تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۴/ شماره ۸۸/زمستان ۱۴۰۲/ص ۳۲-۱۷
سایت مجله:https://www.amsr.areeo.ac.ir

مقاله پژوهشی

ساخت و ارزیابی گلخانه با کشت طبقاتی با نور مصنوعی ال‌ای‌دی

غلامرضا چگینی[1*]، ساسان علی‌نیائی‌فرد[2]، محمدرضا خرم‌تبریزی[3]

۱ و ۳- به ترتیب: دانشیار؛ و کارشناس ارشد گروه فنی کشاورزی دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۷

چکیده

تولید روزافزون محصولات کشاورزی با راندمان بالا باعث شده تا روش‌هایی نوین برای بالا بردن عملکرد این محصولات به‌کار برده شود. از این روش‌ها می‌توان به کشت‌های طبقاتی در گلخانه‌های با نور مصنوعی اشاره کرد. در این گلخانه‌ها، علاوه بر کنترل پارامترهای مختلف اقلیمی، نور مورد نیاز گیاه با لامپ‌های کم‌مصرف ال‌ای‌دی تأمین می‌شود. کشت انواع محصولات کشاورزی مانند کاهو و دیگر سبزی‌ها با تغییر ارتفاع طبقات و تغییر طیف نورهای مختلف مؤثر در فتوسنتز گیاهان از جمله قابلیت‌های این نوع گلخانه است. در این تحقیق، یک گلخانه با کشت عمودی با نور مصنوعی از طریق لامپ‌های LED، سیستم‌های آبیاری، تهویه و بستر کشت هیدروپونیک برای کشت گیاهان ساخته شد. با توجه به مستقل بودن طبقات می‌توان کشت‌های مختلفی با تغذیهٔ یکسان را هم‌زمان عملی کرد و علاوه بر نور، متغیرهای دیگری چون دما و رطوبت هم قابل کنترل است. نتایج عملکرد نشان داد پس از ۳۰ روز و با ابعادی به مساحت یک مترمربع، ۷۲ عدد کاهو پرطاووسی از سیستم برداشت شد که قابل قیاس با عملکرد روش‌های تولید مزرعه‌ای و گلخانه‌ای است. گلخانه در ۳ تیمار با ترکیب نورهای مختلف ارزیابی شد. کمترین وزن تر و خشک گیاه در تیمار ترکیب نوری قرمز، آبی (به ترتیب ۵/۵ و ۰/۳ گرم) و قرمز دور (به ترتیب ٤ و ۰/۲ گرم) مشاهده شد و تلفیق طیف نوری قرمز (۵۰ درصد)، آبی (۲۵ درصد) و قرمز دور (۲۵ درصد) بهترین عملکرد را در پرورش کاهو داشته است.

واژه‌های کلیدی

کاهو، کشت عمودی، محیط‌های کنترل‌شده کشاورزی

مقدمه

اصطلاح کارخانهٔ تولید گیاه با نور مصنوعی (PFAL) یا همان کشاورزی عمودی با نور کاملاً مصنوعی به یک مرکز تولید گیاه گفته می‌شود با سازه‌ای عایق‌بندی شده تا اندازه‌ای که از ورود و خروج هوا جلوگیری می‌شود (Kozai, 2013). با افزایش تعداد طبقات و تراکم کشت، عملکرد محصول یعنی تولید در واحد سطح نیز افزایش می‌یابد. کشاورزی عمودی در قالب گلخانه‌های طبقاتی با مقیاس بزرگ روشی است جدید که می‌تواند جایگزین روش سنتی برای تولید محصولات

*نگارنده مسئول: Email: chegini@ut.ac.ir
https://doi.org/10.22092/amsr.2024.366613.1496

کشاورزی باشد (Tarakanov, *et al.*, 2012; Eigenbrod & Gruda, 2015). به منظور افزایش تولید محصولات نسبت به مساحت زیر کشت، ایجاد کارخانه‌های تولید گیاه دارای پتانسیل بالایی است. با این روش، دورهٔ رشد گیاه کاهش می‌یابد (به دلیل مدیریت زمان و وابسته نبودن تولید محصول به نور خورشید)، مصرف آب، مصرف سوخت‌های فسیلی، هجوم آفات و حشرات موذی کاهش می‌یابد، قابلیت تولید محصولات سالم بالا می‌رود، تولید ۲۴ ساعته محصولات کشاورزی در تمام طول سال قابلیت اجرایی دارد، نیاز به استفاده از سموم کاهش می‌یابد، در داخل شهرها می‌توان محصولات کشاورزی تولید کرد ، حمل‌ونقل و تلفات کاهش می‌یابد و عمر پس از برداشت محصولات کشاورزی افزایش خواهد یافت (Despommier, 2011).

کارخانه‌های تولید گیاه را می‌توان در فضاهای غیر قابل استفادهٔ شهری ایجاد کرد (Resh, 2016). در کارخانه تولید گیاه با نور مصنوعی، بسترهای کشت متعدد به همراه لامپ‌های الکتریکی که بالای هر ردیف عمودی نصب شده است در داخل هر طبقه قرار می‌گیرند. دیگر تجهیزات و دستگاه‌های لازم برای کارخانهٔ تولید گیاه با نور مصنوعی (PFAL)[1] شامل دستگاه‌های گرمایش و سرمایش، دمنده برای چرخش هوا، واحد آبیاری و تزریق محلول غذایی و CO_2 و سیستم کنترل اقلیم هستند. این تجهیزات هزینهٔ اولیه بسیار بالا دارند. نوردهی ۸۰-۷۰ درصد هزینه مصرف برق را شامل می‌شود و بقیه آن صرف راه‌اندازی سیستم تهویه، پمپ‌ها، فن‌ها و غیره می‌شود. تحقیقات در ژاپن روی تولید گیاه تحت نور مصنوعی با هدف تجاری‌سازی در اواسط دههٔ ۷۰ میلادی آغاز (Takakura *et al.*, 1974) و اولین PFAL تجاری در این کشور سال ۱۹۸۳ راه‌اندازی شد . تا اواسط دههٔ ۱۹۹۰، از لامپ‌های سدیم فشار بالا به عنوان منبع نور استفاده می‌شد. از آنجا که دمای سطح این لامپ‌ها به بیش از ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس می‌رسید، لامپ‌ها را بالاتر از یک متری سطح گیاهان نصب می‌کردند. در اواخر دههٔ ۱۹۹۰، عمدتاً لامپ‌های فلورسنت به دلیل داشتن تابش فعال فتوسنتزی نوری بالا به ازای هر وات استفاده می‌شدند. PFALها با منبع نور لامپ‌های LED از سال ۲۰۰۵ در ژاپن برای تولید نشا بدون آفت شروع به تجاری‌سازی شدند (Ohyama *et al.*, 2005).

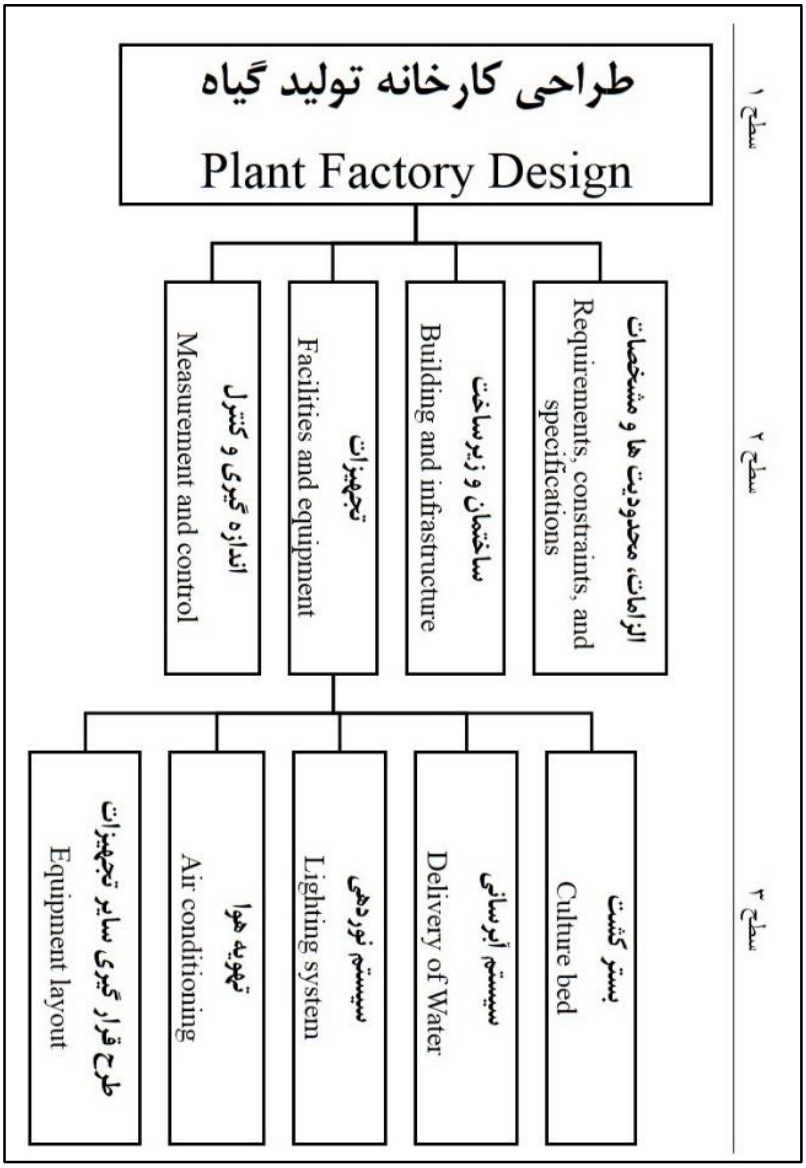
تا سال ۲۰۱۴، ۱۶۵ کارخانه‌های تولید گیاه در ژاپن برای تولید تجاری ایجاد شد، در سال ۲۰۱۵ بیش از ۳۰۰ واحد تجاری سیستم بسته تولید گیاه (CPPS)[2] با نور مصنوعی برای کشت نشا (تولید بذر و قلمه) استفاده می‌شدند. از ۲۰۱۴، ۵۰ شرکت در تولید سبزی با استفاده از PFAL در تایوان مشغول به کار هستند. از سال ۲۰۰۹ در کره جنوبی چندین سیاست ملی برای حمایت از طرح "ساخت اکوسیستم‌های تجاری بر اساس کارخانه تولید گیاه با نور مصنوعی" اجرا شد. ایالات متحده آمریکا PFAL را برای تولید محصولات کشاورزی در دههٔ ۱۹۸۰ معرفی کرد. ناسا برنامهٔ سیستم کنترل شده حمایت از حیات خود را به صورت ابتکاری آغاز کرد (Wheeler, 2002)، جایی‌که گیاهان به روش هیدروپونیک زیر نور مصنوعی (الکتریکی) رشد می‌کردند. هم‌زمان با افزایش علاقه به تولید مواد غذایی بومی، چندین مجتمع تجاری بزرگ PFAL در نزدیکی کلان‌شهرها (مانند شیکاگو) ساخته شده است. علاوه بر این، به عنوان یک برنامه منحصر به فرد، یک PFAL کوچک برای تولید سبزی‌های تازه در ایستگاه قطب جنوب توسط ایالات متحده توسعه

داده شد. این ساختمان ۲۲ مترمربعی، سالیانه بیش از ۳۰ نوع محصول مختلف (به صورت هم‌زمان) از جمله گوجه‌فرنگی، کاهو و گیاهان دارویی برای خدمه تولید می‌کند. فناوری‌های کارخانهٔ گیاه‌سازی در دههٔ گذشته در اتحادیهٔ اروپا به طرز قابل‌توجهی توسعه یافته است که شامل سیستم‌های کامپیوتری یکپارچه برای بهینه‌سازی شرایط رشد و استفاده مؤثر از آب، مواد غذایی و انرژی می‌شود (Kozai, 2016). هلند پیشرفته‌ترین کشور در زمینهٔ کارخانه‌های تولید گیاه و کشت محافظت شده گلخانه‌ای در اروپاست. مرکز تحقیقات بین‌المللی PlantLab یک شرکت خصوصی هلندی است که در زمینهٔ کنترل محیط کشاورزی فعالیت می‌کند و نخستین واحدهای تولید تجاری محصول خود را در سال ۲۰۱۰ تأسیس کرد. این مرکز در سال ۲۰۱۵ بیش از ۲۲ میلیون دلار در دفتر مرکزی و تأسیسات تحقیقاتی ۲۰۰۰۰ مترمربعی سرمایه‌گذاری کرده است که اجازهٔ بهینه‌سازی و پیشرفت‌های بیشتر در زمینهٔ تکنولوژی تولید محصولات در محفظه‌هایی با آب‌وهوای کاملاً بسته و بدون نور روز می‌دهد. در سال ۲۰۱۲ شرکت سوئیسی UrbanFarmers با مشارکت دانشگاه علوم کاربردی زوریخ یک مزرعهٔ گلخانه‌ای به مساحت ۲۶۰ مترمربع را در پشت‌بام‌های صنعتی در شهر بازل ساخت (Graber *et al.*, 2014). هدف از این تحقیق طراحی و ساخت نمونهٔ آزمایشگاهی کارخانه تولید گیاه با نور مصنوعی (PFAL) به عنوان یک واحد آزمایشگاهی برای تولید و ارزیابی مراحل رشد گیاهان است.

مواد و روش‌ها

طراحی کارآمد یک PFAL وابسته به شناخت صحیح از منابع و سیستم‌های نوردهی، اندازه‌گیری و کنترل عوامل محیطی، مدیریت انرژی، مواد و مصالح، کنترل بهداشتی، اکوفیزیولوژی گیاه، آبیاری و تغذیه گیاهان(هیدروپونیک) است. روند طراحی PFAL شامل بخش‌های متفاوتی است (شکل ۱). مطابق این شکل در طراحی سیستم‌های سطح ۳، بسترها، آبرسانی و نوردهی در شکل متغیر های بیشتری نقش دارند که در طراحی باید لحاظ گردند.

برای نصب و جانمایی گلخانه با کشت عمودی، اتاقی به ابعاد ۵ ×۴ متر (۲۰ مترمربع) آماده شد. دمای اتاق بین ۲۰ تا ۲۲ درجهٔ سلسیوس، رطوبت هوای اتاق بین ۵۰ تا ۶۰ درصد در طول شبانه‌روز و مقدار دی‌اکسید کربن بین ۴۰۰ تا ppm ۵۰۰ بود (Resh, 2016) که با سیستم تهویه (کولر گازی) با سرعت نزدیک به ۲ متر بر ثانیه (AR5500, Samsung) تنظیم شده بود. برای اندازه‌گیری دما، رطوبت و دی‌اکسید کربن از دستگاه پرتابل (GC-2028, Lutron) استفاده شد که قابلیت اندازه‌گیری هر سه پارامتر را داشت. دیگر تجهیزات از جمله مخزن محلول غذایی، پمپ آب و سیستم تزریق و آبیاری فضایی کمتر از یک مترمربع اشغال کردند. در کل اتاق هیچ‌گونه منبع نوری دیگری وجود نداشت و تمامی پنجره‌ها پوشیده شده بودند. برای اندازه‌گیری طیف نوری و شدت نور از دستگاه اسپکترومتر (C-7000, Sekonic) استفاده شد.



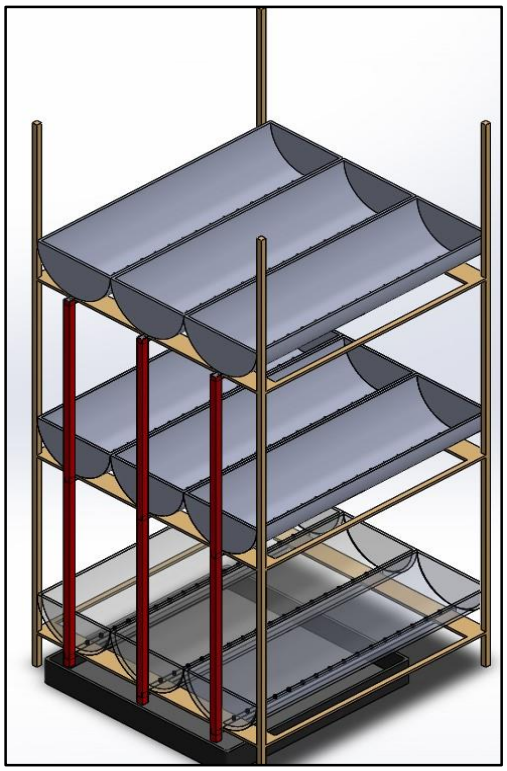
شکل ۱ - ساختار طراحی کارخانه تولید گیاه با نور مصنوعی

Fig. 1- Plant design structure with artificial light

طراحی سازهٔ اصلی

سازهٔ PFAL باید به گونه‌ای طراحی شود که با کمترین میزان مصرف منابع (مواد، مصالح و تجهیزات)، بیشترین مقدار ممکن گیاه تولید شود و میزان آلاینده‌های محیطی زیستی نیز کاهش یابد (Kozai, 2013). اسکلت فلزی PFAL از جنس قفسه‌بندی فولادی ضد زنگ انتخاب شد. قفسه‌بندی این امکان را فراهم کرد تا بتوان دیگر تجهیزات جانبی مانند فن‌ها و لوله‌ها را روی سازه نصب کرد. در انتهای طبقات از سه کانال مربع سراسری با اندازهٔ ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر برای انتقال زهاب بسترهای کشت از هر طبقه به مخزن زهاب، که روی سطح زمین و زیر سازه قرار دارد، استفاده شد. بدین ترتیب عملاً هیچ‌گونه اتلاف آبی در این سیستم کشت وجود ندارد و از زهاب جمع‌آوری شده می‌توان در مسیر برگشت یا در مصارف دیگر کشاورزی

استفاده کرد (شکل ۲). برای جلوگیری از رشد جلبک روی بستر کشت، تمام سطح کشت با فوم سفید رنگی به ضخامت ۲ میلی‌متر پوشانده شد. از این فوم سفید با بازتابش نوری خیلی کم همراه با کاغذ آلومینیمی در دیواره سازه نیز استفاده شد تا از تداخل نوری با محیط اطراف جلوگیری شود.



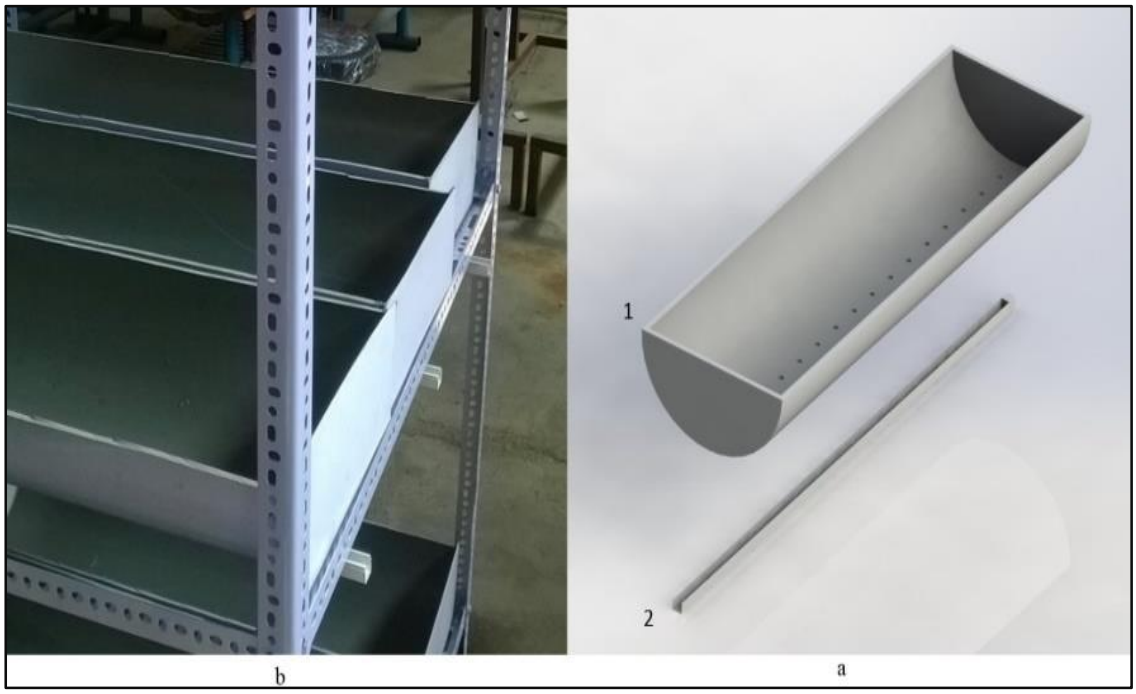
شکل ۲- سازه PFAL طراحی شده در سه طبقه با بسترهای کشت و سیستم زهاب

Fig. 2- The PFAL structure designed in three floors with cultivation beds and drainage system

طراحی بسترهای کشت

بسترهای کشت از پرلیت سایز یک با pH بین ۶ تا ۸ برای به حداقل رساندن هیپوکسی ریشه و توانایی آن در جذب بالای آب (سه تا چهار برابر وزن خود) استفاده شد (Resh, 2016). لامپ‌ها با سه آرایش مختلف (قرمز، قرمز دور و قرمز-آبی) که هرکدام یک تیمار بود در فاصلهٔ ۶۰ سانتی‌متری بالای بسترهای کشت تا انتهای برداشت توسط قلاب و زنجیر نصب گردیدند تا قابلیت تنظیم ارتفاع نیز داشته باشند. در ساخت بستر کشت عوامل گوناگونی دخیل هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ظرفیت کشت بالا، تطابق با سیستم هیدروپونیک، قابلیت تعویض ساده و سازگاری با گیاه اشاره کرد. در این سیستم، به جای استفاده از یک بستر کشت سرتاسری در هر طبقه، از سه بستر مجزای کوچک‌تر استفاده شد تا در صورت شیوع بیماری یا نقص فنی در سیستم، تمامی گیاهان یک طبقه از بین نروند و بتوان به سادگی تنها بستر کشت آلوده یا دارای نقص فنی را تعویض کرد (شکل ۳). به دلیل کاشت گیاهان در پرلیت، بستر باید به گونه‌ای طراحی می‌شد که علاوه بر حفظ پرلیت، زهاب را به طور کامل تخلیه کند. به همین دلیل بستر به صورت یک

نیم استوانه طراحی شد که دو طرف آن بسته شده‌اند. به منظور تخلیه زهاب در کف بستر کشت به صورت سرتاسری و در فاصله‌های معین ۱۶ سوراخ به قطر یک سانتی‌متر تعبیه و در زیر نیم‌استوانه از یک کانال استفاده شد تا زهاب را به لولهٔ تخلیه در انتهای طبقه هدایت کند. با توجه به متراژ کم لوله‌های بستر (یک متر) و شیب ملایم آن، تخلیه کامل صورت می‌گیرد و امکان رسوب وجود ندارد. جنس این بستر از PVC است (شکل ۳ شماره ۱) و قابلیت کشت حداقل ۸ گیاه را دارد.

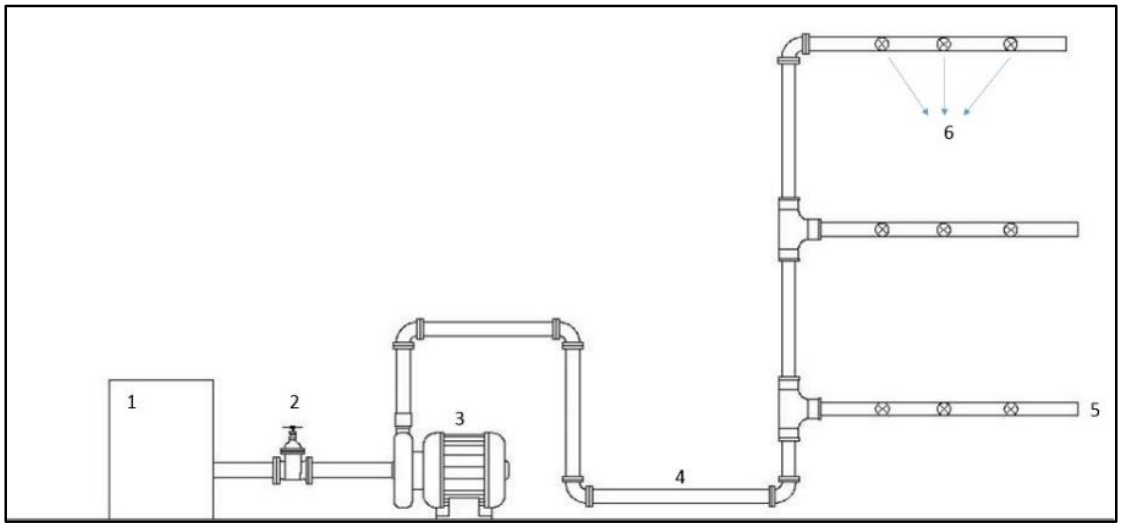


شکل ۳- طراحی اولیه بستر کشت ۱) بستر کشت PVC، ۲) مجرای تخلیه زهاب (a)، بستر کشت نهایی (b)

Fig. 3- The initial design of the culture bed 1) PVC culture bed, 2) drainage channel (a), final culture bed (b)

طراحی و ساخت سیستم آبرسانی

در هر سیستم آبرسانی، وظیفهٔ پمپ تأمین فشار کافی برای حرکت سیال مطابق با جریان مورد نیاز است، و این فشار به عوامل متعددی از جمله طول و قطر لوله، اتصالات، هد مورد نیاز، فشار روی سطح مخزن مایع و غیره بستگی دارد. برای تأمین جریان مورد نیاز از طریق یک سیستم پمپاژ، لازم است فشار عملیاتی سیستم برای انتخاب پمپ مناسب محاسبه شود. شماتیک سیستم محلول‌رسانی طرح مطابق شکل ۴ است.



شکل ٤ - طرح شماتیک سیستم محلول‌رسانی ۱- مخزن ۲- شیرفلکه پروانه‌ای ۳- پمپ آب ٤- لوله ۲۵ میلی‌متری ۵- لوله ١٦ میلی‌متر و ٦- نازل‌های بستر کشت

Fig. 4 - Schematic design of solution delivery system 1- Tank 2- Butterfly valve 3- Water pump 4- 25 mm pipe 5- 16 mm pipe 6- Cultivation bed nozzles

در ابتدا محلول غذایی در مخزن تهیه می‌شود و پس از اندازه‌گیری میزان pH و EC توسط دستگاه (HM Digital, Com 200) ، با پمپ به سمت طبقات حرکت می‌کند. لوله‌های به کار رفته در شکل از ابتدای خروجی مخزن تا ابتدای هر طبقه از جنس PVC و اندازهٔ ۲۵ میلی‌متر است و روی هر ردیف کشت از لوله‌های پلی‌اتیلن با قطر ۱۶ میلی‌متر به دلیل تأمین حداقل دبی مورد نیاز استفاده شده است. روی هر لوله نیز ۳ نازل با قابلیت تنظیم دبی (دبی بیشینه: ۱۲ لیتر در ساعت) و آبپاشی ۳۶۰ درجه تعبیه شد که دبی هر یک از آن‌ها با توجه به ارتفاع هر طبقه و جایگاه آن تنظیم‌شده است تا تمامی نازل‌ها فشار کارکرد یکسانی داشته باشند. برای طراحی سیستم آبیاری، هد کل H_{Total}، به صورت رابطهٔ ۱ تعریف می‌شود:

$$H_{Total} = H_S + H_D \qquad (۱)$$

که در آن،

H_S= هد استاتیکی که فاصلهٔ سطح مخزن تا نقطهٔ بالا (ارتفاع) را نشان می‌دهد و با توجه به تغییر بسیار کم سطح محلول غذایی در مخزن تا نقطهٔ بالا بستر می‌توان از آن صرف‌نظر کرد؛ H_D= هد دینامیکی که به صورت رابطهٔ ۲ تعریف می‌شود:

$$H_D = \frac{K \times V^2}{2g} \qquad (۲)$$

که در آن،

K= ضریب تلفات موضعی؛ V= سرعت آب (۲ متر بر ثانیه) در لوله؛ و g= شتاب گرانش زمین. ضریب K برای اتصالات شیرهای باز، زانویی‌ها و سه‌راهی‌ها بستگی به قطر و تعداد و نوع اتصالات دارد، برای شیرهای نیمه‌باز بستگی به نسبت قطر لوله و درصد باز بودن دارد و برای خم‌ها، ورودی‌ها، انبساط‌ها و انقباض‌ها نیز بستگی به ابعاد هندسی این اقلام دارد که با معلوم بودن پارامترها می‌توان از روی جدول‌های استاندارد مقدار ضریب افت را به دست

آورد. در این سیستم، مقدار ضریب ۱۲ است. با جایگذاری رابطهٔ دبی با سرعت ($Q = V.A$) در ۲، رابطهٔ زیر به دست می‌آید (Shigley & Mischke, 1996):

$$Q = \sqrt{\frac{H_D \times 2g \times A^2}{K}} \quad (۳)$$

انتخاب و نصب سیستم نوردهی

در طراحی این سیستم از لامپ‌های گرولایت LED شرکت پرتو رشد نوین به عنوان منبع نوری استفاده گردید. در طبقه اول تنها از ترکیب طیف نوری قرمز با طول‌موج‌های ۶۳۵ و ۶۶۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۵).

شکل ۵- موقعیت نصب لامپ‌های ال‌ای‌دی با طول موج‌های مختلف (آبی: ٤٤٠، نارنجی: ٦٣٥، قرمز: ٦٦٠، قرمز دور: ٧٤٠ نانومتر)

Fig . 5- Installation position of LED lamps with different wavelengths (blue: 440, orange: 635, red: 660, infrared: 740nm)

سیستم گردش هوا

جریان افقی هوا با سرعت تقریبی ۰/۳ تا ۰/۵ متر بر ثانیه روی طبقات بر سطح گیاهان باعث افزایش انتشار CO_2 و رطوبت هوا از اتاق به سطح حفره‌های برگ‌های گیاهان می‌شود و متعاقباً فتوسنتز، تعرق و رشد گیاه افزایش پیدا می‌کند. با این جریان هوای افقی، اختلاف فشار بخار در سطح بهینه کنترل شود (Yabuki, 2004; Dutta Gupta, S., & Agarwal, 2017).

اندازه‌گیری بازده الکتریکی

ارزش افزوده گیاهان و افزایش وزن خشک آن در گلخانه‌های تجاری PFAL متأثر از مصرف برق است و محاسبهٔ مصرف برق بر قیمت تمام‌شدهٔ محصول اهمیت دارد (Singh *et al.*, 2015). مصرف کل برق با توجه به توان اسمی تجهیزات و با تقریب خوبی در اتاق کشت یک PFAL در واحد سطح A_T (مگاژول بر ساعت بر مترمربع)، با تمامی اجزای آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_T = A_L + A_A + A_M \quad (۴)$$

که در آن،
A_L= میزان مصرف انرژی الکتریکی توسط لامپ‌ها.

$$A_L = \frac{PAR_L}{h} \quad (۵)$$

که در آن،
PAR_L= میزان تابش فعال فتوسنتزی؛ و h= ضریب تست تبدیل انرژی الکتریکی به تابش فعال فتوسنتزی که مقدار آن برای لامپ‌های LED، ۰/۴-۰/۳ است (Mitchell *et al.*, 2012). A_A= میزان مصرف انرژی الکتریکی سیستم سرمایش و گرمایش که طبق رابطهٔ ۶ محاسبه می‌شود:

$$A_A = \frac{H_h}{COP} \quad (۶)$$

که در آن،
H_h= ظرفیت گرمایشی؛ COP= ضریب بازدهی سیستم تهویه؛ و A_M= مصرف انرژی الکتریکی دیگر تجهیزات از جمله فن‌ها، پمپ آب و غیره.

نتایج و بحث

در این بخش مراحل مختلف انتخاب مواد و ساخت اجزای کارخانهٔ گیاهی شرح داده شده است که شامل ساخت سازهٔ اصلی، بستر کشت، سیستم آبیاری، سیستم نوردهی و سیستم تهویه است که در شکل ۶ نشان داده شده است. با مشخص بودن هد دینامیکی مورد نیاز و قطر لوله‌ها (۲۵ میلی‌متر)، دبی مورد نیاز برای آبیاری سیستم محاسبه شد. با توجه به دبی و فشار مورد نیاز سیستم از پمپ آبیاری (QB60, Jiutu) با توان ۰/۵ اسب بخار و دبی ثابت ۲۷ لیتر بر دقیقه استفاده شد.

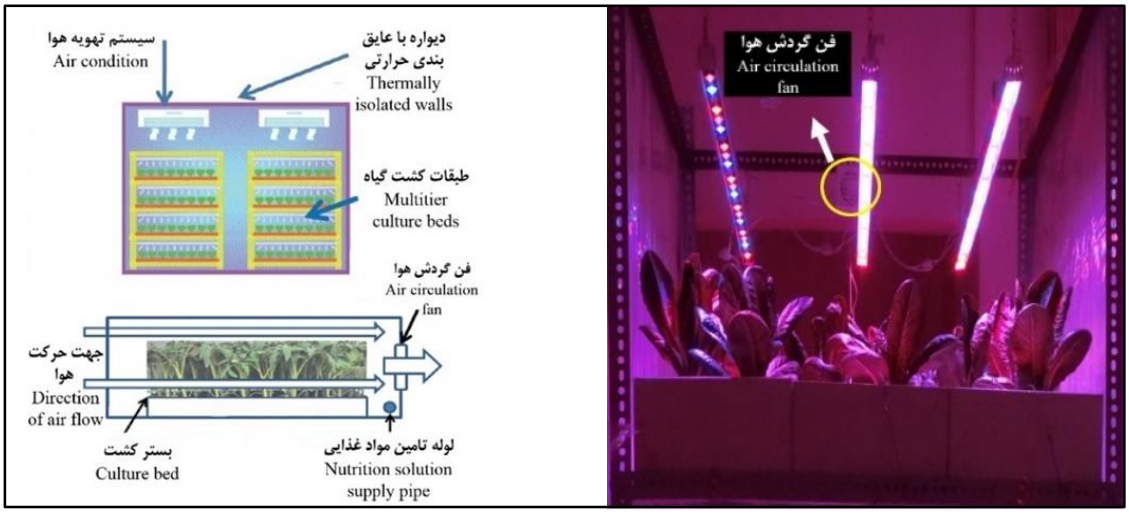
شکل ٦- مجموعهٔ سازه‌های ساخته‌شده به همراه سیستم‌های آبیاری، زهکشی و بستر کشت
Fig. 6- The set of built structures along with irrigation, drainage and cultivation systems

ترکیب سیستم نوری در طبقات گلخانه

سیستم نوردهی در طبقات با ترکیب‌های مختلفی نصب گردیدند. در طبقهٔ دوم از ترکیب طیف نوری قرمز (۷۵ درصد) و آبی (۲۵ درصد) با طول موج‌های ۶۶۰ نانومتر و ۴۴۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۵)، و در طبقه سوم از ترکیب نورهای قرمز (۵۰ درصد)، آبی (۲۵ درصد) و قرمز دور (۲۵ درصد) با پیک طول موج ۶۶۰، ۴۴۵ و ۷۴۰ نانومتر استفاده شد (شکل ۵). برای دستیابی به یکنواختی و زاویهٔ پوشش مناسب و در نتیجه توزیع یکنواخت نور در کل بستر، در هر طبقه ۳ ردیف وال واشر ۲۴ لامپی (۳۶ وات) در ابعاد ۳×۴×۱۰۰ سانتی‌متر قرار گرفت. ارتفاع بهینه سطح نور برای رشد گیاه، با توجه به واریته و مرحلهٔ رشد کاهو، متغیر است. شدت نور یا لوکس (PAR) هر وال واشر از ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری، توسط حسگر نوری (Z990, FluorPen) ۲۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه اندازه‌گیری شد که در تمام مراحل رشد ثابت باقی ماند.

سیستم گردش هوا

سرعت هوای ورودی مناسب ۰/۴ متر بر ثانیه و مساحت دریچهٔ ورود ۰/۰۲ مترمربع بود و بر اساس آن دبی لازم با استفاده از یک فن گردش هوای خانگی (15W, 220V- VPH-8S2S, Damandeh -50Hz) به دست آمد (شکل ۷).



شکل ۷- طرح شماتیک حرکت هوا روی بستر کشت و محل قرارگیری فن در PFAL ساخته شده

Fig. 7- The schematic diagram of air movement on the cultivation bed and the location of the fan was made in PFAL

با استفاده از این فن‌ها (مصرف انرژی: ۱۶ وات، میزان جریان هوا: ۲۴ مترمکعب بر ساعت)، یک جریان هوای ملایم روی سطح گیاهان ایجاد شد. در واقع، وجود یک جریان افقی هوا در ارتفاع ۱۰-۱۵ سانتی‌متری روی پوشش گیاهی باعث می‌شود رطوبت نسبی کانوپی نشا به زیر ۸۵ درصد برسد. در نهایت، سیستم گلخانه عمودی (شکل ۸) در ۳ بخش با ۳ طبقه در هر واحد ساخته و با پوشش‌های پلی‌اتیلن دیواره‌های جانبی آن پوشیده شد.

شکل ۸- نمای نهایی گلخانهٔ عمودی ساخته شده

Fig. 8- The final view of the built vertical greenhouse

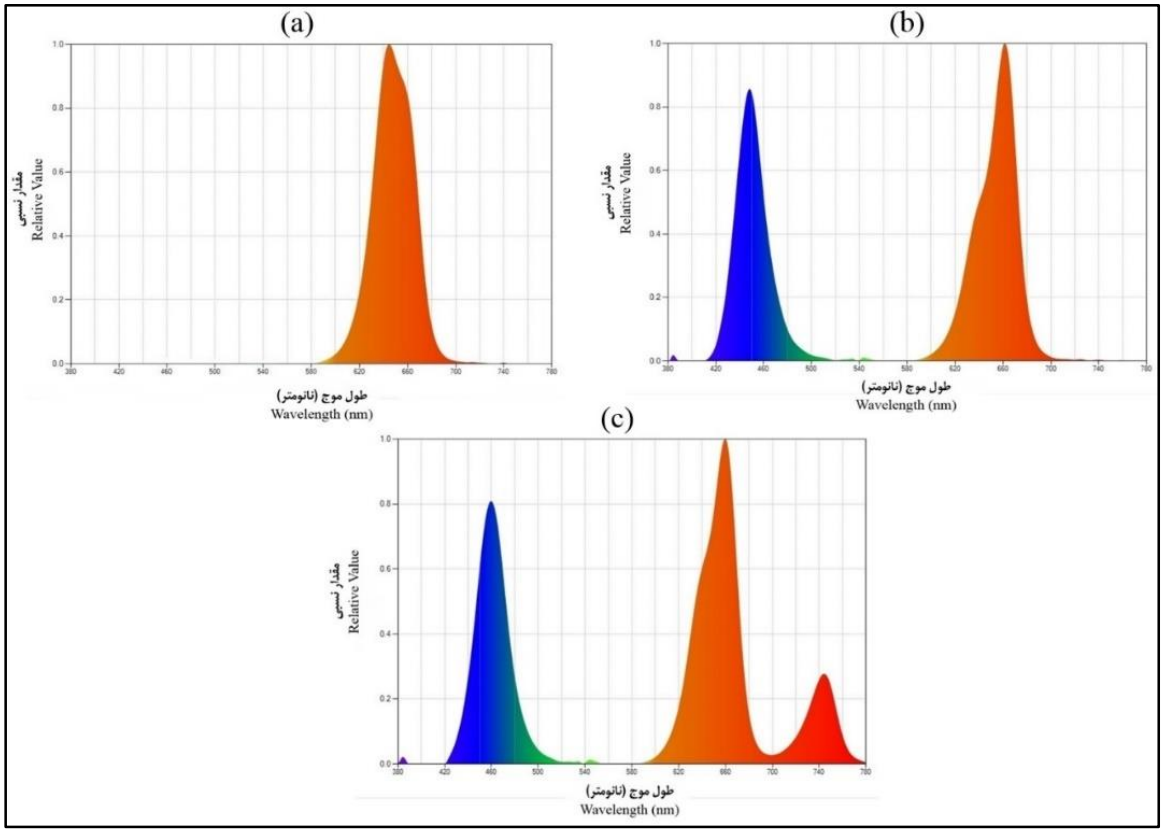
نتایج ارزیابی کشت کاهو

دستگاه به منظور بررسی عملکرد صحیح سیستم و تأثیر طیف‌های نوری (در سه سطح PAR) بر عملکرد محصول کاهو ارزیابی شد. بذر کاهو ابتدا در داخل سینی‌های کشت با ابعاد سینی کشت: ۵۰×۲۷×۶ سانتی‌متر و درون پرلیت کاشته شد. بذرها هر روز با آب مقطر در زیر نور سفید با شدت ۱۵۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه و فتوپریود ۱۶ ساعته، آبیاری می‌شدند. گیاهان پس از ۱۵ روز در مرحله ۳ تا ۴ برگی به بستر کشت طبقاتی منتقل شدند (شکل ۹).

شکل ۹- گلخانه تحت کشت کاهو پس از ۷ روز (a)، ۱۵ روز (b)، ۳۰ روز (c) پس از برداشت (d)

Fig. 9- Greenhouse under cultivation of lettuces after 7 days (a), 15 days (b), 30 days (c) after harvesting (d)

گیاهان به مدت ۳۰ روز تحت نور ۲۴ ساعته در ترکیب‌های متفاوت طیف نوری یا همان سطوح مختلف PAR، با استفاده از دستگاه پرتابل Lutron GC-2028، در شرایط دمایی ۲۱ درجهٔ سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ درصد قرار گرفتند (Resh, 2016). پس از برداشت، وزن تر و خشک تمامی کاهوها اندازه‌گیری شد. در مجموع پس از گذشت تنها ۳۰ روز و با ابعادی به مساحت یک مترمربع، ۷۲ عدد کاهو از سیستم برداشت شد که قابل قیاس با روش‌های مزرعه‌ای و گلخانه‌های مرسوم است. با مقایسهٔ میانگین با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد در قالب طرح کامل تصادفی با پنج تکرار،کمترین وزن تر (۵۰/۱۹ گرم) و خشک گیاه (۰/۳۱ گرم) در تیمار ترکیب نوری قرمز، آبی و قرمز دور (Far-Red) مشاهده شد (شکل c-۱۰). نور قرمز (Red) (شکل a-۱۰) بیشترین عملکرد را نسبت به دیگر تیمارها داشته است. اگرچه در ترکیب نوری قرمز و آبی (R&B) (شکل b-۱۰)، وزن تر اختلاف زیادی با نور قرمز دارد اما میزان از دست دادن رطوبتش در مقایسه با نور قرمز اختلاف چندانی ندارد.



شکل ۱۰- طول موج ترکیب نورهای a) قرمز b) آبی و قرمز و c) آبی، قرمز و قرمز دور

Fig. 10- The wavelength of light combination a) red b) blue and red c) blue, red and far red

نتایج ارزیابی بازده الکتریکی گلخانه

مصـرف کل برق با توجه به توان اسـمی تجهیزات و با تقریب خوبی در اتاق کشت یک PFAL در واحد سطح A_T (مگاژول بر ساعت بر مترمربع)، محاسبه می‌شود. این انرژی الکتریکی شامل مصرف انرژی الکتریکی سیستم سرمایش و گرمایش ، لامپ‌ها و دیگر تجهیزات از جمله فن‌ها، پمپ آب و غیره اسـت. نتایج بررسـی‌ها نشـان داد که ظرفیت گرمایشی (مقدار گرمای گرفته شده از اتاق) و COP ضریب بازدهی سیستم تهویه با کاهش دمای بیرون اتاق، افزایش می‌یابد و مقدارش با توجه به دفترچهٔ راهنمای محصـول ۵/۵ است. محاسبات سهم برق کارخانهٔ گیاهی ساخته شده در جدول ۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۱- میزان مصرف برق بر حسب اجزا

Table 1- Electricity consumption by components

نوع سیستم		میزان مصرف (درصد)	جهت مصرف در	
نوردهی	Lighting	83	لامپ‌های ال‌ای‌دی	LED lamps
خنک‌کننده	cooling	14	سرمایش	air conditioning
سایر تجهیزات	Other equipment	3	فن تهویه ، پمپ آب pump	Fan, water

نتیجه‌گیری

عوامـل محیطـی از جملـه میـزان تـابش نـور خورشـید، سـطح بـارش، دمـای هـوا، میـزان رطوبـت و... از عوامـل تأثیرگـذار در کشـاورزی هسـتند. یکـی از طرح‌های موفـق در کنتـرل شـرایط محیطـی ذکـر شـده، کارخانـهٔ تولیـد گیـاه بـا نـور مصـنوعی اسـت. در ایـن تحقیق، مجموعه سـه واحـدی کارخانـهٔ گیـاهی بـا کشـت عمـودی بـا سیسـتم‌هـای مـورد نیـاز بـرای رشـد گیـاه ماننـد نـور مصـنوعی، آبیـاری، تهویـه و بسـتر کشـت هیـدروپونیک بـرای رشـد و نمـو گیاهـان سـاخته شـد. قابلیت کشـت انـواع محصـولات بـا تغییـر ارتفـاع طبقـات و تغییـر طیـف نورهـای مختلـف مـؤثر در فتوسـنتز در این دستگاه وجـود داشـت، نـور مـورد نیـاز بـرای گیاهـان از طریـق لامـپ‌هـای LED تـأمین می‌شـود؛ بـا کمـک ایـن لامپ‌هـا، نـه‌تنها میـزان تـابش قابـل تنظـیم بـود، بلکـه طیـف نـوری تابیـده شـده بـه هـر گیـاه بـه صـورت جداگانـه تعیـین مـی‌شـد. بـا توجـه بـه مسـتقل بـودن طبقات می‌توان کشـت‌هـای مختلفـی را هم‌زمـان بـه کـار بسـت و متغیرهـای دیگـری چـون دمـا و رطوبـت را هـم کنتـرل کـرد. کارخانـهٔ تولیـد گیـاه بـا نـور مصـنوعی نـه تنهـا راهکـاری پیشـرفته بـرای افـزایش بهـره‌وری تولیـد محصـولات کشـاورزی بـا کمتـرین میـزان مصـرف منـابع اسـت، بلکـه امکـان پـرورش گیاهـان گونـاگون را در اقلیم‌های مختلف فراهم می‌کند.

قدردانی

نویسـندگان مقالـه از گـروه فنـی کشـاورزی و گـروه باغبـانی دانشـکده فنـاوری ابوریحـان، دانشـگاه تهـران بـه پـاس حمایت‌های خوبشان سپاسگزاری می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

Despommier, D. (2011). The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 6*(2), 233-236. https://doi.org/10.1007/s00003-010-0654-3.

Dutta Gupta, S., & Agarwal, A. (2017). Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_1.

Dutta Gupta, S. (2017). *Light emitting diodes for agriculture.* ISBN: 978-981-10-5806-6. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_1.

Eigenbrod, C., & Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 35*(2), 483-498. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0273-y.

Graber, A., Durno, M., Gaus, R., Mathis, A., & Junge, R. (2014). *UF001 LokDepot, Basel: The first commercial rooftop aquaponic farm in Switzerland. The International Conference on Vertical Farming and Urban Agriculture*. Sep. 9-10. Nottingham, UK. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4589.7446.

Kozai, T. (2013). Plant factory in Japan-current situation and perspectives. Chronica Horticulturae, 53(2), 8-11. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00001-7.

Kozai, T. (2016).An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production, Pages 35-68. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00003-2.

Mitchell, C. A., Both, A. J., Bourget, C. M., Burr, J., Kubota, C., Lopez, R., Morrow R., & Runkle, E. (2012). Horticultural Science Focus-LEDs: The future of greenhouse lighting. *Chronica Horticulturae, 52*(1), 6-12.

Morimoto, T., Torii, T., & Hashimoto, Y. (1995). Optimal control of physiological processes of plants in a green plant factory. *Control Engineering Practice, 3*(4), 505-511. https://doi.org/10.1016/0967-0661(95)00022-M.

Ohyama, K., Murase, H., Yokoi, S., Hasegawa, T., & Kozai, T. (2005). A precise irrigation system with an array of nozzles for plug transplant production. *Transactions of the ASAE, 48*(1), 211-215. https://doi.org/10.13031/2013.17956.

Resh, H. M. (2016). *Hydroponic food production.* A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. ISBN 9780367678753. CRC Press.

Shigley, J. E., & Mischke, C. M. (1996). *Machine design handbooks*. McGraw-Hill, New York. USA

Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M., & Roth, B. (2015). LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49*, 139-147. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117.

Takakura, T., Kozai, T., Tachibana, K., & Jordan, K. (1974). Direct digital control of plant growth. I. Design and operation of the system. *Transactions of the ASAE, 17*(6), 1150. https://doi.org/10.13031/2013.37049.

Tarakanov, I., Yakovleva, O., Konovalova, I., Paliutina, G., & Anisimov, A. (2012). *Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. The VII International Symposium on Light in Horticultural Systems*. Oct. 15-18. The Netherlands. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.17.

Wheeler, R. M. (2008). A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop. *HortScience, 43*(7) 1943-1942. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1942

Yabuki, K. (2004). *Photosynthetic rate and dynamic environment*. Springer. https://doi.org/10.1093/aob/mch220.130 pp.

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.24/No.88/Winter 2023/P:17-32
Journal Home Page: https://amsr.areeo.ac.ir

Research Paper

Construction and Evaluation of a Vertical Greenhouse with Artificial Light of LED

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Agrotechnolgy, University of Tehran, Pakdasht, Iran.
Email: chegini@ut.ac.ir
Received: 27 July 2024, Accepted: 14 October 2024
https://doi.org/ 10.22092/amsr.2024.366613.1496

Abstract

The increasing production of agricultural products with high efficiency has led to the use of new methods to increase the yield of these products. Among others, we can mention vertical cultivation in greenhouses with artificial light. In these greenhouses, in addition to controlling the different climatic parameters, the light needed by the plant is provided by low consumption LED lamps. The ability to grow all kinds of agricultural products, including lettuce and other vegetables, by changing the height of the floors and changing the spectrum of different lights effective in the photosynthesis of plants is one of the capabilities of this greenhouse. In this research, a greenhouse with vertical cultivation was built with artificial light through LED lamps, irrigation systems, ventilation and hydroponic cultivation bed for growing plants. Due to the independence of the floors, it is possible to cultivate different crops with the same nutrition at the same time, and in addition to light, other variables such as temperature and humidity can also be controlled. The performance results showed that after 30 days and with dimensions of one square meter, 72 lettuce plant were harvested from the system, which is comparable to the yield of field and greenhouse production methods. Greenhouse evaluation was done in 3 treatments with different light combinations. The lowest fresh and dry weight of the plant was observed in the combination of red, blue and far red light treatment, and red light had the highest yield compared to the far red and red, blue treatments.

Keywords: Controlled Agricultural Environments, Lettuce, Vertical Cultivation

© 2023 Agricultural Mehanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)