Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.1, No.2; 2023.pp: 46-64

Research paper

(Received July 7, 2023 Accepted Aug. 29, 2023)

Wireless Configuration for Smart Greenhouse Automation: An Economical and Efficient Approach

Saman GoruhiPour [1], Mohammad Ali Bagherzadeh*[2], Ehsan Soleimani-Nasab [3], Hossein Vahidi [4]

[1] *Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[2] *Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[3] *Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*
[4] *Assistant Professor, Institute of Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*

Abstract

The integration of advanced technologies, such as smart automation systems and the Internet of Things (IoT), has revolutionized modern greenhouses by enhancing product quality, precise plant growth control, disease and pest reduction, chemical and toxin minimization, waste reduction, and overall operational efficiency. This study focuses on the development of a wireless configuration to transform conventional greenhouses into smart ones with minimal expenses and modifications. The proposed system employs a comprehensive range of sensors to monitor crucial environmental parameters, including temperature, air humidity, light intensity, soil moisture, and CO2 concentration. WiFi and ZigBee protocols are evaluated to establish seamless communication between these sensors and the central monitoring station. WiFi protocol is deemed cost-effective in greenhouses where no interference occurs within the 2.4 GHz frequency range. However, in cases where frequency interference is present, utilizing ZigBee modules operating at sub-one gigahertz frequency (900 MHz) or using the WiFi in the 5 GHz band is recommended. This wireless configuration minimizes installation and setup time and costs and enables remote monitoring and control of greenhouse conditions, empowering users with real-time access to intelligent control system information anytime and anywhere. The proposed solution contributes to the advancement of smart greenhouse automation, offering an economical and efficient approach for the widespread adoption of intelligent systems in the agricultural sector.

Keywords: Smart greenhouse, automation, monitoring, ZigBee protocol, WiFi protocol.

* *Corresponding Author: Mohammad Ali Bagherzadeh*
Email: ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir
Phone: +983431623388

Doi:10.48306/jumee.2023.405892.1010

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال اول/شماره دوم/تابستان ۱۴۰۲/صفحه ۴۶-۶۴

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۲ /۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۶/۸

پیکربندی بی سیم برای اتوماسیون گلخانه هوشمند: یک رویکرد اقتصادی و کارآمد

سامان گروهی‌پور[۱]، محمدعلی باقرزاده کوهبنانی*[۲]، احسان سلیمانی نسب[۳]، حسین وحیدی[۴]

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۴- استادیار، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

پیشرفت فناوری و استفاده از سیستم‌های اتوماسیون هوشمند و اینترنت‌اشیا در گلخانه‌های پیشرفته، موجب افزایش کیفیت محصولات، کنترل دقیق‌تر رشد گیاهان، کاهش بیماری‌ها و آفات، کاهش استفاده از مواد شیمیایی و سموم، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری شده است. سیستم‌های اتوماسیون گلخانه هوشمند شامل حسگرها، کنترل‌کننده‌ها، شبکه‌های ارتباطی و نرم‌افزارهای مدیریتی است و پایش وضعیت گلخانه را به صورت زمان حقیقی انجام می‌دهد. حسگرها برای اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای مختلفی مانند دما، رطوبت، نور، غلظت CO_2 و ... استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه سیم‌کشی بین حسگرها و کنترل‌کننده‌ها یکی از محدودیت‌های اصلی توسعه گلخانه‌های هوشمند است، استفاده از شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم مناسب می‌تواند علاوه بر کاهش زمان نصب و راه‌اندازی، هزینه‌های نصب و راه‌اندازی را نیز به شدت کاهش دهد. ضمن اینکه می‌توان اطلاعات سیستم کنترل هوشمند را از طریق اینترنت در اختیار کاربر قرار داد، تا بتواند در هر زمان و هر مکان، نظارت و کنترل عوامل مدنظر را انجام دهد. در این پژوهش یک پیکربندی بی‌سیم اقتصادی و کارآمد برای اتوماسیون گلخانه‌ها ارائه می‌شود تا بتوان با کمترین هزینه و تغییرات، گلخانه‌های سنتی را به گلخانه هوشمند تبدیل نمود. در این پیکربندی از حسگرهای متعددی برای اندازه‌گیری پارامترهای محیطی گلخانه مانند دما، رطوبت هوا، شدت نور، رطوبت خاک و غلظت CO_2 استفاده شده است. با توجه به گستردگی حسگرها در محیط گلخانه، ارتباط بین این حسگرها با ایستگاه پایش وضعیت به صورت بی‌سیم و با استفاده از دو پروتکل WiFi و ZigBee بررسی شده است. با توجه به اینکه ماژول WiFi نسبت به ماژول‌های ZigBee ارزان‌تر هستند، در گلخانه‌هایی که آلودگی فرکانسی 2.4 GHz وجود ندارد، استفاده از پروتکل WiFi توجیه اقتصادی دارد. در غیر این صورت پیشنهاد می‌گردد از ماژول‌های ZigBee با فرکانس زیر یک گیگاهرتز (900MHz) و یا از WiFi در باند 5 GHz استفاده گردد.

کلمات کلیدی: گلخانه هوشمند، اتوماسیون، مانیتورینگ، پروتکل ZigBee، پروتکل WiFi.

* نویسنده مسئول: محمدعلی باقرزاده کوهبنانی

ایمیل: *ma.bagherzadeh@kgut.ac.ir*

شماره تماس: ۰۳۴-۳۱۶۲۳۳۸۸

Doi:10.48306/jumee.2023.405892.1010

۱- مقدمه

تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و کمبود منابع، کشورهای جهان را به سمت انتخاب راه حل‌های توسعه پایدار سوق داده است. مقابله با کمبود آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب، کاهش سطح فقر در میان جوامع و تامین غذای سالم از موضوعات اصلی توسعه پایدار در دستور کار ۲۰۳۰ سازمان ملل است [۱]. بر این اساس لازم است به منظور تامین غذا برای جمعیت رو به رشد، کشاورزی پایدار از طریق کشت گلخانه‌ای مورد توجه قرار گیرد. کشت گلخانه‌ای در مقایسه با سیستم‌های کشاورزی سنتی این امکان را فراهم می‌کند تا با بهره‌گیری از سیستم اتوماسیون گلخانه، گیاهان را تحت شرایط محیطی کنترل‌شده به‌طور مؤثری پرورش داد. اتوماسیون گلخانه به مجموعه‌ای از فناوری‌ها و سیستم‌های کنترلی گفته می‌شود که برای بهبود و بهینه‌سازی عملکرد فرآیندهای مختلف گلخانه مورد استفاده قرار گرفته تا شرایط محیطی بهینه برای رشد و توسعه گیاهان را فراهم کند. گلخانه هوشمند به لحاظ محیط زیست دارای مزایای مهمی است که از آن جمله می‌توان به «صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی»، « کاهش آلودگی محیطی و حفظ تنوع زیستی» و « کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای» اشاره کرد [۲-۴]. گلخانه‌ای که در آن عوامل محیطی از جمله دما، رطوبت، نور و دی‌اکسید کربن و دیگر عوامل محیطی موثر بر رشد گیاه و ایده‌آل بودن شرایط گلخانه تحت کنترل باشد را گلخانه هوشمند می‌گویند.

ارزش بازار جهانی گلخانه‌های هوشمند درسال ۲۰۱۶ حدود ۶۸۰ میلیون دلار بود و این میزان در سال ۲۰۲۲ به حدود ۱.۳۱ میلیارد دلار رسیده و انتظار می‌رود این بازار به دلیل افزایش جمعیت و تغییرات شدید آب و هوایی شاهد رشد قابل توجهی باشد [۵]. ضمن اینکه سطح کشت گلخانه‌ای در ایران از ۶۰۰ هکتار در سال ۱۳۷۵ به ۱۵۷۰۰ هکتار در سال ۱۳۹۸ افزایش یافته است و به طور متوسط رشد سالانه سطح زیر کشت گلخانه‌ای در ایران حدود ۱۰۰ هکتار بوده است [۶]. با این وجود بسیاری از این گلخانه‌ها به روش سنتی نگهداری و اداره می‌شوند و تا به امروز هوشمندسازی و استفاده از اتوماسیون در این زمینه چندان رواج پیدا نکرده است. این در حالی است که استفاده از اتوماسیون صنعتی در صنایع کشور، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و امروزه یکی از اجزای اصلی و مهم در پروژه‌های صنعتی به شمار می‌رود. بر این اساس، توسعه گلخانه‌ها باعث جذابیت سرمایه‌گذاری در صنایع مرتبط از جمله اتوماسیون گلخانه شده است و طراحی و توسعه سامانه‌های پایش وضعیت و اتوماسیون گلخانه یکی از موضوعات مورد علاقه در بخش کشاورزی است که پتانسیل بالایی جهت توسعه پایدار بخش کشاورزی داشته و با اجرای اتوماسیون صنعتی[1] و اینترنت اشیاء[2] جهت نظارت و کنترل هوشمند در بخش کشاورزی می‌توان افزایش سطح کمی و کیفی محصولات کشاورزی را به همراه داشت.

امروزه گلخانه‌های صنعتی پیشرفته کاملاً خودکار بوده و تولیدکننده می‌تواند شرایط محیط رشد ایده‌آل (شامل شدت تابش نور، دمای محیط، میزان رطوبت، غلظت گازهای محبوس در گلخانه) را تنظیم کند و با استفاده از سیستم اتوماسیون این شرایط محیطی را به طور خودکار کنترل نماید. کنترل شرایط اقلیمی داخل گلخانه، کنترل میزان و نحوه آبیاری، کنترل تغذیه و کوددهی و کنترل میزان محلول‌پاشی و سم‌پاشی در گلخانه، و تنظیم این پارامترها در محدوده مورد نیاز و مطلوب گیاه نقش حیاتی در افزایش سلامت، کیفیت و باردهی گیاهان گلخانه‌ای دارد. برای پایش پارامترهای مذکور بایستی از حسگرهای مختلف دما، رطوبت، گاز، نور، وزش باد، رطوبت خاک و ... استفاده کرد. همچنین برای اعمال شرایط مطلوب و انجام محلول‌پاشی و سم‌پاشی از عملگرهای مناسب مانند سلونوئید ولوها یا رله‌های الکترومکانیکی استفاده می‌شود. در گلخانه‌های سنتی که عملیات تنظیم شرایط محیطی و وضعیت تغذیه گیاهان توسط نیروی انسانی انجام می‌شود، لازم است تا کاربران گلخانه اطلاعات را به طور مستمر اندازه‌گیری کرده و تجهیزات گلخانه را بر اساس شرایط موجود، روشن یا خاموش نمایند. این کار برای نیروی انسانی بسیار پیچیده خواهد بود، زیرا باید یک مراقبت دائمی و شبانه روزی را از محیط گلخانه صورت دهند. ضمن اینکه در برخی مواردی تغییر یک پارامتر بر پارامترهای دیگر اثرگذار بوده (مانند رطوبت که بر دما اثرگذار است) و کاربر بایستی تنظیمات تجهیزات متعددی را تغییر دهد [۷].

اهمیت اجرای اتوماسیون گلخانه، دستیابی به مزیت‌هایی از جمله انجام فعالیت‌ها و ثبت داده‌ها به صورت خودکار به منظور رسیدن به محصولی با کیفیت است. علاوه بر این، دستیابی به اهداف ایمنی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و همچنین بالا بردن ضریب اطمینان کار از دیگر اهداف استفاده از اتوماسیون در گلخانه‌ها است. با این وجود یکی از مهمترین موانع موجود برای توسعه گلخانه‌های هوشمند در کشور، سرمایه اولیه مورد نیاز برای تجهیزات اتوماسیون و مانیتورینگ گلخانه است که باعث شده بسیاری از گلخانه‌ها به صورت سنتی

[1] Industrial Automation
[2] Internet of Things (IoT)

اداره شوند. بنابراین لازم است سیستم‌های اتوماسیون مقرون به صرفه با قابلیت اطمینان بالا، انعطاف‌پذیر و با سرعت پیاده‌سازی بالا توسعه داده شود تا بتوان با صرف کمترین هزینه و تغییرات، گلخانه‌های سنتی را به گلخانه‌های هوشمند تبدیل نمود. این سیستم اتوماسیون بایستی دارای ساختاری باشد که بتوان برحسب نیاز کارفرما حسگرهای بیشتری به آن اضافه یا کم کنیم، همچنین سیستم کنترل و اتوماسیون بایستی قابلیت پیاده‌سازی به صورت بی‌سیم را داشته باشد.

در این مقاله، یک سیستم اتوماسیون گلخانه هوشمند ارائه شده است که توانایی پایش لحظه‌ای پارامترهای مؤثر بر رشد گیاه و کنترل تجهیزات گلخانه را به صورت بی‌سیم دارد. برای این منظور سخت افزارها، ماژول‌های پردازنده و حسگرهای موجود در بازار به همراه پروتکل‌های انتقال اطلاعات بی‌سیم مورد بررسی قرار گرفته و یک طرح مناسب و اقتصادی قابل پیاده‌سازی در گلخانه‌های سنتی به منظور تبدیل آن‌ها به گلخانه‌های هوشمند معرفی شده است.

۲- معرفی سیستم گلخانه هوشمند

امروزه برای کنترل شرایط محیطی گیاهان، از سیستم‌های هوشمند و خودکار کنترلی استفاده می‌شود. این سیستم‌های هوشمند، وضعیت گلخانه را مرتبا از طریق حسگرها رصد نموده و با پردازش اطلاعات حسگرها، تجهیزات مختلف را به صورت همزمان کنترل می‌کنند. استفاده از این سیستم‌های هوشمند موجب می‌شود تا شرایط محیطی و تغذیه گیاه همواره در محدوده ایده‌آل آن قرار داشته باشند و رشد گیاه، باردهی و کیفیت محصولات، به حداکثر میزان خود برسد. به این ترتیب، بهره‌وری گلخانه و بازده اقتصادی کشت گلخانه‌ای، افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، یک سیستم هوشمند کنترل شرایط محیطی گلخانه باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

۱) استفاده از حسگرهای با دقت و صحت مناسب برای پایش شرایط محیطی
۲) توانایی کنترل تجهیزات داخل گلخانه (اعم از سرمایش، گرمایش، رطوبت‌ساز، سایه‌بان و ...)
۳) امکان توسعه و اجرا در سطح گسترده و مساحت‌های زیاد
۴) قابلیت اضافه و کم نمودن تجهیزات و حسگرها برای گلخانه‌های مختلف با شرایط متفاوت
۵) قابلیت ذخیره و پردازش اطلاعات پرحجم و اجرای الگوریتم‌های کنترلی
۶) صدور هشدارهای مختلف برای کاربران گلخانه در صورت لزوم
۷) مقرون به صرفه و قابل شخصی‌سازی با شرایط مدنظر گلخانه‌دار
۸) قابلیت اتصال به اینترنت برای اشتراک‌گذاری اطلاعات بر روی شبکه (اختیاری)

در گلخانه‌های هوشمند تمامی مراحل کنترل دما، رطوبت، شدت نور و کربن‌دی‌اکسید به صورت خودکار انجام می شود. کنترل‌کننده مرکزی مهم‌ترین بخش گلخانه هوشمند است که با استفاده از آن می‌توان از وضعیت گلخانه باخبر شد. ضمن اینکه می‌توان تمامی مقادیر قرائت شده توسط حسگرها و وضعیت تمامی تجهیزات گلخانه را در یک پنل کاربری مدیریت کرد. این گلخانه‌های هوشمند می‌تواند دارای ارتباط بی‌سیم باشد که به کمک شبکه اینترنت و یا تلفن همراه از هر نقطه ای قابل کنترل است. هدف از اتوماسیون در گلخانه‌های هوشمند علاوه بر بهینه‌سازی مصرف انرژی تا ۷۰ درصد (در صورت استفاده از پرده ذخیره ساز انرژی و انتخاب سازه مناسب) [۸] و رسیدن به محصولی باکیفیت، دستیابی به اهداف ایمنی و امنیتی است. برخی از مزایای سیستم اتوماسیون در گلخانه‌های هوشمند عبارتند از :

- ✓ کنترل لحظه‌ای دما، رطوبت، نور و دی‌اکسید کربن
- ✓ کاهش تعداد نیروی انسانی در گلخانه
- ✓ بهبود مدیریت عوامل موثر بر رشد و بازدهی
- ✓ بهبود کیفیت،کمیت و یکنواختی محصول
- ✓ امکان کنترل گلخانه‌های بسیار وسیع

بنابراین نیازمند گلخانه‌ای هوشمند با قابلیت کنترل شرایط محیطی به‌صورت دقیق و کنترل از راه دور هستیم. سیستم اتوماسیون گلخانه از چهار زیرسیستم به شرح زیر تشکیل شده است [۹].

- سیستم کنترل دما، با استفاده حسگرهای دمای مناسب
- سیستم کنترل رطوبت هوا و خاک، با استفاده از حسگر رطوبت
- سیستم کنترل روشنایی با استفاده از حسگر شدت نور و نصب لامپ رشد گیاه و سایه‌بان
- سیستم کنترل دی‌اکسیدکربن با استفاده از حسگر غلظت CO_2

۲-۱- سیستم کنترل دما

کنترل و نظارت بر دما و رطوبت در گلخانه‌ها تاثیر مستقیمی بر رشد کمی و کیفی محصولات گلخانه‌ای دارد. لذا لازم است تا میزان دما همیشه در محدوده مدنظر قرار گیرد تا از آسیب رسیدن به محصول جلوگیری شود. سیستم کنترل دمای گلخانه‌ها بایستی بتواند دمای مطلوب را هم در فصول گرم سال و هم در فصول سرد سال تأمین نماید. لازم به ذکر است با توجه به تابش شدید آفتاب در ماه‌های گرم سال و به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی، لازم است از پرده‌های ذخیره انرژی استفاده گردد. ضمن اینکه در ماه‌های سرد سال نیز می‌توان بخشی از گرمای مورد نیاز گلخانه را از طریق انرژی تابشی خورشید تأمین نمود. بنابراین بایستی متناسب با شرایط محیطی، پرده‌های تعبیه شده را باز یا بسته نمود. در نتیجه پرده‌های ذخیره انرژی نیز جزئی از سیستم کنترل دما منظور می‌گردد. الگوریتم‌های کنترل دما بایستی به نحوی طراحی و اجرا شوند تا بتوانند سیستم سرمایش (در فصول گرم) و سیستم گرمایش (در فصول سرد) را به نحوی کنترل کنند تا دمای گلخانه در سطح مطلوبی باقی بماند.

۲-۲- سیستم کنترل رطوبت

رطوبت موجود در هوا یکی از عواملی است که تأثیر زیادی بر رشد گیاهان و انجام عمل فوتوسنتز گیاهان دارد. میزان رطوبت نسبی به دمای محیط مورد نظر وابسته است و با افزایش دمای هوا مقدار رطوبت نسبی محیط کاهش می‌یابد. بنابراین توجه به این موضوع در کنترل رطوبت نسبی گلخانه ضروری است. اگرچه وجود رطوبت تأثیر زیادی بر رشد گیاهان دارد، ولی نباید فراموش کرد که رطوبت نسبی می‌تواند یکی از عوامل مهم در شیوع بیماری‌های قارچی در گلخانه‌ها باشد. به این صورت که رطوبت داخل گلخانه در طول روزهای آفتابی به دلیل تبخیر از سطح برگ و خاک بالا می‌رود و در طول شب میعان بخار آب رخ داده و قطرات شبنم بر سطح برگ گیاهان تشکیل می‌شود. این قطرات شبنم که بر سطح برگ گیاهان شکل می‌گیرد، شرایط مناسب برای رشد قارچ‌ها را فراهم می‌کند. چنانچه میزان رطوبت داخل گلخانه بیشتر از حد مطلوب باشد، بایستی با تهویه هوا و ورود هوای تازه به گلخانه درصد رطوبت را کاهش داد.

۲-۳- سیستم کنترل روشنایی

وجود نور کافی در کنار آب، خاک و هوای مناسب، ارکان اصلی رشد و حیات گیاهان هستند. بدون دسترسی گیاه به نور با شدت مناسب و برای مدت زمان کافی، عمل فوتوسنتز در گیاه مختل شده و رشد و باردهی آن امکان‌پذیر نخواهد بود. در برخی از گلخانه‌ها، به دلیل کدر بودن پوشش سقف، وجود ساختار طبقاتی در برخی از گلخانه‌ها و شرایط خاص جوی در برخی مناطق، امکان برخورداری گیاهان گلخانه از نور مناسب فراهم نیست. در این موارد از لامپ‌هایی جهت تولید نور مصنوعی در گلخانه‌ها استفاده می‌شود.

مهمترین شاخص‌های نوری در گیاهان «شدت نور»، «طول دوره نوری» و «طیف نور» هستند. افزایش شدت نور و طول دوره نوری می‌تواند تولید محصول را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

فتوسنتز گیاهان بیشتر متاثر از نور با طول موج‌های در محدوده ۴۴۰ الی ۶۵۵ نانومتر صورت می‌گیرد. اغلب گیاهان گلخانه‌ای به شدت نوری در بازه ۱۰۰۰۰ الی ۷۰۰۰۰ لوکس نیاز دارند. البته برای گیاهان سایه پسند، این میزان در بازه ۵۰۰ الی ۵۰۰۰ لوکس کفایت می‌کند. ضمن اینکه گیاهان بر حسب مدت زمان نیاز به نور به سه دسته ۱-گیاهان روز بلند ۲-گیاهان روز کوتاه ۳-گیاهان روز خنثی تقسیم بندی می‌شوند. باتوجه به متفاوت بودن نیاز نوری گیاهان مختلف و همچنین تغییرات شدت تابش نور خورشید در فصول مختلف، لازم است از نور مصنوعی به همراه پرده‌های سایه‌انداز برای مدیریت میزان نوردهی گیاهان استفاده کرد. برای ایجاد نور مصنوعی در گلخانه‌ها انواع مختلف از لامپ‌های نور مصنوعی از قبیل لامپ تنگستن، فلورسنت، متال هالید، سدیمی فشار بالا و LED وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خود را دارد. [۱۰]

۲-۴- سیستم کنترل دی‌اکسیدکربن

غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در هوا ۰/۰۳ درصد و یا حدود 300 PPM است. این مقدار دی‌اکسیدکربن موجود در هوا برای فتوسنتز کافی است. با این وجود، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به میزان 1000 PPM تا 1500 PPM برای اکثر گیاهان مفید است. البته افزایش دی‌اکسیدکربن در فتوسنتز بستگی به سایر عوامل موثر در فتوسنتز نیز دارد. به عنوان مثال شدت نور بیش از 5500 LUX همراه با دمای 29.5 درجه سانتی‌گراد و تزریق دی‌اکسیدکربن به میزان 2400 PPM – 1000 باعث افزایش فتوسنتز به میزان ۲۰۰ برابر زمانی است که غلظت دی‌اکسیدکربن 300 PPM باشد. تزریق دی‌اکسیدکربن وقتی اقتصادی است که شدت نور از 5500 LUX بیشتر باشد. باید توجه داشت غلظت بیش از حد دی‌اکسیدکربن برای گیاه سمی است و باعث کاهش عملکرد، کلروز[3] شدن و نکروز[4] شدن برگ می‌شود. حداکثر مقدار مجاز (سطح آستانه) برای دی‌اکسیدکربن در گیاهان مختلف متفاوت است. مثلاً در گوجه فرنگی ۲۲۰۰ پی‌پی‌ام و در خیار ۱۵۰۰ پی‌پی‌ام است. در ساعات آفتابی روزهای زمستان، به علت بسته بودن دریچه‌های تهویه گلخانه و عدم تبادل هوای داخل گلخانه با محیط بیرون و مصرف شدن دی‌اکسیدکربن موجود در فضای گلخانه توسط فرآیند فتوسنتز، غلظت آن در فضای بسته گلخانه به صورت مداوم کاهش می‌یابد. کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۲۰۰ پی‌پی‌ام، موجب کاهش عمل فتوسنتز و توقف رشد گیاه می‌شود. میزان دی اکسید کربن موجود در گلخانه دربسته می‌تواند در عرض چند ساعت به نقطه بحرانی ۱۲۵- ۲۵ پی‌پی‌ام برسد و باعث توقف رشد گیاهان شود. ادامه کمبود دی‌اکسیدکربن موجب طولانی شدن دوره کشت و کاهش کیفیت محصول می‌شود. بنابراین در گلخانه‌ها از تزریق دی‌اکسیدکربن به عنوان یکی از ابزارهای افزایش بازده و کیفیت محصولات استفاده می‌شود [۱۱].

۳- هوشمندسازی گلخانه

گلخانه‌های هوشمند دارای اجزای (ماژول‌های) متفاوتی هستند که در ادامه هر کدام از آن‌ها را به همراه عملکردشان معرفی می‌کنیم.

- ✓ **ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات:** کنترل (خودکار و دستی) وسایل برقی مانند فن و پد،گرم کن، دریچه، فن سیرکوله، روشنایی، چراغ‌های مخصوص رشد، CO_2 ساز، مه پاش، سایبان و آژیر به همراه پایش وضعیت گلخانه از راه دور و ذخیره‌سازی اطلاعات از مهمترین وظایف این ماژول است.
- ✓ **ماژول حسگر و عملگر:** این ماژول شامل ۵ حسگر (دما و رطوبت سالن‌های گلخانه، رطوبت خاک گلخانه، شدت نور و غلظت دی‌اکسید کربن) به همراه سلونوئید ولوها و رله‌های الکترومکانیکی برای اعمال فرمان‌های کنترلی است. لازم به ذکر است تعداد حسگر، بستگی به مساحت گلخانه و نیاز کارفرما دارد.
- ✓ **ماژول اینترنت:** برقراری ارتباط ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات با کاربر جهت مانیتور گلخانه از راه دور وثبت اطلاعات آب و هوایی و اتفاقات رخ داده از طریق اینترنت وظیفه این ماژول است.
- ✓ **ماژول ارتباط ثابت:** این ماژول امکان کنترل و نظارت بر عملکرد گلخانه را برای اشخاصی که داخل گلخانه هستند (بدون اتصال به اینترنت) فراهم می‌کند.

شبکه حسگر بی‌سیم (WSN[5]) و اینترنت اشیاء از جمله فناوری‌های به‌روز و کاربردی هستند که برای جمع‌آوری و نظارت بر داده‌های توزیع شده در محیط‌هایی مانند گلخانه‌ها بسیار مناسب‌اند. در گلخانه‌های مدرن، چندین نقطه اندازه‌گیری برای ردیابی پارامترهای آب‌وهوایی محلی در بخش‌های مختلف یک گلخانه در مقیاس بزرگ مورد نیاز است تا از عملکرد صحیح سیستم اتوماسیون گلخانه اطمینان حاصل شود. کابل‌کشی، سیستم کنترل و نظارت را زمان‌بر، گران و آسیب‌پذیر می‌کند و پس از نصب، جابه‌جایی سنسورها و عملگرها نیز دشوار است. بنابراین استفاده از شبکه‌های سنسوری بی‌سیم مزیت‌های بسیاری دارند که از آن جمله می‌توان به کاهش زمان و هزینه راه‌اندازی و همچنین تعمیرات و نگهداری سیستم اتوماسیون اشاره کرد. ضمن اینکه استفاده از شبکه‌های سنسوری بی‌سیم امکان استفاده از تعداد زیادی سنسور را با هزینه کمی فراهم می‌کند.

برای طراحی گلخانه هوشمند تجهیزات مختلفی از جمله انواع حسگرها، عملگرها و کنترل‌کننده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به وسعت گلخانه و همچنین بودجه تأمین شده از سوی کارفرما، انتخاب‌های مختلفی برای هوشمندسازی گلخانه پیش روی طراحان

---

[3] - Chlorosis
[4] - Necrosis
[5] Wireless Sensor Network

قرار دارد. هزینه اجرای این طرح‌ها بسیار متنوع است و به نوع تجهیزات هوشمند مورد استفاده و قابلیت‌های آن‌ها بستگی دارد. ضمن اینکه به منظور کیفیت بالاتر سیستم کنترل پارامترهای محیطی، معمولاً به جای یک حسگر (برای هر کدام از کمیت‌ها)، چند حسگر در نقاط مختلف گلخانه نصب می‌شود. تعداد این گره‌های حسگری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در هزینه تمام‌شده طرح دارد. اجرای سیستم اتوماسیون گلخانه را می‌توان در حالت کلی به دو صورت « هوشمندسازی با استفاده از میکروکنترلرها» و «هوشمندسازی با کنترل‌کننده‌های منطقی قابل برنامه‌ریزی (PLC)» طبقه‌بندی نمود.

هوشمندسازی با میکروکنترلر: این روش به کمک پردازنده‌های موجود در میکروکنترلرها انجام شده عواملی مانند دما، رطوبت، نور و دی‌اکسیدکربن را کنترل می‌کند. استفاده از این روش در گلخانه‌های کوچک و متوسط به دلیل قیمت پایین، سهولت راه‌اندازی و استفاده نسبت به روش دیگر برتری دارد .

سیستم مانیتورینگ گلخانه با استفاده از PLC: امکانات گسترده سخت‌افزاری و نرم‌افزاری PLC، امکان اجرای پروژه‌های اتوماسیون گلخانه در ابعاد وسیع را به همراه امکانات و نیازمندی‌های متنوع مورد درخواست کارفرما قابل اجرا می‌کند. امکانات گسترده PLCها جهت پیاده‌سازی سیستم کنترل و مانیتورینگ، اجرای هر گونه پروژه پیچیده در این حوزه را ممکن می‌سازد. اما درمقایسه با روش اول، سخت‌افزار بیشتری مورد نیاز است و هزینه اولیه بالاتری برای اجرای آن لازم است.

یکی از اجزای مهم گلخانه‌ها هوشمند، سیستم پایش وضعیت است که هدف آن جمع‌آوری، ثبت و نمایش اطلاعات مربوط به کمیت‌های محیطی و شرایط عملکردی گلخانه برای رسیدن به اهداف زیر است.

- نمایش وضعیت لحظه‌ای هر یک از پارامترهای حیاتی گلخانه
- نمایش و ثبت پارامترهای مهم و حیاتی گلخانه
- نمایش و ثبت آلارم‌های مختلف در زمان‌های بروز خطا در سیستم
- اصلاح برخی از Set Pointها و همچنین تغییر برخی از فرآیندهای کنترلی از راه دور

سیستم پایش وضعیت بایستی به نحوی طراحی شود که علاوه بر نمایش مقادیر لحظه‌ای دما، رطوبت و دی‌اکسیدکربن، بتواند در صورت بروز هرگونه مشکل، از طریق هشدار گرافیکی یا صوتی در مرکز مانیتورینگ، مسئول مربوطه را مطلع نماید و یا با ارسال پیامک، کاربر را از چنین مشکلی مطلع نماید. ارتباطات سیگنال‌ها در سیستم پایش وضعیت بایستی به صورت بی‌سیم باشد و شبکه بی‌سیم نیز باید به نحوی باشد که تداخل فرکانسی در سایر دستگاه‌های بی‌سیم موجود ایجاد نکند و قابل نفوذ توسط دیگران نیز نباشد.

گلخانه‌های هوشمند مبتنی بر IOT به طور خودکار پارامترهای مختلف مورد نیاز برای گیاهان را کنترل می‌کند و داده‌های حسگرها را برای نظارت مستمر و موثر به یک صفحه وب سفارشی ارسال می‌کند. با توسعه فناوری‌های ارتباطی بی‌سیم و معرفی استانداردها و پروتکل‌های بی‌سیم صنعتی، امروزه بسیاری از برنامه‌های کاربردی مورد نیاز در گلخانه‌های هوشمند قابل پیاده‌سازی با هزینه کمتر و مصرف انرژی پایین‌تر هستند. مطابق گزارش منتشر شده [۱۲]، امروزه در مصارف خانگی و اداری بیشترین بهره‌برداری از فناوری‌های بی‌سیم مربوط به پروتکل‌های WiFi، Bluetooth و ZigBee است که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

۳-۱- بررسی استانداردها و پروتکل‌های بی‌سیم مناسب برای شبکه حسگر بی‌سیم

توسعه فناوری‌های ارتباط بی‌سیم و تصویب استانداردهای مرتبط با نیاز صنایع، امکان استفاده از این فناوری‌ها را در سطوح مختلف اتوماسیون فراهم نموده است. به نحوی که امکان استفاده از شبکه‌های ارتباطی تماماً بی‌سیم یا تلفیق آن‌ها با شبکه‌های سیمی جهت پیکربندی شبکه انتقال داده فراهم شده است. با این وجود به دلیل اینکه شبکه‌های حسگر بی‌سیم از تکنولوژی رادیویی استفاده می‌کنند، می‌توانند با دیگر شبکه‌های رادیویی مانند تلفن‌های همراه، کنترل‌های از راه دور و سایر تجهیزاتی که از امواج رادیویی استفاده می‌کنند، تداخل داشته باشند. بنابراین پیش از اجرای یک طرح اتوماسیون بی‌سیم برای گلخانه هوشمند، لازم است ابتدا استانداردهای مورد نیاز برای شبکه‌های بی‌سیم اتوماسیون انتخاب گردد. باتوجه به گستردگی کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم، استانداردهای متفاوتی توسط موسسه مهندسان برق و الکترونیک (IEEE) توسعه یافته است. این استانداردها که در کمیته تحت عنوان IEEE 802 تدوین شده است، متناسب با کاربردهای متفاوت انتقال اطلاعات بی‌سیم در رنج‌های کاری مختلف در چهار دسته

- Personal Area Network (PAN) (IEEE802.15) در رنج ۱۰ تا ۱۰۰ متر
- Local Area Network (LAN) (IEEE802.11) در رنج ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر
- Metropolitan Area Network (MAN) (IEEE802.16) تا رنج ۵۰ کیلومتر
- Wide Area Network (WAN) (IEEE802.20) تا رنج ۱۰۰ کیلومتر

طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳]. این استانداردها، سری استانداردهای ISO/IEC 802 نامیده شده که در استاندارد ANSI هم با همین شماره شناخته می‌شوند.

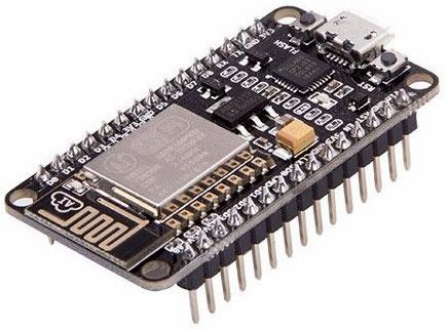
همانگونه که بیان شد، مهمترین چالش در شبکه‌های سنسوری بی‌سیم در یک گلخانه هوشمند، عدم تداخل با سایر تجهیزات بی‌سیم است. بدون شک قابلیت اطمینان بالا، مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های بی‌سیم در سیستم اتوماسیون گلخانه است [۱۴]. تداخل مهمترین دشمن قابلیت اطمینان است و به وسیله کاربران فعال در همان باند فرکانسی به وجود می‌آید [۱۵]. تجهیزات منطبق با استانداردهای IEEE802.11 و IEEE 802.15.4 از باند فرکانسی 2.4 GHz استفاده می‌کنند. دراین باند فرکانسی، مهمترین تداخل توسط گیرنده-فرستنده‌های WiFi تولید می‌شود. معمولاً تداخلات موجود، عملکرد دستگاه‌های منطبق با این استانداردها را به طور کامل مختل نمی‌کنند، اما موجب از دست رفتن یا گم شدن برخی بسته‌های اطلاعاتی می‌شوند. با توجه به فاصله کم حسگرها در یک گلخانه هوشمند (حداکثر چند صد متر)، معمولاً در پیاده‌سازی شبکه حسگر بی‌سیم داخل گلخانه از شبکه‌های بردکوتاه[6] بر پایه پروتکل‌های مبتنی بر IEEE802.11 و IEEE 802.15.4 که در باند فرکانسی 2.4 GHz عمل می‌کنند، استفاده می‌شود [۱۶].این شبکه‌ها به‌طور خاص در حوزه‌هایی همچون ساختمان هوشمند و خانه هوشمند کاربرد گسترده‌ای دارند و برای هوشمندسازی واحدهای صنعتی نیز استفاده می‌شوند. در ادامه تعدادی از مهم‌ترین پروتکل‌های مربوط به شبکه‌های کوتاه برد اینترنت‌اشیاء به طور مختصر، همراه با ویژگی‌ها و کاربردهایشان شرح داده شده است [۱۷].

۳-۱-۱- پروتکل WiFi

محبوب‌ترین پروتکل ارتباطی IOT برای شبکه‌های محلی بی‌سیم (WLAN)، WiFi است که از استاندارد IEEE 802.11 تحت فرکانس‌های ۲.۴ گیگاهرتز UHF و ۵ گیگاهرتز ISM استفاده می‌کند. بسته به فرکانس کانال مورد استفاده و تعداد آنتن‌ها، WiFi دسترسی به اینترنت را با حداکثر سرعت تا۶۰۰ مگابیت در ثانیه فراهم می‌کند. برای ساخت برنامه‌های اینترنت اشیا مبتنی بر WiFi، استفاده از ماژول‌های سری ESP از محبوبت خاصی برخوردار هستند. ESP32 (که در شکل ۱ نشان داده شده است) و ESP8266 متداول‌ترین ماژول‌های این خانواده به شمار می‌روند. استفاده از ESP32 مبتنی بر پروتکل WiFi مزایای زیادی دارد که از آن جمله می‌توان به

- سهولت در راه‌اندازی و هزینه پایین پیاده‌سازی
- تنوع بردهای توسعه برای پیاده‌سازی برنامه‌های IOT از قبیل Raspberry Pi و Node MCU

اشاره کرد.

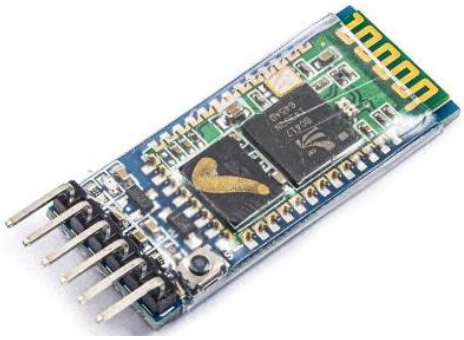


شکل۱- ماژول ESP32 مبتنی بر پروتکل WiFi

[6] Short Range

۳-۱-۲- پروتکل Bluetooth

بلوتوث یک فناوری است که برای انتقال بی‌سیم داده در فواصل کوتاه استفاده می‌شود و از امواج رادیویی با فرکانس ۲.۴ تا ۲.۴۸۵ گیگاهرتز در باند ISM استفاده می‌کند. با استفاده از ماژول بلوتوث (مانند Hc-05 ساخت شرکت Sunhokey Electronics که در شکل ۲ نشان داده شده است)، می‌توان انتقال داده را در فواصل ۱۰ الی ۴۰ مترانجام داد. ماژول بلوتوث، داده را از بوردهای آردوینو، میکروکنترلرها، تلفن‌همراه و... به صورت سریال دریافت می‌کند و سپس خود ماژول، داده را بر اساس پروتکل بلوتوث ارسال می‌کند. همچنین می‌تواند داده را از طریق پروتکل بلوتوث دریافت کرده و پس از تبدیل به سریال، آن را به کاربر تحویل دهد.



شکل ۲- ماژول Hc-05 مبتنی بر پروتکل بلوتوث

۳-۱-۳- پروتکل ZigBee

یکی دیگر از پروتکل‌های بی‌سیم قابل استفاده در اینترنت اشیاء پروتکل ZigBee است که از استاندارد IEEE 802.15.4 پیروی می‌کند و شباهت زیادی به WiFi دارد، تا جایی که در برخی متون به اشتباه از آن با عنوان WiFi صنعتی نام برده شده است. مصرف کم انرژی، قابلیت اطمینان بالا، امنیت بالا و مقیاس پذیری بالا از مهمترین مزایای این پروتکل به حساب می‌آید. Zigbee بردی در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ متر حداکثر ارائه می‌دهد و سرعت داده برای انتقال داده بین دستگاه‌های ارتباطی حدود ۲۵۰ کیلوبیت بر ثانیه است. ZigBee با داشتن مصرف انرژی پایین، برد کوتاه و پهنای باند کم یک انتخاب مناسب برای شبکه‌های بی‌سیم اتوماسیون خانه و گلخانه به حساب می‌آید. رمزگذاری 128 AES بیتی ارائه شده توسط ZigBee کمک بزرگی در ایجاد ارتباط ایمن برای اتوماسیون خانگی و برنامه‌های صنعتی کوچک به شمار می‌رود. دو ماژول شناخته شده مبتنی بر ZigBee با نام‌های XBee (که در شکل ۳ نشان داده شده است) و XBee Pro ارائه شده است که می‌تواند با بوردهای Arduino و همچنین Raspberry Pi برای ساخت پروژه‌های اتوماسیون استفاده کرد.

شکل ۳- ماژولXBee Pro مبتنی بر پروتکل ZigBee

۳-۱-۴- پروتکل Z-Wave

Z-Wave یک پروتکل ارتباطی است که به طور ویژه برای محصولات اتوماسیون هوشمند طراحی شده است و همچنین به عنوان یک فناوری ارتباطات RF کم‌مصرف نیز شناخته می‌شود. بسته‌های داده با نرخ داده حداکثر ۱۰۰ کیلوبیت بر ثانیه مبادله می‌شوند. این پروتکل در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز در باند ISM کار می‌کند و حداکثر برد آن تا ۳۰ متر است و می‌تواند تا ۲۳۲ دستگاه را کنترل و پشتیبانی نماید. Z-Wave دارای ماژول سازگار با Arduino و Raspberry Pi است و می‌تواند برای برنامه‌های اتوماسیون خانگی استفاده شود. این ماژول در شکل ۴ نمایش داده شده است.

شکل ۴- بورد توسعه SLWSTK6050B مبتنی بر پروتکلZ-Wave

۳-۲- بررسی روش‌های مختلف اجرای سیستم مانیتورینگ

هنگامی که از اتصال دو دستگاه به صورت بی‌سیم صحبت می‌شود، اغلب از امواج رادیویی استفاده می‌کنند. داده‌های ارسالی بر روی فرکانس مشخص، ارسال شده و گیرنده‌هایی که با فرکانس صحیح تنظیم شده‌اند می‌توانند آن را دریافت کنند. در این روش، با اتصال تجهیزات نظارتی از طریق WiFi (در فاصله چند ده متر تا چند صد متر) می‌توان سیستم مانیتورینگ را در فضای داخل گلخانه اجرا نمود. در روش دیگر، با استفاده از بستر شبکه اینترنت و فضای ابری، می‌توان داده‌ها را روی شبکه بارگذاری نمود و با اتصال به IP مورد نظر، داده‌های انتقال داده شده را از راه دور مشاهده کرد. برای استفاده از بستر اینترنت و فضای ابری، فناوری‌های مختلفی ارائه شده است که در ادامه به معرفی دو فناوری پر کاربرد « سرویس ابری اینترنت اشیا[۷]» و «استفاده از سرور ThingSpeak» خواهیم پرداخت.

۳-۲-۱- سرویس ابری اینترنت اشیا

Arduino Cloud IoT با ترکیب سخت افزار، سیستم عامل، سرویس ابری و پشتیبانی یک راه حل ساده و حرفه ای برای پروژه‌های اینترنت اشیا ایجاد می کند. پلتفرم IoT آردوینو کاربران را قادر می سازد داده ها را از حسگرهای خود جمع آوری کنند، و دستگاه‌های خود را به صورت اینترنتی کنترل کنند. Arduino IoT Cloud پلتفرمی است که به هر کسی اجازه می‌دهد پروژه‌های اینترنت اشیا را با یک رابط کاربر پسند و همه کاره برای پیکربندی، کدگذاری، آپلود و تجسم ایجاد کند. برای استفاده از این سرویس یک برد سازگار با فضای ابری لازم است، که می‌توان بین استفاده از برد رسمی آردوینو یا برد مبتنی بر میکروکنترلر ESP32 / ESP8266 یکی را انتخاب کرد. Arduino IoT Cloud در حال حاضر از اتصال از طریق WiFi، LoRaWAN، The Things Network و شبکه‌های تلفن همراه پشتیبانی می‌شود[۱۸].

۳-۲-۲- ارسال داده به سرور ThingSpeak

ThingSpeak به یک حساب کاربری و یک کانال نیاز دارد. کانال جایی است که داده ها را ارسال می‌کنید و ThingSpeak داده‌ها را در آن ذخیره می‌کند. هر کانال تا ۸ فیلد داده، فیلد مکان و فیلد وضعیت دارد و می‌توان هر ۱۵ ثانیه یک بار داده به ThingSpeakارسال کرد. برای ارسال داده‌ها توسط آردوینو به ThingSpeak یک کتابخانه رسمی وجود دارد که باید توسط دستگاه آردوینو نصب و استفاده شود تا بتوان داده‌ها را به ThingSpeak ارسال کرد. در یک پروژه اینترنت اشیا به سخت‌افزاری نیاز داریم که

[7] IoT Cloud

بتواند با شبکه اینترنت ارتباط برقرار کند. بورد توسعه NodeMCU که از هسته وای فای ESP8266 پشتیبانی می‌کند، قابلیت انتشار داده‌های قرائت شده از سنسورها بر روی ThingSpeak را دارد و می‌توان آن را دقیقاً مثل آردوینو کدنویسی کرد. سخت‌افزار قوی و وجود کتابخانه‌های خوب از جمله مزایای این بورد توسعه‌ای است [۱۹ و ۲۰].

۴- پیاده‌سازی سیستم اتوماسیون و مانیتورینگ پیشنهادی

استفاده از فناوری شبکه حسگر بی‌سیم با فناوری اینترنت‌اشیاء بسیار توسعه یافته است. اینترنت اشیا (IoT) فناوری است که امکان کنترل، ارتباط و همکاری با دستگاه‌های سخت‌افزاری مختلف را از طریق شبکه‌های کامپیوتری فراهم می‌کند. اینترنت اشیا (IoT) به شکلی از تغییر و توسعه فناوری اطلاعات و شبکه‌های اینترنتی تبدیل شده، که گره‌های مختلف حسگرها و کاربر می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و داده‌ها را مبادله کند. در این پروژه ما یک سیستم بی‌سیم برای کنترل و نظارت بر عوامل محیطی مربوط به گلخانه طراحی و پیاده‌سازی کرده که برای دسترسی به فرآیند و کنترل پارامترها و اطلاعات به طور مستمر از طریق اینترنت و فناوری‌های بی‌سیم مناسب استفاده شده و در اختیار کابر قرار می‌گیرند. بردهای آردوینو حاوی چندین ابزار جانبی برای برقراری ارتباط با دستگاه‌های دیگر از جمله UART، SPI، I2C، USB روی پین‌هایGPIO هستند. با این حال، ارتباط سیمی می‌تواند برقرار باشد، در این پروژه از فناوری‌های WiFi, ZigBee استفاده کرده تا بتوانیم اطلاعات حسگرها را بصورت بی‌سیم دریافت کنیم.

در این بخش سیستم اتوماسیون و مانیتورینگ پیشنهادی که به صورت ماژلار پیاده‌سازی شده است، معرفی می‌گردد. این سیستم از دو بخش اصلی «شبکه حسگر/عملگر بی‌سیم» و «سیستم مانیتورینگ و کنترل‌کننده مرکزی» تشکیل شده است.

۴-۱- شبکه حسگر/عملگر بی‌سیم

حسگرهای استفاده شده در نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند.

الف) حسگرهای استفاده شده جهت اندازه‌گیری کمیت‌های محیطی داخل گلخانه

ب) حسگرهای استفاده شده جهت اندازه‌گیری شدت باد و ذرات معلق خارج گلخانه

به منظور اندازه‌گیری کمیت‌های محیطی داخل گلخانه از حسگرهای «DHT11» برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هوا، «MQ-135»، برای اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسید کربن، «BH1750» برای اندازه‌گیری شدت نور استفاده شده است. این سه حسگر به همراه یک ماژول گیرنده-فرستنده بی‌سیم (برای ارسال داده‌های حسگرها به ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات) بر روی یک مدار چاپی مونتاژ و در داخل گلخانه نصب می‌شوند. به مجموعه این سه حسگر و ماژول گیرنده-فرستنده، یک گره حسگری بی‌سیم می‌گوییم. تعداد گره‌های حسگری نصب شده در داخل گلخانه وابسته به مساحت گلخانه و نیاز کارفرما است. به طور تقریبی به منظور دستیابی به کیفیت مطلوب کنترل شرایط محیطی، به ازای هر صد متر مربع فضای گلخانه به چهار گره حسگری نیاز است. بنابراین با توجه به مساحت گلخانه تعداد گره حسگری و در نتیجه هزینه پیاده‌سازی این سیستم متفاوت خواهد بود.

علاوه بر این با توجه به اینکه یکی از تجهیزات کنترلی در گلخانه‌های هوشمند مربوط به باز و بسته کردن پنجره سقفی گلخانه است، لازم است از یک حلقه حفاظتی برای بسته نگه‌داشتن پنجره در شرایط طوفانی یا غلظت بالای ریزگردها استفاده کنیم. برای این منظور از حسگرهای «MPXV7002DP» برای اندازه‌گیری شدت باد و «GP2Y1010» برای اندازه‌گیری ذرات معلق در هوا استفاده شده است. این حسگرها به همراه یک ماژول گیرنده-فرستنده بی‌سیم (برای انتقال داده‌های حسگرها به ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات) بر روی یک مدار چاپی مونتاژ و خارج از گلخانه نصب می‌شود. لازم به ذکر است برای یک گلخانه با هر میزان مساحت، تنها به یک گره حسگری خارجی برای قرائت شدت باد و ذرات معلق نیاز است و مساحت گلخانه تأثیری بر آن ندارد.

علاوه بر گره‌های حسگری معرفی شده، لازم است از یک سلونوئید ولو برای تزریق دی‌اکسیدکربن به فضای داخل گلخانه و تعدادی رله الکترومکانیکی برای روشن و خاموش کردن مه‌پاش (جهت افزایش رطوبت)، لامپ‌های رشد گیاه، موتورهای باز و بسته کننده سایبان و پنجره سقفی و همچنین سیستم گرمایش و سرمایش استفاده شود. ارتباط این رله‌ها و سلونوئید ولو با ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات می‌تواند به صورت سیمی یا به صورت بی‌سیم (با استفاده از یک ماژول گیرنده-فرستنده بی‌سیم) انجام شود.

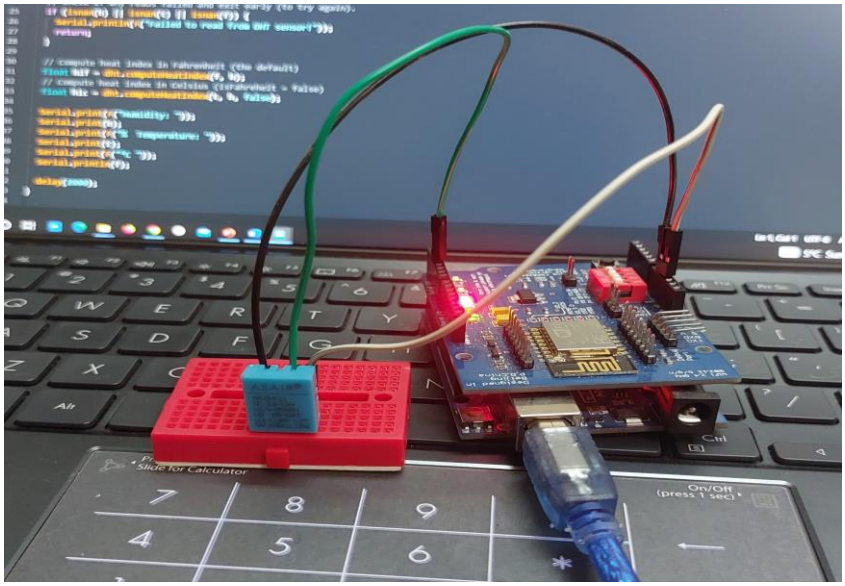
در این مطالعه از دو پروتکل شناخته شده WiFi و ZigBee برای انتقال بی‌سیم اطلاعات استفاده و از نظر فنی و اقتصادی مقایسه شده است.

۴-۱-۱- استفاده از پروتکل WiFi

در روش اول، ارتباط بین گره‌های حسگری با ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات را با استفاده از پروتکل WiFi انجام داده و با استفاده از این فناوری، اطلاعات حسگرها را به کاربر منتقل می‌کنیم. این روش را می‌توان برای بوردهای آردوینو با یکی از موارد زیر استفاده کرد.

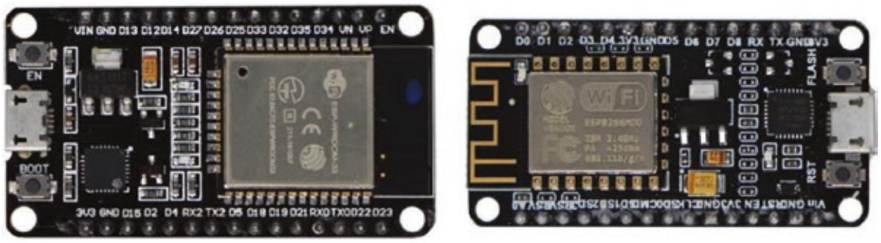
- استفاده از بورد آردوینو با شیلد وای‌فای
- استفاده از بورد آردوینو با ماژول ESP32
- استفاده از بورد آردوینو با ماژول ESP8266
- استفاده از بورد آردوینو MKR1000

استفاده از بورد آردوینو با شیلد وای‌فای به دلیل اینکه باید از یک آردوینو UNO به عنوان Header board برای اتصال آن استفاده کنیم مقرون به صرفه نیست. ضمن اینکه استفاده از این روش باعث ایجاد مشکلاتی در اتصالات و پیاده‌سازی پروژه مدنظر می‌شود. بنابراین استفاده از شیلد وای‌فای، که در شکل ۵ نمایش داده شده، پیشنهاد نمی‌شود.



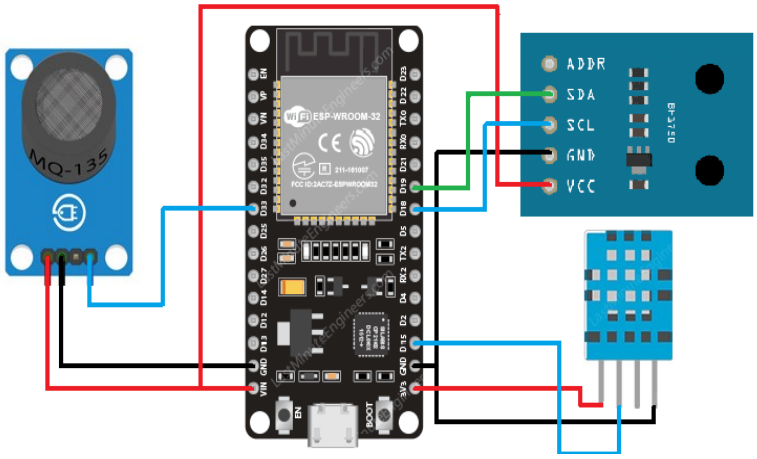
شکل ۵- اتصالات مداری ماژول ESP8266 WiFi shield همراه با برد آردوینو UNO

استفاده از آردوینو با ماژول ESP32 (یا ماژول ESP8266) روش دیگری برای ارتباط بین گره‌های حسگری با ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات است که نسبت به روش قبلی مزایای متعددی دارد. بوردهای آردوینو (به غیر از MKR1000) به طور ذاتی از پروتکل‌های بی‌سیم پشتیبانی نمی‌کند، بنابراین بایستی از یک ماژول پشتیبانی کننده از پروتکل WiFi، مانند ESP32، استفاده کنیم که می‌تواند با پروتکل فرمان AT کنترل شود. به این ترتیب، می‌توان یک سریال نرم‌افزاری را در آردوینو باز کرد تا با ماژول ESP32 و در نتیجه با اینترنت ارتباط برقرار کنیم. ESP32 نسخه‌ی به‌روز شده از ESP8266 و یک تراشه ترکیبی WiFi و بلوتوث دارد که بر روی باند فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز ISM کار می‌کند. این ماژول برای دریافت بهترین قدرت و عملکرد RF در ارتباط با گوشی‌های موبایل، برنامه‌های کاربردی اینترنت اشیاء و دستگاه‌های الکترونیکی سیار طراحی شده است. ESP32 عمدتاً در برنامه‌های WiFi و بلوتوث اینترنت اشیا با ۲۰ جزء خارجی استفاده می‌شود. ESP32 علاوه بر قابلیت WiFi، دارای قابلیت بلوتوث نیز می‌باشد. درحالی که ESP8266 فقط قابلیت WiFi دارد. ESP32 سریع‌تر بوده و در طراحی دو هسته‌ای موجود است. ضمن اینکه قابلیت کار در حالت کم مصرف را نیز دارد [۲۱]. ماژول‌های ESP32 و ESP8266 جهت مقایسه در شکل ۶ نشان داده شده است.

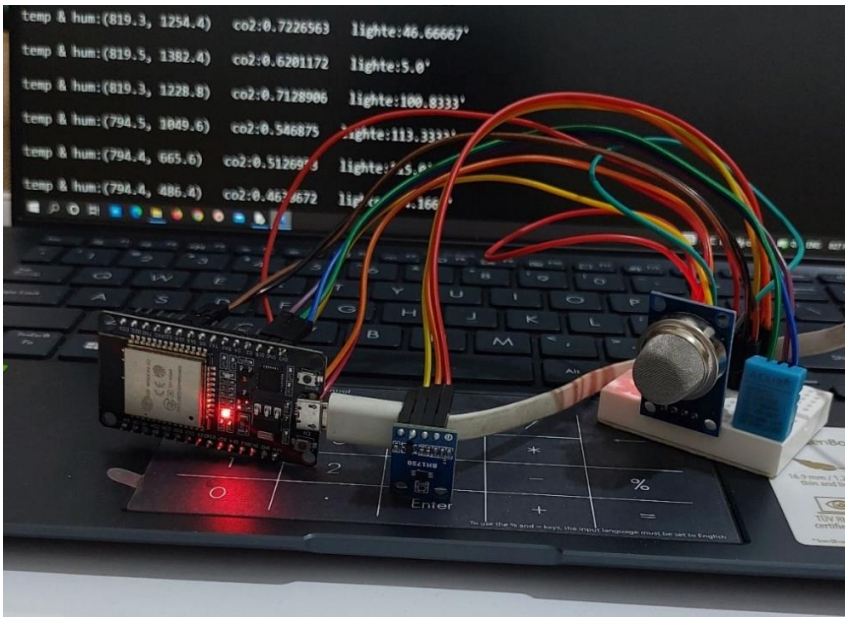


شکل ۶- ماژول ESP32 (سمت چپ) و ماژول ESP8266 (سمت راست)

ESP32 را می‌توان با استفاده از محیط‌های مختلف توسعه برنامه‌ریزی کرد. می‌توان کد را به زبان C++ (مانند آردوینو) یا با زبان MicroPython نوشت. با توجه به نیاز به راه‌اندازی چندین حسگر به طور همزمان توسط یک پردازنده و ارسال اطلاعات آن به ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات، از ESP32 برای پیکربندی این پروژه استفاده شده و برای برنامه‌ریزی آن از زبان میکروپایتون استفاده شده است. پیاده‌سازی و شماتیک مدار و اتصال حسگرهای DHT11، MQ-135 و BH1750 به ماژول ESP32 در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

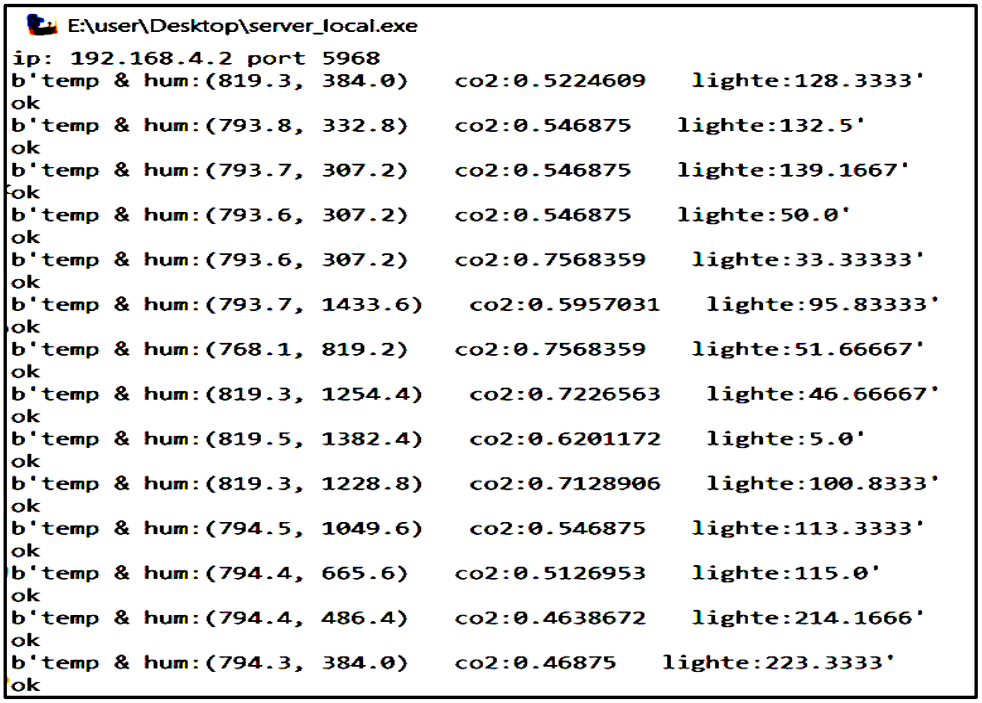


شکل ۷- شماتیک مدار اتصال ESP32 به حسگرهای DHT11، MQ-135 و BH1750



شکل ۸- پیاده‌سازی مدار اتصال ESP32 با حسگرهای DHT11,MQ-135,BH1750

سپس کد برنامه مورد نظر برای پایش وضعیت گلخانه و مدیریت عوامل موثر در گلخانه که در محیط MicroPython توسعه یافته را بر روی سخت‌افزار ESP32 بارگذاری کرده و اجرا می‌کنیم که با تامین تغذیه سیستم خروجی برنامه قابل مشاهده است.

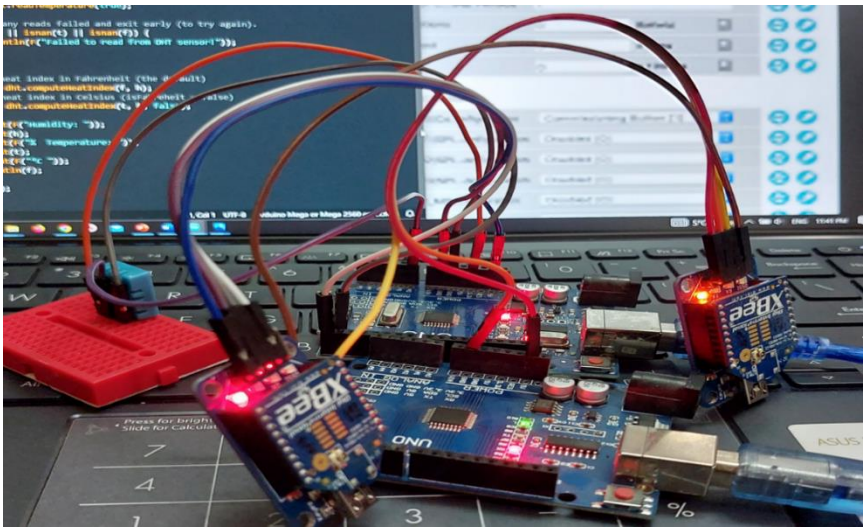


شکل ۹- خروجی پروژه و نمایش مقادیر حسگرها

۴-۱-۲- استفاده از پروتکل ZigBee

همانگونه که بیان شد، ZigBee یک فناوری ارتباط بی‌سیم مبتنی بر استاندارد IEEE 802.15.4 است که از ارتباط سریال برای ارسال و دریافت داده استفاده می‌کند و می‌توان از آن به عنوان فرستنده و گیرنده استفاده کرد. بنابراین می‌توان با Arduino و هر نوع میکروکنترلر و کامپیوتر رابط کاربری داشته باشد، چرا که همگی از ارتباط سریال پشتیبانی می‌کنند و همگی دارای پورت سریال برای ارسال و دریافت داده هستند. همچنین می‌تواند با دیگر بوردهای ZigBee ارتباط برقرار کند تا یک شبکه تشکیل دهد، یا می‌توان برای ایجاد یک شبکه محلی از آن استفاده کرد. با توجه به امکانات بیان شده، برخی از کاربردهای آن عبارتند از: ارتباطات بی‌سیم برد کوتاه، سیستم پایش از راه دور، سیستم اتوماسیون بی‌سیم برای خانه و صنایع کوچک [۲۲].

برای برقراری ارتباط با استفاده از فناوری ZigBee باید از ماژول XBee استفاده کنیم که توسط رابط مناسب مانند Arduino و NodeMCU به سیستم متصل می‌شود. ماژولXBee را می‌توان به عنوان Coordinator، Router یا End Divice مشخص کرد. برای راه‌اندازی و مشخص کردن نقش هرگره ابتدا باید آن‌ها را با استفاده از نرم‌افزار XCTU پیکربندی کنیم، سپس با اتصال حسگرهای مختلف و اجرای برنامه، می‌توان خروجی ارتباط سریال را به گره‌های مختلف ارسال کرد. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، اتصالات مداری این سیستم پیچیده‌تر از ماژول ESP32 مبتنی بر WiFi بوده و نیازمند تجهیزات بیشتری است. هزینه قطعات مورد نیاز برای راه‌اندازی این سیستم با استفاده از ماژول XBee بالاتر از ماژول WiFi بوده و پیاده‌سازی طرح با این روش توجیه اقتصادی ندارد و استفاده از آن پیشنهاد نمی‌شود.

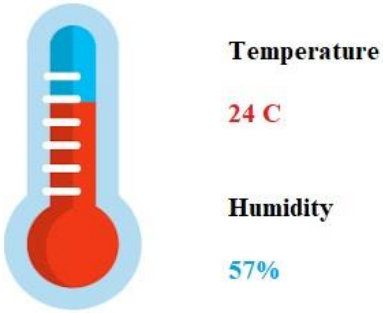


شکل ۱۰- اتصال حسگر DHT11 به ماژول XBee

۴-۲- سیستم مانیتورینگ و کنترل‌کننده مرکزی

در نمونه آزمایشگاهی ارائه شده، برای سیستم مانیتورینگ و کنترل مرکزی، جهت کاهش هزینه‌ها، ماژول پردازنده و کنترل تجهیزات و ماژول اینترنت بر روی یک لپ‌تاپ پیاده‌سازی شده است. با توجه به اینکه در کنترل تجهیزات گلخانه عملیات پردازشی سنگینی مورد نیاز نیست، می‌توان از یک مینی‌کامپیوتر یا سرور با قابلیت اتصال به WiFi و شبکه LAN استفاده نمود. ضمن اینکه این کامپیوتر پس از دریافت داده‌های حسگرها از طریق WiFi، می‌تواند آن‌ها را بر روی بستر اینترنت در اختیار کاربر یا مدیر گلخانه قرار دهد. علاوه بر این مدیر گلخانه می‌تواند از راه دور مقادیر setpoint کمیت‌های محیط گلخانه را تغییر دهد یا اینکه به صورت دستی فرمان روشن یا خاموش تجهیزات را اعمال نماید. لازم به ذکر است با توجه به اینکه در هر گره حسگری از ماژول گیرنده-فرستنده WiFi استفاده شده است، اشخاص داخل گلخانه می‌توانند با اتصال تلفن همراه خود به این ماژول‌ها مقادیر قرائت شده توسط حسگرها را مشاهده نمایند.

به عنوان مثال برای پایش دما و رطوبت هوای داخل گلخانه، حسگر DHT11 را به ماژول NodeMCU وصل کرده و داده‌های لحظه‌ای دما و رطوبت را به سرور ThingSpeak ارسال می‌کنیم. به این صورت فقط با داشتن یک ارتباط با اینترنت می‌توانید دما و رطوبت یا سایر متغیرهای فیزیکی دیگری را از راه دور نظارت کنیم. سپس کد برنامه مورد نظر را بر روی بورد توسعه NodeMCU بارگذاری کرده و برنامه را اجرا می‌کنیم و می‌توان در هر زمان و مکان به ThingSpeak متصل شده و اطلاعات حسگر را مانند شکل ۱۱ مشاهده کرد.



شکل ۱۱- خروجی برنامه در Arduino Cloud IoT

۴-۳- مقایسه اقتصادی طرح پیشنهادی با نمونه‌های مشابه

تاکنون سیستم‌های اتوماسیون و مانیتورینگ مختلفی برای گلخانه‌های هوشمند معرفی و به بازار ارائه شده‌اند. با این وجود این سیستم‌ها عمدتاً قابلیت انعطاف زیادی نداشته و در صورت نیاز به تبدیل گلخانه‌های سنتی موجود در کشور، بایستی تغییرات زیادی در

گلخانه اعمال گردد و این تغییرات هزینه زیادی به همراه دارد. در این پروژه تلاش شده است پیکربندی ماژولار و انعطاف‌پذیری ارائه شود که پیاده‌سازی را بسیار آسان‌تر و راحت‌تر کرده، زمان نصب و راه‌اندازی را به شدت کاهش دهد و عیب‌یابی و تعمیر و نگهداری آن نیز سریع‌تر و آسان‌تر انجام شود. جنبه دیگر اهمیت این پروژه، توجیه اقتصادی بسیار مناسب آن درعین حال که تمام توانایی‌های سیستم‌های مشابه را داراست، به این صورت که کشاورزان با سطح توانایی‌های مختلف بتوانند از این سیستم استفاده کنند. هزینه هوشمندسازی گلخانه بر اساس تعداد حسگرها و تعداد سخت‌افزارهای گلخانه و امکانات سیستم هوشمندسازی محاسبه می‌شود، به تبع وقتی ابعاد گلخانه بزرگ‌تر می‌شود باید برای هوشمندسازی کامل گلخانه دستگاه‌ها و اجزای بیشتری را کنترل کرد و حسگرهای بیشتری را برای سنجش دقیق‌تر شرایط محیطی داخل گلخانه استفاده کرد. بنابراین هزینه مورد نیاز برای هوشمندسازی گلخانه افزایش می‌یابد. هزینه راه‌اندازی سیستم‌های موجود در بازار برای هر گره حسگری با استفاده میکروکنترلرها بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلیون ریال است، در حالی که سیستم پیشنهادی با وجود اینکه توانایی‌های بیشتر و به‌روزتری دارد و عملکرد و کارایی آن باتوجه به استفاده از پروتکل‌های بی‌سیم بسیار مناسب‌تر است، هزینه راه‌اندازی و اجرای بسیار پایین‌تری دارد.

در طرح پیشنهادی، یک معماری اینترنت اشیا مبتنی بر ارتباطات بی‌سیم و اینترنتی برای کنترل و نظارت بر عوامل موثر بر رشد گیاه در یک گلخانه ارائه شده است. طراحی این سیستم با استفاده از یک شبکه حسگری مناسب با شرایط گلخانه انجام شده که با استفاده از میکروکنترلرها پردازش می‌شود، این سیستم کاملا به‌روز با امکانات قابل توجه و کارآمد است که با هزینه بسیار کم و کارکردی پایدار و مطمئن نسبت سیستم‌های موجود پیاده‌سازی شده که می‌تواند از طریق فناوری WiFi داده‌های سیستم را در اختیار کنترل‌کننده مرکزی قرار دهد و امکان مدیریت و کنترل شرایط محیطی را برای کاربر فراهم کند. یک سیستم اتوماسیون و مانیتورینگ اقتصادی مبتنی بر اینترنت اشیا با بهره‌گیری از دانش فنی و ترکیب ابزارهای سخت‌افزاری کم هزینه، پیاده‌سازی و محقق شده است. این سیستم در مقایسه با سیستم‌های فعلی موجود در بازار دارای مزایای زیر است:

۱. تامین نسبتاً آسان قطعات و تجهیزات لازم و پیاده‌سازی آسان و سریع
۲. قیمت مناسب حسگرها، میکروکنترلرها و گیرنده-فرستنده‌های داده
۳. ایجاد یک اتصال اینترنتی و اشتراک آسان داده‌ها بر روی شبکه
۴. سهولت در عیب‌یابی و تعمیر و نگهداری آن
۵. انتقال امن و پایدار داده به صورت بی‌سیم

هزینه پیاده‌سازی هر گره حسگری داخل گلخانه در این طرح در حدود ۱۵ میلیون ریال (با احتساب دلار ۴۵۰ هزار ریالی) و هزینه گره حسگری بیرونی در حدود ۵۵ میلیون ریال محاسبه شده است. لازم به ذکر است متناسب با وسعت گلخانه، نیازمند استفاده از چند گره حسگری برای نصب در مکان‌های مختلف گلخانه هستیم. در حالی که برای هر گلخانه با هر ابعاد، تنها نیاز به استفاده از یک گره حسگری بیرونی است. ضمناً استفاده از این گره حسگری الزامی نبوده و در صورت صلاحدید کارفرما به منظور کاهش هزینه قابل چشم‌پوشی است. لازم به ذکر است علاوه بر هزینه گره‌های حسگری ذکر شده، به یک سرور نیاز است که هزینه‌ای بین ۱۵ تا ۲۵ میلیون تومان در بر خواهد داشت. این هزینه جزو هزینه‌های ثابت پروژه است و مساحت گلخانه تأثیری در آن ندارد. همچنین در صورت نیاز به آپشن‌های بیشتر از جانب کارفرما، هزینه اجرای پروژه به همان نسبت افزایش می‌یابد.

در حال حاضر، اکثر شرکت‌های موجود در حوزه اتوماسیون گلخانه‌های هوشمند، به عنوان نماینده انحصاری شرکت‌های خارجی عمل می‌کنند و با استفاده از تجهیزات آماده وارداتی طرح‌هایی با انعطاف‌پذیری کمی را ارائه می‌دهند. از این رو چنین سیستم‌هایی، هزینه‌های بالای تهیه و نگهداری، کابل‌کشی و ارسال اطلاعات با روش‌های سنتی به همراه داشته و معمولاً برای گلخانه‌های با مساحت بالا (حداقل هزار مترمربع) مناسب هستند. هزینه پیاده‌سازی سیستم اتوماسیون گلخانه که در بازار توسط شرکت‌های مختلف برای گلخانه‌های کوچک با متراژ ۱۰۰ متر با چهار گره سنسوری ارائه می‌شود بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلیون ریال به علاوه هزینه سیم‌کشی است. در حالی که هزینه پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی برای چنین گلخانه‌ای بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلیون ریال خواهد بود که بسیار مقرون به صرفه بوده و هزینه سیم‌کشی و نصب نیز نخواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

گلخانه‌ای که در آن پارامترهای دما، رطوبت، نور و دی‌اکسیدکربن تحت کنترل و پایش باشد، را یک گلخانه هوشمند گویند. تاکنون سیستم‌های اتوماسیون مختلفی برای کار در گلخانه‌های هوشمند ساخته شده که عمده آن‌ها با اتصالات سیمی انجام شده است و برای تبدیل گلخانه‌های سنتی کوچک به گلخانه هوشمند هزینه بالایی را بر کشاورز تحمیل می‌کند. استفاده از اتصالات سیمی در چنین سیستم‌هایی، نه تنها هزینه اجرای طرح را بالا می‌برد، بلکه تعمیرات و عیب‌یابی را نیز پیچیده‌تر می‌کند. به همین منظور استفاده از شبکه‌های بی‌سیم در سیستم‌های اتوماسیون هوشمند روند رو به رشدی دارد. باتوجه به فضای محدود و سرپوشیده گلخانه‌ها و فواصل کوتاه بین حسگرها، WiFi و ZigBee دو پروتکل مناسب برای پیکربندی شبکه‌های بی‌سیم به حساب می‌آیند. در این مطالعه ابتدا پروتکل‌ها و استانداردهای مناسب برای برقراری ارتباط بین اجزای سیستم اتوماسیون بررسی شد. سپس تعدادی از حسگرهای مناسب برای این طرح شامل حسگر اندازه‌گیری دما و رطوبت DHT11، حسگر اندازه‌گیری رطوبت خاک Fc-28، حسگر اندازه‌گیری شدت نور BH1750، حسگر اندازه‌گیری کربن‌دی‌اکسید MQ-135 و مواردی دیگر با توجه به نیاز گلخانه استفاده شد. در پیاده‌سازی پروتکل‌های فوق‌الذکر، مشاهده شد که هزینه تمام شده طرح با استفاده از ماژول‌های XBee Pro مبتنی بر پروتکل ZigBee بسیار بیشتر از پروتکل WiFi است. بنابراین برای اقتصادی نمودن طرح و کاهش هزینه از شبکه بی‌سیم مبتنی بر پروتکل WiFi با استفاده از ماژول ESP32 استفاده کردیم. طرح اتوماسیون پیشنهادی با استفاده از سخت‌افزارهای ارزان قیمت و در عین حال با کیفیت مناسب پیاده‌سازی شده و عملیات کنترل و مانیتورینگ گلخانه را از طریق حسگرها و عملگرهای مناسب انجام می‌دهد. این سیستم دارای ساختار ماژولار با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا بوده ~~بوده~~ و امکان تغییر و افزایش و کاهش حسگرهای مدنظر برای بالا بردن ضریب اطمینان را دارد. طرح پیشنهادی قابلیت اتصال به اینترنت را نیز دارد و می‌تواند اطلاعات وضعیت گلخانه را از راه دور در اختیار کاربر قرار دهد، تا بتواند در هر زمان و هر مکان، نظارت و تغییر در عوامل مدنظر را انجام دهد. سیستم پیشنهادی در مقایسه با موارد مشابه بسیار کم‌هزینه بوده و برای هوشمندسازی گلخانه‌های سنتی کوچک گزینه مناسبی بوده و می‌توان در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با کمترین تغییرات و پرداخت کمترین هزینه از مزایای گلخانه‌های هوشمند استفاده نمود.

۶- منابع و مراجع

[1] United Nations, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. [online]. Available: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9814. (Accessed on Jun. 28, 2023).

[2] C. Kittas, N. Katsoulas, T. Bartzanas and S. Bakker, "Greenhouse climate control and energy use," in Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. pp. 63–95. Available online: https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf (accessed on July 03, 2023).

[3] Akrami M, Salah AH, Javadi AA, Fath HE, Hassanein MJ, Farmani R, Dibaj M, Negm A. Towards a sustainable greenhouse: Review of trends and emerging practices in analysing greenhouse ventilation requirements to sustain maximum agricultural yield. Sustainability. 2020 Apr 1;12(7):2794. doi:10.3390/su12072794.

[4] Dhanaraju M, Chenniappan P, Ramalingam K, Pazhanivelan S, Kaliaperumal R. Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. Agriculture. 2022 Oct 21;12(10):1745.

[5] Tapuwa Mashangwa, Greenhouses part 2: An option for maximised production . https://blog.growlink.com/the-history-of-greenhouses (accessed on July 03, 2023).

[6] Rezvani SM, Shamshiri RR, Moghaddam JJ, Balasundram SK, Hameed IA. Digital Agriculture in Iran: Use Cases, Opportunities, and Challenges. *Digital Agriculture, Methods and Applications*. 2022 Oct 28. DOI: 10.5772/intechopen.103967

[7] Soheli SJ, Jahan N, Hossain MB, Adhikary A, Khan AR, Wahiduzzaman M. Smart greenhouse monitoring system using internet of things and artificial intelligence. *Wireless Personal Communications*. 2022 Jun;124(4):3603-34.

[8] Gupta MJ, Chandra P. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*. 2002 Aug 1;27(8):777-94.

[9] Badji A, Benseddik A, Bensaha H, Boukhelifa A, Hasrane I. Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2022 Aug 28:133753.

[۱۰] محمدرضا حسندخت، مدیریت گلخانه (تکنولوژی تولید محصولات گلخانه‌ای)، انتشارات سلسبیل، ۱۳۸۶، شابک ۱۰ رقمی: ۹۶۴۸۹۰۳۴۶۸

[۱۱] پل.وی. نیسون، ترجمه سازمان پارکها و فضای سبز شهر تهران، مدیریت گلخانه (جلد ۱)، ۱۳۷۴.

[12] R. Rayhana, G. Xiao, and Z. Liu, "Internet of Things empowered smart greenhouse farming," IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 4, no. 3, pp. 195-211, 2020.

[13] Xiao, Yang, and Yi Pan, *Emerging wireless LANs, wireless PANs, and wireless MANs: IEEE 802.11, IEEE 802.15, 802.16 wireless standard family*, John Wiley & Sons, 2009.

[14] Liu, Ruoshui, and Ian J. Wassell. "Opportunities and challenges of wireless sensor networks using cloud services." Proceedings of the workshop on Internet of Things and Service Platforms. 2011.

[15] P. C. Pinto and M. Z. Win, ”Communication in a Poisson Field of Interferers–Part I: Interference Distribution and Error Probability,” in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 7, pp. 2176-2186, July 2010.

[16] Chaitanya Kumar D, Adiraju RV, Pasupuleti S, Nandan D. *A review of smart greenhouse farming by using sensor network technology*. InProceedings of International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications: ICMISC 2020 2021 (pp. 849-856). Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-15-7234-0_79.

[17] Naidu GA, Kumar J., *Wireless protocols: WiFi son, Bluetooth, ZigBee, z-wave, and WiFi.* In Innovations in Electronics and Communication Engineering: Proceedings of the 7th ICIECE 2018 2019 (pp. 229-239). Springer Singapore.

[18] L. Guoli, Z. Chuang, and M. Fuyuan, "Design of remote monitoring and control system for agricultural greenhouse environment based on ESP32," *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, vol. 43, no. 3, p. 47, 2022.

[19] Afolaranmi SO, Ramis Ferrer B, Martinez Lastra JL. Technology Review: prototyping platforms for monitoring ambient conditions. International Journal of Environmental Health Research. 2018 May 4;28(3):253-79. doi.org/10.1080/09603123.2018.1468423.

[20] Porwal A, Tulchhia A. Weather Forecasting in Real Time using IoT and Machine Learning (Chapter 3). *Trends in Agriculture using IoT*., AkiNik Publications, New Delhi, 2022.

[21] Hoddie P, Prader L. *IoT Development for ESP32 and ESP8266 with JavaScript: A Practical Guide to XS and the Moddable SDK*., Apress; 2020 Jun 25.

[22] Farooq MS, Riaz S, Helou MA, Khan FS, Abid A, Alvi A. Internet of Things in Greenhouse Agriculture: A Survey on Enabling Technologies, Applications, and Protocols. *IEEE Access*. 2022 Apr 11;10:53374-97.