

Evaluation of the effects of artificial light on some plant characteristics in the design and construction of a small-scale plant factory

Pourya Shamsi Roodbarsar¹, Seyed reza Mousavi Seyedi², Davood Kalantari³, Kamran Ghasemi⁴

1- MSc. Graduated of Mechanics of Biosystem Department. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor of Mechanics of Biosystem Department. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Associate Professor of Mechanics of Biosystem Department. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Assistant Professor of Horticultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

mousavi22@sanru.ac.ir

Introduction It is predicted that the world population will grow to 9.3 billion up to 2050 and urban population will grow 73%. It means that it will grow from 3.6 billion to 6.3 billion. This huge population need abundant food production. Plant factory with artificial light (PFAL) is a closed growing system that is insulated against heat and air. The plant grow in shelves under artificial lighting which are laid horizontal. The main goal of PFAL is commercial production of plants, but min PFALS has not commercial goals and is used to produce plants in domestic and small sizes. The Plants that are less than 30 cm tall and grow well in relatively low light conditions and also at high planting densities, are suitable for plant factory. Therefore, plants such as rice, wheat and potatoes are not suitable for cultivation in a plant factory. The main purpose of this research is to study the proper light quality for growing radish plant. All light treatments had a significant effect on biomass, sugar and photosynthetic pigments of radish. The result showed that the highest amount of chlorophyll a was 0.964 and the lowest amount was equal to 0.318 mg/g fresh leaf weight. In chlorophyll b, the highest value was 0.666 mg/g and the lowest value was 0.229 mg/g wet weight. The highest and the lowest carotenoids were equal to 74.75 mg/g and 30.6 mg/g wet weight. The highest sugar content was 0.717 µg/g and the lowest was 0.02 µg/g dry weight. The highest fresh and dry weight of the plant were 0.27 g and 0.014 g, and the lowest were recorded 0.155 and 0.007 g. In this study, plant length was also examined but no significant difference was observed between different light treatments. Based on a general conclusion, it can be said that the light composition (R2, G0, B1) was the most suitable light regime for use in the designed system.

Materials and methods The plant, studied in this investigation is radish. The place of growth was built vertically in 4 floor. Each floor was been divided into two sections. There should be a controller in each section, to control the parameters like light time off and on, temperature and moisture. In this method the controller was designed by the Fritzing software and then it was built by parts and sensors like DHT 11, Arduino UNO, based on ATMEGA328P, Relay module Arduino, data logging shield, driver module RC. The programming platform like Arduino was used for writing down the codes to control the other needed parameters. In this study 7 different light treatments were used plus sunlight as witness for studying different lights effects. These light treatments were developed throw changing the number of 3 lights (red, green, blue). LEDs were installed after designing and constructing m-PFAL. According to previous studies which have been done in this matter, all LED lights were installed above the shelves, so that the plants can use the proper amount of light in vertical state. And some light reflectors were installed beside the plants so that the lower leaves can get the proper light. In this study LED light with 7 different optical spectrum composition and sunlight as the witness were used. The experimental design was randomized completely design with 8

treatments and three replications and all the data analysis were done through SAS software. The average comparison was done in Duncan method and probability of 1% and 5%.

Results and discussion According to results, light regime (R2,G0,B1) has the highest amount of chlorophyll “a”, that has significant difference with the witness and the other treatments. The lowest amount of chlorophyll “a” was related to (R1, G0, B0) treatment, that didn't have significant difference with the witness and (R1,G1,B1). The highest amount of chlorophyll “b” was related to (R2,G0,B1) treatment, that had significant difference with the witness, but in comparison with (R2, G1, B0) and (R1, G0, B2) treatments didn't have significant difference. The amount of photosynthesis pigments are higher by using the mixed light treatment of blue and red, especially when the red light is more. The highest wet weight was seen in (R2, G0, B1) treatment, which didn't have significant difference with natural light. The lowest wet weight was seen in just red light treatment, that was very low in comparison with the other treatments. According to results, dry weight of radish is 4-6 percent of its wet weight. In dry weight just like the wet weight, the highest amount was for (R2, G0, B1) treatment, that didn't have significant difference with (R0, G1, B2) and (R1, G0, B0). The highest amount of sugar was seen in (R2, G0, B1) treatment, that was very high in comparison with other used optical regimes and natural light. Because the production of carbohydrates and sugar has direct relation with Photosynthesis, so we can conclude that the state of photosynthesis is more proper in (R2, G0, B1) treatment.

Conclusion In this study, the effective light quality for healthy and faster growth of radish plant in a plant factory was investigated. In case of limitations of natural light in greenhouse, multi-floor plantings and plant factories, LED lights in optimized quality can be a good alternative light. Also it has been indicated that the best light mixture is the red and blue light, when the red light is more than the blue light. And the worst light regime was the only red color, which had negative effect on the all parameters.

Keywords: Artificial light, Chlorophyll, Light regime, Plant factory, Urban agriculture.

ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه در طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی

مقیاس کوچک

پوریا شمسی رودبارسرا^۱، سیدرضا موسوی سیدی^۲، داوود کلاتتری^۳، کامران قاسمی^۴

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۲ دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۳ دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

^۴ استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*نویسنده مسئول: mousavi22@sanru.ac.ir

چکیده

تولید مواد غذایی در محیط شهری راهکار مناسبی برای به کارگیری فضاهای بلااستفاده می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مجهز به نور مصنوعی جهت استفاده در مناطق شهری می‌باشد. از آن جا که تامین نور مناسب از مهمترین

ویژگی‌های تاثیرگذار بر کارایی یک کارخانه گیاهی محسوب می‌شود، تعداد ۸ تیمار نوری ($R=2, G=0, B=1$)، ($R=2, G=1, B=0$)، ($R=1, G=0, B=2$)، ($R=0, G=1, B=2$)، ($R=1, G=1, B=1$)، ($R=0, G=0, B=1$)، ($R=1, G=0, B=0$) و نور خورشید به عنوان شاهد و در سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. گیاه مورد استفاده تربچه با نام علمی *Raphanus sativus* بود که پس از ۵ هفته برداشت شد و پارامترهای مختلفی از ش (Li *et al.*, 2012). گیاهانی مانند برنج، گندم و سیب‌زمینی که معمولاً به‌عنوان منبع کالری مورد استفاده انسان و دام قرار می‌گیرند و گیاهانی که نیاز به مناطق وسیعی جهت پرورش دارند، مناسب تولید در کارخانه گیاهی نیستند. کارخانه گیاهی در ژاپن و کشورهای آسیایی جهت تولید سبزیجات، گیاهان دارویی و نشا مورد استفاده قرار گرفته است (Kozai, 2013). با توجه به اینکه یکی از مشکلات هر جامعه‌ای موضوع اشتغال‌زایی است، کارخانه گیاهی تا حدودی برای حل این مشکل مناسب است. بدین صورت که با ارائه‌ی آموزش‌هایی ساده به افراد جامعه، کارخانه گیاهی می‌تواند موجب ایجاد فرصت‌های شغلی برای سالمندان و معلولین با محیط کاری امن و دلپذیر شود و سبب تولید گیاهانی تازه و با کیفیت بالا گردد (Kozai *et al.*, 2019).

در تحقیقی (Ikeda *et al.*, 1991) به تولید کاهو با استفاده از لامپ‌های فلورسنت و تحت یک برنامه کشت سالانه پرداختند. در این آزمایش از ۱۶ ساعت روشنایی استفاده کردند به طوری که شدت نور در زمان روشنایی در محدوده $330-560 \mu E/m^2s^{-1}$ ، دما $25/5 \pm 0$ درجه سانتیگراد و در دوره خاموشی نیز $20/2 \pm 0$ درجه سانتیگراد تنظیم شد. همچنین رطوبت برابر با 5 ± 70 درصد، غلظت کربن دی-اکسید 50 ± 900 ppm، سرعت جریان هوا $0/5$ متر بر ثانیه، هدایت الکتریکی $1/3$ ms و pH محلول غذایی برابر با $5/5$ تنظیم شد. نتایج نشان داد که در شرایط فوق رشد کاهو افزایش یافت به طوری که وزن تازه گیاه در طی ۲۹ روز به ۷۵ گرم رسید. همچنین مصرف الکتریسیته برای روشنایی در طول دوره جوانه‌زنی گیاه و مصرف الکتریسیته کل به ترتیب برابر با $1/1$ و $2/5$ کیلووات‌ساعت گزارش شد که حدود ۵۰ و ۲۰ درصد کمتر از تجهیزات متعارف با استفاده از لامپ‌های سدیم فشار بالا بود. در پژوهشی (Kozai *et al.*, 2007) در یک کارخانه گیاهی از روش نوردهی رو به بالا با استفاده از LEDهایی که روی پانل‌های کشت قرار گرفت تا انرژی نورانی بیشتری برای برگ‌های پایینی ایجاد شود، استفاده کردند. در کارخانه گیاهی، نور رو به بالا که توسط برگ‌های پایینی جذب نمی‌شود، توسط برگ‌های بالا جذب می‌شود و یا توسط بازتابنده نوری که در بالای تاج پوششی گیاه قرار می‌گیرد، به سمت جامعه گیاهی بازتاب می‌شود که از نوردهی بین محصولات مفیدتر می‌باشد در تحقیقی (Shimizu *et al.*, 2011) به توسعه یک دستگاه جدید بهینه شده با LED برای تولید سبزیجات در یک کارخانه گیاهی پرداختند که در آن هدف اصلی بررسی کیفیت نور موثر برای رشد سالم و سریع‌تر گیاهان بود. تاثیر کیفیت نور توسط ترکیبی از LEDها (آبی، سبز و قرمز) بر میزان فتوسنتز و رشد کاهو بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان فتوسنتز کاهو در نور مخلوط با LEDهای قرمز و آبی بیشتر است. طول ساقه در نور قرمز و آبی افزایش و در نور ترکیبی کاهش یافت. همچنین وزن تر کاهو در نور قرمز و فلورسنت افزایش یافت. در پژوهشی (Graamansv *et al.*, 2018) با استفاده از منابع موجود در

مورد تولید کاهو، عملکرد یک کارخانه گیاهی را با یک گلخانه سنتی برای سه منطقه جغرافیایی مختلف مقایسه کردند. با توجه به نتایج اعلام شده، از لحاظ بهره‌وری انرژی کارخانه گیاهی (1411 MJKg^{-1}) حتی از کارآمدترین گلخانه‌ها (1699 MJKg^{-1}) نیز بهتر عمل کرد. همچنین از لحاظ منابع مصرفی مانند آب و کربن‌دی‌اکسید نیز عملکرد بهتری از خود نشان داد. هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی و ارزیابی اثر رژیم‌های نوری مختلف بر برخی از ویژگی‌های محصول تولیدی در آن به منظور تولید مواد غذایی در محیط شهری بود. در این تحقیق از گیاه تربچه استفاده شد.

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت کارخانه گیاهی با استفاده از نرم‌افزار Solidworks برای طراحی محفظه رشد، نرم افزار Fritzing برای طراحی مدار الکترونیکی ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه، کدنویسی در آردینو برای راه اندازی کنترلر، مازول رطوبت و دما، مازول رله، مازول درایور I2C، کنترلر و LED ها استفاده شد.

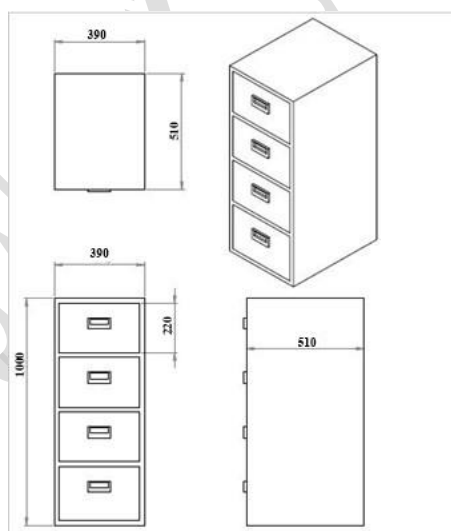
طراحی و ساخت محفظه رشد

محفظه رشد به صورت عمودی در ۴ طبقه ساخته شد و به منظور کاهش حجم محفظه، هر طبقه به دو بخش تقسیم گردید. برای طراحی فضای کشت از نرم‌افزار Solidworks استفاده شد. در شکل ۱، نمای سه‌بعدی و در شکل ۲، نمای دوبعدی محفظه رشد که در بخش Drawing طراحی گردید، نشان داده شده است. واحد اندازه‌گیری همه ابعاد محفظه بر حسب میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی محفظه رشد و اطمینان از کارکرد صحیح سایر قطعات، میزان دما و رطوبت کارخانه گیاهی خالی از گیاه هر ده دقیقه به مدت ۴۸ ساعت اندازه‌گیری و ذخیره شد. در این آزمایش دمای اندازه‌گیری روی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت روی ۶۰ درصد تنظیم شد. حداکثر اختلاف دما و رطوبت برای سنسورها در طی این مدت به ترتیب دو درجه سانتی‌گراد و چهار درصد به‌دست آمد.



شکل ۱- طرح سه بعدی محفظه رشد

Fig.1. Three-dimensional design of the growth chamber



شکل ۲- طرح دو بعدی محفظه رشد

Fig.2. Two-dimensional design of the growth chamber

ماژول اندازه‌گیری دما و رطوبت DHT-11

این سنسور برای اندازه‌گیری دما و رطوبت می‌باشد. دارای مصرف انرژی کم، انتقال سیگنال به مسافت بیش از ۲۰ متر و دارای اندازه‌ی کوچک است. دقت اندازه‌گیری دما ± 2 درصد و دقت اندازه‌گیری رطوبت ± 5 درصد است. ولتاژ ورودی و خروجی آن ۳ الی ۵ ولت می‌باشد. دمای بین ۲۰- الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۵ الی ۹۵ درصد را می‌توان اندازه‌گیری کند.

ماژول رله

این ماژول زمان روشنایی و خاموشی را کنترل می‌کند از رله ۵ ولت هشت کاناله استفاده شد. این ماژول به گونه‌ای است که پین‌های دیجیتال برد آردینو مستقیماً به ورودی کنترل رله وصل می‌شود.

ماژول درایور I2C

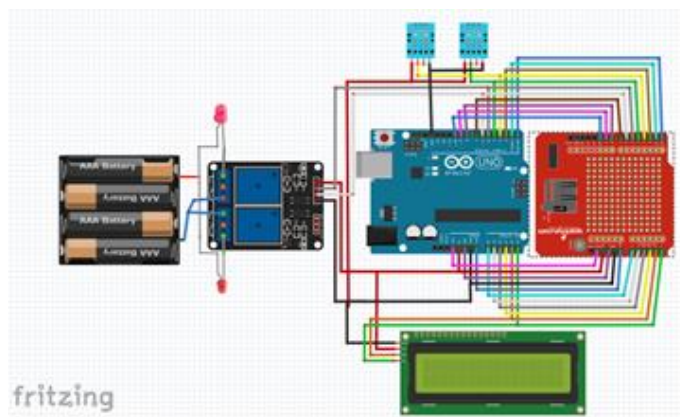
در این طراحی از یک ماژول درایور LCD کاراکتری ۱۶*۲ با ارتباط I2C استفاده شد. به کمک این درایور راه اندازی LCD بسیار آسان می‌شود و از تعداد پین‌های دیجیتال آردینو کمتری استفاده می‌شود.

شیلد دیتا لاگر

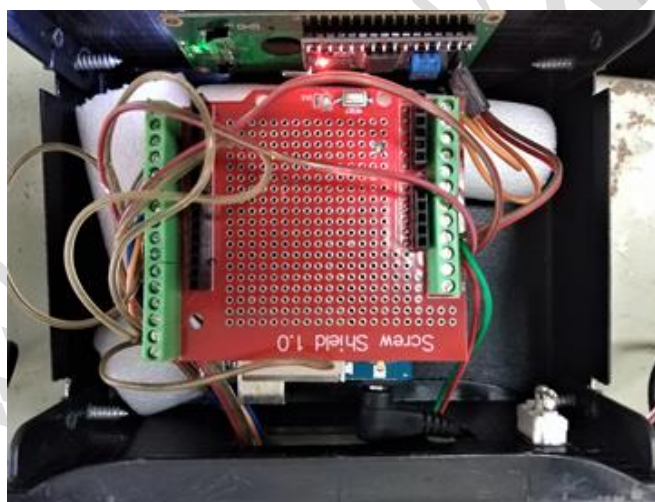
به منظور ذخیره داده‌ها و همچنین تنظیم ساعت برای خاموشی و روشنایی از یک شیلد دیتالاگر آردینو استفاده شد. با استفاده از این شیلد می‌توان فایل‌ها را بر روی یک حافظه SD ذخیره کرد. دیتالاگر برای ذخیره داده‌هایی به کار می‌رود که بعد از قطع شدن برق، اطلاعات آن از بین نرود.

طراحی و ساخت کنترلر برای کارخانه گیاهی

برای کنترل برخی از پارامترها مانند دما، رطوبت و زمان روشن و خاموش شدن لامپ‌های مورد استفاده جهت تولید نور مصنوعی، نیاز به یک کنترلر می‌باشد. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Fritzing کنترلر مورد نظر طراحی شد (شکل ۳) و در ادامه از قطعات و سنسورهای DHT-11 برای اندازه‌گیری رطوبت و دما، برد آردینو UNO بر پایه ATMEGA328P، ماژول رله، شیلد دیتالاگر و ماژول درایور I2C استفاده شد. همچنین برای نوشتن کدها جهت کنترل پارامترهای مورد نیاز، از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار آردینو استفاده شد. شکل ۴ کنترلر استفاده شده در این پژوهش را نشان داده است.



شکل ۳- مدار طراحی شده در نرم افزار Fritzing
Fig.3. Circuit designed in Fritzing software



شکل ۴- کنترلر مورد استفاده
Fig.4. The controller used

تیمارهای رنگی

برای بررسی تاثیر نورهای مختلف بر گیاه از ۷ تیمار رنگی و از نور خورشید به عنوان تیمار شاهد استفاده شد. این تیمارها از طریق تغییر در تعداد سه رنگ قرمز (۶۶۰-۶۱۰ نانومتر)، سبز (۵۵۰-۵۰۰ نانومتر) و آبی (۵۰۰-۴۵۰ نانومتر) به وجود آمدند (جدول ۱). طول همهی LEDهای مورد استفاده ۱۰ سانتی متر و محدوده پوشش آنها حدود ۳۰ سانتی متر بود (شکل ۵).



شکل ۵- LEDها برای تولید نور مصنوعی
Fig.5. LEDs to produce artificial light

جدول ۱- نسبت لامپ‌های LED بکاررفته در این آزمایش

Table 1- The ratio of LED lamps used in this experiment

تیمارها Treatments	قرمز Red	سبز Green	آبی Blue
تیمار 1 Treatment 1	2	0	1
تیمار 2 Treatment 2	2	1	0
تیمار 3 Treatment 3	1	0	2
تیمار 4 Treatment 4	0	1	2
تیمار 5 Treatment 5	1	1	1
تیمار 6 Treatment 6	0	0	1
تیمار 7 Treatment 7	1	0	0
تیمار 7 Treatment 7			
تیمار 8 Treatment 8			

شاهد (نور طبیعی محیط)

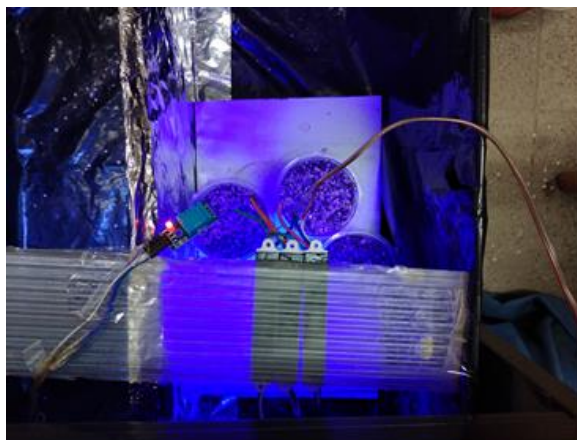
Control (natural ambient light)

اجرای آزمایش و تست با گیاه مدل

پس از طراحی و ساخت کارخانه گیاهی کوچک، LEDها نصب شدند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، همه‌ی LEDها در قسمت بالایی هر قفسه قرار گرفت و گیاه در معرض تابش نور مستقیم لامپ‌های مورد استفاده بود. مدت زمان روشنایی و خاموشی به ترتیب بر ۱۶ و ۸ ساعت تنظیم شد و شدت نور بر ۱۰۰ ± 3000 لوکس تنظیم شد که این مقدار توسط دستگاه لوکس‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین برای رسیدن نور به برگ‌های زیرین گیاه، از بازتابنده‌ها (فویل آلومینیومی) در اطراف گیاه استفاده شد. شکل ۶ محل قرارگیری LEDها را نشان داده است. دما و رطوبت در طول انجام آزمایش ثابت بود و برای تنظیم آن‌ها از سیستم خنک‌کننده آزمایشگاه استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری دما و رطوبت از دو سنسور استفاده شد که در قفسه‌های اول و سوم و در بالای LEDها نصب شدند. شکل ۷ محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت را نشان داده است. پس از نصب سنسورها و سایر قطعات مربوط به کارخانه گیاهی کوچک و تنظیم دمای مورد نظر برای رشد گیاه، بذر گیاه تریچه درون لیوان‌های یکبارمصرف کاشته شد و داخل دستگاه قرار گرفت. همچنین از کوکوپیت و پرلیت به عنوان بستر کشت استفاده شد. در ابتدا تنها آب مورد نیاز در اختیار گیاهان قرار گرفت و پس از دو هفته و رشد برگ‌های حقیقی، محلول غذایی رقیق‌شده نیز به منظور تغذیه گیاهان استفاده شد. پس از گذشت پنج هفته اقدام به برداشت تریچه‌ها شد و در آن با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. همچنین طول گیاه (طول اندام رویشی) در سه مرحله زمانی اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای مختلف مانند وزن تر و خشک، قند و همچنین رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کارنوئید) اندازه‌گیری گردید.



شکل ۶ - محل قرارگیری LEDهای تولیدکننده نور مصنوعی
Fig.6. Location of LEDs producing artificial light



شکل ۷ - محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت
Fig.7. Location of temperature and humidity sensor

اندازه گیری قند گیاه

پس از خشک کردن گیاه تریچه، نمونه‌ها با ۵ میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد مخلوط شد و به مدت ۱۰ دقیقه درون حمام آب گرم در دمای ۷۰ درجه قرار گرفت. سپس محلول ساخته شده در دستگاه سانتریفیوژ با چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. این فرایند چهار بار تکرار و در ادامه محلول آنترون ساخته شد و مقدار ۱۵۰ میلی گرم آنترون در ۱۰۰ میلی لیتر اسید سولفوریک رقیق حل شد. سپس جهت اندازه‌گیری قند محلول، مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره گیاه تریچه در لوله آزمایش ریخته شد و ۳ میلی لیتر محلول آنترون به آن اضافه گردید. مخلوط به دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه در درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب جوش قرار گرفت. در نهایت جذب عصاره در طول موج ۶۲۰ نانومتر توسط اسپکتوفتومتر خوانده شد و با استفاده از رابطه (۱) مقدار قند بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه به دست آمد (McCready *et al.*, 1950).

$$\text{وزن خشک} * \left(\frac{-0.304 - \text{میزان جذب}}{0.01242} \right) = \text{مقدار قند} \quad (1)$$

اندازه‌گیری رنگی‌های فتوسنتزی

جهت عصاره‌گیری رنگی‌ها، از حلال متانول استفاده شد و جذب عصاره متانولی به دست آمده در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد و محاسبات لازم با استفاده از روابط ۲-۴ انجام گرفت (Lichtenthaler and Buschmann, 2001). در این روابط، C_a کلروفیل a ، C_b کلروفیل b و $C_{(x+c)}$ کارتنوئیدها (گزانتوفیل+کاروتن) می‌باشد.

$$C_a (\mu\text{g/ml}) = 16.72 A_{665.2} - 9.16 A_{652.4} \quad (2)$$

$$C_b (\mu\text{g/ml}) = 34.09 A_{652.4} - 15.28 A_{665.2} \quad (3)$$

$$C_{(x+c)} (\mu\text{g/ml}) = (1000 A_{470} - 1.63 C_a - 104.96 C_b)/221 \quad (4)$$

طرح آماری مورد استفاده

در این پژوهش از نور مصنوعی تولید شده با استفاده از LED با هفت ترکیب طیف نوری و از نور خورشید به عنوان تیمار شاهد استفاده شد. طرح مورد استفاده، طرح کاملاً تصادفی با ۸ تیمار و ۳ تکرار بود و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز از روش دانکن و در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد، تاثیر تیمارهای بکار رفته بر تمامی صفات مورد ارزیابی به جز طول گیاه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲- آنالیز واریانس تاثیر تیمارهای نوری بر زیست توده، قند و رنگیزه‌های فتوسنتزی تربچه

Table 2- Analysis of variance of the effect of light diets on biomass, sugar and photosynthetic pigments of radish

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of square							
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid	وزن تر Wet weight	وزن خشک Dry weight	قند sugar	طول length
تیمار Treatment	7	0.106**	0.065**	0.328**	718.27**	0.0046**	0.000017**	0.168**	1.13 ^{ns}
خطا Error	16	0.019	0.011	0.057	153.31	0.0006	0.0000015	0.006	0.46
ضریب تغییرات Coefficient of variation	-	22.16	22.54	22.02	22.52	10.61	10.77	22.01	9.13

^{ns} عدم وجود اختلاف معنی‌دار، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

^{ns} No significant difference, ** Significant difference at the level of one percent probability

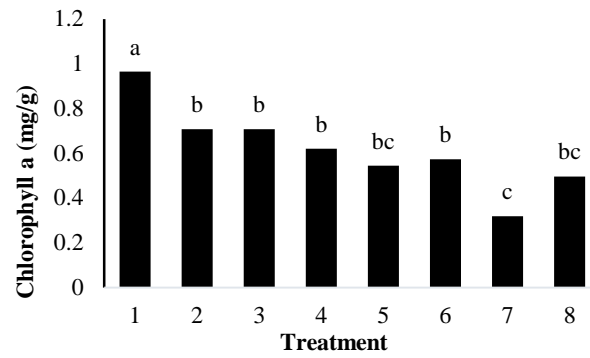
با توجه به نتایج به دست آمده، تیمار نوری (R2, G0, B1) دارای بیشترین مقدار کلروفیل a بود و اختلاف معنی‌داری با شاهد و سایر تیمارهای دیگر داشت (شکل ۸). کمترین مقدار کلروفیل a نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۸).

بیشترین مقدار کلروفیل b متعلق به تیمار (R2, G0, B1) بود که با شاهد دارای اختلاف معنی‌دار بود ولی نسبت به تیمارهای (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). مشابه آنچه در خصوص کلروفیل a بیان شد، کمترین مقدار کلروفیل b نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۹).

کلروفیل کل به مجموع دو کلروفیل a و b گفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین میزان کلروفیل کل، مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد و همه تیمارهای نوری مورد بررسی به جز دو تیمار (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2)، برتری داشت (شکل ۱۰).

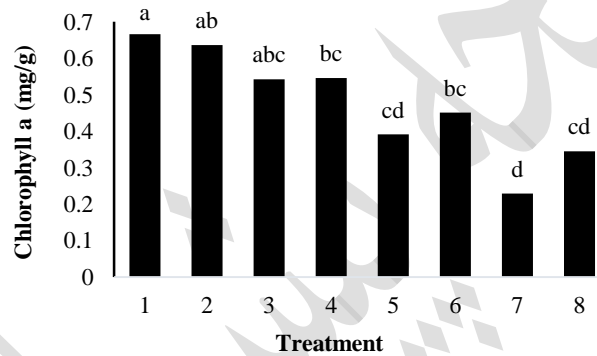
کارتونید مجموع رنگی‌هایی مانند گزانتوفیل و کاروتن می‌باشد که نقش آن جمع‌آوری انرژی و استفاده در فتوسنتز است. شکل ۱۱ مقایسه میانگین کارتونید در تیمارهای مختلف را نشان داده است. بیشترین مقدار کارتونید مربوط به تیمار (R2, G1, B0) بود که با تیمارهای شاهد، (R0, G0, B1)، (R1, G0, B0) و (R1, G1, B1) اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد داشت (شکل ۱۱).

نتایج این بخش نشان داد که تیمار نوری ترکیب قرمز و آبی به‌ویژه زمانی که نور قرمز بیشتر باشد، دارای رنگی‌های فتوسنتزی بالاتری است. برعکس اگر تنها از یک طیف نوری آبی یا قرمز استفاده شود و یا نسبت نوری مساوی قرمز، سبز و آبی اعمال شود، وضعیت رنگی‌های فتوسنتزی و به تبع آن میزان فتوسنتز کاهش خواهد یافت. زیرا توسعه روزنه (روزنه‌هایی بر روی گیاه که با جذب دی-اکسیدکربن امکان فتوسنتز را برای گیاه فراهم می‌کند) گیاه در نور تک‌رنگ نسبت به نور مخلوط کمتر است. نور آبی و قرمز بیشترین تاثیر را در فرآیند فتوسنتز دارند و نور آبی دارای قدرت نفوذ بیشتری در بافت‌های گیاه نسبت به نور قرمز دارد و می‌بایست به نسبت منطقی از نور آبی بهره برد و برای رشد بیشتر نیاز به حجم نور قرمز بیشتری است. همچنین کلروفیل بیشتر نور سبز جذب نمی‌کند و آن را بازتاب می‌کند. براساس برتری تیمار (R2, G0, B1)، از نظر همه رنگی‌های فتوسنتزی می‌توان نتیجه گرفت، این تیمار نوری مطلوب‌ترین تیمار برای رنگی‌های فتوسنتزی است. نتایج پژوهش (Shimizu *et al.*, 2011) نیز نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در افزایش رنگی‌های فتوسنتزی نقش موثری دارد.



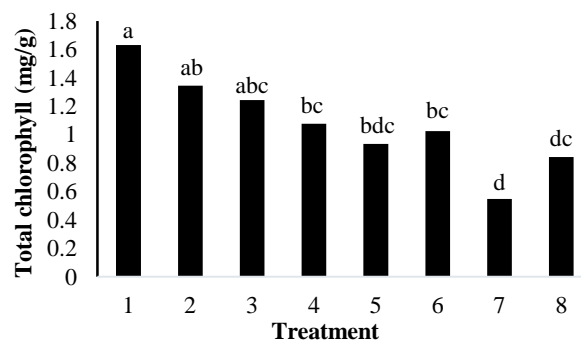
شکل ۸- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل a برگ تربچه

Fig.8. The effect of light quality on the amount of chlorophyll a in radish leaves



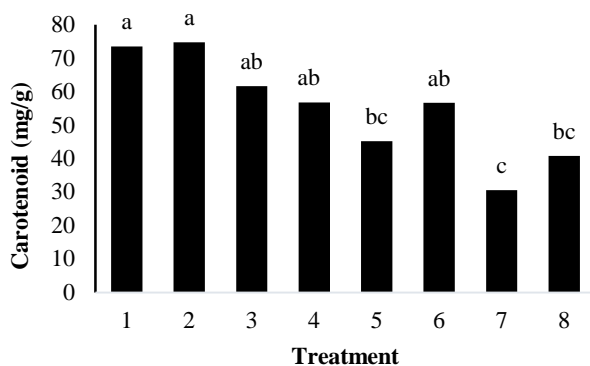
شکل ۹- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل b برگ تربچه

Fig.9. The effect of light quality on the amount of chlorophyll b in radish leaves



شکل ۱۰- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل کل برگ تربچه

Fig.10. The effect of light quality on the amount of total chlorophyll in radish leaves

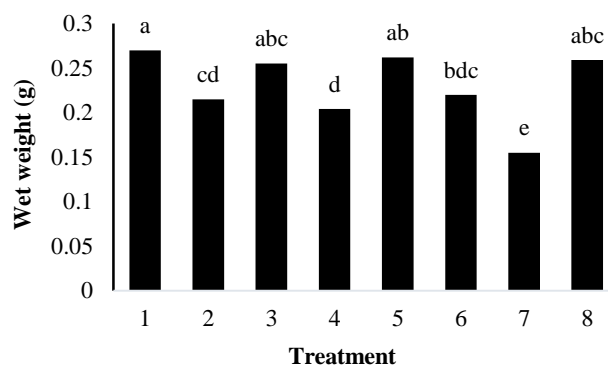


شکل ۱۱- تاثیر کیفیت نور بر میزان کارتنوئید برگ تربچه

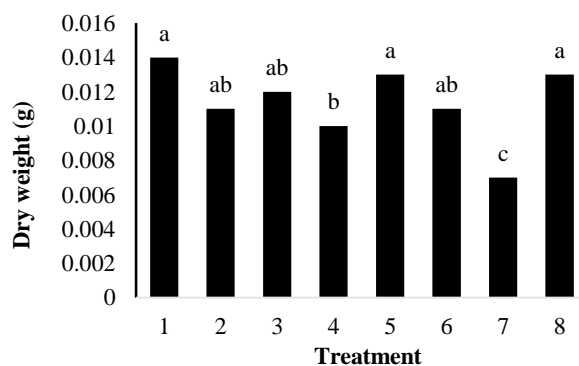
Fig.11. The effect of light quality on the amount of carotenoid in radish leaves

با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۱۲)، بیشترین مقدار وزن تر مربوط به تیمار (R2، G0، B1) بود که اختلاف معنی داری با نور طبیعی و تیمارهای (R1، G0، B2) و (R1، G1، B1) نداشت. کمترین وزن تر نیز در تیمار نوری صرفاً قرمز به دست آمد که به طور معنی داری از تمامی تیمارها پایین تر بود (شکل ۱۲). بر اساس نتایج به دست آمده، وزن خشک گیاه تربچه بین ۴ الی ۶ درصد وزن تر گیاه بود. در وزن خشک نیز مانند وزن تر بیشترین میزان وزن خشک مربوط به تیمار (R2، G0، B1) بود که اختلاف معنی داری با سایر تیمارها به جز (R0، G1، B2) و (R1، G0، B0) نداشت (شکل ۱۳). نتایج نشان داد که طیف نوری قرمز به تنهایی نمی تواند شرایط لازم برای رشد و در نهایت حصول عملکرد مطلوب گیاه را فراهم نماید. در هنگام استفاده از یک طیف نوری، نور آبی شرایط بهتری نسبت به نور قرمز برای رشد گیاه فراهم نمود. این نتیجه علاوه بر زیست توده، در خصوص رنگیزه های فتوسنتزی نیز صادق بود و طیف آبی نسبت به طیف قرمز شرایط بهتری را برای فتوسنتز گیاه فراهم کرد.

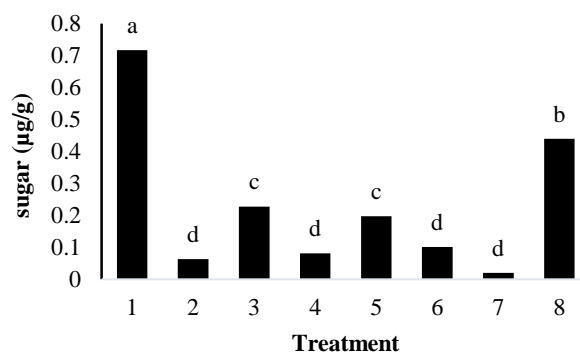
شکل ۱۴ نتایج مقایسه میانگین بین قند گیاه در تیمارهای مختلف را نشان داده است. بیشترین میزان قند گیاه مربوط به تیمار (B1، R2، G0) بود که به طور معنی داری نسبت به تیمار شاهد، نور طبیعی و سایر تیمارهای نوری به کار رفته برتری داشت. از آنجا که تولید کربوهیدرات ها و قند ارتباطی مستقیم با کارایی فتوسنتزی دارد لذا می توان گفت که در تیمار (R2، G0، B1) وضعیت فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای مورد بررسی وضعیت بهتری داشته است. در پژوهشی که به منظور بررسی اثر طیف های مختلف نوری بر گیاه کاهو انجام شد، نتایج نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی، کارایی فتوسنتزی بالاتری نسبت به طیف های نوری مورد آزمایش داشت (Shimizu *et al.*, 2011). همراستایی میزان بالای قند و میزان رنگیزه های فتوسنتزی نیز نشان داد که در تیمار (R2، G0، B1) شرایط مناسبتری برای جذب نور و انجام فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای نوری وجود دارد.



شکل ۱۲- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن تر برگ تربچه
Fig.12. The effect of light quality on the fresh weight of radish leaves

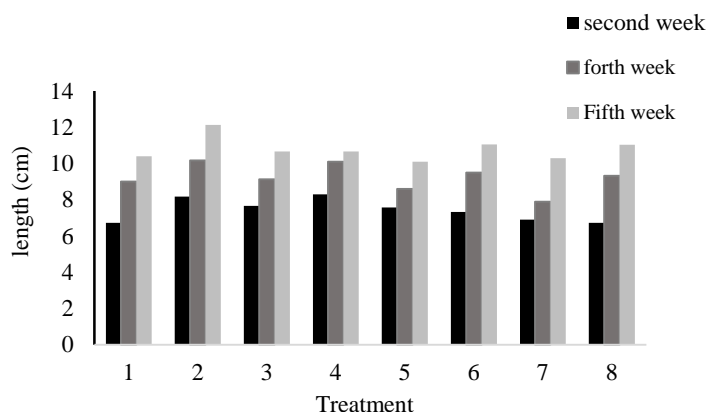


شکل ۱۳- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن خشک برگ تربچه
Fig.13. The effect of light quality on the dry weight of radish leaves



شکل ۱۴- تاثیر کیفیت نور بر میزان قند برگ تربچه
Fig.14. The effect of light quality on the sugar content of radish leaves

طول گیاه در سه مقطع زمانی اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر طول گیاه وجود نداشت. نتایج ارزیابی طول گیاه در تیمارهای مختلف نشان داد که اگر شدت نور مناسبی انتخاب گردد؛ لامپ‌های LED عارضه کشیدگی (legginess) در مقایسه با نور طبیعی ایجاد نمی‌کنند. در اختلال کشیدگی، ساقه گیاه طویل شده ولی ضعیف و دارای کیفیت پایین است (Javanmardi, 2010). نور مصنوعی در صورتی که به درستی تنظیم نشود ممکن است عارضه کشیدگی را تشدید نماید



شکل ۱۵- تاثیر کیفیت نور بر طول گیاه در سه مقطع زمانی
Fig.15. The effect of light quality on plant length in three time periods

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که اگر محدودیتی از نظر نور طبیعی در فضاهایی مانند گلخانه و کشت‌های طبقاتی و همچنین کارخانه‌های گیاهی ایجاد شود، می‌توان از نور مصنوعی حاصل از لامپ‌های LED در کیفیت بهینه‌شده را جایگزین نور طبیعی نمود. بررسی اثر تیمارهای مختلف نوری بر برخی از خصوصیات گیاه تربچه نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در صورتی که شدت نور قرمز نسبت به نور آبی بیشتر باشد، می‌تواند در مقایسه با دیگر تیمارها شرایط بهتری را برای گیاه فراهم نماید، زیرا گیاه می‌تواند همه‌ی انرژی موجود در نورهای قرمز و آبی را جذب کند. دلیل بیشتر بودن شدت نور قرمز این است که، نور قرمز دارای قدرت نفوذ کمتری نسبت به نور آبی است به همین دلیل، برای آنکه بتواند به بافت‌های گیاه نفوذ کند باید شدت آن را افزایش داد. ترکیب نور قرمز و آبی در افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، وزن تر و خشک و افزایش قند گیاه نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. در مقایسه با تیمارهای مختلف مورد بررسی، استفاده از نور قرمز به تنهایی، تاثیر نامطلوبی بر همه شاخص‌های مورد بررسی داشت. نور سبز تاثیر زیادی بر زیست توده و پارامترهای فیزیولوژیکی اندازه‌گیری شده نداشت؛ لذا حضور آن در ترکیب نوری جهت رشد گیاه ضروری به نظر نمی‌رسد. پژوهش‌های آینده می‌تواند بررسی

رژیم‌های نوری دیگر، به‌ویژه رنگ نارنجی و بنفش را در گیاهان متنوع، مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین پرداختن به ارزش غذایی و دارویی گیاهان تحت نور مصنوعی می‌تواند از دیدگاه تجاری مهم و ارزشمند باشد.

References

1. Graamans, L., E. Baeza, A.V. D. Dobbelsteen, I. Tsafaras, and C. Stanghellini. 2018. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems* 160:31-43.
2. Ikeda, A., Y. Tanimura, K. Ezaki, Y. Kawai, S. Nakayama, K. Iwao, and H. Kageyama. 1991. Environmental control and operation monitoring in a plant factory using artificial light. In *I International Workshop on Sensors in Horticulture* 304:151-158.
3. Ikeda, A., Y. Tanimura, K. Ezaki, Y. Kawai, S. Nakayama, K. Iwao, and H. Kageyama. 1991. Environmental control and operation monitoring in a plant factory using artificial light. In *I International Workshop on Sensors in Horticulture* 304:151-158.
4. Javanmardi, J. 2010. *Scientific and applied basis for vegetable*. University of Mashhad press. (In Farsi).
5. Kozai, T. (2007). Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of ornamental plants* 7(3), 145-149.
6. Kozai, T., 2013. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Japan Academy* 89: 447-461.
7. Kozai, T. 2012. Sustainable plant factory: Closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. In *International Symposium on Soilless Cultivation* 1004: 27-40.
8. Kozai, T. 2013. Plant factory in Japan-current situation and perspectives. *Chronica Horticulturae* 53(2): 8-1.
9. Kozai, T., G. Niu, and M. Takagaki. 2019. *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press.
10. Li, M., T. Kozai, K. Ohyama, S. Shimamura, K. Gonda, and S. Sekiyama. 2012. Estimation of hourly CO₂ assimilation rate of lettuce plants in a closed system with artificial lighting for commercial production. *Ecological Engineering* 24 (3):77-83.
11. Lichtenthaler, H. K., C. Buschmann. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry* 1(1): F4-3.
12. Graamans, L., E. Baeza, A.V.D. Dobbelsteen, I. Tsafaras, and C. Stanghellini. 2018. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems* 160:31-43.
13. Ohyama, K., M. Takagaki, and H. Kurasaka. 2008. Urban horticulture: its significance to environmental conservation. *Sustainability Science* 3(2): 241-247.

14. McCready, R. M., J. Guggolz, V. Silveira, and H.S. Owens. 1950. Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical chemistry* 22(9):1156-1158.
15. Shimizu, H., Y. Saito, H. Nakashima, J. Miyasaka, and K. Ohdoi, K. 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes* 44(1): 605-609.
16. Takagaki, M., H. Hara, T. Kozai. 2014. Indoor horticulture using micro-plant factory for improving quality of life in urban areas: design and a social experiment Approach, IHC 2014, Abstract book.

نستجه
پيس
نستجه