



Design, Construction and Evaluation a Vertical Farming System with Automated Controller of Plant Growth Environment Parameters for Developing Urban Farming

Morteza Sedaghat Hosseini^{1✉} | Nazilla Tarabi² | Mohammad Younesi Alamouti³ |
Hamid Khafajeh⁴

1. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Imam Khomeini Higher Education Centre; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: mo.sedaghat@areeo.ac.ir

2. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: tarabi99@ut.ac.ir

3. Imam Khomeini Higher Education Centre; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: mohamadyunesi@yahoo.com

4. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran. E-mail: khafajeh@jahromu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 11, 2026

Revised: May. 29, 2026

Accepted: July. 1, 2026

Published online: Autumn 2026

Keywords:

*Vertical farming,
Urban farming,
Hydroponic,
Automated control*

ABSTRACT

A vertical farming system is a method for solving challenges such as climate changes, increasing population and environmental damage. In urban vertical farming, the usage of an automated control system is necessary. So the aim of this study was to design and construct a hydroponic vertical farming system that controlled plant growth parameters in an indoor environment. This system has a control unit of lighting, heating, cooling, air conditioning units and is able to store and send data. The effect of air flow rate of fans on the time of adjustment of temperature and moisture was studied to choose the optimum setting of heating and air conditioning units. The data of sensors was recorded in 24 hr. The results confirmed that there is no significant difference in the air flow rates of inlet fans for reducing temperature and 101 cfm was suggested. It was observed that there was a significant difference ($p < 0.01$) in the states of lighting unit (on/off) at the time of reducing temperature. Results of ANOVA showed that there was a significant difference ($p < 0.01$) between fan rotating speeds for setting the moisture at range of 50% to 60% and the optimum air flow rate was at 117 cfm. The data of air temperature and the moisture of the vertical greenhouse in 24hr showed that the automated control system can set the temperature and the moisture in the optimum range. RMSE for weight, height and width were 2.45 to 4.54 which showed suitable performance of the system.

Cite this article: Sedaghat Hosseini, M., Tarabi, N., Younesi Alamouti, M. & Khafajeh, H (2026). Design, construction and evaluation a vertical farming system with automated controller of plant growth environment parameters for developing urban farming, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (3), 71-90. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412587.665645>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412587.665645>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate changes, reduced soil fertility and increase in the population in large cities necessitate new approaches in agriculture. Vertical urban farming is an alternative method for traditional greenhouses and open-field agriculture. By integrating vertical cultivation structures and soilless closed-loop irrigation methods, the amount of land and water used per crop is extremely reduced compared to open-field practices. But for increasing efficiency of farming performance, intelligence control system is required. So the aim of this study is design, construction and evaluation of indoor vertical hydroponics farming that equipped with monitoring and controlling system of plant growth parameters such as temperature, moisture, and light, level of water in tank, EC and pH of nutrient water. This system allows monitoring and control of the major characteristics of the leafy vegetables' cultivation process while still ensuring simplicity of application and management by farmers with average technical skills and knowledge.

Material and methods

In order to evaluate the automated control system, a NFT vertical greenhouse system was designed and constructed. This system consists of vertical hydroponic structure, sensors and actuators, monitoring and control system, air Conditioner system, nutrient container, water and air pump, artificial lighting unit, nutrient and pH adjustments' solutions unit, and etc. Also control setup consists of a discovery board of STM32f411, LDR sensors, temperature and moisture sensors, pH and EC sensors, electrical current sensors, a water level sensor, fans drivers, an ETHERNET module and a TFT LCD. Air moisture and temperature contents are the most important parameters in plant cultivation in greenhouse. The control system has to set the optimum amount of moisture and temperature. So optimum rotating speed of air conditioner fans for controlling the moisture and temperature were determined. Effects of air flow rates of inlet (blower) and outlet (vacuum) fans (in 101, 105, 109, 117 and 121 cubic feet per minute) on the greenhouse air temperature and moisture adjusting time were carried out. The temperature test was carried out in two modes of active and inactive of lighting and heating units. The results were analyzed by ANOVA. Lettuce seedlings have been chosen to be cultivated for the present study. The lettuce seedlings were first planted in rockwool blocks and then placed into the specific plastic cubic plots before they were transferred to the vertical farm. In order to evaluate the urban vertical farming greenhouse performance, weight, height and width of the cultivated lettuces were measured and compared with the samples and RMSE parameter was determined.

Results and discussion

The results show that there is no significant difference in inlet air flow rates effects the vertical greenhouse air temperature adjusting time. It was observed that there was a very significant difference ($p < 0.01$) in the lighting system statement (on/off) on time of air temperature adjusting and there was no significant difference in inlet air flow rate on time of air temperature adjusting. So the best inlet air flow rate for setting optimum temperature is at 101 cubic feet per minute (cfm). Results of analysis of variance shows that there was a significant difference between five levels of outlet fan air flow rates for setting the greenhouse air moisture content at range of 50% to 60% and by Duncan test was found that there is maximum difference between 101 and 112 cfm. Also the optimum fan speed for setting the greenhouse air moisture content was at 117 cfm.

Results of recording data of the air temperature and the moisture contents of the vertical greenhouse in 24hr show that the automated control system can setting the temperature and the moisture in optimum range of 16 °C to 24 °C and 50-60 % respectively.

The results for growth of the lettuces in vertical farming with automated control setup show that weight, height and width of the lettuces are in sufficient range. Average of weight, height and width of the lettuces were 128.3 gr, 28 and 25 cm respectively and RMSE of each other were 4.54, 3.28 and 2.45 respectively. The results of RMSE in compare with other studies showed the automated control system has suitable performance.

Conclusion

Due to the increasing world population, loss of arable land, and increasing food demands, new agricultural practices are required. There is an important requirement for new agricultural practices. Therefore, this study has focused on the latest farming technique which is vertical farming. It is the latest technique to deal with the crisis as it offers high yield, less water usage, and is not affected by climate conditions. An automated system employs the use of various sensors to maintain optimum plant growth parameters. For comparative analysis NFT vertical greenhouse that equipped with control setup was designed and constructed. The suggested system is easy to implement and provides intelligent remote management of the plant growing process. It is characterized by mobility, small size, quick and easy installation, and that it does not require personnel with

professional experience to operate or specialized service support and is easy to clean.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Morteza Sedaghat Hosseini: Conceptualization, Design and construction of the system, Formal analysis, acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing original draft.

Nazilla Tarabi: Conceptualization, Design and construction of the control system, Formal analysis, Funding, acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing original draft.

Mohammad Younesi Alamouti: review & editing

Hamid Khafajeh: review & editing

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

In this research did not used Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

Authors would like to acknowledge Imam Khomeini Higher Education Centre and Dr. Ahmad Banakar, faculty member of Tarbiat Modares University.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کشت عمودی مجهز به کنترل خودکار شرایط محیط رشد با هدف توسعه کشاورزی شهری

سید مرتضی صداقت حسینی^۱ | نازیلا طربی^۲ | محمد یونسی الموتی^۳ | حمید خفاجه^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه فنی و ماشین‌های کشاورزی، مرکز آموزش عالی امام خمینی (ره)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: mo.sedaghat@areeo.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: tarabi99@ut.ac.ir

۳. گروه فنی و ماشین‌های کشاورزی، مرکز آموزش عالی امام خمینی (ره)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: mohamadyounesi@yahoo.com

۴. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران. رایانامه: khafajeh@jahromu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۱۰

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

کشت عمودی،

کشاورزی شهری،

هیدروپونیک،

کنترل خودکار.

کشت عمودی به عنوان راه‌حلی برای چالش‌های تغییرات اقلیم، رشد جمعیت شهرنشینی و تخریب محیط‌زیست در کشاورزی و تضمین امنیت غذایی، مورد توجه است. در تلفیق کشت عمودی با کشاورزی شهری، برای جلوگیری از تأثیرات منفی تغییرات آب‌وهوایی، وجود سامانه کنترل پارامترهای محیط رشد ضروری است. بنابراین هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک سامانه کشت عمودی هیدروپونیک مجهز به کنترل‌کننده خودکار عوامل تأثیرگذار بر رشد گیاه و سازگار با محیط‌های سرپوشیده است. این سامانه، دارای واحدهای کنترل‌کننده روشنایی، گرمایش، سرمایش، تهویه و تغذیه است و قابلیت ذخیره و ارسال داده را دارد. برای انتخاب شرایط بهینه عملکرد واحد تهویه و گرمایش، تأثیر ظرفیت هوادهی فن‌ها (در پنج سطح) در تعدیل دما و رطوبت بررسی شد. داده‌های دریافتی از حسگرها در شبانه‌روز ثبت و مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برخی مشخصه‌های ظاهری کاهوی فرانسوی کشت شده با نمونه‌های شاهد مقایسه شد. نتایج تحلیل واریانس در بررسی واحد گرمایش نشان داد که تغییر ظرفیت هوادهی فن دمنده در تعدیل دما معنی‌دار نبود. بنابراین کمترین ظرفیت هوادهی (101 cfm) پیشنهاد شد. تأثیر فعال بودن واحد روشنایی در افزایش دمای محیط کشت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. تأثیر ظرفیت هوادهی فن دمنده نیز در مدت زمان تعدیل رطوبت در سطح یک درصد معنی‌دار بود و مقدار 117 cfm پیشنهاد شد. بررسی داده‌های دریافتی از حسگرها طی شبانه‌روز نشان داد که سامانه کنترلی به خوبی دما و رطوبت را در محدوده مطلوب حفظ می‌کند. مقایسه پارامترهای وزن، ارتفاع و عرض کاهو کشت شده با مقدار RMSE بین ۴/۵۴ تا ۲/۴۵ نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سامانه بود.

استناد: صداقت حسینی، مرتضی؛ طربی، نازیلا؛ یونسی الموتی، محمد و خفاجه، حمید (۱۴۰۵). طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کشت عمودی مجهز به کنترل خودکار شرایط محیط رشد با هدف توسعه کشاورزی شهری، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۷ (۳)، ۷۱-۹۰.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412587.665645>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI:

مقدمه

چالش‌های تغییرات اقلیم، محدودیت در زمین‌های قابل کشت، کاهش تدریجی حاصلخیزی خاک، کمبود منابع آب، فرسایش خاک و در مقابل آن افزایش جمعیت مناطق شهری و تأثیر آن بر افزایش تقاضای غذا، عوامل محدود کننده اصلی در کاربرد روش‌های سنتی کشاورزی مبتنی بر خاک می‌باشند (Mthembu et al., 2025; Wu et al., 2025; Sehgal et al., 2026). با توسعه کشت عمودی هیدروپونیک با تکیه بر کشت طبقاتی، به عنوان یکی از روش‌های جایگزین سامانه‌های کشاورزی مبتنی بر خاک، امکان کاهش اثرات مربوط به کمبود مداوم آب و زمین‌های حاصلخیز، وجود دارد. از آنجایی که استفاده از نهاده‌های شیمیایی از قبیل آفت‌کش‌ها و کودها در کشت عمودی هیدروپونیک در مقایسه با کشاورزی سنتی بسیار کمتر است، این روش منجر به کاهش انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای در مزرعه، مانند اکسید نیتروژن و کاهش بخشی از هزینه تولید می‌شود (Rufi-Salis et al., 2020, Vatistas et al., 2022). از مزایای دیگر روش کشت عمودی هیدروپونیک می‌توان به افزایش تعداد برگ در هر بوته و بقای گیاهچه نیز اشاره نمود (Duan et al., 2020) و گزارش شده‌است که میزان آب مصرفی در کشت عمودی هیدروپونیک در مقایسه با کشت مرسوم بسیار کمتر است (Hasan et al., 2026; Martin & Molin, 2019). برای کاربرد سامانه کشت عمودی هیدروپونیک معمولاً از فناوری‌های پیشرفته برای تولید محصول در محیط‌های سرپوشیده مختلف استفاده می‌شود. نور مصنوعی، سامانه سرمایش و گرمایش، مکانیزم آبیاری، مکانیزم تهویه و تغذیه و بسترهای رشد بدون خاک، همگی در این سامانه گنجانده شده‌اند. کشت عمودی علاوه بر هیدروپونیک در قالب آئروپونیک و آکوپونیک نیز قابل اجرا است (Chowdhury et al., 2020; Chu & Wan, 2026). گلخانه‌ها و مزارع سرپوشیده متعددی در سراسر جهان در حال حاضر از این فناوری برای فراهم کردن شرایط رشد پایدار و قابل اعتماد در تمام طول سال استفاده می‌کنند (Sengodan et al., 2022). در برخی منابع بر بهبود خواص تغذیه‌ای و مواد مغذی گیاه رشد داده شده در کشت عمودی هیدروپونیک در مقایسه با کشت مزرعه‌ای تأکید شده است (Qian et al., 2022; Sharma et al., 2026). همچنین تحقیقاتی در زمینه اصلاح ژنتیک محصولات برای کاهش ارتفاع گیاه برای تطبیق با محیط کشت عمودی انجام شده‌است (Jeon et al., 2025). اما عمده‌ترین محدودیت کشت عمودی هیدروپونیک وابستگی آن به سامانه‌های انرژی محور است که برای حل این مشکل تلفیق این سامانه با کشاورزی شهری پیشنهاد می‌شود، بطوریکه می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی آن را کاهش دهد (Kumar, 2022). به طور مثال با قرارگیری یک سامانه کشت عمودی هیدروپونیک در فضاهای بدون استفاده و غیر مفید ساختمان‌های اداری، فروشگاه‌ها، لابی برج‌ها، آپارتمان‌ها و غیره می‌توان از گرمای باقیمانده ساختمان بهره برد و تأثیرات زیرساخت‌های اضافه شده را کاهش داد (Martin & Molin, 2019) و یا با تلفیق با سامانه‌های فتوولتائیک انرژی مورد نیاز را تأمین کرد (Wu et al., 2025; Sohn et al., 2026). با این حال، برای افزایش بازده این سامانه‌ها، گام‌های کارآمدتری نیاز است. در سامانه کشت عمودی هیدروپونیک که در فضای شهری بکار گرفته می‌شوند، ممکن است تغییرات آب و هوایی و دمایی محیط بیرون از گلخانه، تأثیرات منفی در حفظ شرایط مطلوب رشد داشته باشد. بنابراین برای جلوگیری از تغییرات سریع دما و رطوبت داخل فضای کشت، نیاز به یک سامانه کنترلی است که بتواند از تغییرات ناگهانی دما، رطوبت و سایر پارامترها جلوگیری کند، بطوریکه ترکیب کشت عمودی شهری با سامانه‌های کنترل خودکار، منجر به ایجاد روشی پایدار و پربازده برای تأمین تقاضای غذا شود.

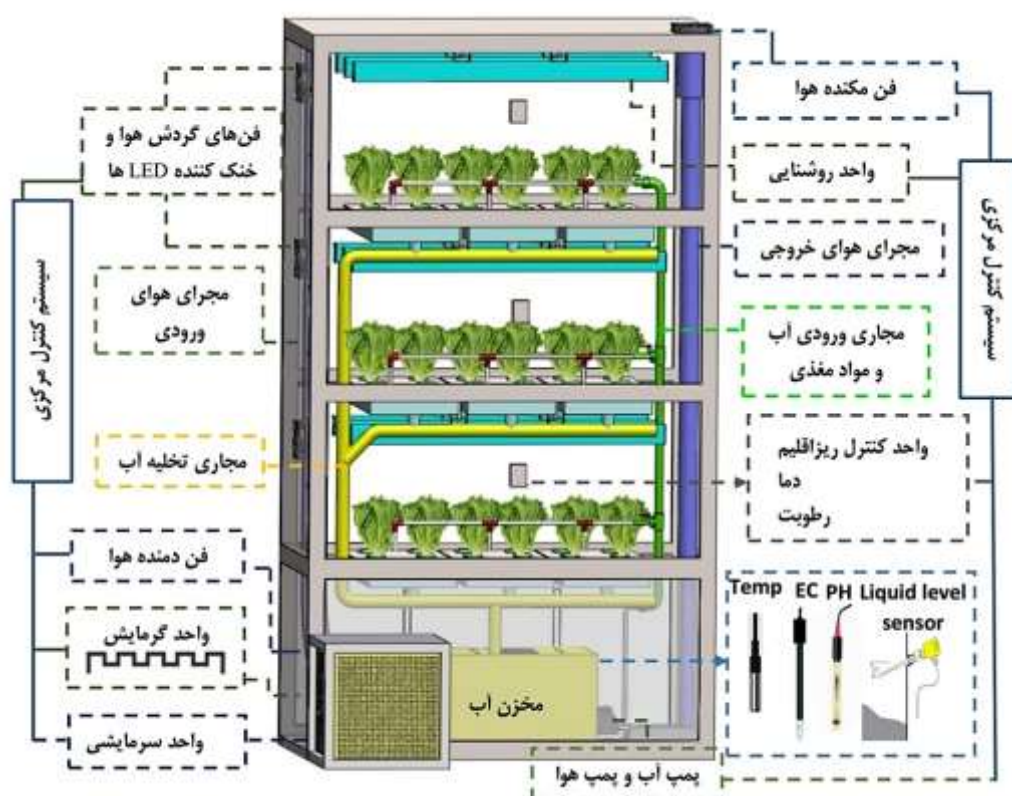
بررسی‌های مختلفی در زمینه روش‌های افزایش پایداری کشت عمودی هیدروپونیک انجام شده که در ادامه به برخی اشاره می‌شود. Chowdhury et al. (2020) به پیاده‌سازی و ارزیابی یک سامانه کشت عمودی هیدروپونیک که مجهز به سامانه کنترل خودکار بود، پرداختند. در این بررسی، یک پلتفرم محیط کشت عمودی تجاری خریداری شد و سامانه کنترل دما و رطوبت بر روی آن نصب شد. بررسی این تحقیق نشان داد که بکارگیری یک سامانه کنترلی بر روی این گلخانه عمودی شهری، به طور قابل توجهی عملکرد آن را بهبود می‌بخشد و داده‌های آن را می‌توان برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی با هدف افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی کننده عملکرد سامانه، مورد استفاده قرار داد. (Nikolov et al., 2023) به طراحی یک سامانه هیدروپونیک کشت عمودی کوچک که مجهز به سامانه کنترلی پیشرفته برای کشت سبزیجات برگدار بود، پرداختند. نتایج بدست‌آمده تأیید می‌کند که سامانه هیدروپونیک طراحی شده در مقیاس کوچک، پارامترهای تعیین‌شده دمای هوا، رطوبت هوا و pH محلول غذایی را در محدوده بهینه برای رشد کاهو حفظ می‌کند. در آزمایش اولیه، ۷۵ درصد جوانه‌زنی بذر کاهو حاصل شد. مزایای اصلی سامانه هیدروپونیک پیشنهادی، سادگی مدیریت و نصب آسان آن است. علاوه بر این،

امکان نظارت و کنترل از راه دور را بدون نیاز به تجربه بالای کاربر با چنین امکاناتی فراهم می‌کند. (Kaur et al. (2023) سامانه کشت عمودی هیدروپونیک مجهز به بخش کنترل عوامل محیطی برای تولید کاهوی رومی را طراحی و پیاده‌سازی کردند. در این سامانه از تکنیک جریان عمیق هیدروپونیک، حسگرهای مختلف و یک سامانه متعادل‌کننده خودکار pH و میزان جامدات محلول (TDS) استفاده شد. تحلیل و مقایسه نتایج با کشت مرسوم نشان داد که وزن گیاه تازه گلخانه دارای سامانه کنترل خودکار و بدون سامانه خودکار به ترتیب ۵۸/۶۶ گرم و ۴۸/۸۱ گرم است. همچنین، تجزیه و تحلیل شیمیایی نشان داد که در هر دو کشت عمودی مجهز به کنترل خودکار و بدون کنترل خودکار، عناصر ریزمغذی و درشت مغذی گیاه در محدوده بهینه قرار دارد اما مقادیر فسفر و پتاسیم در کاهو کشت شده در محیط کنترل شده بیشتر است. (Verma et al. (2025) به طراحی یک محیط کشت عمودی برای پرورش توت‌فرنگی پرداختند. در این پژوهش علاوه بر اعمال سامانه کنترلی pH، تاثیر فاصله منبع نور مصنوعی و مدت زمان روشنایی بر روی کمیت و کیفیت محصول مورد ارزیابی قرار گرفت و مدلی مبتنی بر رگرسیون برای رشد گیاه و عملکرد محصول ارائه شد. (Wu et al. (2025) یک سامانه کشت عمودی شهری اقتصادی را طراحی و پیاده‌سازی کردند که دارای چهار طبقه بود و علاوه بر تامین انرژی توسط صفحات خورشیدی، قابلیت کنترل روشنایی، تامین غلظت CO_2 از جذب مستقیم هوای محیط بیرون را داشت و در محلول تغذیه آن، از بیوجار^۱ برای رشد بهتر گیاه استفاده می‌شد. مطالعات پارامتریک و تجزیه و تحلیل کاربرد در مقیاس جهانی، سازگاری گسترده این روش را با شرایط محیطی متنوع نشان می‌دهد. این یافته‌ها، همراه با ویژگی‌های ماژولار سامانه‌های کشاورزی عمودی، پتانسیل امیدوارکننده این طرح را برای افزایش امنیت غذایی و تقویت کشاورزی پایدار برجسته می‌کند. همچنین بررسی کشت محصولات پروبیوتیک مانند کاسنی در محیط کنترل‌شده کشت عمودی شهری توسط Battistelli et al. (2025) انجام شد و یافته‌ها سازگاری قابل توجه محصولات پروبیوتیک چون کاسنی با شرایط رشد کاملاً کنترل‌شده و توانایی آن در تجمع سطوح بالای اینولین^۲ در ریشه جوان گیاه، با وجود چرخه رشد کوتاه را نشان می‌دهد.

با توجه به دیدگاه منابع مختلف و چالش‌های مطرح شده و پژوهش‌های محدودی در زمینه کنترل پارامترهای محیط کشت عمودی هیدروپونیک در ایران و نیاز به بررسی نحوه پیاده‌سازی کشت عمودی هیدروپونیک در محیط‌های شهری در داخل کشور، هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت یک سامانه کشت عمودی هیدروپونیک مجهز به کنترل‌کننده خودکار عوامل تاثیرگذار بر رشد گیاه و سازگار با محیط‌های سرپوشیده مانند ساختمان‌های اداری و مکان‌های مشابه است که از اثرات منفی تغییرات شرایط آب‌وهوایی محیط بیرون کشت تاثیرپذیر نباشد و اهداف کشاورزی شهری را دنبال کند. همچنین علاوه بر کنترل خودکار پارامترهای موثر در رشد گیاه، قابلیت ذخیره داده‌های دریافتی از حسگرها و ارسال آن با پروتکل ارتباطی مشخص به میزبان^۳ را داشته باشد و در عین سادگی کاربرد، مدیریت کشت محصول را برای کشاورزانی با مهارت‌ها و دانش فنی متوسط فراهم کند. بررسی تاثیر تغییرات دور فن‌های تهویه و ظرفیت هوادهی آنها بر مدت زمان تعدیل دما و رطوبت محیط کشت با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) برای انتخاب شرایط بهینه از سایر اهداف این پژوهش است. همچنین برای ارزیابی تاثیر عملکرد سامانه کنترلی در رشد گیاه، مشخصه‌های کیفی محصول کشت شده با نمونه‌های شاهد مقایسه شده و پارامتر میانگین مربعات خطا (RMSE) و انحراف استاندارد (SD) برای مشخصه‌های مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

سامانه کنترل کشت عمودی هیدروپونیک مورد نظر در این پژوهش، از چند زیرسامانه تشکیل شده‌است که شامل: واحد کنترل ریزاقلیم جهت نظارت بر پارامترهای دما و رطوبت محیط کشت و خارج آن، واحد کنترل پارامترهای محلول مواد مغذی از جمله دما، pH، EC و ارتفاع سطح مایع درون مخزن محلول مواد مغذی و مدت زمان روشن بودن پمپ تغذیه، واحد کنترل روشنایی یا نور مصنوعی، واحد تامین گرمایش و سرمایش، واحد تهویه و واحد ذخیره و ارسال داده است (شکل ۱). در این مطالعه ابتدا اجزاء و ساختمان گلخانه، شامل طبقات و سینی‌های کشت، طراحی و ساخته شد، سپس سامانه کنترل خودکار شرایط محیط رشد گیاه طراحی و پیاده‌سازی شد. پس از ارزیابی سامانه و به منظور بررسی عملکرد گلخانه، اقدام به کشت و پرورش نشاء کاهوی فرانسوی گردید که در ادامه هر کدام از مراحل مذکور بیان می‌گردد.

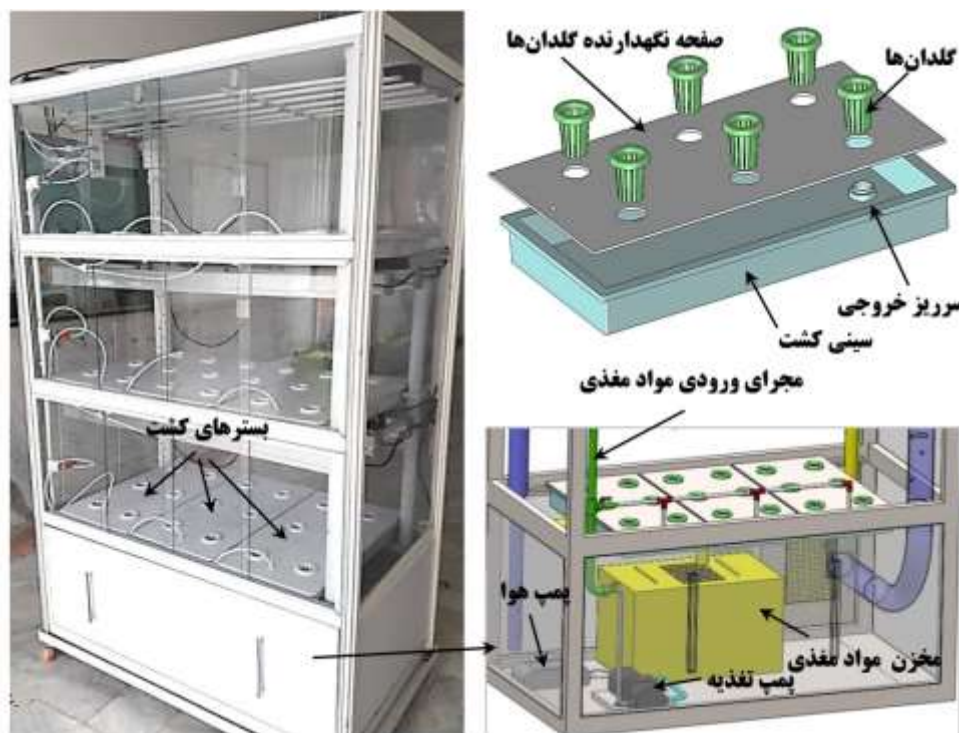


شکل ۱. نمای پشت سامانه کشت عمودی هیدروپونیک ساخته شده و ارتباط زیرسامانه‌های کنترلی آن

ساختار سامانه کشت عمودی هیدروپونیک

کارکرد سامانه کشت عمودی هیدروپونیک ساخته شده در این پژوهش، بر اساس روش کشت جریان عمیق (DFT) بود. روش DFT تلفیقی از روش کشت لایه نازک مواد مغذی (NFT) و کشت آب عمیق (DWC) است (Kaur et al., 2023). به‌منظور امکان استفاده در محیط‌های سرپوشیده و فضاهای کوچک با هدف پیاده‌سازی کشاورزی شهری، ابعاد بدنه اصلی گلخانه عمودی مورد نظر با ارتفاع 1 ± 2 میلی‌متر، طول 1200 ± 2 میلی‌متر و عرض 600 ± 8 میلی‌متر مطابق با استاندارد DIN7168 طراحی شد (ولی‌نژاد، ۱۳۹۱). برای کاهش وزن سازه و ضدآب بودن آن، پروفیل آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ برای جنس اسکلت سازه انتخاب شد و برای دیواره‌های طبقه زیرین و محل قرارگیری تجهیزات مانند مخزن و پمپ‌ها از ورقه‌های PVC و در مورد دیواره‌های طبقات کشت، از ورقه‌های پلکسی‌گلس و شیشه استفاده شد. به‌منظور داشتن فضای کافی برای رشد محصولات در طبقات، فضای مورد نظر برای سه طبقه کشت در نظر گرفته شد و فاصله بین طبقات کشت با توجه به بررسی منابع، ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Saito et al., 2013; Duangpakdee & Sukpancharoen, 2024; Soufi e al., 2024). بستر کشت هر طبقه متشکل از سه سینی مخصوص کشت علوفه هیدروپونیک بود که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۶۰۰، ۳۰۰ و ۶۰ میلی‌متر بود (شکل ۲). هر سینی مجهز به زهکش در کف بود و در قسمت زهکش از یک فیتینگ لوله آبیاری قطره‌ای استفاده شد. وجود فیتینگ به عنوان سرریز سینی باعث می‌شود تا سطح محلول مغذی داخل بستر کشت بطور مداوم در حدود ۱۵ میلی‌متر تنظیم گردد. در طول آزمایش، با وجود فیتینگ و قطر لوله زهکش و حجم ریشه‌ها گرفتگی فیتینگ و نشستی آب دیده نشد، اما در صورت احتمال سرریز شدن آب از سینی‌های کشت، بهتر است به طور دوره‌ای گرفتگی دهانه لوله فیتینگ چک شود.

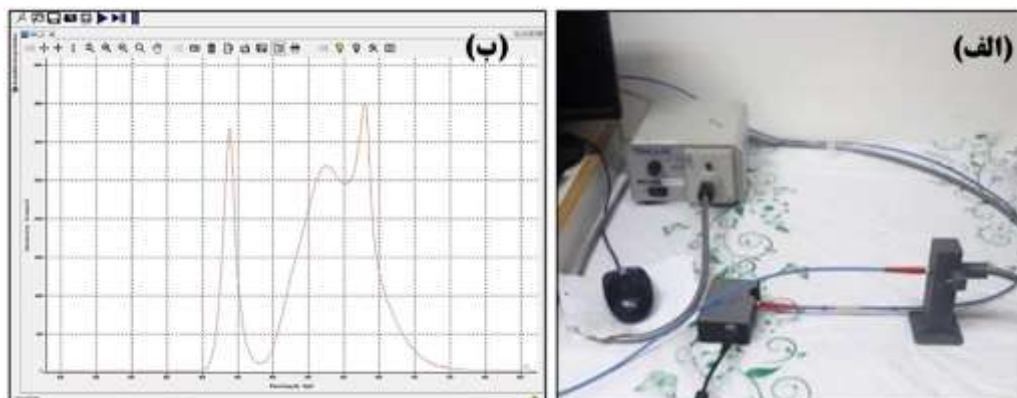
از سینی‌های کشت، آب اضافی از بین سینی‌ها به داخل مخزن ریخته می‌شوند. برای هر سینی، ۶ گلدان توری مخصوص کشت در نظر گرفته شد که توسط صفحه نگهدارنده‌ای با شش سوراخ از جنس PVC، گلدان‌ها بر روی سینی کشت ثابت نگه‌داشته می‌شدند (شکل ۲).



شکل ۲. اجزا بستر کشت و نمای انفجاری و داخلی آن

برای تامین نور مورد نیاز از LEDهای رشد گیاه ۱ وات (با نام تجاری LED Power Cree 1W، ساخت کشور چین، تحت لیسانس آمریکا) که طول موج نور آنها در محدوده ۴۲۰ تا ۷۵۰ نانومتر بودند، استفاده شد. توسط دستگاه Fiber-Lite مدل DC950H طیف نوری آنها اندازه گیری شد و در شکل ۳ تصویر دستگاه مذکور و نمودار طیف نوری LEDها نشان داده شده است. برای هر طبقه، سه آرایه از LEDها در نظر گرفته شد. در هر آرایه، از ۳۶ عدد LED یک وات استفاده گردید. برای افزایش راندمان LEDهای ۱۲ ولت هر کدام یک لنز (عدسی) ۳۰ درجه استفاده شد و در نهایت میزان پار نوری (PPFD) تقریباً برابر با $215 \pm 5/5$ میلی مول بر مترمربع بر ثانیه با توجه به فاصله بین LEDها از بستر کشت طبق پژوهش‌های (Saito et al. (2013)، (Soufi et al. (2024)، (Budavári، Hosseini et al. (2021) et al. (2024) تامین شد (اندازه‌گیری شده توسط دستگاه با نام تجاری Quantum PAR Meter، با بازه اندازه‌گیری ۰ تا ۵۰۰۰ میلی مول بر مترمربع ثانیه و ساخت کشور چین). مجموعه ترانس و LEDها در یک محفظه آب‌بندی شده قرار داده شد و از حسگرهای فتوسل برای تشخیص روشن یا خاموش بودن آرایه LEDها استفاده شد تا در صورت اختلال در میزان طول دوره روشنایی یا از کار افتادن هریک از LEDها هشدار لازم به کاربر داده شود. در هر طبقه برای هر مجموعه LEDها، نیز یک فن نصب شد تا علاوه بر تهویه بهتر از گرم شدن LEDها و گرم شدن احتمالی محصول جلوگیری کند. برای تهویه هوا دو مجرای ورودی و خروجی هوا که مجهز به فن‌های دمنده و مکند بودند، در نظر گرفته شد (شکل ۱- لوله‌های آبی پررنگ). در ابتدای مجرای ورودی هوا، یک کولر مخصوص (مجهز به فن با دور ۸۷۰۰ دور در دقیقه و پدهای خنک‌کننده و عرض، طول و ارتفاع بدنه ۳۰ سانتیمتر) و واحد گرمایش که یک المنت پره‌ای با توان ۵۰۰ وات بود قرار داده شد تا در صورت نیاز هوای گرم یا سرد وارد محیط کشت شود که هریک از طریق رله و فرمان میکرو راه‌اندازی می‌شدند. مخزن محلول مواد مغذی به طول ۵۳ سانتیمتر، عرض ۳۴ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر در زیر طبقات کشت قرار داشت. توسط پمپی با توان ۳۶ وات و دبی ۳/۱ لیتر بر دقیقه، محلول مواد مغذی وارد مجاری مربوطه شده (شکل ۱- مجاری سبز رنگ) و توسط شیرهای مجزا به بسترهای کشت انتقال پیدا می‌کرد. علاوه بر پمپ محلول مواد مغذی، سامانه به پمپ هوا با مقدار دبی هوا تا حداکثر ۴/۵ لیتر در دقیقه و فشار ۰/۱۲ مگاپاسکال، مجهز شد و یک هواساز در مخزن قرار داده شد. مخزن دارای حسگرهای دما، pH متر و EC متر و همچنین حسگر اندازه‌گیری ارتفاع سطح مایع در مخزن بود تا شرایط محلول مواد مغذی به طور مداوم بررسی شود. محلول غذایی پس از عبور از کنار گلدان‌های داخل بسترهای کشت و ریشه‌های گیاه، از طریق سرریز (شکل ۲) و سوراخ خروجی سینی‌های کشت، بوسیله لوله‌های برگشتی (شکل ۱- مجاری زرد رنگ) به داخل مخزن بر می‌گشت و توسط پمپ در این مسیر چرخش می‌کرد. کنترل هریک از واحدها و

حسگرهای مرتبط در ادامه شرح داده می‌شوند.

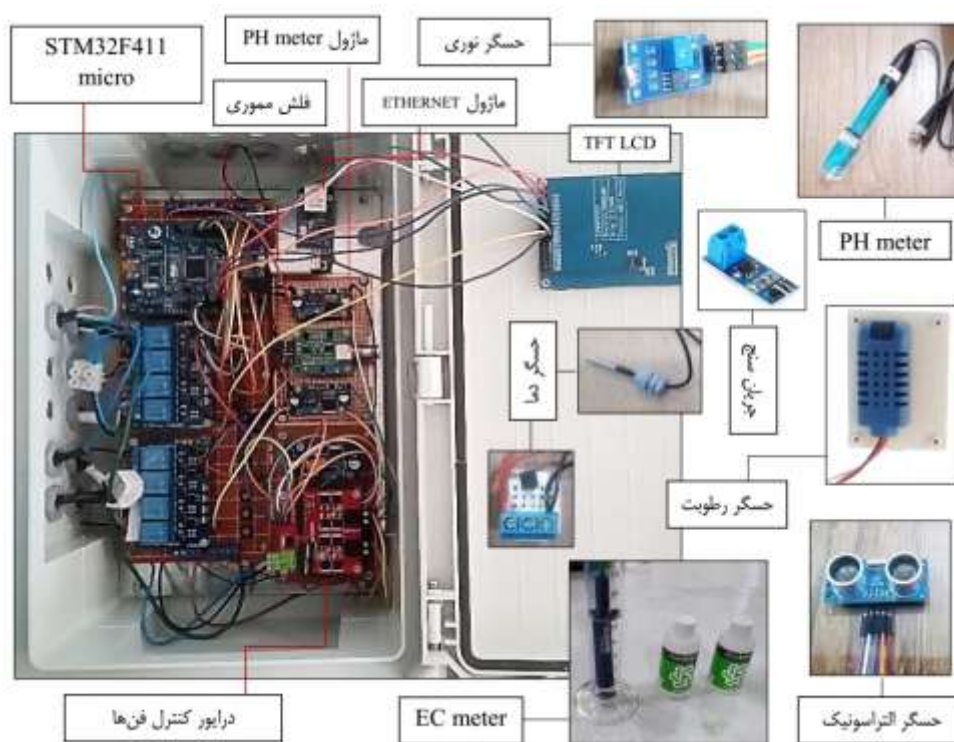


شکل ۳. الف) دستگاه اندازه گیری شدت طیف‌های منابع نور، ب) طیف منبع نور گلخانه مورد نظر

واحد کنترل و تحویل داده سامانه کشت عمودی هیدروپونیک

واحد کنترل مرکزی سامانه کشت عمودی هیدروپونیک ساخته شده، مبتنی بر دیسک‌آوری STM32F411 از خانواده میکروکنترلرهای ARM بود و در کامپایلر KEIL.uVision5 کد نویسی انجام شد (شکل ۴). کلیه حسگرها و عملگرها فرمان مورد نظر را از میکرو دریافت کرده و داده‌ها علاوه بر نمایش آنالاین، به صورت متن با فرمت CSV ذخیره می‌شود. ظرفیت فضای ذخیره سازی ۱۶ گیگابایت و با نرخ نمونه‌برداری ۱۲ داده بر دقیقه است که با استفاده از پروتکل USB، داده‌ها بر اساس زمان و تاریخ، ذخیره می‌شوند که حجم قابل توجهی برای ذخیره داده محسوب می‌شود و برای ارتباط با میکرو از ماژول مبدل USB OTG TO microUSB استفاده شد. برای حفظ زمان دقیق و جلوگیری از تاثیر احتمال قطع برق در داده‌ها از واحد RTC میکرو و اتصال پایه VB میکرو به باتری استفاده شد تا علاوه بر ذخیره داده با زمان و تاریخ در صورت قطع برق، از باتری برای تامین برق واحد ثبت زمان استفاده شود. برای کنترل واحد روشنایی، طول دوره روشن یا خاموش بودن LEDها توسط واحد Timer/Counter میکرو تعیین شد و دستور قطع یا وصل LEDها به رله مربوطه ارسال می‌شود. به تعداد آرایه‌های لامپ رشد، از حسگرهای فتوسل LDR MLG5516 استفاده شد که در صورت از کار افتادن LEDها خارج از بازه زمانی تعیین شده، هشدار مناسب صادر شود. برای کنترل دور فن‌های دمنده و مکنده از درایور موتور دوکاناله آمپر بالا مدل XY160D استفاده شد. این درایور بر اساس داده دریافتی از حسگرهای دما و رطوبت، فرمان خود را از واحد PWM میکرو دریافت می‌کند. ارسال فرمان از میکرو به سایر عملگرها مانند پمپ محلول مغذی، هیتر، LEDهای رشد، فن‌های گردش هوا، پمپ کولر و سایر عملگرها از طریق رله الکترومکانیکی انجام می‌شود. نوع کنترلر سامانه از نوع ON/OFF بود. برای دریافت بازخورد از کارکرد درست فن‌ها از حسگر جریان الکتریکی مدل ACS712 استفاده شد تا در صورت از کار افتادن هر یک از فن‌ها هشدار لازم صادر شود و رله مربوطه اتصال برق به فن مذکور را قطع کند. همچنین حسگر رطوبت محیط گلخانه از مدل AM1001 و حسگر دمای آن نیز مدل LM35DZ با خروجی آنالوگ بود و برای هر طبقه حسگرهای دما و رطوبت جدا در نظر گرفته شد و یک واحد کنترل دما و رطوبت در بیرون از محیط گلخانه نصب شد. حسگر دمای مورد استفاده برای مخزن محلول مواد مغذی نیز از مدل LM35 و از نوع ضد آب و با پوشش استیل بود. الکتروود pH متر مورد استفاده مدل E201-C و از ماژول مانیتورینگ و کنترلر حسگر pH با خروجی آنالوگ استفاده شد. EC متر مدل Conductivity K 1.0 probe، بر روی مخزن نصب شد که اطلاعات را به طور لحظه‌ای به سامانه پردازش انتقال می‌داد. برای کالیبره کردن EC متر از محلول‌های کالیبراسیون استاندارد که به همراه دستگاه بود استفاده شد. در صورت قرائت مقادیر pH و EC توسط حسگرها، خارج از دامنه مطلوب رشد، پیام اصلاح مقادیر برای کاربر نمایش داده می‌شود. در این مرحله، ابتدا مقدار pH اصلاح می‌شود و سپس مقدار EC. به این صورت که مقادیر محلول قلیایی یا اسیدی در چند مرحله برای جلوگیری از اعمال شوک به گیاه، به محلول داخل مخزن توسط کاربر اضافه می‌شود که در مراحل توسعه یافته سامانه این مرحله توسط پمپ انجام خواهد شد. برای اطمینان از پر بودن مخزن از یک شناور استفاده

شد که از طریق جریان شبکه لوله کشی آب چاه که فاقد کلر بود، سطح آب مخزن تنظیم شود و محلول مواد غذایی که مشخصات و نحوه تهیه آن در بخش کشت کاهو ذکر شده است، اضافه می‌شد. برای دریافت سیگنال هشدار سطح مخزن و تعیین ارتفاع محلول مغذی درون مخزن از حسگر فاصله سنج التراسونیک مدل HY-SRF05 استفاده شد و در قسمت بالای مخزن نصب گردید تا میزان ارتفاع دقیق مایع درون مخزن برای محاسبه حجم محلول مغذی مورد نیاز فراهم شود. میزان غلظت CO_2 مورد نیاز برای رشد کاهو حدود ۴۰۰ ppm است (Hosseini et al., 2021) که در طول روز با توجه به حضور افراد در ساختمان اداری و گردش هوای بیرون به داخل، در محیطی که سامانه در آن قرار داشت به حدود ۷۰۰ ppm می‌رسید و در حین فرایند تهویه، این سطح از CO_2 وارد محیط گلخانه می‌شد که نیاز به تزریق CO_2 را رفع می‌کرد. در نهایت داده‌های دریافتی از حسگرها پس از بهبود و تبدیل شدن به سیگنال قابل پردازش توسط میکروکنترلر به رایانه مورد نظر برای نمایش داده‌های نهایی انتقال داده می‌شدند. به این صورت که میکرو به ماژول شبکه اترنت DP83848 متصل شده و سپس این ماژول توسط کابل LAN به اکسس پوینت ENS202 EnGenius متصل شده و به صورت بی‌سیم، داده‌ها به رایانه منتقل می‌شوند. اکسس پوینت مورد استفاده در این طرح مدل ENS202 EnGenius بود. پهنای فرکانس این اکسس پوینت تا ۲/۴ GHz و دارای استاندارد IP65 می‌باشد. برای طراحی رابط گرافیکی کاربر نیز از نرم افزار C#.NET استفاده شد و در آن داده‌ها به همراه زمان و تاریخ، نمایش داده می‌شدند. همچنین یک نمایشگر مدل TFT touch 4inch با درایور LIL9488 برای نمایش اطلاعات بر روی بکس مدار سامانه کشت عمودی نصب شد. پروتکل ارتباطی این نمایشگر از نوع موازی بود. بکس مدار کنترلی با IP65 که بر روی دیواره جانبی خارجی گلخانه عمودی نصب شده تا از رطوبت داخل گلخانه دور باشد و سایر حسگرها در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۴. مدار کنترلی سامانه کشت عمودی و برخی اجزای آن

نحوه کشت کاهو و ارزیابی سامانه

در مرحله طراحی دستگاه، برای اطمینان از تحمل بار توسط شاسی گلخانه در نرم‌افزار SolidWorks، شبیه‌سازی و تحلیل تنش روی شاسی گلخانه انجام شد. جنس شاسی گلخانه از آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با تنش تسلیم ۲۳۰ MPa است. زمانی که سینی‌ها پر از آب و کاهو باشد وزن روی هر طبقه، حدود ۲۰ کیلوگرم است که در تحلیل ۲/۵ برابر این مقدار برای هر طبقه در نظر گرفته شد و ضریب اطمینان برای شاسی گلخانه تعیین شد. برای کشت کاهو، ابتدا نشاءهای کاهو فرانسوی تهیه شده و به محیط کشت گلخانه عمودی مورد نظر، منتقل گردید. نشاءهای تهیه شده در بستر پرلیت رشد داده شده بودند و برای ادامه رشد در سامانه کشت عمودی، پرلیت‌های باقی‌مانده از ریشه‌ها شسته و جدا شدند و در گلدان‌ها قرار داده شدند. برای رشد بهتر کاهو از محلول غذایی کاهو فرانسوی هیدروپونیک استفاده شد. برای تهیه محلول

غذایی، محصولی با نام تجاری تبسم سبز که حاوی دو استوک جدا بود خریداری شد. محتوای بسته‌ها به صورت جداگانه در ۲ لیتر آب مقطر با دمای ۲۰-۲۵ درجه حل شده و برای ساخت هر ۱۰ لیتر محلول غذایی نهایی لازم بود تا ۲۰۰ میلی‌لیتر از هر کدام از استوک‌ها را به ۹/۶ لیتر آب اضافه شود. آب مورد استفاده برای رشد کاهو، آب لوله‌کشی از چاه و بدون کلر بود. که در غیر این صورت باید از آب تصفیه شده یا آب شهری با شرط ماندگاری ۲۴ ساعت با هدف حذف کلر استفاده شود. دوره رشد کاهو فرانسوی بین ۴۰ تا ۴۵ روز است. بهینه دمای مناسب برای رشد کاهو بین ۱۶ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین نسبت ساعت روشن بودن نور مصنوعی (روز) به خاموش بودن آن (شب) برابر با ۱۶ به ۸ ساعت است (Kumaran et al., 2025). رطوبت بهینه برای رشد کاهو در زمان برگ‌دهی ۵۰ تا ۶۰ درصد است و محدوده pH مناسب برابر ۵/۵-۶/۵ تنظیم شد. EC مناسب برای رشد کاهو برابر با ۰/۹ تا ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز در نظر گرفته شد (Hosseini et al., 2021) و سامانه کنترل خودکار به گونه‌ای برنامه‌ریزی گردید تا شرایط مذکور را برای رشد بهینه گیاهان داخل گلخانه حفظ نماید. تغییرات دمای محیط بیرون گلخانه و گرمایی که لامپ‌های رشد گیاه تولید می‌کنند از جمله عوامل تاثیرگذار در خارج شدن دما از محدوده بهینه رشد است. بنابراین ضروری بود تا پیش از بررسی فرایند رشد کاهو در سامانه مورد نظر، دور بهینه و ظرفیت هوادهی مناسب برای فن‌ها در حفظ رطوبت و دمای مطلوب تعیین شود چرا که استفاده از دور حداقل و موثر علاوه بر کاهش سروصدا، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط مختلف از جمله فعال بودن واحد گرمایش و واحد روشنایی، تاثیر دورهای فن‌های دمنده و مکنده بر روی تعدیل دمای داخل محیط کشت مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تغییر دور فن از واحد PWM میکرو استفاده شد بطوریکه حداقل مقدار OCR براساس میزان افزایش دمای هیت و جلوگیری از گداخته شدن آن انتخاب شد و در مراحل بعدی ۱۰ واحد به مقدار OCR اضافه شد و برای درک بهتر عملکرد فن، بجای مقدار OCR واحد PWM از تبدیل دور فن به ظرفیت هوادهی فن استفاده شد. بنابراین مقدار تغییرات دما در مدت زمان ۳۰ دقیقه و با تغییر در ظرفیت هوادهی فن دمنده در پنج سطح ۱۰۱، ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۱۷ و ۱۲۱ فوت مکعب بر دقیقه (cfm) و در دو وضعیت روشن و خاموش بودن لامپ‌های رشد و با فعال بودن واحد گرمایش اندازه‌گیری شد (مرسوم است که واحد ظرفیت هوادهی فن را بر حسب فوت مکعب بر دقیقه بیان کنند. جدول کالیبراسیون مقادیر OCR متناسب با ظرفیت هوادهی فن در جدول ۱ نشان داده شده‌است) که به ترتیب متناسب با مقادیر ۲۲۵، ۲۳۵، ۲۴۵ و ۲۵۵ واحد OCR بود. در بررسی تعیین ظرفیت هوادهی فن، با توجه به اینکه هدف پیاده‌سازی کشاورزی شهری است، دمای محیط بیرون از گلخانه در زمان انجام این آزمایش برابر با ۱۹ درجه سانتی‌گراد بود. تاثیر ظرفیت هوادهی فن دمنده (در پنج سطح ۱۰۱، ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۱۷ و ۱۲۱ فوت مکعب بر دقیقه) در دو وضعیت روشن و خاموش بودن لامپ‌های رشد و با فعال بودن واحد گرمایش، بر افزایش دمای گلخانه در مدت ۳۰ دقیقه و با استفاده از نرم‌افزار SPSS به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه بار تکرار به طوریکه برای هر آزمون شرایط اولیه شروع به تست شامل دمای ابتدایی و رطوبت اولیه یکسان بود، ارزیابی شد.

جدول ۱. جدول کالیبراسیون مقادیر ظرفیت هوادهی فن متناسب با مقدار OCR

مقدار OCR	مقدار ولتاژ قرائت شده از خروجی درایور (ولت)	سرعت دورانی فن (دور بر دقیقه)	ظرفیت هوادهی فن (فوت مکعب بر دقیقه)
۲۱۵	۱۰/۳۵	۷۴۱۷/۵۱	۱۰۱
۲۲۵	۱۰/۷۳	۷۶۸۹/۸۳	۱۰۵
۲۳۵	۱۱/۱۰	۷۹۵۵	۱۰۹
۲۴۵	۱۱/۴۲	۸۳۸۱/۳۳	۱۱۷
۲۵۵	۱۱/۷۸	۸۴۴۲/۲۱	۱۲۱

با رشد گیاه و تبخیر و تعرق آن، رطوبت محیط گلخانه افزایش می‌یابد، با توجه به پاسخ سریع تغییرات رطوبت با روشن شدن واحد تهویه و به‌منظور بررسی اثر تغییر ظرفیت هوادهی فن مکنده در مدت زمان کاهش رطوبت، ابتدا رطوبت فضای داخل گلخانه به ۶۰ درصد رسانده شده و با روشن شدن فن مکنده، مقدار رطوبت متناسب با زمان، اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. مدت زمان لازم برای رسیدن رطوبت به مقدار ۵۰ درصد برای هر کدام از ظرفیت هوادهی فن (پنج سطح ۱۰۱، ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۱۷ و ۱۲۱ فوت مکعب بر دقیقه) و در سه مرحله تکرار اندازه‌گیری شد و نتایج بدست آمده در طراحی الگوریتم برنامه کنترلی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تاثیر پارامترهای مذکور و

همچنین تاثیر متقابل آنها از یک طرح آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر ترکیب استفاده شد و نتایج با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) در نرم افزار SPSS مورد ارزیابی قرار گرفتند و در صورت معنی داری از آزمون دانکن برای بیان تفاوت‌ها استفاده شد.

به منظور ارزیابی عملکرد سامانه کشت عمودی، ۵۴ عدد نشاء کاهوی فرانسوی تهیه شد و در گلدان‌های گلخانه عمودی کاشته شدند. کاهوهای کاشته شده بعد از ۴۰ روز برداشت شد و پارامترهای رشد شامل وزن بوته کاهو، ارتفاع بوته‌ها و عرض بوته‌ها اندازه‌گیری شدند (شکل ۵).



شکل ۵. کاهو فرانسوی کشت شده در مراحل مختلف رشد در گلخانه عمودی هیدروپونیک

نمونه‌های مرجع برای مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، از کاهوهای فرانسوی مورد پسند بازار که در شرایط گلخانه‌های هیدروپونیک مرسوم کشت شده بودند، تهیه شدند و هر یک از پارامترهای مذکور نیز برای نمونه‌های مرجع اندازه‌گیری شد. هدف از این آزمون، بررسی تطبیق پارامترهای ظاهری کاهوهای کشت شده با کاهویی است که مطلوب مصرف‌کننده نهایی بوده و امکان عرضه در بازار را دارند. انحراف استاندارد (SD) برای تعیین نزدیکی داده‌ها به یکدیگر محاسبه شد که بیانی از دقت اندازه‌گیری است. همچنین خطای مربعات میانگین ریشه‌ها (RMSE) برای مقایسه اختلاف بین اندازه‌گیری انجام شده از کاهوهای کشت شده در محیط گلخانه عمودی و کاهوهای شاهد، تعیین شد. برای محاسبه انحراف استاندارد و خطای مربعات میانگین ریشه‌ها به ترتیب از روابط ۱ و ۲ استفاده شد.

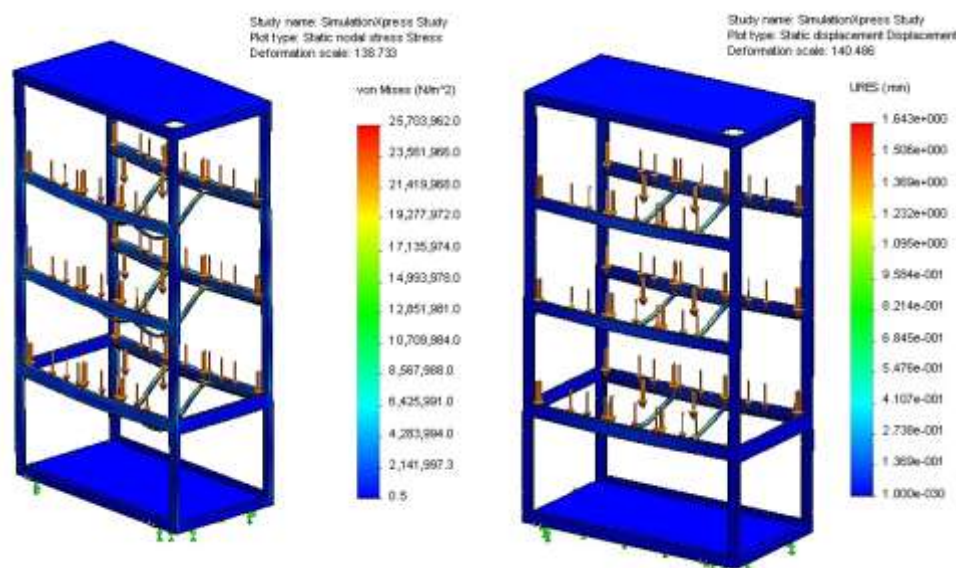
$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در روابط ۱ و ۲، C_i ، داده مرتبط با کاهو کشت شده مانند وزن و ارتفاع کاهو در محیط کنترل شده هیدروپونیک برای نمونه نام است، $\bar{C}_i$ میانگین داده مورد نظر برای کاهوی کشت شده در محیط کنترل شده هیدروپونیک، $\hat{C}_i$ میانگین مقادیر پارامترهای وزن، ارتفاع و عرض برای نمونه‌های شاهدی است که از کاهوهای کشت شده در محیط‌های گلخانه‌ای مرسوم و بازار پسند بدست می‌آید و n تعداد نمونه است.

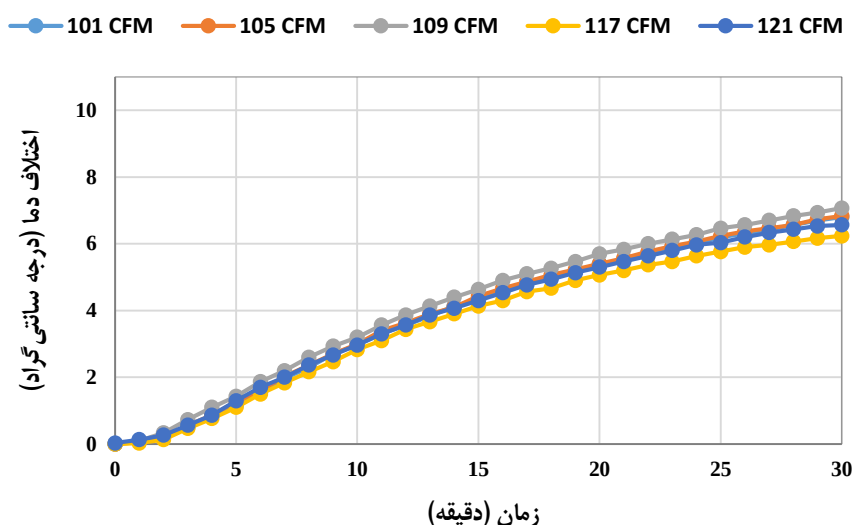
نتایج و بحث

نتایج تحلیل المان محدود شاسی سامانه کشت عمودی نشان داد که مقدار حداکثر تنش به وجود آمده بر اساس معیار فون میسز برابر با ۲۵ MPa و بیشترین مقدار جابه‌جایی برابر با ۱/۶ میلی‌متر بود (شکل ۶). با توجه به حداکثر تنش به وجود آمده و تنش تسلیم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ که برابر با ۲۳۰ MPa است، ضریب اطمینان شاسی سامانه کشت عمودی تقریباً برابر ۹ بود که نشان دهنده داشتن قابلیت تحمل بار روی شاسی است.

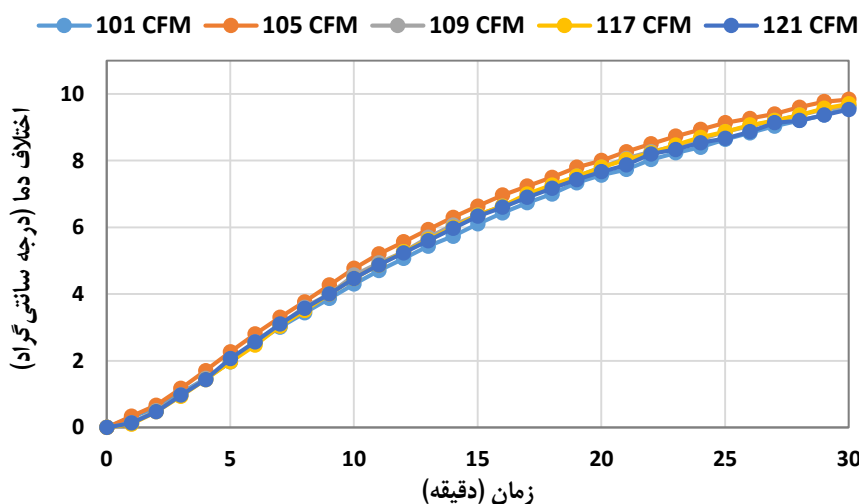


شکل ۶. نتایج تحلیل تنش و میزان جابه‌جایی بر روی شاسی سامانه کشت عمودی

با بررسی نتایج آزمون تاثیر ظرفیت هوادهی فن و وضعیت واحد روشنایی در تنظیم دمای محیط گلخانه مشخص گردید که با روشن شدن واحد گرمایش و روشن بودن فن دمنده، حداکثر اختلاف دما بین طبقه بالا و پایین با توجه به دور فن به ۱/۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسید که با گذشت چند دقیقه، این اختلاف دما کاهش پیدا کرده و تقریباً دمای طبقات یکسان می‌شدند. بنابراین، برای بررسی عملکرد واحد گرمایش و تاثیر سرعت فن، میانگین دمای بین طبقات در نظر گرفته شد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ در دو دقیقه ابتدایی آزمون، تقریباً افزایش دمایی مشاهده نمی‌شود ولی به تدریج سرعت افزایش دما بیشتر شده و در انتهای مدت زمان آزمایش، مجدداً شیب نمودارها کاهش می‌یابد. نزدیک هم بودن نمودارها امکان عدم وجود تاثیر معنی‌دار تغییر سرعت فن دمنده در میزان کاهش دما را محتمل‌تر می‌نماید. وقتی واحد روشنایی، خاموش است، افزایش دمای گلخانه پس از ۳۰ دقیقه، حدود ۶ تا ۷ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۷) در حالی که این مقدار برای حالت فعال بودن واحد روشنایی، بین ۹/۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. پس از ۳۰ دقیقه، با توجه به روشن بودن فن‌های خنک‌کننده LEDها، پس از این مدت زمان، شیب افزایش دما کاهش می‌یابد و در صورت بیش‌تر شدن از مقدار مطلوب رشد گیاه، هیتر خاموش شده و فن مکند فعال می‌شود (شکل ۸). مطابق جدول ۱، نتایج تحلیل واریانس نشان داد که اختلاف دمای ایجاد شده در بین پنج سطح ظرفیت هوادهی فن در شرایط یکسان معنی‌دار نیست. به عبارتی، افزایش دور فن در پنج سطح مورد نظر در ایجاد اختلاف دما در یک زمان ثابت، تاثیری ندارد. همچنین نتایج آزمون نشان داد که اثر متغیر وضعیت واحد روشنایی (روشن/خاموش) در افزایش دمای گلخانه خیلی معنی‌دار است ($P < 0.01$) و با روشن بودن لامپ‌های رشد، دمای محیط کشت سریع‌تر افزایش می‌یافت. این موضوع به دلیل تبدیل حدود ۷۰ درصد انرژی مصرفی واحد روشنایی به گرما می‌باشد. به عبارت دیگر هنگام روشن بودن لامپ‌های رشد، نیاز به واحد گرمایش کاهش پیدا می‌کند. میانگین مقدار افزایش دمای گلخانه در مدت ۳۰ دقیقه آزمایش، در وضعیت خاموش بودن واحد روشنایی ۶/۷۰ درجه سانتی‌گراد بود که این مقدار برای وضعیت روشن بودن واحد روشنایی به ۹/۶۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. نتایج همچنین نشان داد اثر متقابل ظرفیت هوادهی فن و وضعیت واحد روشنایی بر ایجاد اختلاف دمای محیط گلخانه معنی‌دار نیست (جدول ۲). لذا بهتر است به منظور کاهش مصرف انرژی و کاهش صدا، هنگام فعال بودن واحد گرمایش، از حداقل ظرفیت ممکن هوادهی فن استفاده شود.



شکل ۷. تاثیر ظرفیت هوادهی فن در میزان اختلاف دمای ایجاد شده با گذشت زمان، در حالت فعال بودن واحد گرمایش و غیرفعال بودن واحد روشنایی



شکل ۸. تاثیر ظرفیت هوادهی فن در میزان اختلاف دمای ایجاد شده با گذشت زمان، در حالت فعال بودن واحد روشنایی و گرمایش

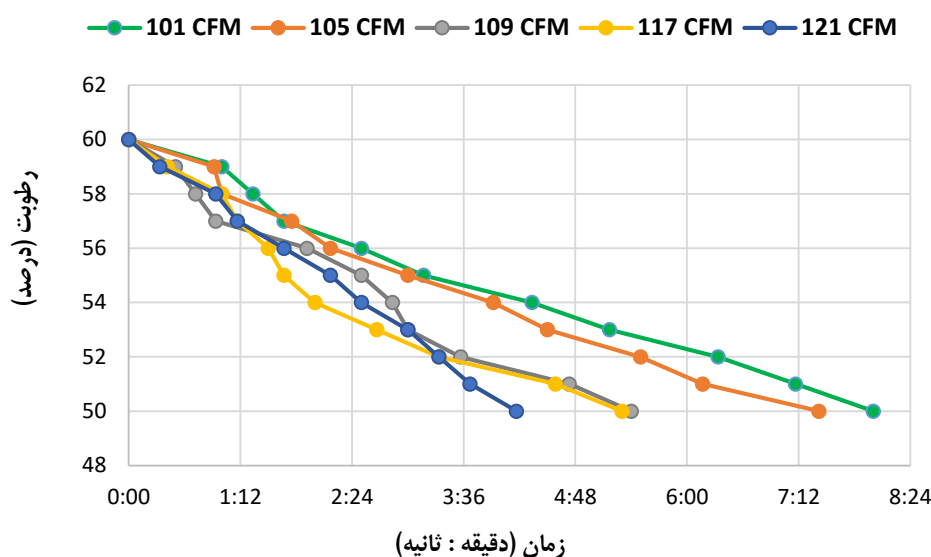
جدول ۲. نتایج ANOVA برای بررسی تغییرات ظرفیت هوادهی فن و فعال بودن واحد روشنایی بر روی اختلاف دمای ایجاد شده

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار
مدل آماری	۹	۴/۹	۰/۵۴۴	۳/۲۴۷*
ظرفیت هوادهی فن	۴	۱/۲۲۵	۰/۳۰۶	۱/۸۳۷ ^{ns}
واحد روشنایی	۱	۳/۴	۳۷۲/۷۷۷	۲۰/۲۸۰**
ظرفیت هوادهی فن * واحد روشنایی	۴	۰/۲۷۵	۹۵۲/۸۰۳	۴۵۱/۰ ^{ns}
خطا	۲۰	۳/۳۵۳	۱۹/۳۸۵	
کل	۳۰	۶۰۰/۵۵		

* معنی داری در سطح احتمال ۰/۰۵، ** معنی داری در سطح احتمال ۰/۰۱، ^{ns} معنی دار نیست

از آنجایی که افزایش ظرفیت هوادهی فن می تواند باعث انتقال سریع تر رطوبت به خارج گلخانه شود، نتایج آزمون واحد تهویه نشان داد که با افزایش ظرفیت هوادهی بین مقادیر ۱۰۱ تا ۱۲۱ فوت مکعب بر دقیقه، مدت زمان رسیدن به ناحیه مطلوب رطوبت محیط گلخانه (۵۰ درصد) تقریباً بین ۳/۵ تا ۸ دقیقه تغییر می نماید (شکل ۹). نتایج تحلیل واریانس نیز معنی دار شدن در سطح یک درصد

($p < 0.01$) اختلاف مدت زمان کاهش رطوبت در ظرفیت‌های مختلف هوادهی فن مکنده را نشان می‌دهد (جدول ۳).



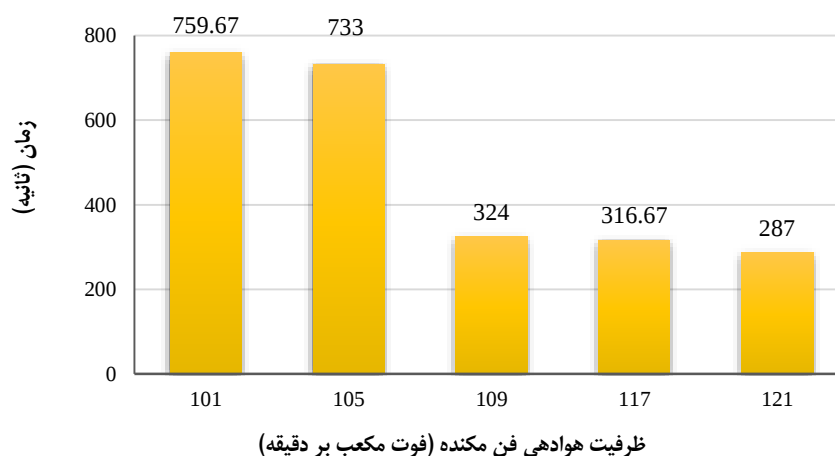
شکل ۹. تغییرات رطوبت با گذشت زمان در مقادیر مختلف ظرفیت هوادهی فن مکنده

جدول ۳. نتایج ANOVA برای بررسی تاثیر ظرفیت هوادهی فن در مدت زمان کاهش رطوبت بر حسب ثانیه

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F مقدار
مدل آماری	۴	۶۹۱۲۰۷/۶	۱۷۲۸۰۱/۹	۶۴۸/۸۱۷**
ظرفیت هوادهی فن	۴	۶۹۱۲۰۷/۶	۱۷۲۸۰۱/۹	۶۴۸/۸۱۷**
خطا	۱۰	۲۶۶۳/۳۳	۲۶۶/۳۳	
کل	۱۵	۴۲۰۸۶۷۹		

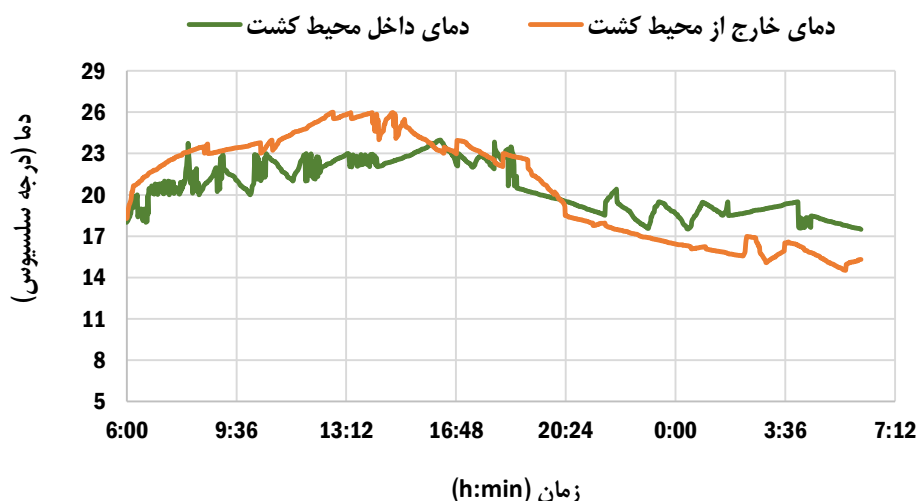
* معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵، ** معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱، ns معنی‌دار نیست

نتایج آزمون دانکن نشان داد با افزایش ظرفیت هوادهی فن مکنده، زمان تنظیم رطوبت گلخانه، کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). این مدت برای ظرفیت‌های ۱۰۱ و ۱۰۵ فوت مکعب بر دقیقه بیشترین مقدار و ظرفیت‌های ۱۲۱ و ۱۱۷ فوت مکعب در دقیقه کمترین مقدار بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای کاهش زمان تعدیل رطوبت داخل گلخانه و صرفه‌جویی در انرژی مصرفی و کاهش صدای فن مکنده، هنگام استفاده از سیستم تهویه برای تنظیم رطوبت از ظرفیت هوادهی فن به مقدار ۱۱۷ فوت مکعب بر دقیقه استفاده شود که برای کاهش ده درصدی رطوبت (از ۶۰ به ۵۰ درصد) زمانی در حدود ۴/۵ دقیقه لازم است.

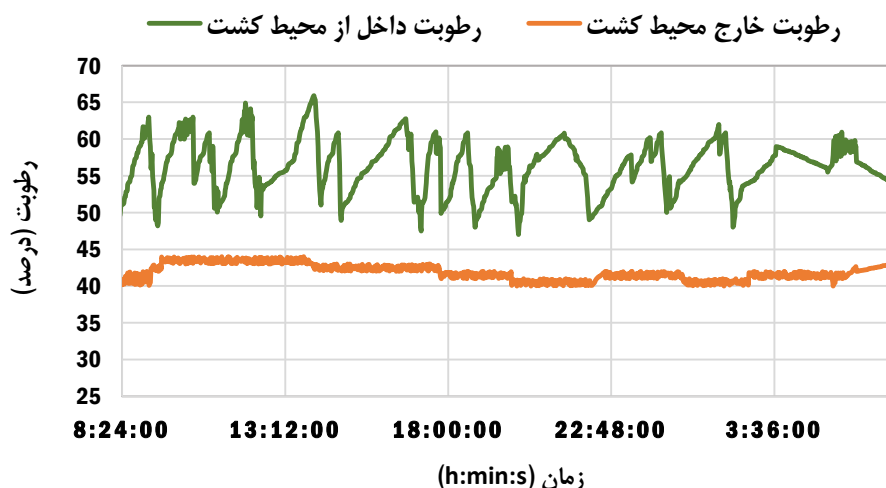


شکل ۱۰. نتایج آزمون دانکن برای زمان کاهش رطوبت (ثانیه) در سطوح مختلف ظرفیت هوادهی فن مکنده

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، تغییرات دما و رطوبت طی یک شبانه‌روز در داخل محیط کشت عمودی هیدروپونیک و خارج از محیط کشت تحت سامانه کنترلی نشان داده شده‌است. علاوه بر تاثیر تغییرات دمای خارج از محیط کشت، روشن بودن واحد روشنایی بر روی دمای داخل محیط کشت موثر است به طوری که در صورت خاموش بودن واحد تهویه و فن‌های دمنده و مکند، در عرض یک ساعت به واسطه گرمایی که لامپ‌های رشد ایجاد می‌کنند، دما تا چهار درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و در صورت عدم عملکرد سامانه کنترلی، آسیب جدی به گیاه وارد می‌شود. نمودار شکل ۱۱ نشان می‌دهد سامانه کنترلی ON/OFF توانسته در طی ۲۴ ساعت، بر عوامل کاهنده یا افزایش دما غلبه کند و دمای محیط رشد را در نزدیکی محدوده بهینه حفظ کند. اختلاف بیشترین و کمترین دما در مدت ۲۴ ساعت با سامانه کنترلی، حدوداً ۴ درجه سانتی‌گراد بود که با فاصله چندین ساعته و شیب ملایم اتفاق افتاده است و از سویی به دلیل اینکه در رنج مطلوب رشد گیاه قرار داشته ایجاد شوک نمی‌کند. کاهش ناگهانی دمای خارج از محیط کشت به دلیل استفاده از سامانه کنترل هوشمند گرمایش ساختمان محل آزمایش بوده که در زمان خالی بودن ساختمان و برای کاهش مصرف سوخت، دمای سیستم گرمایش را کاهش می‌داد و عملکرد سامانه کنترلی به خوبی توانسته این تغییر را جبران کند. در شکل ۱۲ نیز با وجود اینکه به دلیل گردش آب و فرایند فتوسنتز گیاه، رطوبت در محیط کشت به سمت افزایش می‌رود اما سامانه کنترلی توانسته دامنه رطوبت داخل محیط کشت را در محدوده بهینه ۵۰ تا ۶۰ درصد حفظ کند. نمودار نشان می‌دهد افزایش رطوبت ده درصدی طی یک تا دو ساعت طول می‌کشد و روند کاهش رطوبت حدوداً نیم ساعت تا چهل دقیقه طول کشید که علاوه بر این مدت زمان، در رنج مطلوب بودن برای رشد گیاه موجب وارد شوک و آسیب به محصول نمی‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات دمای داخل محیط کشت و خارج محیط کشت تحت سامانه کنترلی در طی یک شبانه‌روز



شکل ۱۲. تغییرات رطوبت داخل محیط کشت و خارج محیط کشت تحت سامانه کنترلی در طی یک شبانه‌روز

نتایج بررسی مشخصه‌های ظاهری کاهوهای فرانسوی کشت شده در محیط گلخانه عمودی نشان داد که میانگین وزن کاهوها برابر با ۱۲۸/۳۱ گرم است و مطابق جدول ۴، مقدار RMSE برای مقایسه وزن بوته‌های کاهوها با میانگین وزن نمونه‌های شاهد برابر با ۴/۵۴ است که نشان دهنده نزدیکی مقادیر مذکور با نمونه‌های شاهد است. بطوریکه میانگین وزن نمونه‌های کاهوهای فرانسوی شاهد برابر با ۱۳۳/۶ گرم بود. انحراف استاندارد وزن بوته‌های کاهوی کشت شده در محیط کنترل شده به طور میانگین برابر با ۳/۶۱ بود که نشان دهنده یکنواختی وزن بوته‌های کاهوی فرانسوی بود. میانگین ارتفاع بوته‌های کاهوی کشت شده برابر با ۲۷ سانتی‌متر بود و حدود ۲ سانتی‌متر از ارتفاع کوتاه‌تری نسبت به نمونه‌های شاهد برخوردار بودند و این امر ممکن است به علت قرارگیری لامپ رشد در نزدیکی کاهوها در مقایسه با روش‌های مرسوم کشت کاهوی فرانسوی باشد. البته ارتفاع زیاد کاهو موجب سفت شدن ساقه و کاهش محدوده برگ‌های کاهو می‌شود. میانگین مقادیر SD برای ارتفاع کاهوها نیز برابر با ۱/۱۹ و میانگین مربعات خطا برابر با ۳/۲۸ بود. بنابراین کاهوهای کشت شده در محیط کنترل شده مورد مطالعه، از مشخصه‌های ظاهری مطلوبی برخوردار هستند. با توجه به میزان رشد ریشه‌ها، گرفتگی لوله فیتینگ توسط ریشه‌ها و ممانعت از عبور آب مشاهده نشد و ارتفاع سینی‌ها برای رشد این نوع کاهو مناسب بود.

نتایج بررسی نشان داد که فاصله انتخاب شده بین طبقات در کنار LEDهایی با لنز ۳۰ درجه و پار نوری ۲۱۵ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه تا پایان مرحله رشد هیچ‌گونه نقاط داغ نوری یا سوختگی و زردی روی گیاه ایجاد نکرد که نشان دهنده مناسب بودن فاصله است. همچنین در بررسی (Saito et al., 2013) در انتخاب لنز ۱۷ و ۳۵ درجه با پار نوری ۲۲۰ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه و فاصله ۳۰ سانتی‌متری منبع نور تا بستر کشت، برای محصول کاهو و همچنین در بررسی (Pereira & Gomes, 2025) با فاصله ۲۲ سانتی‌متری از بستر کشت برای محصول ریحان با پار نوری تا ۷۵۰ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه سوختگی و نقطه داغی بر روی گیاه گزارش نشد که تایید کننده انتخاب مطلوب فاصله بین طبقات و مشخصات منبع نور است. پیشنهاد می‌شود در صورتی که هدف داشتن کاهوهایی با ارتفاع بیشتر است، می‌توان فاصله بین طبقات را تا حدی افزایش داد.

مشاهده میزان رشد ریشه‌ها نشان داد که عمق سینی‌های کشت، فضای کافی برای رشد ریشه کاهوها را فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود در صورت کشت گیاهانی با میزان ریشه دهی بیشتر، عمق سینی‌های کشت مورد بازطراحی قرار گیرد.

جدول ۴. مقادیر RMSE و SD برای مشخصه‌های ظاهری کاهوی کشت در مقایسه با نمونه مرجع

مشخصه	وزن بوته	ارتفاع بوته	عرض بوته
RMSE	۴/۵۴	۳/۲۸	۲/۴۵
SD	۳/۶۱	۱/۱۹	۱/۴۴

نتیجه گیری کلی

با توجه به مشکلات کشاورزی سنتی، نیاز به رویکرد جدید در کشت محصولات کشاورزی است و بکارگیری کشت عمودی در کنار استفاده از مزایای کشاورزی شهری، می‌تواند راه‌حل موثری باشد. از این رو در این مطالعه پس از ساخت یک دستگاه گلخانه عمودی شهری که مجهز به واحد روشنایی، تهویه، سرمایش، گرمایش و تغذیه بود، سامانه کنترل خودکار شرایط اقلیم کشت، طراحی و ساخته شد و سپس روی گلخانه نصب گردید. سامانه مذکور علاوه بر کنترل پارامترهایی محیط رشد، قابلیت ذخیره داده برای اهداف بعدی بکارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی را داشته و با ارسال داده به کاربر امکان پایش پارامترهای محیط رشد را فراهم می‌کند. قبل از کشت محصول و ارزیابی نهایی گلخانه و به‌منظور ارزیابی عملکرد واحدهای تنظیم دما و رطوبت، تاثیر ظرفیت هوادهی فن‌های دمنده و مکنده و همچنین تاثیر وضعیت روشن یا خاموش بودن واحد روشنایی بر تنظیم دما و رطوبت گلخانه بررسی شد که خلاصه نتایج آن به شرح ذیل است:

اثر ظرفیت هوادهی فن دمنده در افزایش دمای گلخانه معنی‌دار نشد، بنابراین ظرفیت هوادهی مطلوب فن دمنده هنگام تنظیم دمای محیط گلخانه، کمترین مقدار ممکن به عبارت دیگر ۱۰۱ فوت مکعب بر دقیقه بود.

اثر ظرفیت هوادهی فن مکنده در کاهش کنترل رطوبت گلخانه در سطح یک درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار شد و ظرفیت هوادهی مطلوب فن مکنده هنگام تنظیم رطوبت محیط گلخانه، ۱۱۷ فوت مکعب بر دقیقه بود.

اثر وضعیت روشن یا خاموش بودن سیستم روشنایی در تنظیم دمای گلخانه در سطح یک درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار بود.

پس از تنظیم سامانه کنترلی بر اساس نتایج آزمون سامانه کنترل دما و رطوبت، نشاء کاهوی فرانسوی در گلخانه کشت شد و پس از مدت ۴۰ روز نگهداری و رشد در گلخانه، برداشت شد. نتایج بررسی مشخصه‌های ظاهری کاهوهای فرانسوی کشت شده در گلخانه،



شامل وزن، ارتفاع و عرض کاهو نشان دهنده رشد مطلوب کاهو بود. بنابراین به منظور توسعه کشاورزی شهری، بکارگیری گلخانه عمودی همراه با سامانه‌های کنترلی آن توصیه می‌گردد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

پژوهش حاضر هیچ گونه حمایت مالی از سازمان‌های دولتی یا خصوصی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: در طراحی پژوهش، بررسی منابع، طراحی و ساخت دستگاه، جذب حمایت مالی، تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

نویسنده دوم: در بررسی منابع، طراحی و ساخت سامانه کنترلی دستگاه، برنامه نویسی، ترسیم نقشه فنی و تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

نویسنده سوم: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در تهیه، تدوین و ویرایش این اثر، از هیچ یک از ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از ریاست محترم و معاونت پژوهشی مرکز آموزش عالی امام خمینی (ره) و همچنین از جناب آقای دکتر احمد بناکار، عضو هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس، به خاطر حمایت و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

ولی‌نژاد، عبدالله. ۱۳۹۰. جداول و استانداردهای طراحی و ماشین‌سازی، ترجمه از مرجع آلمانی، چاپ شانزدهم، انتشارات نشر طراح، تهران، ۲۵۷.

REFERENCES

- Battistelli, A., Proietti, S., Pagliarlunga, G., Mattioni, M., Nazzaro, F., Fratianni, F., ... & Moscatello, S. (2025). Establishing baselines for prebiotic production in controlled environments for applications in space and vertical farming. *Heliyon*, 11(2).
- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An overview on the use of artificial lighting for sustainable lettuce and microgreens production in an indoor vertical farming system. *Horticulturae*, 10(9), 938.
- Chowdhury, M. E., Khandakar, A., Ahmed, S., Al-Khuzaei, F., Hamedalla, J., Haque, F., ... & Al-Emadi, N. (2020). Design, construction and testing of IoT based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in Qatar. *Sensors*, 20(19), 5637.
- Chu, S. W., & Wan, T. J. (2026). Advancing Sustainable Agriculture Through Aeroponics: A Critical Review of Integrated Water-Energy-Nutrient Management and Environmental Impact Mitigation. *Agriculture*, 16(2), 265.
- Duangpakdee, K., & Sukpancharoen, S. (2024, July). Vertical smart farm system for off-season crop

- production using hydroponics and iot-based environmental control. In *2024 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)* (pp. 284-289). IEEE.
- Duan, J. X., Duan, Q. X., Zhang, S. F., Cao, Y. M., Yang, C. D., & Cai, X. D. (2020). Morphological, physiological, anatomical and histochemical responses of micropropagated plants of *Trichosanthes kirilowii* to hydroponic and soil conditions during acclimatization. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 142(1), 177-186.
- Hasan, M., Paradkar, V., & Vinod Kumar, S. (2026). Comparative Study on Resource Efficiency and Environmental Impacts in Vertical Hydroponic Controlled-Environment and Crop Evapotranspiration-Based Drip Irrigation Systems for Bok Choy Cultivation (*Brassica rapa* subsp. *chinensis* L.). *Irrigation and Drainage*, 75(1), 115-127.
- Hosseini, H., Mozafari, V., Roosta, H. R., Shirani, H., van de Vlasakker, P. C., & Farhangi, M. (2021). Nutrient use in vertical farming: Optimal electrical conductivity of nutrient solution for growth of lettuce and basil in hydroponic cultivation. *Horticulturae*, 7(9), 283.
- Jeon, Y. J., Hong, S., Lee, T. S., Park, S. H., Song, G., Seo, M. G., ... & Kwon, C. T. (2025). Volumetric deep learning-based precision phenotyping of gene-edited tomato for vertical farming. *Plant Phenomics*, 100095.
- Kaur, G., Upadhyaya, P., & Chawla, P. (2023). Comparative analysis of IoT-based controlled environment and uncontrolled environment plant growth monitoring system for hydroponic indoor vertical farm. *Environmental Research*, 222, 115313.
- Kumar, M., Haillot, D., & Gibout, S. (2022). Survey and evaluation of solar technologies for agricultural greenhouse application. *Solar Energy*, 232, 18-34.
- Kumaran, G. S., Vijayalakshmi, S., Kaviya, S., Gayathry, G. (2025) Energy-Efficient LED Lighting and Smart Climate Control in the Hydroponic System of Vertical Farming using AI and IoT. *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS-2025) IEEE Xplore Part Number: CFP25K74-ART; ISBN: 979-8-3315-1208-8*.
- Martin, M., & Molin, E. (2019). Environmental assessment of an urban vertical hydroponic farming system in Sweden. *Sustainability*, 11(15), 4124.
- Mthembu, B. E., Cele, T., & Mkhize, X. (2025). Climate change impacts on agricultural infrastructure and resources: Insights from communal land farming systems. *Land*, 14(6), 1150.
- Nikolov, N. V., Atanasov, A. Z., Evstatiev, B. I., Vladut, V. N., & Biris, S. S. (2023). Design of a small-scale hydroponic system for indoor farming of leafy vegetables. *Agriculture*, 13(6), 1191.
- Pereira, J., & Gomes, M. G. (2025). Lighting strategies in vertical urban farming for enhancement of plant productivity and energy consumption. *Applied Energy*, 377, 124669.
- Qian, Y., Hibbert, L. E., Milner, S., Katz, E., Kliebenstein, D. J., & Taylor, G. (2022). Improved yield and health benefits of watercress grown in an indoor vertical farm. *Scientia horticulturae*, 300, 111068.
- Rufi-Salis, M., Calvo, M. J., Petit-Boix, A., Villalba, G., & Gabarrell, X. (2020). Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104683.
- Saito, Y., Shimizu, H., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2013). Effect of distribution of photosynthetic photon flux density created by LEDs and condenser lenses on growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* var. *angustana*). *Environmental Control in Biology*, 51(3), 131-137.
- Sehgal, R., Biswas, D., & Gupta, S. D. (2026). Incorporation of IoT and AI Methods for Sustainable Vertical Farming: A Smart Agriculture Approach. In *Adaptive Technologies for Sustainable Growth* (pp. 724-727). CRC Press.
- Sengodan, P. (2022). An Overview of Vertical Farming: Highlighting the Potential in Malaysian High-Rise Buildings. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 30(2).
- Sharma, A., Rani, S., Kumar, A., Kumar, P., & Warghat, A. R. (2026). Vertical Farming for Medicinal Plants: A Smart Approach. In *Transforming Medicinal Plant Agriculture: Implementing Soil-less Systems and AI Innovations for Smart Farming* (pp. 13-36). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sohn, J., Dziumla, J., Salleh, A. F., & Xydis, G. (2026, December). Vertical farming as a resource nexus solution for sustainable agriculture. In *Sustainability Nexus Forum* (Vol. 34, No. 1, p. 1). Springer Berlin Heidelberg.
- Soufi, H., Ali, A., & Shojaee KHabisie, M. (2024). Growth and photosynthesis characteristics of lettuce cultivars in response to supplementary LED lights and replacement methods of the nutrient solution. *Greenhouse Plant Production Journal*, 1(3), 28-44.
- Valinejad, A. 1390, Tables and Standards for Design and Machine Building, translated from a German



reference, 16th edition, *Tarah Publishing House*, Tehran, 257 (In Persian).

- Vatistas, C., Avgoustaki, D. D., & Bartzanas, T. (2022). A systematic literature review on controlled-environment agriculture: How vertical farms and greenhouses can influence the sustainability and footprint of urban microclimate with local food production. *Atmosphere*, 13(8), 1258.
- Verma, P., Singh, G., Singh, S. K., Bakshi, M., Mirza, A. A., Mehandi, S., & Vijayvargiya, V. (2025). Correlation, path-coefficient and principal component analysis association among quantitative traits in strawberry to unlock potential of vertical farming system. *Kuwait Journal of Science*, 52(1), 100303.
- Wu, J., Cheng, Y. W., Lin, G., Xu, D., Wang, Y., Chong, C., ... & Ge, T. (2025). Toward Sustainable Agriculture: The Design of Environmentally Friendly, Economical, and Modular Vertical Farming Systems. *Engineering*.