) (TVH).

رطوبت مورد نیاز خیار: بهینه‌ترین رطوبت ۷۵٪ است. خیلی کم "کمتر از ۶۰٪" (Humidity Very Low (HVL))، کم "۶۰-۷۰٪" (Humidity Low (HL))، رطوبت مطلوب "۷۰-۸۰٪" (Humidity Good (HGOOD))، زیاد "۹۰-۸۰٪" (Humidity High (HH))، خیلی زیاد "بیشتر از ۹۰٪" (Humidity Very High (HVH)).

بر اساس اینکه دمای مورد نیاز گیاه در طول شب و روز متفاوت است، قوانین نوشته شده در کنترل فازی نیز متفاوت خواهد بود. در سیستم طراحی شده برای تشخیص روز و شب از یک حسگر نور که در بیرون گلخانه نصب شده، استفاده می‌شود.

تعیین ورودی و خروجی‌های کنترل کننده

برای قرار گرفتن شرایط اقلیم گلخانه در مراحل مختلف رشد گیاه خیار، سامانه کنترلی گلخانه با استفاده از کنترل فازی طراحی و پیاده‌سازی شد. هدف از این سامانه کنترل دما، رطوبت و مقدار CO₂ است. قوانین فازی از دو قسمت مقدمه و نتیجه تشکیل شده‌اند. ورودی‌های سامانه شرایط محیطی هستند که پس از فازی‌سازی وارد پایگاه قواعد فازی می‌شوند. شکل ۳ بلوک دیاگرام سامانه کنترل فازی طراحی شده را نشان می‌دهد. تمام داده‌های مربوط به حسگرها هر ۵ ثانیه یک‌بار به صورت فایل متن و اکسل ذخیره می‌شود (شکل ۴). در این صفحه نمایشگر یک قسمت برای نقطه تنظیم (Set point) نور جهت تشخیص روز و شب است. همچنین برنامه نوشته شده قابلیت اجرا به صورت دستی و اتوماتیک فازی را دارد.

استراتژی غیرفازی ایجاد شود. قوانین به دست آمده در این تحقیق با توجه به دیاگرام رشد خیار حاصل شده است.

جمع‌آوری داده‌ها

در مرحله اول طراحی کنترل فازی با توجه به کشت هیدروپونیک خیار، اطلاعات مربوط به دمای مطلوب، حداکثر و حداقل دمای مورد نیاز گیاه با استفاده از دیاگرام رشد گیاه استخراج شد (Janoudi et al., 1993).

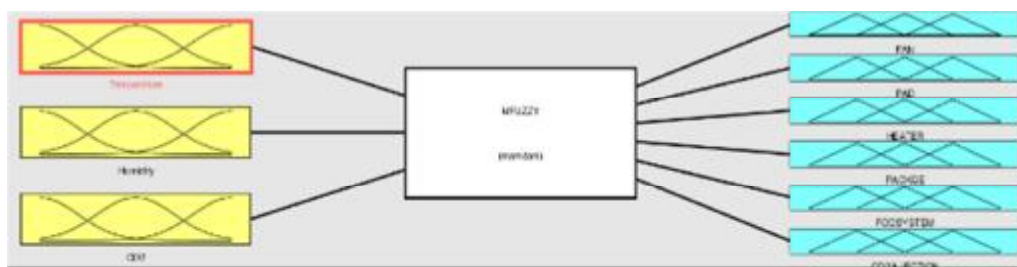
میزان دما و رطوبت خیار در طول روز

بهینه‌ترین دما برای رشد خیار در روز ۲۵ درجه سلسیوس است. با توجه به منحنی‌های نرخ رشد، بازه‌های فازی دمای گیاه خیار در طول روز به صورت زیر تعریف شد.

خیلی کم "کمتر از ۱۵ °C" (Temperature Very Cold) (TVCOLD)، کم "۱۵-۲۰ °C" (Temperature Cold) (TCOLD)، تقریباً کم "۲۰-۲۴ °C" (Temperature Good) (TCOOL)، دمای مطلوب در روز ۲۵ درجه سلسیوس "۲۴-۲۶ °C" (Temperature Good (TGOOD))، نسبتاً زیاد "۲۶-۳۰ °C" (Temperature Small Heat (TSH))، خیلی زیاد "۳۰-۳۵ °C" (Temperature Heat (TH))، خیلی زیاد" بالاتر از ۳۵ °C" (Temperature Very Heat) (TVH).

دمای مورد نیاز خیار در شب: بهینه‌ترین دما ۲۰ درجه سلسیوس است. با توجه به منحنی‌های نرخ رشد، بازه‌های فازی دمای گیاه خیار در طول شب به صورت زیر تعریف شد.

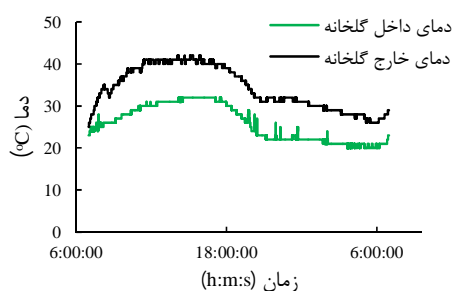
خیلی کم "کمتر از ۱۰ °C" (Temperature Very Cold) (TVCOLD)، کم "۱۰-۱۵ °C" (Temperature Cold) (TCOLD)، تقریباً کم "۱۵-۱۹ °C" (Temperature) (TCOOL)، دمای مطلوب در شب ۲۰ درجه سلسیوس "۱۹-۲۱ °C" (Temperature Good (TGOOD)).



شکل ۳- سیستم کنترل فازی



شکل ۵- آماده سازی بستر و کشت هیدروپونیک خیار

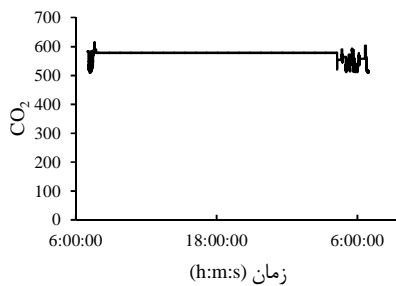


شکل ۶- دمای خارج و داخل گلخانه در طول شبانه روز

برای تأمین رطوبت در گلخانه، حد بالای رطوبت نسبی محیط ۷۵٪ اعمال شد. با کمتر شدن رطوبت نسبی، دستگاه کنترل فاز فرمان روشن شدن پد و سپس مه‌پاش را به کنتاکتور صادر کرده و کنتاکتور عملگرها را روشن می‌کند. همچنین، با بیشتر شدن رطوبت نسبی، سیستم مه‌پاش خاموش می‌شود. در مواقعی رطوبت از حد مطلوب بالاتر می‌رود که این بالا رفتن به علت اولویت سامانه کنترل فاز در تنظیم دمای گلخانه نسبت به رطوبت است. شکل ۷ تغییرات رطوبت نسبی محیط داخل و خارج گلخانه را در طول روز و نیز وضعیت عملکرد سیستم تولید رطوبت را نشان می‌دهد. در حالت کنترل فاز ضریب تغییرات رطوبت روز و شب به ترتیب ۱۹/۸۲ و ۲۶/۶۲ به دست آمد. اختلاف رطوبت زیادی بین رطوبت داخل و خارج گلخانه مشاهده می‌شود. میانگین رطوبت داخل گلخانه در روز و شب به ترتیب ۶۰/۱۸٪ و ۶۵/۷۰٪ و میانگین رطوبت خارج گلخانه در روز ۲۴/۷۷٪ و در شب ۲۶/۳٪ ثبت شد. اختلاف مقدار رطوبت داخل گلخانه در روز نسبت به رطوبت مطلوب ۱۴/۸۲٪ و در شب ۹/۳٪ است. در حالت کنترل معمولی اختلاف رطوبت داخل گلخانه در روز نسبت به رطوبت مطلوب ۲۳/۶۵٪ و در شب

نتایج و بحث

هدف اصلی از انجام این تحقیق، طراحی و ساخت سامانه کنترل فاز شرایط محیطی گلخانه هیدروپونیک کشت خیار است. بعد از طراحی و ساخت گلخانه و نصب و راه‌اندازی حسگرها و عملگرها، سامانه کنترل فاز مورد ارزیابی قرار گرفت. عوامل محیطی مانند نور، دما، رطوبت نسبی و گازکربنیک در گلخانه‌ها بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند و ممکن است تغییر در شرایط و مقدار یک عامل تغییر در عوامل دیگر را به دنبال داشته باشد. شکل ۶ تغییرات دمای محیط داخل و خارج گلخانه را در طول شبانه‌روز و نیز وضعیت عملکرد سیستم کنترل فاز را نشان می‌دهد. در حالت فاز کمترین اختلاف بین دمای گلخانه و دمای مطلوب مشاهده شد. این اختلاف دما به دلیل گرم بودن زیاد هوا در ماه‌های داده‌برداری بوده است. در این حالت ضریب تغییرات دمای روز و شب به ترتیب ۱۶/۶۵ و ۸/۲۹ است. اختلاف دمایی زیادی بین دمای روز و شب، داخل و خارج گلخانه مشاهده می‌شود. بیشینه دمای داخل در روز ۳۲°C و کمینه دما در شب ۲۰°C، بیشینه دمای روز در خارج گلخانه ۴۲°C و کمینه دما در شب در خارج گلخانه ۲۱°C ثبت شد. مقدار بیشترین اختلاف دما داخل گلخانه در روز نسبت به دمای مطلوب ۶°C و مقدار اختلاف کمترین دما در شب نسبت به دمای مطلوب ۰°C است. در حالت کنترل دستی اختلاف دما داخل گلخانه در روز نسبت به دمای مطلوب ۱۵°C و در شب این اختلاف ۴°C است. در حالت فاز نسبت به حالت کنترل معمولی اختلاف دمای داخل گلخانه در روز ۹°C کاهش و در شب ۴°C کاهش یافت.



شکل ۹- تغییرات مقدار دی‌اکسیدکربن گلخانه در طول شبانه روز

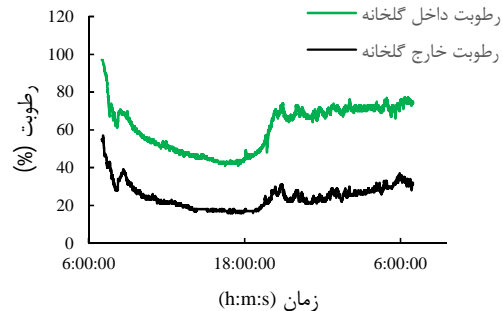
در پژوهشی نتایج حاصل از شبیه‌سازی سامانه کنترل فازی در گلخانه در منطقه خشک نشان داده است که بیشترین مقادیر دما در فصل بهار و تابستان در محدوده‌ی ۲۰ تا ۲۸ درجه سلسیوس به دست آمده که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد (Didi *et al.*, 1993).

Zarei & Azizi (2016) دستگاه مرکزی برای کنترل شرایط اقلیم گلخانه طراحی کردند و توانستند دما، رطوبت و میزان دی‌اکسیدکربن را به ترتیب در بازه‌های ۲۲ تا ۲۹ درجه سلسیوس، ۳۵ تا ۵۵ درصد و ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ پی‌پی‌ام تنظیم کنند.

مصرف انرژی

تولیدکنندگان محصولات گلخانه‌ای عمدتاً مشکلات عدیده‌ای در بهره‌برداری بهینه از انرژی مصرفی در گلخانه‌ها دارند و حذف یارانه حامل‌های انرژی نیز مشکلات اقتصادی آن‌ها را دو چندان کرده است. در تحقیق حاضر مقدار انرژی مصرفی در دوره کشت خیار با اندازه‌گیری روزانه محاسبه شد. مصرف کل انرژی الکتریسیته در دوره کشت هیدروپونیک خیار ۱۱/۹۱۲ کیلووات ساعت به دست آمد. بیشترین مصرف انرژی ۰/۱۲۱ کیلووات ساعت مربوط به ماه خرداد است. به صورت میانگین در سامانه کنترل فازی برای هر روز ۰/۰۹۸ کیلووات ساعت انرژی مصرف شده است. مصرف کل انرژی سوخت در دوره کشت هیدروپونیک خیار ۱۸۴/۶ مترمکعب به دست آمد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقدار انرژی مصرفی را در طول دوره کشت نشان می‌دهد.

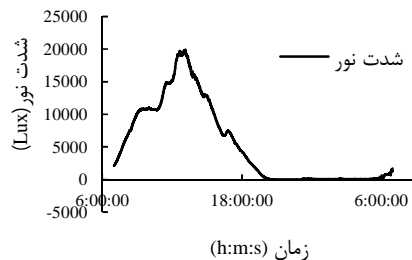
۶/۴۳٪ است. سامانه کنترل فازی مقدار اختلاف رطوبت داخل گلخانه را نسبت به رطوبت مطلوب ۸/۸۳٪ کاهش و در شب ۲/۸۷٪ افزایش داد.



شکل ۷- رطوبت نسبی خارج و داخل گلخانه در طول شبانه روز

میزان نور محیط خارج گلخانه

شکل ۸ مقدار تغییرات نور محیط را در طول روز نشان می‌دهد. بیشترین مقدار نور در روز ۱۹۷۶۵ لوکس گزارش شد.

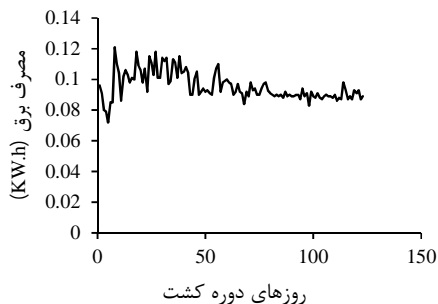
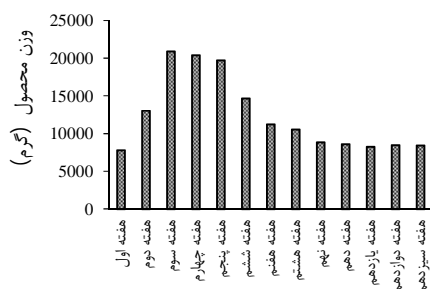


شکل ۸- تغییرات مقدار نور در طول شبانه روز

تهویه و کنترل دی‌اکسیدکربن محیط

مقدار مطلوب گاز دی‌اکسیدکربن که برای سامانه فازی با تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شده، ۶۰۰ ppm است. قوانین فازی به این صورت است که چنانچه روز باشد و CO_2 کمتر از حد مطلوب باشد سامانه تزریق دی‌اکسیدکربن این کمبود را جبران کند و با بیشتر شدن غلظت این گاز در داخل سامانه کنترل فازی فرمان روشن شدن سیستم تهویه را به کنتاکتور صادر کرده تا مقدار را کاهش دهد. شکل ۹ روند تغییرات دی‌اکسیدکربن را در طول روز در گلخانه نشان می‌دهد. سامانه کنترل فازی به خوبی توانسته است مقدار دی‌اکسیدکربن را کنترل کند.

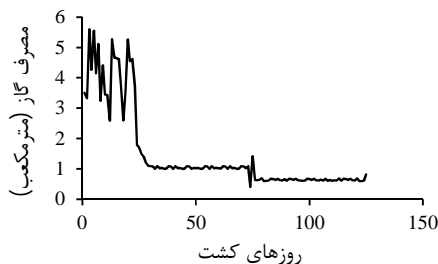
عملکرد مربوط به هفته اول به میزان $7/831$ کیلوگرم است. عملکرد کل گلخانه $181/389$ کیلوگرم گزارش شد.



شکل ۱۰- مصرف انرژی الکتریسیته در کل دوره کشت هیدروپونیک

شکل ۱۲- عملکرد کشت هیدروپونیک خیار در طول دوره برداشت

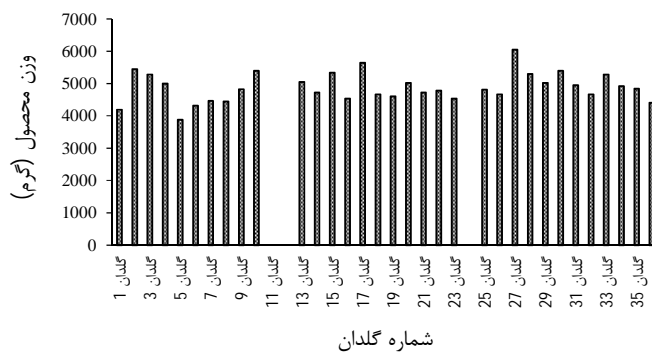
در شکل ۱۳ عملکرد هر گلدان به صورت جداگانه در طول دوره برداشت آمده است. متوسط عملکرد هر گلدان $5/49$ کیلوگرم به دست آمد. اسفنجاری کناری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به بررسی کارایی مصرف انرژی در گلخانه‌های تولید خیار استان تهران پرداختند که انرژی مصرفی سوختی $1985/56$ لیتر و انرژی الکتریسیته مصرفی برای سامانه سرمایشی، تهویه و پمپ $kW.h$ $1478/26$ را به دست آوردند. همچنین مقدار محصول تولیدی خیار را $100798/24$ کیلوگرم برای هر هکتار گزارش کرده‌اند.



شکل ۱۱- مصرف گاز در کل دوره کشت هیدروپونیک

عملکرد کشت هیدروپونیک خیار

یکی از اهداف این تحقیق به دست آوردن عملکرد کشت هیدروپونیک خیار بوده است. عملکرد خیار در طول دوره به صورت هفته‌ای اندازه‌گیری شد. شکل ۱۲ عملکرد هفته‌های مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین عملکرد مربوط به هفته سوم به مقدار $20/930$ کیلوگرم و کمترین



شکل ۱۳- عملکرد گلدان‌های مختلف کشت هیدروپونیک خیار

مقدار دی‌اکسیدکربن را در حد مطلوب، با موفقیت می‌تواند کنترل کند. نتایج نشان داد علاوه بر بهینه شدن مصرف انرژی عملکرد محصول نیز کاهش نیافته است. برنامه کنترل‌کننده مبتنی بر برنامه منطقی فازی با پایگاه

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ارزیابی سامانه کنترل فازی طراحی و ساخته شده در یک گلخانه هیدروپونیک خیار نشان داد این سامانه به خوبی دمای گلخانه، رطوبت نسبی محیط و

- greenhouses: measurement and models comparison, *Agric. For. Meteorol*, 58: 43-62.
12. Kashi, A. 1998. Public vegetable cultivation. University of Tehran Publications. 188 p. (In Farsi)
 13. Körner, O. and Challa, H. 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops, *Comput. Electron. Agric.*, 39(3): 173-192.
 14. Márquez-Vera, M. A. Ramos-Fernández, J. C. Cerecero-Natale, L. F. Lafont, F. Balmat, J. F. and Esparza-Villanueva, J. I. 2016. Temperature Control in a MISO Greenhouse by Inverting its Fuzzy Model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124: 168-174.
 15. Momeni, D. Banakar, A. Ghobadian, B. and Minaei, S. 2016. Design, manufacturing and evaluation of a solar heating system with Fresnel concentrator for greenhouse. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 25: 59-69. (In Farsi)
 16. Montazeri, M. Banakar, H. Ghobadian, B. and Pashdarshahri, H. 2019. Evaluation of direct evaporative cooling system (fan-pad) in greenhouse under different environmental conditions. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 8: 107-116. (In Farsi)
 17. Moreton, O. R. and Rowley, P. N. 2012. The Feasibility of Biomass CHP as an Energy and CO₂ Source for Commercial Glasshouses. *Applied Energy*, 96: 339-346.
 18. Omid, M. and Shafaei A. 2005. Temperature and relative humidity changes inside greenhouse. *Int. Agrophysics*, 19: 324-335.
 19. Patil, S. B. and Digambar, D. S. 2010. Implementation of Fuzzy Logic Controller in Greenhouse Automation, *Interscience Management Review (IMR)*, 2(1): 11-14.
 20. Sriraman, A. and Mayorga, R. V. 2007. Climate Control inside a Greenhouse: An Intelligence System Approach using Fuzzy Logic Programming. *Journal of Environmental Informatics*, 10(2): 68-74.
 21. Stanghellini, C. and De Jong, T. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse, *Agric. For. Meteorol*, 76(2): 129-148.
 22. Trabelsi, A. Lafont, F. Kamoun, M. and Enea, G. 2007. Fuzzy Identification of a Greenhouse. *Applied Soft Computing Journal*, 7(3): 1092-1101.
 23. Wang, L. and Zhang, H. 2018. An adaptive fuzzy hierarchical control for maintaining solar greenhouse temperature. *Comput. Electron. Agric.* 155: 251-256.
 24. Wang, Z. Y. and Cheng, L. 2006. Research قوانین است؛ بنابراین طراحی برنامه کنترل برای هر نوع شرایط محیطی گلخانه‌ای قابل اجراست. برنامه کنترل‌کننده را برای هر برنامه گلخانه‌ای موجود می‌توان اصلاح و اعمال کرد.
- منابع**
1. Arbel, A. Barak, M. and Shklyar, A. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses, *Biosys. Eng.*, 84: 45-55.
 2. Baker, J. C. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.), *J. Hortic. Sci.*, 65: 323-331.
 3. Ben, A. R. Bouadila, S. and Mami, A. 2018. Development of a Fuzzy Logic Controller applied to an agricultural greenhouse experimentally validated. *Appl. Therm. Eng.*, 141: 798-810.
 4. Caponetto, R. Fortuna, L. Nunnari, G. Occhipinti, L. and Xibilia, M. G. 2000. Soft computing for greenhouse climate control, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 8(6): 753-760.
 5. Didi Faouzi, N. Bibi-Triki, B. and Draoui Abène A. 2016. Greenhouse Environmental Control Using Optimized, Modeled and Simulated Fuzzy Logic Controller Technique in MATLAB SIMULINK. *Computer Technology and Application*, 7: 273-286.
 6. Esfanjari kenari, R. Shaabanzadeh, M. Jansouz, P. and Omid, A. 2015. Analysis of Energy Consumption in Greenhouse Cucumber Production (a Case Study, Tehran Province). *Iran P. J. Biosyst. Eng. (IRANIAN J. Agric. Sci.)*, 46: 125-134 (In Farsi)
 7. Ferreira, P. M. Faria, E. A. and Ruano, A. E. 2002. Neural network models in greenhouse air temperature prediction, *Neurocomputing*.
 8. Hasandokht, M. 2007. Greenhouse Management (Technology of Greenhouse Crop Production). *Marz e Danesh Publication*. 320 p. (In Farsi).
 9. Janoudi, A. K. Widders, I. E. and Flore, J. A. 1993. Water deficits and environmental factors affect photosynthesis in leaves of cucumber (*Cucumis sativus*). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 118: 366-370.
 10. Joliet, O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouse, *J. Agric. Eng.*, 57(1): 23-37.
 11. Joliet, O. and Bailey, B. J. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in

- on Regulatory Device of Greenhouse Based on Fuzzy Control. Zhejiang Daxue Xuebao (Nongye yu shengmin Kexue Ban). Journal of the Zhejiang University – Agriculture and Life Science, 32(2): 195-199.
25. Willits, D. H. and Peet, M. M. 1989. Predicting yield responses to different greenhouse CO₂ enrichment schemes: cucumbers and tomatoes, Agric. For. Meteorol, 44(3-4): 275-293.
26. Willits, D. H. and Peet, M. M. 1993. The effect of evaporative cooling on the efficiency of external greenhouse shade cloths, Paper No. 93-4042, ASAE Meeting Presentation, Spokane, Washington, USA.
27. Zarei, Gh. and Azizi, A. 2016. Design, manufacture and evaluation of central apparatus for greenhouse environmental control. Journal of Greenhouse Culture Science and Technology, 6(4): 47-62 (In Farsi)