کنترل کامپیوتری شرایط محیطی گلخانه: قسمت دوم – آزمون و بررسی عملکرد سیستم[1]

اردشیر شفایی و محمود امید[2]

تاریخ دریافت مقاله: ۸۳/۲/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۳/۱۰/۲۲

چکیده

اخیراً یک سیستم کنترل و مانیتورینگ کامپیوتری شرایط محیطی گلخانه طراحی کرده‌ایم. در این مقاله ابتدا جزئیات مربوط به نحوهٔ طراحی و پیاده سازی بخش مانیتورینگ سیستم ارائه می‌شود و پس از آن دربارهٔ نتایج آزمون عملکرد کل سیستم پیشنهادی بحث و بررسی خواهد شد. واسط گرافیکی کاربر سیستم با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک طراحی و پیاده سازی شده است. با استفاده از کنترل موجود در محیط ویژوال بیسیک، امکان دریافت اطلاعات از پورت سریال کامپیوتر و ارسال فرامین کنترلی به آن فراهم شد. از این طریق، نرم افزار با سخت افزار کنترل مرتبط گردید که یک میکروکنترلر مدل AVR است. این واسط گرافیکی برای نظارت بر کل سیستم توسعه داده شده است تا از طریق آن رفتار حرارتی و رطوبتی درون گلخانه در شرایط مختلف جوی در حالتی که به طور خودکار نظارت و کنترل اوضاع را در دست می‌گیرد، بررسی و تجزیه و تحلیل شود. برای ارزیابی کلی سیستم در تنظیم و تثبیت شرایط محیطی گلخانه آزمایش‌هایی در آذرماه ۱۳۸۲ انجام گرفت. این آزمایش‌ها در دو سری، حالت بدون کنترل و حالت کنترل شده، و در چند نوبت روی سیستم ادامه یافت. نتایج آزمایش‌های سری اول از عملکرد صحیح و کارآیی بالای سیستم حکایت دارد. نتایج آزمایش‌های سری دوم مبین آن است که سیستم پیشنهادی با توجه به تنظیمات از پیش تعیین شدهٔ رطوبت و دما، قادر به تنظیم و تثبیت دما و رطوبت گلخانه از طریق ارسال فرامین مناسب به سیستم‌های عمل کننده در نرم افزار سیستم هست. عملکرد سیستم برای تثبیت دما در تمام آزمایش‌ها بسیار مطلوب و زمان سپری شده برای ثابت نگه داشتن دما در محدوده تنظیمی نسبتاً کوتاه (در حدود ۱۰ دقیقه) است، ولی عملکرد سیستم مه‌پاش در افزایش سریع رطوبت محیط نسبتاً کند (در حدود ۳۰ دقیقه) است. در دقایق آخر یکی از آزمایش‌ها حالت دوم که رطوبت نسبی به نقطهٔ تنظیم خود نزدیک شده بود، دمای درون گلخانه یعنی دمای نواحی مجاور پوشش گلخانه و دمای نواحی نزدیک به ارتفاع گیاه بر هم منطبق شدند که این امر نتیجهٔ مثبت تأثیر رطوبت بالای گلخانه بر توزیع یکنواخت‌تر دمای درون گلخانه را اثبات می‌کند.

واژه‌های کلیدی

اتوماسیون گلخانه، سیستم جمع آوری داده، کنترل دما، کنترل رطوبت، طراحی اینترفیس، مانیتورینگ

۱- برگرفته از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شمارهٔ ۷۱۹/۳/٦۷۱.

۲- به ترتیب کارشناس ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و استادیارگروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی بیوسیستم کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران. تلفن/فکس: ۰۲٦۱-۲۸۰۲۸۳۸. پیام نگار: **omid@ut.ac.ir**

مقدمه

برای اجرای موفقیت آمیز یک سیستم اتوماسیون گلخانه‌ای، ایجاد محیطی تعاملی و آسان برای اپراتور اهمیت بالایی دارد [۱، ۳، و ۵]. سیستم‌های کنترل کامپیوتری، در مقایسه با روش‌های متداول کنترل صنعتی مثل سیستم‌های کنترل مبتنی بر کنترل کننده‌های منطقی برنامه پذیر[1]، از قابلیت‌های زیادتری برخوردارند. عامل اصلی برتری این سیستم‌ها، امکاناتی است که آنها در فاز نرم افزاری سیستم برای فرآیند کنترل فراهم می‌کنند. در این زمینه می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ فرآیند کنترل را در سطوح پیشرفته‌تر به راحتی می‌توان اجرا کرد؛ در این سیستم‌ها طراحی و پیاده سازی الگوریتم‌های پیچیده و استفاده از توابع کنترلی پیشرفته نظیر کنترلر فازی لجیک[2] [۲]، شبکه عصبی مصنوعی[3] و تکنیک‌های بهینه‌سازی مثل الگوریتم ژنتیک [۸] به روش ساده‌تری امکان پذیر است. امکان مانیتورینگ دقیق و اپراتوری ساده از دیگر ویژگی‌های سیستم‌های کنترل کامپیوتری به حساب می‌آید. ضمناً این سیستم‌ها امکانات لازم را برای مانیتورینگ و تجزیه و تحلیل آماری از وضعیت سیستم نیز مهیا می‌کنند. اهمیت این موضوع در مورد سیستم‌های کنترل گسترده و غیر متمرکز، قابل توجه است. استفاده از واسط گرافیکی کاربر[4] (GUI) پیشرفته با امکانات کامل کنترلی و مانیتورینگ، توانایی اپراتور را برای اِعمال نظارت و مدیریت دقیق و صحیح بر عملکرد سیستم افزایش می‌دهد. اپراتور بر حسب مورد می‌تواند مطابق با روال‌های کنترلی پیش بینی شده در برنامه بر روند کنترل نظارت و دخالت کند [٦، ۷، و ۹].

عموماً، شرکت‌های طراح و عرضه کننده سیستم‌های کنترل کامپیوتری صنعتی به همراه سیستم کنترلی، نرم افزار آن را نیز عرضه می‌کنند. در حالت کلی، طراحی نرم افزار مناسب برای محیط گلخانه نیاز به فرآیند برنامه‌نویسی پیشرفته‌ای دارد. در این میان، بعضی از شرکت‌های سازندهٔ تجهیزات و بردهای کنترلی برای تسهیل طراحی نرم افزارهای کنترلی خود به عرضه بسته‌های نرم‌افزاری خاصی روی آورده‌اند. این بسته‌ها قابلیت‌های پیشرفتهٔ برنامه‌نویسی زیادی دارند و با سخت افزارهای کنترلی استاندارد نیز سازگارند. برای مثال، نرم افزار LabView محصول شرکت National Instrument از جمله پیشرفته ترین نرم‌افزار های برنامه نویسی شیء گراست که امکانات برنامه نویسی پیشرفته، مخصوصاً در زمینه فرآیندهای کنترلی را دارد. نرم‌افزار متلب[5] محصول شرکت Mathworks دیگر نرم افزاری است که دارای جعبه ابزارهای مخصوصی در زمینه مانیتوریگ فرآیندهای کنترلی است. از جمله عوامل مهم در ارزیابی و طراحی این سیستم‌ها می‌توان به مواردی از قبیل قابلیت اطمینان سیستم، دقت بالا، کاربر پسند بودن، و کاربری آسان آنها اشاره کرد [۱۰]. این نرم افزارها، به رغم قابلیت اطمینان بالا و به کارگیری گستردهٔ آنها در سیستم‌های کنترل صنعتی، معایبی نیز دارند. به طور کلی، این نرم‌افزارها از انعطاف‌پذیری کمی برخوردارند

1- Programmable Logic Control
2- Fuzzy Logic Controller
3- Artificial Neural Network
4- Graphic User Interface
5- MATLAB

به‌طوری‌که با سخت‌افزارهای مختلف سازگار نیستند و قابلیت توسعه و کاربری مناسبی ندارند. همچنین، آنها بسیار هزینه‌بر هستند به طوری که برای تهیهٔ آنها (مثلاً نسخه اصلی LabView) مشکلاتی نظیر تحریم اقتصادی و مسائل کپی رایت پیش روست.

با توجه به مطالب پیش گفته، در این تحقیق تصمیم به طراحی و پیاده سازی نرم افزار مانیتورینگ برای گلخانهٔ مدل، گرفته شد. در مرور تحقیقات گذشته مشاهده شد که اغلب محققان از نرم افزارهای موجود در بازار نظیر موارد مذکور استفاده کرده‌اند یا حداکثر از برنامه‌ای استفاده کرده‌اند که تحت محیط سیستم عامل داس قابل اجراست [٤]. در این تحقیق ما ضمن طراحی و ساخت گلخانهٔ مدل و سیستم کنترل الکترونیکی برای آن [٦، ٧، و ٩]، کل برنامهٔ سیستم مانیتورینگ گلخانه را که با اغلب سیستم عامل‌های امروزی مایکروسافت (نظیر ویندوز ۲۰۰۰، XP، و غیره) سازگار است طراحی و پیاده کردیم. زبان برنامه‌نویسی استفاده شده ویژوال بیسیک نسخهٔ ٦ است که در حال حاضر یکی از محبوب ترین زبان‌های برنامه نویسی شیء گراست. در این مقاله، ابتدا در بخش مواد و روش‌ها مراحل پیاده سازی الگوریتم‌های کنترل و طراحی GUI بیان می‌شود؛ پس از آن در بخش نتایج و بحث، نتایج حاصل از آزمایش‌ها صورت گرفته روی کل سیستم در جهت ارزیابی و بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

در قسمت اول [٦] مراحل طراحی و ساخت یک گلخانه مدل و نیز بخش‌های سخت افزاری سیستم کنترل الکترونیکی آن به تفصیل بیان شده است. به طور خلاصه، در سیستم پیشنهادی ابتدا داده‌های مربوط به وضعیت محیطی گلخانه با استفاده از سه سنسور دما و یک سنسور رطوبت به یک برد میکروکنترلری منتقل می‌شود. میکروکنترلر، داده‌های دریافتی را به صورت رقمی[1] از طریق پورت سریال RS232 برای نمایشگر جلو اپراتور ارسال می‌کند و همزمان بر حسب مورد ممکن است فرامین کنترلی ارسالی از کامپیوتر را به صورت دستی یا خودکار دریافت کند و متناسب با آنها تجهیزات کنترلی گلخانه (عمل کننده‌ها[2]) را در جهت تأمین شرایط مطلوب، تغییر وضعیت دهد. برای اجرای چنین الگوریتم کنترل و مانیتورینگ پیچیده‌ای، لازم بود برنامه ای مناسب نوشته شود. این نرم افزار، اطلاعات مربوط به سنسورها را از طریق پورت سریال RS232 کامپیوتر دریافت، ذخیره، و به صورت آنلاین و به‌شکل نمودارهای مجزا روی نمایشگر کامپیوتر عرضه می‌کند. این نرم افزار علاوه بر مانیتورینگ اطلاعات وظیفهٔ اجرای الگوریتم‌های کنترلی سیستم گلخانه را نیز به عهده دارد. بدین ترتیب که الگوریتم‌های کنترلی تعریف شده در برنامه با مقایسه و سنجشِ لحظه‌ایِ اطلاعات مربوط به دما و رطوبت نسبی گلخانه، بر حسب مورد فرامین کنترلی مناسب را به برد

1- Digital 2- Actuators

میکروکنترلر ارسال می‌کنند تا میکروکنترلر عمل کننده‌ها را در جهت تأمین شرایط محیطی مورد نظر تغییر وضعیت دهد.

در نرم افزار طراحی شده، امکانات لازم برای کنترل شرایط محیطی گلخانه در دو وضعیت کنترل خودکار و کنترل دستی در نظر گرفته شده است. در حالت اول اپراتور قادر است برای انجام فرآیندهای کنترلی مختلف، تجهیزات مربوطه را شخصاً فعال یا غیر فعال سازد، اما در حالت دوم برنامه بر اساس الگوریتم کنترلی از پیش تعریف شده، فرآیند کنترلی لازم را انتخاب می‌کند و به اجرا در می آورد. چگونگی ارتباط اجزای برنامه در فلوچارت شکل شمارهٔ ۱ نشان داده شده است. متغیرهای کنترلی و فرآیندهای کنترلی مربوط به آنها و نیز عملکرد تجهیزات گلخانه در هر مورد در جدول‌های شمارهٔ ۱ و ۲ خلاصه شده‌اند [۹]. در ادامه، نحوه طراحی و پیاده سازی نرم‌افزار به اختصار توضیح داده می‌شود.

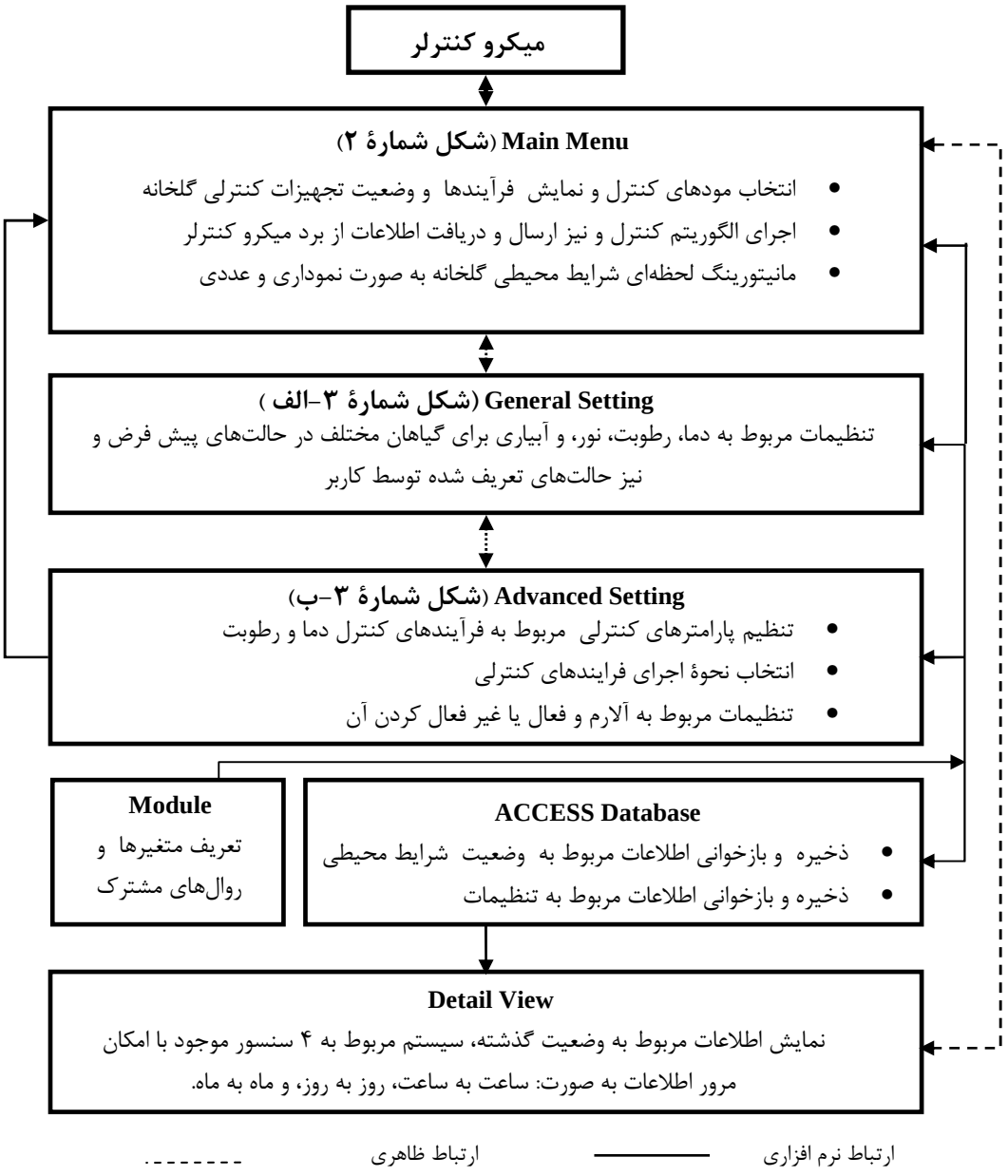
جدول شمارهٔ ۱- فرآیندهای کنترلی و عملکرد تجهیزات گلخانه مربوط به متغیرهای دما و رطوبت

متغیر کنترلی	فرآیند کنترل	هیتر ۱	هیتر ۲	فن ورودی	فن‌های خروجی	دریچهٔ تهویه	شیر کنترل‌های مه‌پاش
دما	گرمایش	روشن مرحله ای	روشن مرحله ای	روشن	خاموش	خاموش	خاموش
	خنک کنندگی زمستانه	خاموش	خاموش	روشن	روشن	روشن	خاموش
	خنک کنندگی تابستانه	خاموش	خاموش	روشن	روشن	روشن	روشن
رطوبت	افزایش رطوبت	خاموش	خاموش	روشن	خاموش	خاموش	روشن
	کاهش رطوبت (تهویه)	خاموش	خاموش	روشن	روشن	روشن	خاموش

جدول شمارهٔ ۲- فرآیندها و عملکرد تجهیزات گلخانه مربوط به تثبیت دی اکسید کربن و یکنواختی دما

متغیر	فرآیند	فن ورودی	فن‌های خروجی	دریچهٔ تهویه*
دی اکسید کربن (تثبیت)	تهویه	روشن	روشن	روشن
دما (یکنواختی)	گردش هوا	روشن	خاموش	خاموش

* در وضعیت روشن، دریچهٔ دارای موتور پشت فن ورودی باز و در وضعیت خاموش بسته می‌شود.



شکل شمارهٔ ۱- نمای شماتیک از اجزای نرم افزار کنترل و مانیتورینگ گلخانه

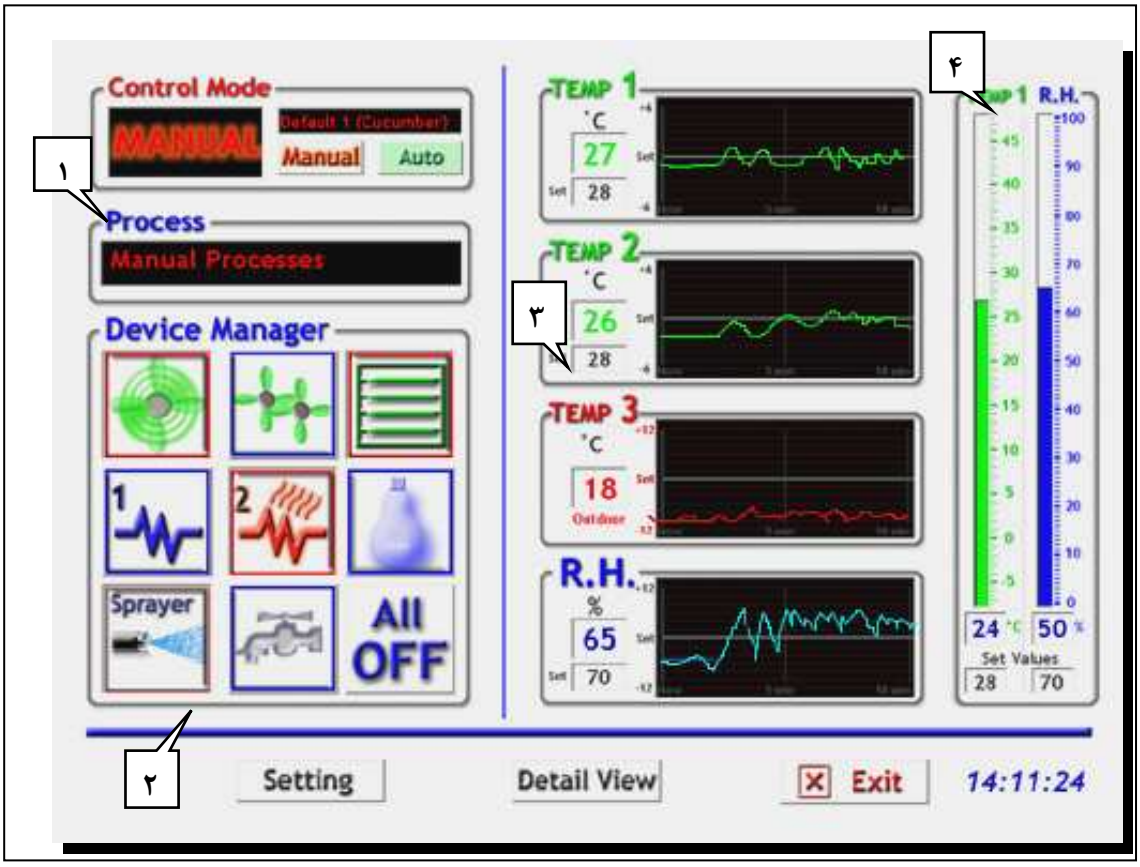
نرم افزار طراحی شده از چهار منو تشکیل شده است که با یکدیگر مرتبط شده‌اند: منوی اصلی، منوی تنظیمات، منوی تنظیمات پیشرفته، و منوی نمایش دقیق. در ادامه، توضیحاتی دربارهٔ منوی اصلی (شکل شمارهٔ ۲) و منوی تنظیمات برنامه (شکل‌های شمارهٔ ۳- الف و ۳- ب) ارائه می‌شود.

همان‌گونه که در شکل شمارهٔ ۲ نشان داده شده است منوی اصلی برنامه شامل دو قسمت است: کنترل و مانیتورینگ. قسمت کنترل آن از سه کادر اصلی تشکیل شده است، در کادرهای شمارهٔ ۱ اپراتور می‌تواند با استفاده از دکمه‌های خودکار و دستی وضعیت کنترل را به‌ترتیب در حالت خودکار یا دستی قرار دهد. ضمناً در اینجا علاوه بر این دکمه‌ها، دو کادر تصویری نیز در نظر گرفته شده است. کادر تصویری اول وضعیت کنترل (خودکار یا دستی) و کادر تصویری دوم تنظیمات انتخابی در وضعیت کنترل خودکار را نشان می‌دهد. فرآیند یا فرآیندهای کنترلی که در حالت کنترل خودکار در حال اجراست در این قسمت نمایش داده می‌شود. کادر شمارهٔ ۲ در حالت کنترل خودکار و کنترل دستی عملکردهای متفاوتی دارد. این کادر در وضعیت کنترل خودکار هنگام اجرای فرآیندهای مختلف، دستگاه‌های مختلف گلخانه مثل فن‌ها، هیترها، دریچهٔ تهویه، مه‌پاش و غیره را (که با ۸ کادر تصویری مجزا نمایش داده شده‌اند) روشن یا خاموش می‌کند. اما در حالت کنترل دستی به جای کادر تصویری، ۹ دکمه تعبیه شده است که اپراتور با فشردن هر یک از آنها می‌تواند دستگاه مربوط را روشن یا خاموش کند. این دکمه‌ها وضعیت دستگاه مربوط را از لحاظ روشن یا خاموش بودن نیز نشان می دهند.

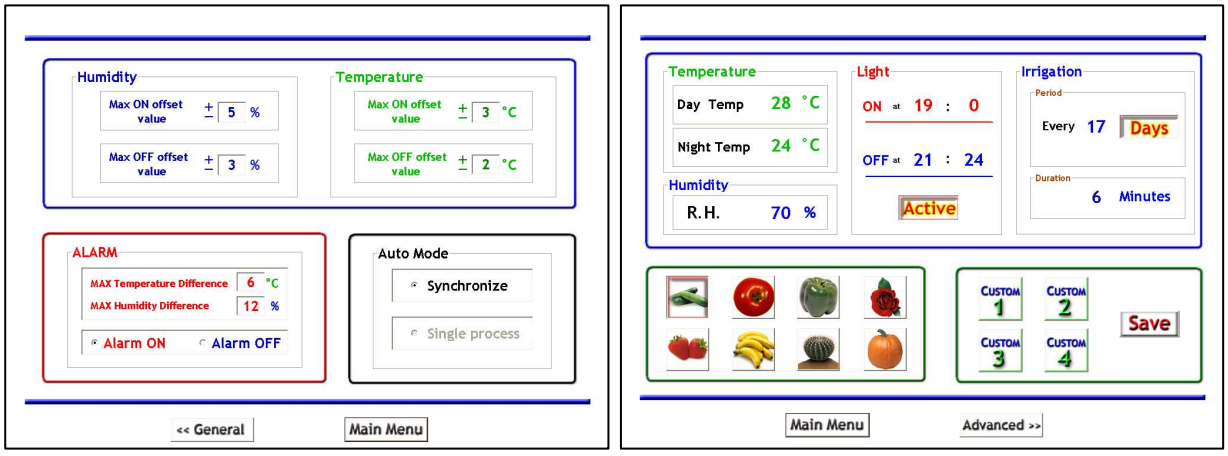
کادرهای با شمارهٔ ۳ و ٤ مربوط به بخش مانیتورینگ لحظه‌ای سیستم هستند. اطلاعات لحظه‌ای مربوط به سه سنسور دما و یک سنسور رطوبت نسبی در این کادرها نمایش داده می‌شوند. در کادرهای شمارهٔ ۳ دما و رطوبت اندازه‌گیری شده با سنسورها در هر لحظه نمایش داده می‌شوند. در این کادرها تغییرات دما و رطوبت از لحظه جاری تا ۱۰ دقیقهٔ قبل از آن، قابل مشاهده است. کادرهای تصویری در سمت راست که با شمارهٔ ٤ در شکل شمارهٔ ۲ مشخص شده است اطلاعات لحظه‌ای مربوط به سنسور دمای شماره یک (T_{mid})، یعنی دمای در ارتفاع گیاه و نیز سنسور رطوبت نسبی (RH) را به‌صورت نمودارهای میله‌ای و مقادیر عددی متناظرآن نمایش می‌دهند.

در پایین منوی اصلی چند دکمه تعبیه شده است. دکمهٔ تنظیمات[1] مربوط به تنظیمات عمومی برنامه است (شکل شمارهٔ ۳-الف)، در حالت کنترل دستی فعال می‌شود، و با کلیک کردن آن برنامه وارد منوی مربوط می‌شود. اپراتور می‌تواند تنظیمات مورد نظر خود را در آنجا اِعمال کند. در حالت کنترل خودکار، این دکمه غیر فعال است. دکمهٔ نمایش جزئیات[2] نیز برای مشاهده تغییرات دما و رطوبت با فرمت‌های مختلف در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به مانیتورینگ وضعیت کامل گذشته سیستم در مورد

1- Setting 2- Detail View



شکل شمارهٔ ۲- منوی اصلی نرم افزار مانیتورینگ و کنترل شرایط محیطی گلخانه



(ب) (الف)

شکل شمارهٔ ۳- تنظیمات نرم افزار: (الف) منوی تنظیمات برای دما، رطوبت، آبیاری، و غیره؛ (ب) منوی تنظیمات پیشرفته

چهار پارامتر اندازه‌گیری شده در این منو قابل مشاهده است. این اطلاعات به‌صورت ساعت به ساعت، روز به روز، و ماه به ماه، به‌شکل نمودارهای مجزا نمایش داده می‌شوند. برنامه، داده‌های دریافتی از سنسورها را در ابتدا در یک بانک اطلاعاتی مبتنی بر نرم افزار اکسس مایکروسافت در فواصل زمانی ۵ ثانیه ذخیره می‌کند و اپراتور بعداً می‌تواند در این منو اطلاعات ذخیره شده را برای فواصل زمانی معین فراخوانی و به‌صورت نمودارهایی مشاهده کند.

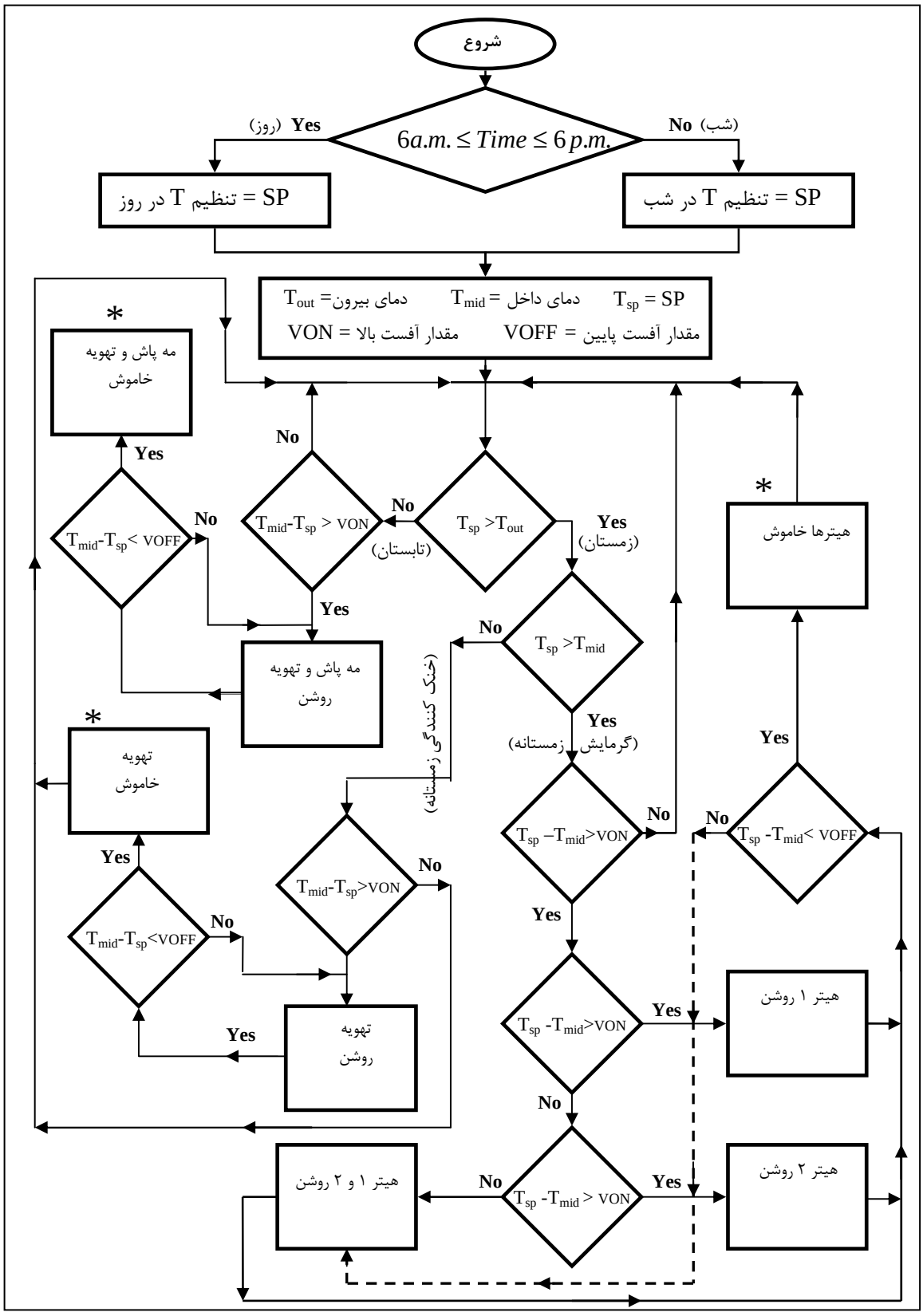
در حالت کنترل خودکار، الگوریتم کنترل با توجه به مقادیر لحظه‌ای پارامترهای محیطی و مقایسهٔ آنها با مقادیر از پیش تنظیم شده در منوی تنظیمات برنامه (شکل شمارهٔ ۳-الف) و نیز با توجه به شرایط زمانی سیستم در جهت تأمین شرایط مطلوب، فرایندهای مختلفی را به اجرا در می‌آورد. که شامل فرآیندهای کنترلی و فرآیندهای زمان بندی شده هستند (شکل شمارهٔ ۳-الف). الگوریتم برنامه شامل زیر روال‌های لازم برای اجرای هر یک از این فرآیندهاست. فرآیندهای مربوط به کنترل دما شامل گرمایش، خنک‌کنندگی تابستانه، و زمستانه است. در مورد کنترل رطوبت، فرآیندهای کنترلی تنها شامل افزایش و کاهش رطوبت است. الگوریتم کنترل برنامه در مورد هر یک از این فرایندها بر مبنای یک تابع کنترلی دو وضعیتی (ON/OFF) با هیسترزیس قابل تنظیم عمل می‌کند. برای هر یک از پارامترهای دما یا رطوبت در قسمت تنظیمات عمومی برنامه (شکل شمارهٔ ۳-الف) سه پارامتر مشخص تعریف شده است. پارامتر اول مربوط به مقادیر تنظیمی دما و رطوبت است که در واقع هدف سیستم گلخانه‌ای طراحی شده، تأمین و تثبیت دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه در این مقادیر است. این مقادیر به عنوان نقاط تنظیم[1] (SPs) شناخته می‌شوند. دو پارامتر دیگرشامل مقادیر پارامترهای کنترلی (آفست‌ها[2]) مربوط به عملکرد ON و OFFتابع کنترل حول هر یک از نقاط تنظیم هستند که در قسمت تنظیمات پیشرفته برنامه (شکل شمارهٔ ۳-ب) اعمال می‌شوند.

برای کنترل دما در قسمت تنظیمات عمومی برنامه (شکل شمارهٔ ۳-الف) دو مقدار تعریف شده است. مقدار اول مربوط به دمای روز و دیگری مربوط به دمای شب است. الگوریتم کنترل در طول شبانه روز نقطه تنظیم مناسب را محاسبه می‌کند. فلوچارت کامل الگوریتم دما در شکل شمارهٔ ٤ نشان داده شده است. بدین ترتیب که در محدودهٔ زمانی ٦ صبح تا ٦ عصر مقدار دمای روز به‌عنوان نقطهٔ تنظیم دما، T_{SP}، انتخاب و خارج از این بازهٔ زمانی شرایط مربوط به وضعیت شب اعمال می‌شود (شکل شمارهٔ ٤). این روند به‌طور پیوسته توسط برنامه بررسی و اجرا می‌شود. در مرحلهٔ دوم مقدار T_{SP} در فواصل زمانی مشخصی با دمای بیرون گلخانه، T_{out}، مقایسه می‌شود و بر اساس اینکه دمای بیرون کمتر یا بیشتر از T_{SP} باشد یکی از این دو حالت اتفاق می‌افتد: اگر $T_{out} < T_{SP}$ باشد شرایط زمستانه اعمال خواهد شد و اگر $T_{out} > T_{SP}$ باشد شرایط تابستانه حکم فرماست. در حالت اول برحسب مورد ممکن است

1- Set Points 2- Offsets

یکی از فرآیندهای گرمایشی یا خنک‌کنندگی زمستانه مورد نیاز باشد. اما در حالت دوم فرآیند کنترل دما، تنها فرآیند خنک‌کنندگی تابستانه است. شروع یا توقف هر یک از فرآیندهای فوق از طریق یک الگوریتم خاص و با مقایسهٔ مقادیر مربوط به T_{out} و T_{mid} با T_{SP} و با توجه به پارامترهای کنترلی آفست (V_{ON} و V_{OFF}) انجام می‌گیرد.

سایر فرآیندهای کنترلی نیز در برنامه قابل تنظیم‌اند که در ادامه به اختصار آنها را شرح می‌دهیم. در فرآیند کنترل رطوبت، ابتدا مقدار نقطهٔ تنظیم رطوبت، RH_{SP}، با میزان رطوبت نسبی محیط گلخانه مقایسه می‌شود که توسطه سنسور مربوط اخذ شده است. اگر رطوبت محیط گلخانه بیشتر از RH_{SP} باشد الگوریتم کنترلی مطابق با تابع کنترلی و پارامترهای آن فرآیند کاهش رطوبت یعنی تهویه را برای کاهش سطح رطوبت نسبی گلخانه آغاز می‌کند (فلوچارت مربوط به فرایند کنترل رطوبت در منبع شمارهٔ ۹ موجود است). این فرآیند مطابق با تابع کنترلی و پارامترهای آن تا حد تنظیمی ادامه می‌یابد و پس از آن متوقف می‌شود. اما اگر رطوبت محیط گلخانه کمتر از میزان تنظیم شده باشد الگوریتم کنترل فرآیند افزایش رطوبت را مطابق با تابع کنترلی آغاز می‌کند و تا رسیدن رطوبت به سطح مطلوب این کار ادامه می‌یابد. بر خلاف دما و رطوبت، در این سیستم فرآیندهای مربوط به تثبیت دی اکسید کربن و یکنواختی دما عملاً جزء فرآیندهای کنترلی محسوب نمی‌شوند و در واقع در زمرهٔ فرآیندهای زمان‌بندی شده به حساب می‌آیند. برای آبیاری، تهویه، گردش هوا، و روشنایی نیز در این سیستم از فرآیندهای زمان-بندی شده استفاده شده است. بنابراین مثلاً برای سیستم آبیاری قطره‌ای، در قسمت تنظیمات برنامه دو پارامتر Period و Duration در نظر گرفته شده است (شکل شمارهٔ ۳-الف). پارامتر اول بر مبنای دقیقه و پارامتر دوم می‌تواند به صورت روز یا ساعت توسط اپراتور تعریف شود. الگوریتم برنامه بر اساس این مقادیر دو روال زمانی را به طور همزمان به اجرا در می‌آورد. روال زمانی اول به مدت زمان Period و روال دوم به طول Duration ادامه می‌یابد. آبیاری زمانی انجام می‌گیرد که هر دو روال فعال باشند. پس از سپری شدن روال زمانی کوتاه‌تر، آبیاری تا سپری شدن روال زمانی طولانی‌تر یعنی روال مربوط به Period و آغاز مجدد هر دو روال، متوقف می‌شود. ممکن است تحت شرایطی فرآیندهای گرمایش و افزایش رطوبت همزمان فعال باشند. در چنین شرایطی، الگوریتم کنترل به گونه‌ای طراحی شده است که اگر این دو فرآیند همپوشانی داشته باشند (یعنی یکی از دستگاه‌های کنترلی گلخانه نظیر فن ورودی به‌طور مشترک استفاده شود)، هنگام متوقف شدن یکی از فرآیندها (که با علامت * در شکل شمارهٔ ٤ نشان داده شده است)، دستگاه مشترک برای استفاده فرآیند دوم همچنان فعال باقی می‌ماند تا در اجرای آن فرآیند وقفه‌ای حاصل نشود. توضیحات مربوط به سایر منوهای نرم‌افزار، الگوریتم، و فلوچارت مربوط به سایر فرآیندها شامل:



شکل شمارهٔ ٤- فلوچارت مربوط به فرایند کنترل

رطوبت، تهویه، گردش هوا، آبیاری، و روشنایی در منبع شمارهٔ ۹ موجود است.

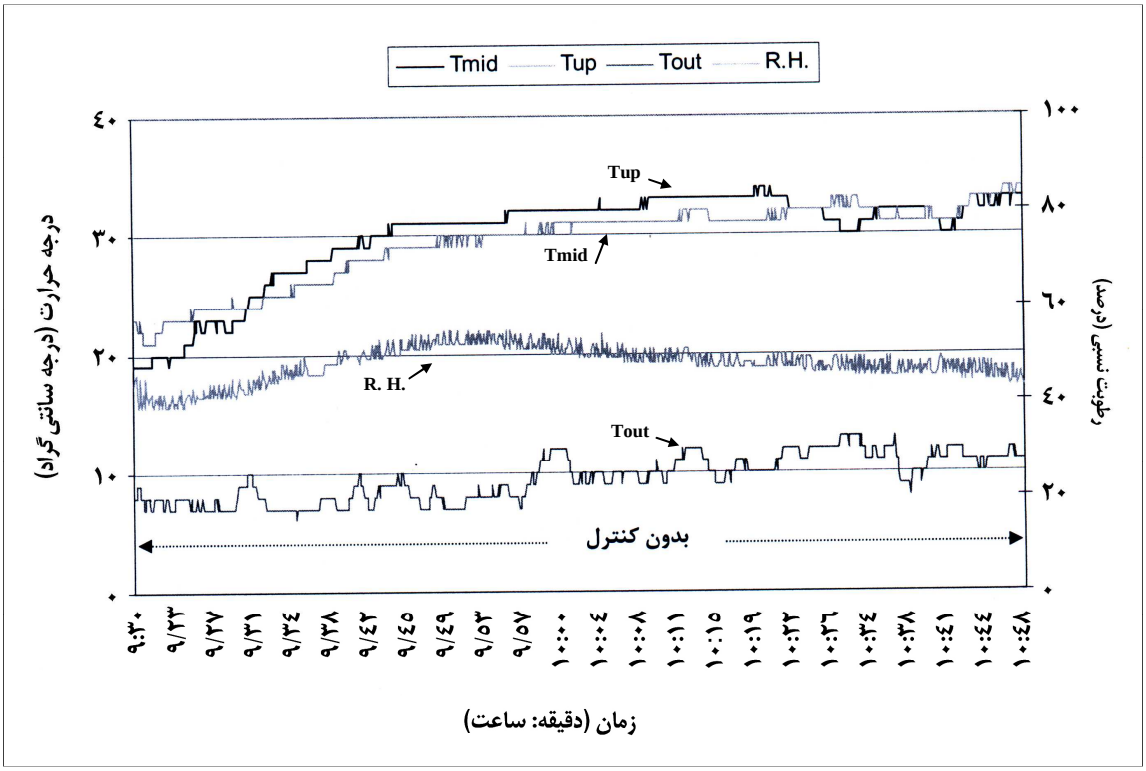
نتایج و بحث

پس از طراحی الگوریتم‌های کنترلی، برای اجرای فرآیند کنترل و مانیتورینگ گلخانه با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک نرم افزاری کاربرپسند و انعطاف‌پذیر برای گلخانه طراحی و پیاده‌سازی شد. نحوهٔ پیاده‌سازی الگوریتم‌ها با ویژوال بیسیک ٦ و نیزکدهای برنامه در منبع شمارهٔ ۹ موجود است. با استفاده از کنترل MSComm موجود در محیط ویژوال بیسیک امکان دریافت اطلاعات از پورت RS232 و ارسال فرامین کنترلی به آن فراهم آمد. از این طریق نرم‌افزار با سخت افزار کنترل مرتبط گردید تا امکان ارزیابی سیستم فراهم آید. ویژگی‌ها و عملکرد برنامه از دو جنبه، یکی کنترل و دیگری مانیتورینگ قابل توجه است.

شرایط آزمایش: عملکرد سیستم طراحی شده در شرایط مختلف جوی و در دو وضعیت بدون کنترل و کنترل شده در پاییز ۱۳۸۲ بررسی و ارزیابی شد. این آزمایش‌ها در صبح و عصر روزهای ١٦، ١٧ و ٢٦ آذرماه ۱۳۸۲ انجام گرفته است که تماماً در منبع شمارهٔ ۹ موجود است. نتایج حاصل از بعضی آزمایش‌ها که روزهای ١٧ و ٢٦ آذرماه صورت گرفته در این مقاله بررسی می‌شوند. برای اجرای آزمایش‌ها سکوهایی به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر ساخته و داخل گلخانه مدل قرار داده شد [٦ و ۹]. محل اجرای آزمایش‌ها گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی بیوسیستم کشاورزی دانشگاه تهران در کرج است. در تمام موارد، T_{mid} مربوط به دمای درون گلخانه در ارتفاع رشد گیاه، T_{up} مربوط به دمای محیط گلخانه در مجاورت پوشش سقف، RH رطوبت درون گلخانه و T_{out} دمای محیط بیرون است. در زمان اجرای آزمایش‌ها از ۸ گلدان استفاده کردیم که جهت نصب قطره چکان‌ها و کنترل سیستم آبیاری و نیز نصب سنسور دما و رطوبت روی این سکوها قرار گرفته بودند. ارتفاع گیاه (محل نصب T_{mid}) در حدود یک متر بود (٦٠ سانتی‌متر ارتفاع سکو +۲۰ سانتی‌متر ارتفاع گلدان + ۲۰ سانتی‌متر بالاتر از گلدان برای نصب سنسور دما).

آزمایش اول- تست تجهیزات سیستم:

این آزمایش به منظور بررسی عملکرد کلی سیستم و صحیح کارکردن سنسورها و بخش مانیتورینگ سیستم انجام گرفت که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد. بدین منظور کلیه روال‌های کنترلی برنامه موقتاً به صورت دستی غیرفعال و از سیستم تنها برای جمع‌آوری داده‌ها توسط سنسورها، انتقال داده‌ها به کامپیوتر، و در نهایت نمایش اطلاعات مورد نظر در روی نمایشگر استفاده شد. بدین منظور دو آزمایش، یکی روز ١٦ آذرماه ۱۳۸۲ در فاصلهٔ زمانی از ساعت ۱۰ بامداد تا ۱۲ ظهر و دیگری در روز ٢٦ آذر ماه ۱۳۸۲ در فاصلهٔ زمانی ۹:۳۰ بامداد تا ۱۱ اجرا شد و اطلاعات مربوط به سنسورهای دما و رطوبت به‌طور پیوسته ثبت شد. تنها، نتایج تکرار دوم (روز ٢٦ آذر ماه ۸۲) در شکل شمارهٔ ۵ نشان داده شده است (نتایج آزمایش روز اول در منبع شمارهٔ ۹ موجود است).



شکل شمارهٔ ٥- نتایج آزمایش سیستم در حالت بدون کنترل (۲٦ آذر ۱۳۸۲)

آزمایش دوم- کنترل دمای داخل گلخانه به‌طور خودکار:

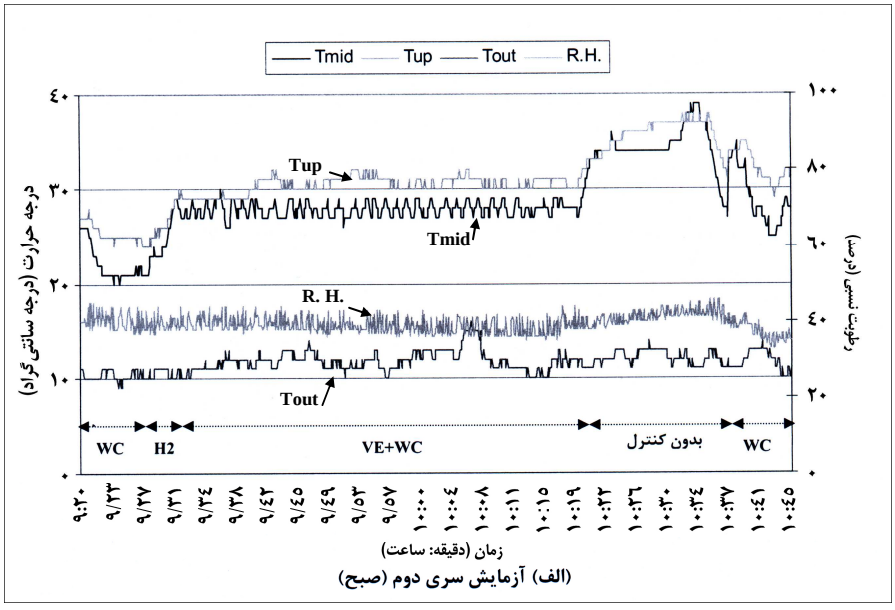
این آزمایش به منظور ارزیابی عملکرد و کارایی سیستم برای کنترل دمای داخل گلخانه درحد مطلوب و از پیش تنظیم شده، انجام گرفت. برای این منظور دو آزمایش، یکی در صبح و دیگری در بعد از ظهر روز ۱۷ آذرماه ۱۳۸۲ اجرا شد. آزمایش اول از ساعت ۹:۲۰ تا ۱۰:٤٥ و آزمایش دوم از ساعت ۱٦:۲۰ تا ۱۷:۲۰ برای بررسی عملکرد سیستم در شرایط شب ادامه یافت. در آزمایش صبح T_{sp}=۲۷°C و آزمایش بعد از ظهر T_{sp}=۱۹°C در منوی تنظیمات عمومی برنامه (شکل شمارهٔ۳- الف) منظور شد. در آزمایش صبح، برای فعال کردن هیترها و بررسی روند گرمایش در ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه فرآیند خنک کنندگی به صورت دستی فعال شد تا دمای محیط گلخانه کاهش یابد. پس از افت دما تا حدود ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد، سیستم در حالت کنترل خودکار قرار داده شد تا دما در حد مورد نظر یعنی ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد تثبیت شود. برای اجرای این مرحله از آزمایش، تمام روال های مربوط به کنترل رطوبت به طور موقت غیر فعال شد

زیرا فقط کنترل دما مورد نظر بود. مقادیر آفست برای این آزمایش در شکل شمارهٔ ۳-ب نشان داده شده است. تنظیمات مشابهی برای آزمایش تکرار دوم در منوهای برنامه اعمال شد. نتایج به دست آمده از این سری آزمایش‌ها در شکل‌های شمارهٔ ٦-الف و ٦-ب نشان داده شده است.

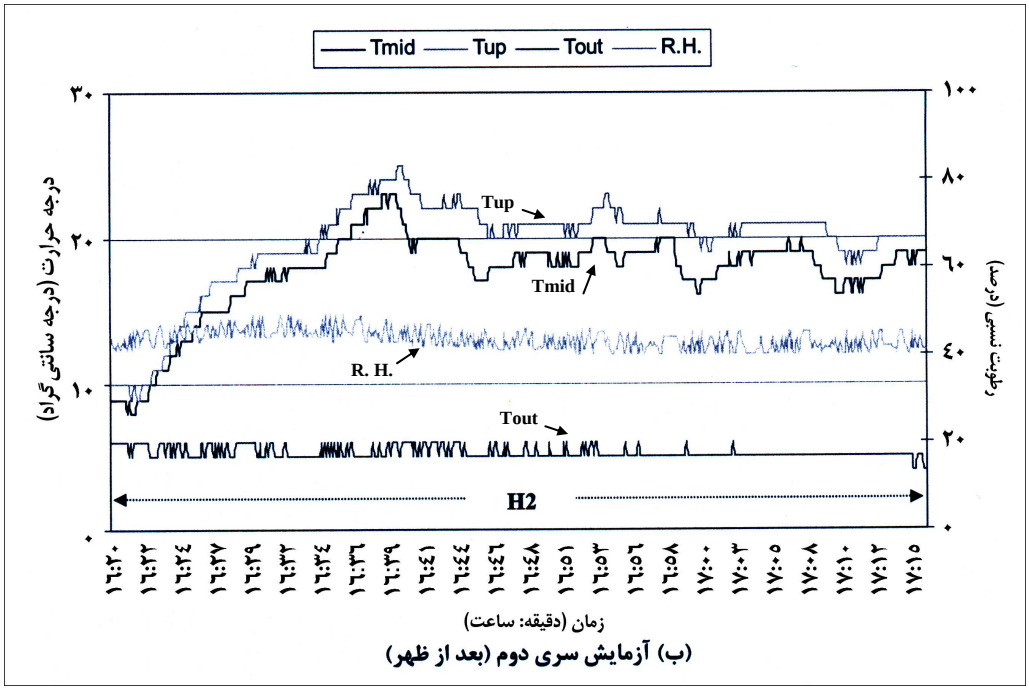
آزمایش سوم- کنترل توأم دما و رطوبت گلخانه: هدف از اجرای این آزمایش، ارزیابی عملکرد سیستم در کنترل توأم دما و رطوبت داخل گلخانه بود. برای این منظور مقادیر دما و رطوبت به ترتیب ۳۱ درجهٔ سانتی‌گراد و ۷۰ درصد در شکل شمارهٔ ۳- الف اعمال گردیدند. پارامترهای کنترلی (مربوط به آفست‌ها) برای فرآیندهای کنترل دما $V_{ON}(T)=3^{\circ}C$، $V_{OFF}(T)=1^{\circ}C$ و برای فرآیندهای کنترل رطوبت $V_{ON}(RH)=5^{\circ}C$ ، $V_{OFF}(RH)=2^{\circ}C$ در منوی تنظیمات پیشرفتهٔ برنامه (شکل شمارهٔ ۳-ب) تعریف شدند. نتایج به دست آمده از این سری در شکل شمارهٔ ۷ نشان داده شده است.

برای اجرای هریک از آزمایش‌های دوم و سوم، ابتدا تنظیمات مربوط در منوهای شکل شمارهٔ ۳ اعمال و سپس با قرار دادن سیستم در وضعیت کنترل خودکار، آزمایش آغاز شد. در هر یک از مراحل آزمایش، عملکرد تجهیزات کنترلی و فرآیندهای کنترلی، همچنین تغییرات دما و رطوبت مربوط به سنسورهای مختلف به‌طورپیوسته در کامپیوتر ثبت شد. در کل، سیستم بدون خطا و با قابلیت اطمینان بالا وظایف محوله را در سراسر آزمایش‌ها به خوبی انجام داد.

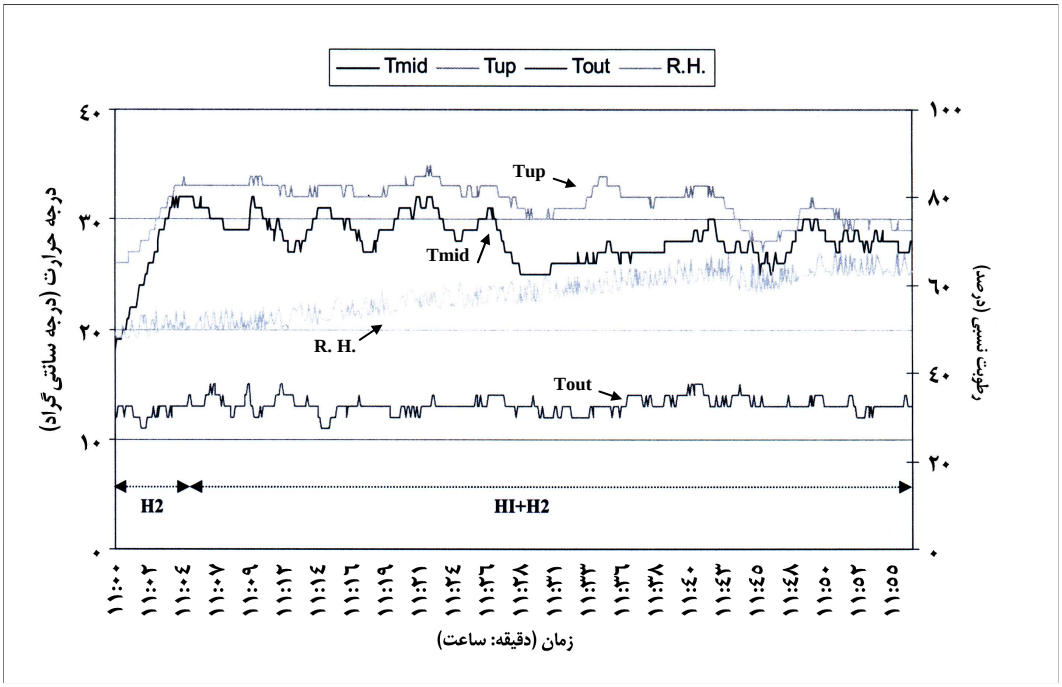
از نتایج به دست آمده از آزمایش سری اول (حالت بدون کنترل) صحت کارکرد صحیح سنسورها،



(الف) آزمایش سری دوم (صبح)



شکل شمارهٔ ٦- نتایج آزمایش مربوط به ارزیابی سیستم در کنترل دما. (الف) ساعت ۹:۲۰ تا ۱۰:٤٥ بامداد و (ب) ۱٦:۲۰ تا ۱۷:۲۰- روز ۱۷ آذر ماه ۱۳۸۲



شکل شمارهٔ ۷- نتایج آزمایش‌های مربوط به ارزیابی سیستم در کنترل توأم دما و رطوبت نسبی (۱۷ آذر ۱۳۸۲)

میکروکنترلر، و بخش نرم افزار سیستم مورد تأیید قرار گرفت. تفسیر نتایج این آزمایش که در شکل شمارهٔ ۵ نشان داده شده است در قسمت اول موجود است [٦].

از آزمایش‌های سری دوم (کنترل دما) که در شکل شمارهٔ ٦ نشان داده شده است نتایج زیر حاصل می‌شود: در شکل شمارهٔ ٦-الف می‌بینیم که در شروع روند کنترل خودکار، فرآیند گرمایش مرحلهٔ ۲ (H2) فعال شده و پس از گذشت زمانی در حدود ۱۰ دقیقه دمای محیط گلخانه تا حد ۲۷ درجهٔ سانتی‌گراد (T_{SP}) افزایش یافته است. از این زمان به بعد به مدت ۵۰ دقیقه فرآیندهایی که سیستم برای کنترل دما انجام داده فرآیند خنک کنندگی زمستانه[1] (WC) و تهویه[2] (VE) بوده است. بعد از این به مدت ۲۰ دقیقه شرایط بدون کنترل برقرار شد تا دما افزایش یابد. با افزایش دما تا حد ٤۰ درجهٔ سانتی‌گراد دوباره سیستم در وضعیت کنترل خودکار قرار گرفت. در این حالت سیستم برای کاهش دما مجدداً یک فرآیند WC را به‌طور خودکار فعال کرد. بعد از گذشت ده دقیقه دما مجدداً به محدوده T_{SP} رسید. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ سیستم برای افزایش یا کاهش دمای محیط نسبتاً سریع است. با در نظر گرفتن این نکته که برای پوشش گلخانه از ۲ لایه پلی اتیلنی استفاده شده است و تقریباً محیطی ایزوله از محیط ambient بیرون را داریم می‌توان انتظار داشت که پاسخ زمانی سیستم در شرایط کاشت واقعی نیز تقریباً ثابت بماند. از شکل شمارهٔ ٦-ب ملاحظه می‌شود که به خاطر کاهش شدت نور در شرایط شب در شروع آزمایش دمای محیط گلخانه در حدود ۸ درجهٔ سانتی‌گراد بوده است. با قرار گرفتن سیستم در حالت کنترل خودکار فرآیند H2 فعال شده و پس از گذشت حدود ۱۵ دقیقه دمای محیط گلخانه به T_{SP} (۱۹ درجهٔ سانتی‌گراد) افزایش یافته است. از این زمان به بعد دمای محیط گلخانه طبق مقادیر پارامترهای کنترلی در محدوده مقدار تنظیم شده تثبیت شده است. سایر نکات قابل توجه در بررسی دقیق روند تغییرات در طول این سری از آزمایش‌ها و شکل‌های شمارهٔ ٦-الف و ٦-ب به قرار زیر است:

عملکرد سیستم در تثبیت دمای شاخص یعنی بعد از مرحلهٔ گرمایش اولیه کاملاً مطلوب و با تنظیمات اعمال شده کاملاً منطبق است. مقدار T_{mid} به‌واسطه WC (شکل شمارهٔ ٦-الف) و به واسطهٔ H2 (شکل شمارهٔ ٦-ب) به تناوب بین ۲٦ تا ۲۸ درجهٔ سانتی‌گراد و ۱۸ تا ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد در نوسان بوده است که این موضوع با توجه به پارامترهای کنترلی تنظیم شده در بخش تنظیمات پیشرفته برنامه مؤید عملکرد صحیح الگوریتم‌های کنترل برای تثبیت دما در حدود نقاط تنظیم ۲۷ و ۱۹ درجهٔ سانتی‌گراد است. برای تثبیت دما در این محدوده‌ها فرآیندهای خنک کنندگی زمستانه یا گرمایش مرحلهٔ ۲ به دفعات و با فواصل زمانی کوتاه به طور مرتب تکرار شده است. در نتیجه، کم کردن اختلاف بین پارامترهای کنترلی (آفست‌ها) برای رسیدن به دقت بالاتر می‌تواند باعث ایجاد نوسانات زیادتر در تجهیزات کنترلی شود که این موضوع مطلوب نیست. مدت زمان آزمایش،

1- Winter Cooling 2- Ventilation

$T_{out} < T_{mid} < T_{up}$ و علاوه بر آن سرعت افزایش یا کاهش T_{mid} بیشتر از T_{up} بوده است (به عکس حالت بدون کنترل). به همین جهت می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد سیستم توزیع هوای پلی‌تیوب[1] که در این طرح از آن استفاده شده است (برای اطلاع بیشتر به منبع شمارهٔ ۹ رجوع شود) برای هدایت هوا به سمت ناحیهٔ رشد گیاه چه در فرآیند گرمایش و چه در مورد خنک کنندگی مثبت ارزیابی می‌شود. از زمان شروع آزمایش و آغاز روند کنترل دما تا آغاز وضعیت بدون کنترل (شکل شمارهٔ ٦-الف)، روند تغییرات رطوبت نسبی درون گلخانه نسبتاً ثابت بوده است. اما با شروع حالت بدون کنترل، به واسطهٔ متوقف شدن تهویه و جایگزین نشدن هوای محیط گلخانه با محیط بیرون، تغییرات رطوبت روندی افزایشی طی کرده است. بعد از این مرحله، با آغاز روند کنترل خودکار و انجام WC به واسطهٔ جایگزینی هوای خشک محیط بیرون با هوای مرطوب گلخانه مجدداً سطح رطوبت کاهش یافته است. در آزمایش دوم نیز پس از رسیدن دما به نقطهٔ تنظیم، رطوبت نسبی تغییر محسوسی نداشته است (شکل شمارهٔ ٦-ب).

از آزمایش سری سوم (کنترل توأم دما و رطوبت) این نتایج حاصل می‌شود: مطابق شکل شمارهٔ ۷ ابتدای فرآیند کنترل خودکار با انجام H2 همراه بوده تا دمای گلخانه از مقدار اولیه‌اش یعنی ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد به محدودهٔ تنظیمی ۳۱ درجهٔ سانتی‌گراد برسد. فرآیند کنترلی دیگری که از شروع این مرحله از آزمایش تا پایان آن در جریان بوده فرآیند تزریق رطوبت (HI) است که سیستم مه‌پاش آن را به انجام رسانده است. با بررسی دقیق روند تغییرات ملاحظه می‌شود که نکات مطرح شده در ارتباط با نتایج آزمایش‌های سری دوم در این مورد نیز تا حدود زیادی صادق است. در ضمن با مشاهدهٔ شکل شمارهٔ ۷ می‌توان نتیجه گرفت:

(الف) در فاصلهٔ زمانی پس از گرمایش اولیه تا انتهای آزمایش، به دلیل اثر خنک کنندگی مه‌پاش‌ها هیچ گونه فرآیند خنک کنندگی انجام نگرفته و تنها در چند مورد برای افزایش دما فرآیند گرمایش به طور خودکار فعال شده است. در کل، تثبیت دما در این آزمایش نسبت به آزمایش سری قبل ثبات کمتری داشته است که این امر ناشی از تأثیرات سیستم مه‌پاش بر تغییرات دماست. (ب) عملکرد سیستم مه‌پاش در افزایش رطوبت به ۷۰ درصد، نسبتاً کند است. در حدود ۳۰ دقیقه زمان لازم است تا رطوبت به محدوده تنظیم شده برسد. این موضوع برای کنترل رطوبت نسبتاً طبیعی است اما در تحقیقات بعدی می‌توان با افزایش ظرفیت سیستم مه‌پاش و نیز استفاده از یک سنسور رطوبت با پاسخ زمانی سریع تر نتایج بهتری به دست آورد. (ج) مقادیر مربوط به دمای داخل گلخانه (T_{mid} و T_{up}) در محدوده انتهای آزمایش که میزان رطوبت افزایش یافته و به مرز ۷۰ درصد نزدیک شده است، تقریباً برهم منطبق شده‌اند. این موضوع تأثیر رطوبت بالا را بر توزیع یکنواخت‌تر دما در گلخانه اثبات می‌کند.

1- polytube

نتیجه‌گیری

تحقیقات بیشتر در جهت توسعه و بهینه کردن سخت افزار و نرم افزار سیستم پیشنهادی، سازه گلخانه‌ای، و تجهیزات کنترلی آن می‌تواند عملکرد و کارایی آن را بهبود بخشد. ارتقای قابلیت‌های نرم‌افزاری و سخت افزاری سیستم در جهت کنترل سایر پارامترهای مربوط به شرایط محیطی گلخانه مثل دما، pH خاک، CO_2، و شدت نور از موارد قابل توجه هستند که باید در تحقیقات بعدی مد نظر قرار گیرند.

قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شماره ۷۱۹/۳/٦۷۱ است. بدین وسیله مجری طرح از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران که منابع مالی مورد نیاز طرح را تأمین کرده‌اند سپاسگزاری می‌کند.

مراجع

1- **Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, N. J., and Barak, V. D. 1995. Greenhouse climate control. Wageningen Press. Holland.**

2- **Gates, R. S., Chao, K. and Sigramis, N. 1999. Fuzzy control simulation of plant and animal environments. ASAE Annual Int'l. Meeting. Canada. Paper No. 993196.**

3- **Hanan, J. J. 1998. Greenhouses: Advanced technology for protected horticulture. CRC Press. Florida.**

4- **Marhaenanto, B., and Singh, G. 2002. Development of a computer-based greenhouse environment controller. World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources. Brazil, 136- 146.**

5- **Nelson, P. V. 2002. Greenhouse operation and management. 6th Ed. Prentice Hall, 704.**

6- **Omid, M. and Shafaei, A., M. 2005. A Computer-Based Control System for Greenhouse Environment: Part I - Results and System Validation. J. Agri. Eng. Res., Vol. 6(23), 1-20 (In Farsi- This Issue).**

7- **Omid, M. 2004. Computer Control of Greenhouse Environment: Design and building of model. University of Tehran. Iran. Technical Report No. 719-3-671, 30 p. (In Farsi).**

8- **Pohlheim, H. and Heißner, A. 1997. Optimal control of greenhouse climate using evolutionary algorithms. In Proceedings of 42 Int'l Scientific Colloquium Ilmenau. Vol. 3, 9-16.**

9- **Shafaei, A. 2003. Computer control of greenhouse climate: Design and development of a prototype. MSc. Thesis. University of Tehran. Iran, 145 p. (In Farsi).**

10- **Zylstra, A. R. 2000. Greenhouse environment control system considerations. National Greenhouse Manufacturers Assoc. (NGMA), 20 pp.**

A Computer-Based Control System for Greenhouse Environment: Part II - Results and System Validation

A. Shafaei and M. Omid

Recently, a computer-based control and monitoring system for greenhouse environment was designed. In this paper details about the design and implementation of the monitoring part of the system is provided, first. A graphical user interface (GUI) was designed using Visual Basic. The GUI was developed to carry out the monitoring tasks. The software implements the control algorithms, compares the received data with set points and sends out control signals to the microcontroller in order to change the states of actuators, i.e., heater, fan, etc., to reach the desired conditions. Flow chart and snap shot of the software are given. A series of experiments were carried out in Fall 2003 in order to validate the system. Performance of the system, controller as well as the GUI, was evaluated by installing the system in a model greenhouse. Two sets of experiments were carried out. For the uncontrolled experiment, it was found that the outside temperature was always less than the inside one. For the second set of experiments the controller was put in operation. It was found that contrary to the previous case. the rate of temperature change at lower part of greenhouse was greater than the rate of temperature change near the ceiling. This is partly due to the use of re-circulating fan with an attached perforated polyethylene tube in guiding the air toward the plant root zone. The time constant of mist and fog system was rather long, about 30 min, in reaching to the desired humidity.

Keywords: Data-Acquisition System, Greenhouse, Interface Design, Monitoring, Temperature and Humidity Control