

مقاله علمی - پژوهشی

بررسی اثر طیف‌های مختلف نوری بر رشد و مورفولوژی کاهو در سامانه کارخانه گیاهی

مرتضی کریمی^۱، ساسان علی‌نیا^{۲*}، محمد محمدیان^۳، امیررضا حامی^۴، مریم سیفی کلهر^۵،
محمودرضا روزبان^۶ و سیدحسین موسوی^۷

۱- ۲، ۳، ۴ و ۶- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ دانشجوین کارشناسی ارشد؛ و استادیار دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۵- شرکت پاک رستن چشمه میهن، پارک علم و فناوری دانشگاه تهران
۷- استادیار پژوهشکده سبزی و صیفی، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۱

چکیده

اخیرا توجه زیادی به تولید گیاهان در کشت‌های عمودی سامانه کارخانه گیاهی معطوف شده است، زیرا امکان رشد گیاه را فارغ از شرایط آب و هوایی با مصرف بهینه منابع فراهم می‌کند. هدف تحقیق حاضر، بررسی رشد و عملکرد گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) در سامانه طبقاتی کارخانه گیاهی تحت اثر طیف‌های مختلف نور مصنوعی است. در این آزمایش گیاهان در بستر کشت هیدروپونیک با سامانه بازچرخ تکنیک جریان مواد غذایی پرورش یافتند. به منظور اجرای آزمایش، از طرح کاملا تصادفی استفاده شد. برای تأمین نیاز نوری گیاه از دیودهای ساطع کننده نور (LED) شامل طیف‌های قرمز و آبی (RB) با نسبت‌های (RB,90:10-RB,80:20) (RB,70:30) و قرمز و آبی و قرمز دور (RBFR) با نسبت (RBFR,3:1:1) و قرمز و سفید (RW) با نسبت (RW,1:1) و با طول مدت نوردهی ۱۸ ساعت و شدت نور 20 ± 250 میکرومول بر مترمربع در ثانیه استفاده شد. بیشترین سطح برگ و وزن بوته، بر اثر نور RB,80:20 مشاهده شد و گیاهان رشد یافته بر اثر نور RBFR واکنش اجتناب از سایه شامل افزایش ارتفاع گیاه همراه با کمترین سطح برگ را نسبت به سایر تیمارهای نوری نشان دادند. بنابراین، طیف RB,80:20 به دلیل داشتن بالاترین ویژگی‌های رشدی و عملکردی به عنوان بهترین طیف برای تولید محصول کاهو در سامانه کارخانه گیاهی معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی

دیودهای ساطع کننده نور، کشاورزی در محیط کنترل شده، کیفیت نور، مزرعه عمودی

مقدمه

بینی می‌شود جمعیت جهان از ۸ میلیارد نفر در سال ۲۰۲۰ به ۹/۳ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ و جمعیت شهری از ۳/۶ میلیارد نفر به ۶/۳ میلیارد نفر برسد؛ به عبارت دیگر، طی ۳۰ سال ۱۲ درصد افزایش در جمعیت رخ خواهد داد. رشد جمعیت شهری به مفهوم کاهش جمعیت روستایی و کاهش

تولید مواد غذایی در جهان امروز با عوامل تهدیدکننده‌ای چون آب و هوای نامناسب، خشکسالی، مصرف سموم و محدودیت منابع آبی روبه‌روست. این تهدیدها با توسعه کشاورزی به صورت روزافزونی شدت پیدا کرده است. پیش

می‌شوند لازم است (Benke & Tomkins, 2017). از پراستفاده‌ترین شیوه‌های کشت هیدروپونیک که در سامانه کارخانه گیاهی استفاده می‌شود، تکنیک جریان مواد غذایی^۲ است که در آن لایه‌ای نازک از مواد مغذی برای آبرسانی و همچنین رساندن عناصر غذایی به ریشه‌های گیاه به کار گرفته می‌شود. از مزایای این شیوه کشت هیدروپونیک می‌توان نیاز به فضای کمتر، مصرف آب و کود کمتر و صرفه اقتصادی بیشتر اشاره کرد که باعث شده است در سراسر جهان برای پرورش انواع محصولات بسیار محبوب شود (Khan, 2018).

نور منبع اصلی انرژی برای گیاه است و به همراه دیگر پارامترهای محیطی و عوامل کشت در تعیین رفتار گیاه اثر دارد. نور، افزون بر تأمین انرژی برای فتوسنتز، سیگنال‌های خاصی نیز تولید می‌کند (Paradiso & Proietti, 2021). دیوده‌های ساطع‌کننده نور (LED) در دهه ۲۰۰۰ در کشت گیاهان معرفی شد و به طور گسترده در کشاورزی نوین استفاده می‌شود. کیفیت نور می‌تواند روی رشد و نمو، فتومورفوزن^۳، فیزیولوژی، ریخت‌شناسی^۴، کیفیت و عملکرد گیاه تأثیر بگذارد. انتخاب طیف و منبع نور می‌تواند تأثیر زیادی بر هزینه‌های اولیه و هزینه‌های تولیدی کارخانه گیاهی داشته باشد، علاوه بر این، طیف و منبع نور بر رشد و نمو گیاه نیز تأثیر قابل توجهی می‌گذارد (Dănilă & Lucache, 2016). بنابراین، در کارخانه گیاهی نیاز است بهترین نسبت نوری که بتوان تولید را به حداکثر رساند مشخص شود (Benke & Tomkins, 2017).

در مطالعه‌ای نشان داده شد که استفاده از سامانه کارخانه گیاهی سبب افزایش شاخص‌های کیفیت مانند آنتوسیانین، فلاونوئیدها و کلروفیل و

سطح زیر کشت است. در چنین شرایطی و با توجه به محدودیت منابع طبیعی، تنها راهکار پیش رو رشد ۹۰ درصد در تولیدات جهانی از طریق افزایش عملکرد و بالا بردن تراکم محصولات زیر کشت است (Anon, 2020). باقی ماندن آفت‌کش‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها، هورمون‌ها، مایکوتوکسین‌ها، فلزهای سنگین و نگهدارنده‌های سنتزی از جمله عامل‌هایی هستند که وجود آنها در غذا برای مردم ناشناخته است و تهدیدی مهم برای سلامت محسوب می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به اهمیت امنیت غذایی و قرار داشتن ایران در منطقه پرخطر و ناامن غذایی، باید از سیستم‌های پایدار تولید محصول استفاده کرد (Hojjati & Noshad, 2019).

رشد سریع جمعیت، شهرنشینی، کاهش سلامت محصولات، تغییرات آب و هوایی، کارایی پایین مصرف آب و انرژی ممکن است منجر به کمبود منابع غذایی در آینده شود، به همین دلیل در دو دهه اخیر تمایل به کشت گیاهان در سامانه کارخانه گیاهی^۱ شدیداً در دنیا در حال گسترش است. کارخانه گیاهی سامانه بسته هیدروپونیک طبقاتی است که در آن نور، دما، رطوبت و CO₂ کنترل می‌شود (Graamans et al., 2017). از مزایای کارخانه گیاهی می‌توان به افزایش تولید در واحد سطح، افزایش کارایی مصرف آب، عملکرد بیشتر، دوره رشد کوتاه‌تر، تولید محصول در تمام سال و کاهش عوامل بیماری‌زا اشاره کرد. در سامانه کارخانه گیاهی، افزایش سرعت رشد گیاه مهم است که این افزایش سرعت رشد به عواملی که پیشتر گفته شده مانند دما، رطوبت، CO₂، نور و تغذیه بستگی دارد. به دلیل نبودن این روش تولید، تحقیقات بیشتری به ویژه در زمینه نور و تغذیه گیاهانی که با این روش کشت

1- Plant Factory

3- Photomorphogenesis

2- Nutrient Film Technique

4- Morphology

گسترده و سریع سامانه کارخانه گیاهی، پروتکل نوری مناسب برای پرورش گیاهان در این سامانه هنوز کاملاً شناخته نیست و تثبیت نشده است، بنابراین پژوهش حاضر به منظور پیدا کردن بهترین طیف برای رشد و عملکرد کاهو در سامانه کارخانه گیاهی با سامانه تکنیک جریان مواد غذایی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

سامانه کارخانه گیاهی در ابعاد $1/1 \times 1/8$ متر با ارتفاع $2/15$ متر در ۴ طبقه و ارتفاع هر طبقه ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد که بخش زیرین طبقات برای قرار دادن تانک محلول غذایی در نظر گرفته شد. دمای اتاق، غلظت CO_2 و رطوبت نسبی $^{4}(RH)$ به ترتیب برابر با ۲۵ درجه سلسیوس، ۴۰۰ و ۵۰ ppm درصد تنظیم شد. در این اتاق هیچ منبع نوری جز LED روشن نشد و تمام پنجره‌ها با پوشش ضد نور پوشانده شدند. برای کنترل شدت نورهای مصنوعی از دستگاه FluorPen-PAR MAX-100 FP ساخت جمهوری چک استفاده شد.

مراحل طراحی و ساخت

در این سیستم هدررفت مواد غذایی صورت نگرفت و مواد غذایی محلول در آب در حال گردش بود و در هر طبقه، از ۶ بستر کشت مجزا با ابعاد 5×10 سانتی‌متر در طول $1/8$ متر استفاده شد. به دلیل کاشت گیاهان در محلول غذایی، گونه‌ای طراحی به گونه‌ای بود که آب با شدت جریان مناسب وارد هر بستر شده و از انتهای بستر با همان شدت ورود اولیه، خارج گردد. با توجه به شدت جریان ورودی از سمت پمپ به سیستم کارخانه گیاهی و همچنین با توجه به تعداد محیط کشت در هر طبقه، دبی $3/47$ لیتر در دقیقه به صورت تجربی

همچنین سبب افزایش عملکرد در کاهو (*Lollo Rossa*) می‌شود (Nicole *et al.*, 2016). آزمایش‌های گذشته نشان می‌دهند که کارایی کلی سامانه تا حد زیادی به استراتژی روشنایی مانند ترکیب طیف، شدت نور و دوره نوری^۱ آن بستگی دارد. بر این اساس، بخش‌های مشخصی از طیف‌های نوری به عنوان منابع انرژی اصلی برای فتوسنتز در نظر گرفته می‌شود (Pennisi *et al.*, 2019). تحقیقات نشان می‌دهند که نور قرمز بیشترین تأثیر را در فرآیند فتوسنتز و رشد گیاه دارد، با این حال استفاده از نور قرمز به صورت تنها، اثرهایی منفی مانند کاهش ظرفیت فتوسنتزی و ایجاد خم‌شدگی برگ (اپی‌ناستی^۲) به همراه دارد. این تصور وجود دارد که نور آبی بیشترین تأثیر را در انباشتگی متابولیت‌های ثانویه و ایجاد صفات کیفی در گیاه دارد (Lu & Shimamura, 2018).

نور قرمز در فرایندهای جوانه‌زنی و فتوسنتز دخیل است و ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه را تغییر می‌دهد و همچنین رشد گیاهچه‌ها، ارتفاع ساقه و مجموع زیست‌توده^۳ گیاه را افزایش می‌دهد (Aliniaiefard *et al.*, 2018). نور آبی سبب باز شدن روزنه و توسعه کلروپلاست می‌شود (Sheng *et al.*, 2017). این طیف نور عملکرد فتوسنتز را بهبود می‌بخشد (Aalifar *et al.*, 2020) و سبب افزایش آنتوسیانین و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Moradi *et al.*, 2021). نور قرمز دور با طول موج بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر باعث افزایش طول میان‌گره‌ها و طول ساقه می‌شود که نشان‌دهنده آن است که تخصیص زیست‌توده‌ها تحت تأثیر این نور به سمت ساقه‌های اصلی و فعالیت بیشتر فیتوهورمون‌ها خواهد بود (Kong *et al.*, 2018). با وجود توسعه

1- Photoperiod

3- Biomass

2- Epinasty

4- Relative humidity

موجب سهولت در نصب LEDهای مختلف و دیگر تجهیزات مورد نیاز مانند فن‌های گردش هوا و سیستم محلول‌رسانی شد و فضای کافی نیز به منظور رشد و نمو گیاه کاهو تا مرحله برداشت فراهم آمد. در تمام مراحل رشد، به منظور تأمین نیاز نوری گیاهان منابع نوری LED در فاصله ۳۵ سانتی‌متری در بالای بستر کشت نصب شد. برای جلوگیری از رشد جلبک روی بستر کشت و مخزن آب، از لامپ UV در تمام طول دوره رشد استفاده شد. برای انتقال محلول غذایی از مخزن، از سیستم لوله‌کشی که با بست‌های نگهدارنده به سازه اصلی متصل بود، استفاده شد (شکل ۱).

و با استفاده از توان پمپ به دست آمد. سیستم خروجی در انتهای هر بستر به نحوی تعبیه شد که ممانعتی برای خروج آب ایجاد نکند و سطح محلول غذایی با بالا نگه‌داشتن لوله تعبیه شده بر مکان خروج به ارتفاع دو سانتی‌متر تنظیم شد تا محلول غذایی از این مکان با نیروی ثقلی دوباره به مخزن برگردد.

طراحی سازه اصلی

بدنه سامانه شامل سیستم نوردهی، تهویه، سیستم انتقال محلول غذایی، کانال‌های کشت و مخزن است. در مطالعه حاضر، بدنه سامانه از جنس پروفیل آهن در نظر گرفته شد که با ایجاد طبقه‌بندی‌های یکسان از نظر مساحت و ارتفاع



شکل ۱- اسکلت سازه، بستر کشت و LEDهای استفاده شده در سامانه کارخانه گیاهی

Fig. 1- Frame of the system, growing medium and lighting LEDs used in the plant factory system

پژوهش حاضر از پمپ Sobo مدل wp-7200 استفاده شد. تغذیه گیاهی محلول غذایی به مخزن اضافه می‌شود و با پمپ به سمت طبقات بالایی حرکت می‌کند. میزان

طراحی سیستم آبرسانی

انتخاب پمپ مناسب برای تأمین نیاز آبی سیستم به عوامل متعددی از جمله طول، قطر و زاویه لوله، نوع اتصالات و ارتفاع آب در مخزن بستگی دارد (Tsirogiannis et al., 2014).

مخصوص رشد گیاه ۱۸ وات ساخت شرکت Guangzhou Grow Light به طول ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده و فاصله پنل‌های LED از هم ۱۰ سانتی‌متر تنظیم شد (شکل ۲). شدت نور با استفاده از دستگاه پارمتر PAR-fluorPen FP 100-MAX اندازه‌گیری و روی ۲۵۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه تنظیم شد (Sago, 2016). به منظور جلوگیری از ایجاد آلودگی نوری و اختلال نورها، بین طبقات کشت به وسیله فول‌های آلومینیمی پوشانده و از نفوذ منابع نور خارجی نیز به طور کامل جلوگیری شد.

اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) توسط دستگاه‌های pH متر و EC متر به ترتیب مدل HI98107 و HI98304 ساخت آمریکا در مخزن به صورت دیجیتال اندازه‌گیری شد. در مراحل اولیه، از محلول غذایی نصف غلظت هوگلند و در مراحل انتهایی رشد گیاه از محلول غذایی کامل هوگلند استفاده شد (Hoagland & Arnon, 1950).

طراحی سیستم نوردهی

در این سامانه برای توزیع یکنواخت نور و تأمین نیاز نوری گیاهان در هر طبقه از LED ۱۸



شکل ۲- نوردهی سامانه کارخانه گیاهی کاهو ساخته شده، ۲۸ روز پس از انتقال نشا

Fig. 2- The lighting system of lettuce plant factory, 28 days after seedling transplanting

می‌کند. برای ایجاد جریان هوا در سامانه کارخانه گیاهی حاضر از فن‌های دمنده- مکنده در محل دو سمت طبقات کشت استفاده و شدت جریان هوای مورد نیاز تأمین شد (شکل ۳). جریان هوا با دستگاه سرعت‌سنج جریان هوا (kimo LV130) اندازه‌گیری شد (Yabuki, 2004).

طراحی سیستم گردش هوا

جریان افقی هوا در اتاقی که سیستم کارخانه گیاهی وجود داشت با سرعت تقریبی ۰/۳ تا ۰/۵ متر بر ثانیه روی سطح گیاهان باعث افزایش انتشار CO₂ و رطوبت هوا به سطح روزنه‌های گیاهان می‌شود و متعاقباً فتوسنتز، تعرق و رشد گیاه افزایش پیدا



شکل ۳- سیستم گردش هوا در سامانه کارخانه گیاهی
Fig. 3- Air circulation system in plant factory system

آزمون دستگاه

و قرمز و سفید (RW) با نسبت (RBFR,3:1:1) با دوره نوری ۱۸ ساعته قرار گرفتند و در تمامی مراحل آزمایش تا مرحله برداشت شرایط دمایی در طول روشنایی ۲۴ درجه سلسیوس با رطوبت نسبی ۷۰ درصد و در شرایط تاریکی دما ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۵۰ درصد حفظ شد (Clavijo-Herrera *et al.*, 2018). پس از برداشت، صفات مورفولوژیکی مانند وزن تر ریشه و ساقه و برگ، طول ساقه و ریشه، تعداد برگ و سطح برگ اندازه‌گیری شد.

پارامترهای رشدی

وزن برگ، وزن ریشه و وزن کل با ترازو دیجیتال و سطح برگ، قطر و طول ساقه با نرم‌افزار Digimizer (version 4.1.1.0) و تعداد برگ در گیاه از هر طیف نوری بررسی شد. برای مقایسه وزن تر گیاهان، ابتدا برگ‌ها از ساقه جدا و بلافاصله نمونه‌ها با ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شدند. وزن ساقه و ریشه هم به همین روش محاسبه شد. برای مقایسه سطح برگ گیاهان، برگ‌ها از گیاهان جدا و با اسکنر (HP Scanjet G4010, Palo Alto, CA, USA) اندازه‌گیری شدند.

از آنجا که کاهو به عنوان محصول اصلی سامانه کارخانه گیاهی شناخته شده، در تحقیق حاضر برای ارزیابی دستگاه و به منظور بررسی عملکرد صحیح سامانه و تأثیر طیف‌های نوری (در پنج سطح) بر رشد و عملکرد کاهو، از رقم *Batavia* استفاده شد. بذرهای کاهو ابتدا در داخل سینی‌های کشت ۴۸ سلولی (به ابعاد ۵۳ در ۳۴ سانتی‌متر) و درون بستر پرلیت کشت شد. پس از جوانه‌زنی بذرهای سینی‌ها به اتاقک‌های رشد با نور سفید با شدت ۲۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه و دوره نوری ۱۸ ساعته و دمای ۲۳ تا ۲۵ درجه سلسیوس انتقال داده شد. گیاهان پس از ۱۵ روز در مرحله ۳ تا ۴ برگی به کارخانه گیاهی منتقل شدند (Esmaili *et al.*, 2021; Ghorbanzadeh *et al.*, 2021).

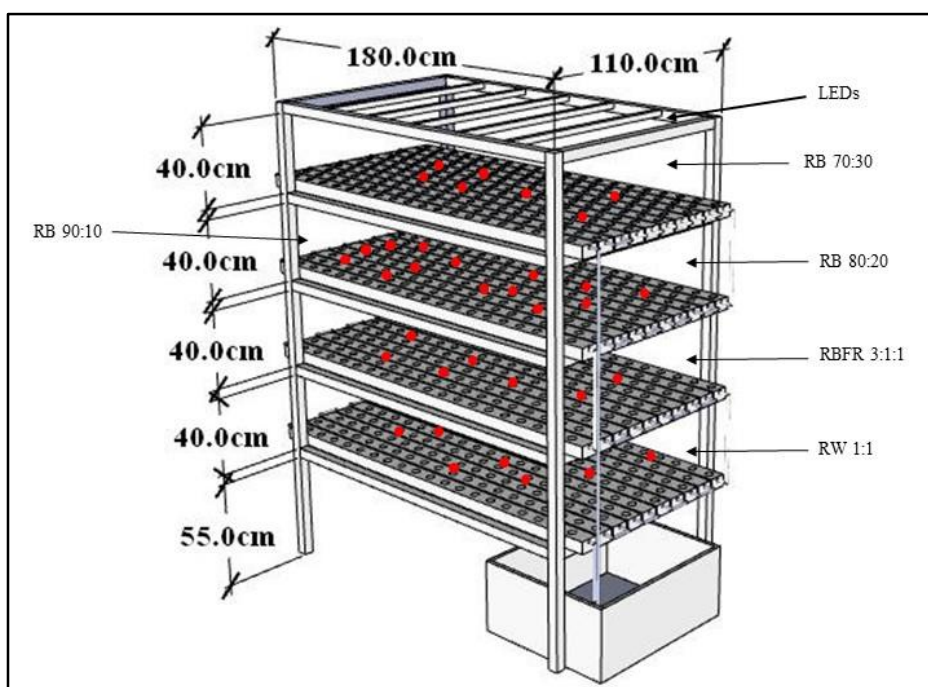
در هنگام رشد رویشی گیاهان کاهو تحت تیمارهای نوری طیف‌های قرمز و آبی (RB) با نسبت‌های (RB,90:10-RB,80:20-RB,70:30)، قرمز و آبی و قرمز دور (RBFR) با نسبت

اندازه‌گیری‌ها سعی شد گیاهان قرار گرفته در حاشیه منظور نشده و نمونه‌ها به صورت تصادفی از قسمت‌های میانی هر منطقه برای آنالیز استفاده شوند. داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۲ تجزیه و میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن مقایسه شدند. معنی‌دار بودن تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد محاسبه شد.

CA, USA) عکس‌برداری شدند و با کمک نرم‌افزار Digimizer سطح برگ و به همین روش طول و قطر ساقه و طول ریشه نیز اندازه‌گیری شد (Moosavi-Nezhad *et al.*, 2021).

طرح آزمایشی و آنالیز داده‌ها

برای این آزمایش ۵ تیمار نوری با ۷ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در نظر گرفته شد (شکل ۴).



شکل ۴- طرح شماتیک سامانه کارخانه گیاهی (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10) و نور قرمز و سفید با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)، نقاط قرمز نمایانگر محل نمونه برداری گیاهی است).

Fig. 4- Schematic design of plant factory system [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW), the red dots represent the location of plant sampling]

نتایج و بحث

ریشه و وزن ساقه در سطح ۱ درصد اما سطح برگ در سطح ۵ درصد معنی‌داری است. قطر ساقه و طول ریشه در هیچ سطحی معنی‌دار نشد (جداول ۱ و ۲).

تجزیه واریانس‌ها نشان می‌دهند که تعداد برگ، وزن برگ، وزن کل (زیست‌توده)، طول ساقه، وزن

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر طیف نوری بر صفات مورفولوژیکی کاهو

Table 2- Variance analysis of the effect of light spectrum on the morphological characteristics of lettuce

میانگین مربعات		درجه آزادی		منابع تغییرات	
Mean squares		Degree of freedom		Sources of variation	
وزن برگ Leaf weight	وزن کل Total weight	تعداد برگ Leaf area	تعداد برگ Leaf number	4	طیف نوری Light spectrum
5354.22**	4641.24**	167515.73*	243.06**	10	خطا Error
216.31	299.66	88090	84.66		ضریب تغییرات Coefficient of variation
7.99	7.66	9.97	14.97		

**Significance 1%, *Significance 5%

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر طیف نوری بر صفات مورفولوژیکی کاهو

Table 2- Variance analysis of the effect of light spectrum on the morphological characteristics of lettuce

میانگین مربعات		درجه آزادی		منابع تغییرات	
Mean squares		Degree of freedom		Sources of variation	
قطر ساقه Stem diameter	طول ریشه Root length	طول ساقه Stem length	وزن ریشه Root weight	وزن ساقه Stem weight	طیف نوری Light spectrum
1.31 ^{n.s}	32.64 ^{n.s}	510.41**	73.31**	147.99**	خطا Error
0.07	45.03	103.77	8.24	9.63	ضریب تغییرات Coefficient of variation
6.07	24.47	19.26	5.61	13.44	

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ^{n.s} فاقد تفاوت معنی‌دار

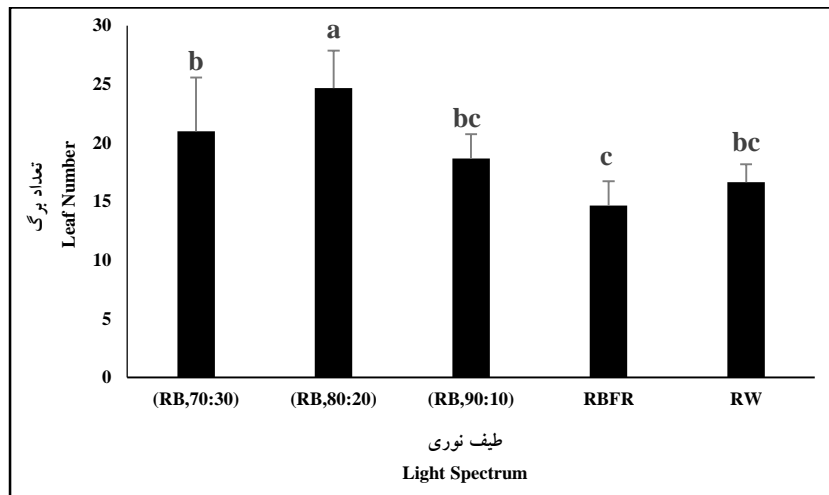
**Significance 1%, *Significance 5%, Non-significant

اثر تیمار نوری روی صفات ظاهری کاهو

تعداد برگ

دارد (Kuno *et al.*, 2017).
کمترین تعداد برگ در تیمار RBFR با میانگین ۱۴/۶۶ مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای نوری RB,80:20 و RB,70:30 دارد ولی با تیمارهای RB,90:10 و RW تفاوت معنی‌داری ندارد (شکل ۵). کاهوهای رشدیافته تحت تیمار نوری RB,80:20 افزایش ۱۷ درصد را در تعداد برگ، نسبت به تیمار RB,70:30، و افزایش ۶۸ درصد را در تعداد برگ نسبت به تیمار RBFR نشان می‌دهد.

بیشترین تعداد برگ در هر بوته در تیمار RB,80:20 مشاهده شد که میانگین آن ۲۴/۶۶ بود. این میانگین تفاوت معنی‌داری با میانگین تعداد برگ در دیگر تیمارها دارد. دلیل این امر سازگاری توزیع مناسب انرژی طیفی آن با جذب کلروفیل است و در نتیجه، میزان خالص فتوسنتز افزایش می‌یابد علاوه بر این، نسبت طیف بین LEDهای قرمز و آبی اهمیت زیادی در تعداد برگ گیاهان



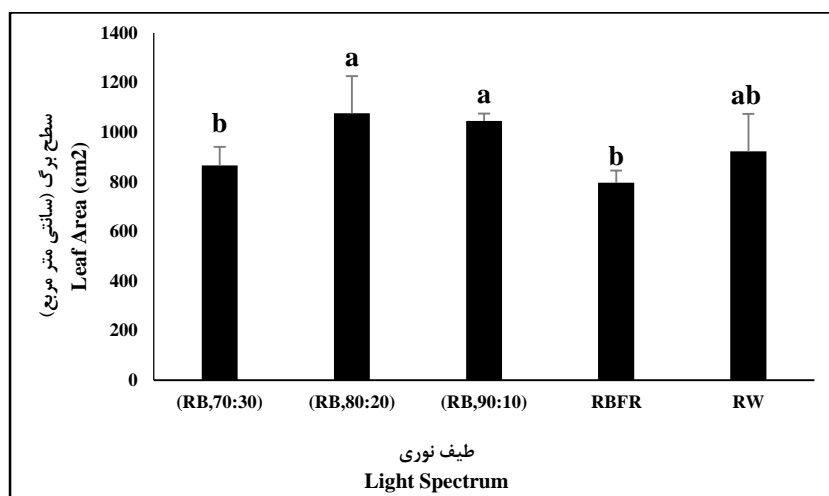
شکل ۵- تأثیر طیف‌های مختلف نوری (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10)، نور قرمز، آبی و قرمز دور با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)) بر تعداد برگ کاهو در سامانه کارخانه گیاهی

Fig. 5- Effect of different light spectra [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW)] on the number of lettuce leaves in the plant factory system

سطح برگ

2021). کمترین سطح برگ مربوط به گیاهان در تیمار نوری RBFR با میانگین ۷۹۶/۶۷ سانتی‌متر مربع دیده شده است که تفاوت معنی‌داری با سطح برگ گیاهان تیمارهای RB,70:30 و RW ندارد (جدول ۱). بالا بودن نسبت نور آبی (B)، به عنوان تابش القاکننده تنش می‌تواند سبب کاهش سطح برگ شود. استفاده از تیمار RB,80:20 سبب افزایش ۲۴ درصد در سطح برگ نسبت به تیمار RW و افزایش ۳۵ درصد نسبت به تیمار RBFR شده است.

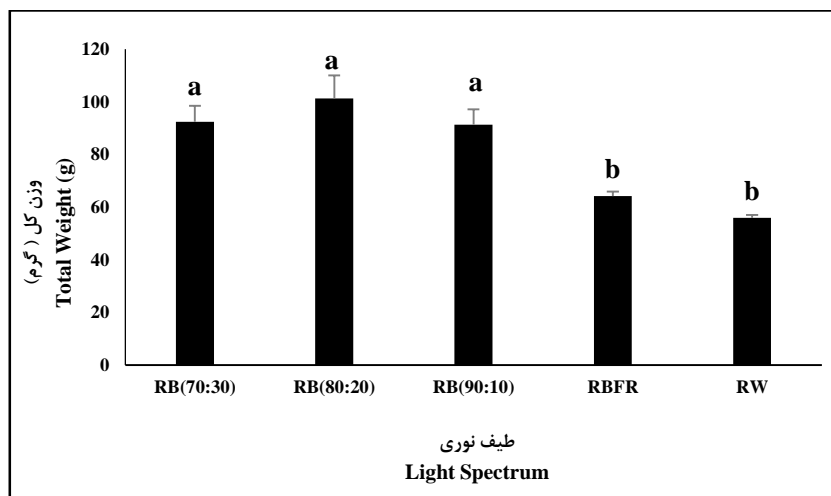
بیشترین سطح برگ در گیاهان تحت تیمار نوری RB,80:20 با میانگین ۱۰۷۵/۶ سانتی‌متر مربع دیده شد که با سطح برگ در گیاهان تحت تیمارهای RB,90:10 و RW تفاوت معنی‌داری نشان نداد اما با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۶). در مطالعات دیگر همچنین گزارش شده است که درصد بالایی از نور قرمز (R) می‌تواند به طور مؤثر فتوسنتز را تحریک کند و باعث گسترش سطح برگ در گیاهان شود (Kong & Nemali,



شکل ۶- اثر طیف‌های نوری مختلف (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10)، نور قرمز، آبی و قرمز دور با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)) بر سطح برگ کاهو در سامانه کارخانه گیاهی کاهو

Fig. 6- Effect of different light spectra [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW)] on lettuce leaf area in plant factory system

زیست توده
بیشترین وزن کل در گیاهان تحت تیمار RB,80:20 با میانگین ۱۰۱/۲ گرم دیده شد که با وزن کل در گیاهان با تیمارهای RB,90:10 و RB,70:30 تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۷). این موضوع نشان‌دهنده افزایش فتوسنتز و زیست توده تحت تأثیر نور قرمز (R) است ولی نور قرمز (R) به تنهایی در گیاه باعث ایجاد اختلالات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی می‌شود که به سندرم نور قرمز مشهور است (Aliniaiefard et al., 2018; Seif et al., 2021). نور قرمز (R) برای اثرگذاری بهتر نیاز به نور آبی (B) دارد در واقع تعیین نسبت نور قرمز به آبی (R:B) برای بهبود واکنش‌های فتوسنتزی و رشد گیاهان بسیار مورد توجه محققان است (Kaiser et al., 2019; Moradi et al., 2021; Seif et al., 2021). نور قرمز و آبی (RB) باعث افزایش میزان فتوسنتز و زیست توده اندام هوای کاهو می‌شود (Esmaili et al., 2021; Ghorbanzadeh et al., 2021; Li et al., 2021). اثرگذاری نور آبی (B) از راه فیتوتروپین‌ها و فیتوکروم‌ها در تشکیل کلروفیل، باز شدن روزنه و فعالیت فتومورفوژن به خوبی نشان داده شده است (Whippo & Hangarter, 2004). محروم کردن گیاهان از نور آبی (B) منجر به فتوسنتز ناکارآمد می‌شود. نور آبی می‌تواند کارایی فتوسنتز را با تنظیم دهانه روزنه، کسب CO₂ بیشتر و سرکوب تنفس نوری افزایش دهد (Hiyama et al., 2017). اضافه کردن نور آبی (B) سبب افزایش زیست توده در کاهو، گوجه‌فرنگی و کلم می‌شود (Kaiser et al., 2019). کمترین وزن کل در گیاهان رشد یافته تحت تیمار RBFR دیده شد با میانگین ۵۶ گرم که با وزن کل در گیاهان رشد یافته در تیمار RW تفاوت معنی‌داری ندارد ولی با دیگر تیمارها تفاوت معنی‌داری دارد (جدول ۱). استفاده از تیمار RB,80:20 سبب ۵۷ درصد افزایش در وزن کل نسبت به تیمار RW شده است.

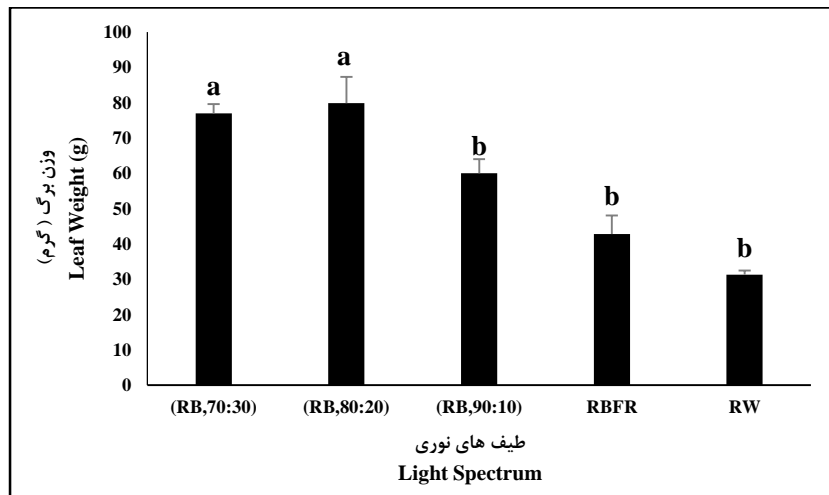


شکل ۷- اثر طیف‌های مختلف نور (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10)، نور قرمز، آبی و قرمز دور با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)) بر وزن کل گیاه کاهو در سامانه کارخانه گیاهی

Fig. 7- Effect of different light spectra [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW)] on the total weight of lettuce in the plant factory system

وزن برگ RBFR با میانگین ۳۱/۲۸ گرم مشاهده شد (شکل ۸) که با وزن برگ در گیاه‌های رشدیافته تحت تیمارهای RB,90:10 و RW تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۱) در حقیقت، کاهش وزن کل گیاه و حتی وزن کل برگ در نور (RB,70:30) به علت افزایش میزان نور آبی (B) است که سبب کاهش زیست‌توده شده است و لازم است گفته شود نور قرمز (R) سبب افزایش زیست‌توده در قسمت مختلف می‌شود (Bian *et al.*, 2020). استفاده از تیمار RB,80:20 سبب افزایش ۳۲ درصد در وزن برگ نسبت به تیمار RB,70:30 شده است.

بیشترین وزن برگ در گیاهانی دیده شد که تحت تیمار RB,80:20 قرار داشتند، میانگین وزن برگ گیاهان ۷۹/۸۲ گرم محاسبه شد (شکل ۸) که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش رشد گیاهان تحت تیمارهای ذکر شده باشد (Kim *et al.*, 2004). وزن برگ در این گیاهان با وزن برگ در گیاهان تحت تیمار RB,70:30 تفاوت معنی‌داری نداشت ولی با وزن برگ گیاهان تحت تیمارهای دیگر تفاوت معنی‌داری نشان داد. کمترین وزن برگ در گیاه‌های رشدیافته تحت تیمار نوری



شکل ۸- اثر طیف‌های مختلف نور (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10)، نور قرمز، آبی و قرمز دور با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)) بر وزن برگ گیاه کاهو در سامانه کارخانه گیاهی

Fig. 8- Effect of different light spectra [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW)] on lettuce leaf weight in plant factory system

کمترین طول ساقه را با میانگین ۸/۱۵ سانتی‌متر نشان دادند که با طول ساقه گیاهان در تیمار RB,70:30 تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد ولی با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار دارد (جدول ۲). دلیل این امر آن است که فیتوکروم‌های جذب‌کننده نور قرمز (R) رشد را تنظیم می‌کنند بنابراین نقش اساسی در سازگاری گیاهان به محیط دارند. فیتوکروم‌ها مسئول جذب نورهای قرمز و قرمز دور (R:FR) هستند. فیتوکروم‌ها به دو شکل قابل تعویض هستند.

فرم Pr نور قرمز (R) را جذب می‌کند، در حالی که فرم Pfr نور قرمز دور (FR) را جذب می‌کند (Viczián *et al.*, 2017). هنگامی که گیاهان در معرض نسبت کم نور قرمز به قرمز دور (R:FR) قرار می‌گیرند، فیتوکروم B تا حدی به شکل غیرفعال خود تبدیل می‌شود و از فاکتورهای برهمکنش با فیتوکروم (PIF) جدا می‌شود، که باعث تجمع و بیان ژن‌های دخیل در رشد و تحریک سنتز جیبرلین‌ها و

قطر و طول ساقه

به وجود آمدن ساقه و افزایش طول میان‌گره صفتی منفی برای کاهوست. در این پژوهش مشخص شد بیشترین قطر ساقه مربوط به گیاهانی است که تحت تیمار نوری RW قرار داشتند ولی با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری نشان نداد. کمترین قطر ساقه نیز در کاهوهای رشدیافته تحت تیمار RB,90:10 مشاهده شد (جدول ۲). به طور کلی در این آزمایش معلوم شد هرچه طول ساقه بیشتر باشد قطر آن کمتر است (جدول ۱). در واقع، رشد کاهو به صورت فشرده است و کاهو ساقه‌ای کوتاه دارد ولی بر اثر طیف FR میان‌گره و طول ساقه در کاهو افزایش می‌یابد. در این آزمایش، بیشترین طول ساقه مربوط به گیاهانی است که تحت تیمار RBFR بودند با میانگین ۲۵/۴۳ سانتی‌متر که با طول ساقه گیاهان تحت تیمار RB,90:10 تفاوت معنی‌داری نشان نداد ولی با دیگر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داده است. کاهوهای رشدیافته تحت تیمار نوری RW

سانتی‌متر مشاهده شد که با طول ریشه در کاهوه‌های رشدیافته تحت تیمار RB,70:30 تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد اما با دیگر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان می‌دهد. گیاهان تیمار شده با نور قرمز (R) به دلیل کاهش بیان ژن BWF4 که مرتبط با بیوسنتز براسینواسستروئید در گیاهان است، منجر به کاهش طول ریشه شد و همچنین افزایش بیان ژن ARF ممکن است باعث رشد ریشه در شرایط نور آبی (B) شود (Xie et al., 2021). کمترین طول ریشه در کاهوه‌های تحت تیمار نوری RB,90:10 با میانگین ۷/۳۱ سانتی‌متر مشاهده شد که با طول ریشه در کاهوه‌های تحت تیمار RW تفاوت معنی‌داری ندارد (جدول ۲). استفاده از طیف RB,80:20 سبب ۲۸ درصد افزایش در طول ریشه نسبت به تیمار RBFR و ۶۸ درصد افزایش نسبت به تیمار RB,90:10 شده است.

وزن ریشه

بیشترین وزن ریشه در گیاهان تحت تیمار طیف نوری RW دیده شد با میانگین ۱۸/۳۷ گرم که با وزن ریشه در گیاهان تحت تیمارهای RB,90:10 و RB,80:20 تفاوت معنی‌داری نشان نداد. کمترین وزن ریشه در گیاهان تحت تیمار RBFR با میانگین ۱۲/۶ گرم حاصل شد که با وزن ریشه در گیاهان تحت تیمار RB,70:30 تفاوت معنی‌داری نشان نداد، ولی با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۲). استفاده از تیمار RW سبب ۲۷ درصد افزایش در وزن ریشه نسبت به تیمار RB,70:30 شده است.

بیشترین وزن ساقه در گیاهان تحت تیمار نوری RBFR حاصل آمده است با میانگین ۱۲/۰۷ گرم که با وزن ساقه در تمام گیاهان تحت تیمارهای نوری اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد. کمترین وزن ساقه مربوط به تیمارهای RB,80:20 با میانگین ۴/۱۹ گرم است که با تیمار RW تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد (جدول ۲).

افزایش طول ساقه می‌شود. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض نسبت پایین نور قرمز به قرمز دور (R:FR) نیز می‌تواند سنتز جیبرلین را افزایش دهد که عملکرد PIFs را تسهیل می‌کند و باعث رشد می‌شود (Meng et al., 2019). PIFها با فعال کردن ژن‌های مربوط به سنتز و انتقال اکسین منجر به سطوح بالاتر اکسین می‌شوند (Bantis et al., 2020). در پژوهش حاضر، طیف نوری RBFR بیشترین تأثیر را بر طول ساقه نشان داده و باعث افزایش طول ساقه نسبت به تیمارهای نوری دیگر شده است که به دلیل تأثیر نور قرمز دور (FR) بر افزایش طول میان‌گره‌هاست و این افزایش طول ساقه در آزمایش‌های قبلی نیز گزارش شده است (Park & Runkle, 2016). علاوه بر این، پژوهش‌های زیادی درباره تأثیر نور آبی (B) در جلوگیری از افزایش طول ساقه در گیاهان اشاره شده است. گزارش شده که استفاده از طیف‌های نوری قرمز و قرمز دور (R:FR) سبب افزایش طول ساقه می‌شود که این افزایش طول ساقه در تیمار نوری آبی و قرمز دور (B:FR) مشاهده نمی‌شود. در واقع پاسخ گیاهان به نور قرمز (FR) را می‌توان به تشخیص نور قرمز و قرمز دور (R:FR) توسط فیتوکروم‌ها نسبت داد. این اثرهای فیتوکروم‌ها در شرایط نسبت پایین نور قرمز به قرمز دور (R:FR) و افزایش ارتفاع ساقه، با عنوان پاسخ‌های اجتناب از سایه شناخته شده است (Murchie & Lawson, 2013). استفاده از طیف RBFR سبب ۴۹ درصد افزایش در طول ساقه نسبت به تیمار RB,80:20 و ۹۱ درصد افزایش نسبت به تیمار RB,70:30 شده است.

طول ریشه

بیشترین طول ریشه در کاهوه‌های رشدیافته تحت تیمار نوری RB,80:20 با میانگین ۱۲/۲۹

استفاده از تیمار RBFR سبب افزایش ۲۲ درصد در وزن ساقه نسبت به تیمار RB,80:20 است. در واقع، نور RBFR سبب افزایش ارتفاع ساقه و وزن ساقه در کاهو شده است.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر طیف‌های مختلف نور (نور قرمز و آبی با نسبت ۷۰:۳۰ (RB, 70:30)، نور قرمز و آبی با نسبت ۸۰:۲۰ (RB, 80:20)، نور قرمز و آبی با نسبت ۹۰:۱۰ (RB, 90:10)، نور قرمز، آبی و قرمز دور با نسبت ۳:۱:۱ (RBFR) و نور قرمز و سفید با نسبت ۱:۱ (RW)) بر صفات مورفولوژیکی کاهو در سامانه کارخانه گیاهی

Table 3- Mean comparison effect of different light spectra [red and blue light with a ratio of 70:30 (RB, 70:30), red and blue light with a ratio of 80:20 (RB, 80:20), red and blue light with a ratio of 90:10 (RB, 90:10), red, blue and far-red light with a ratio of 3:1:1 (RBFR) and red and white light with a ratio of 1:1 (RW)] on the morphological characteristics of lettuce in plant factory system

طیف نوری Light spectra	وزن ریشه (گرم) Root weight (g)	وزن ساقه (گرم) Stem weight (g)	قطر ساقه (سانتی‌متر) Stem diameter (cm)	طول ساقه (سانتی‌متر) Stem length (cm)	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)
RB,70:30	14.66 ^{bc}	6 ^c	1.44 ^a	13.2 ^{cd}	9.7 ^a
RB,80:20	17.19 ^{ab}	4.19 ^c	1.4 ^a	17.05 ^{bc}	10.25 ^a
RB,90:10	18.04 ^{ab}	9.86 ^b	1.06 ^a	19.68 ^{ab}	5.98 ^a
RBFR	12.6 ^c	12.07 ^a	1.17 ^a	25.43 ^a	8.88 ^a
RW	18.73 ^a	4.19 ^c	1.92 ^a	8.15 ^d	8.35 ^a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ندارند.

Means which follow the same letter are not statistically different at 5% probability level based on duncan test

نتیجه‌گیری

ارتفاع گیاه، وزن ساقه و کمترین سطح برگ که از جمله عوامل عملکردی منفی برای کاهو هستند، در تیمار RBFR,3:1:1 مشاهده شد و در تیمار RW بیشترین مقدار وزن ریشه به دست آمده است. بنابراین تیمار (RB,80:20) به عنوان طیف مناسب برای پرورش کاهو تحت نور مصنوعی در سامانه کارخانه گیاهی توصیه می‌شود.

نتایج این بررسی نشان داد که طیف نور ترکیبی قرمز و آبی در صفات اساسی مربوط به عملکرد کاهو دارای تأثیر مثبت است و در کشت کاهو در سامانه کارخانه گیاهی با نور مصنوعی بیشترین سطح برگ، وزن کل، وزن برگ، تعداد برگ، رشد و عملکرد و کیفیت در تیمار (RB,80:20) مشاهده شد. بیشترین

قدردانی

از شرکت پاک رستن چشمه میهن (پرچم) که تأمین مالی و تجهیزاتی پروژه حاضر را متقبل شدند قدردانی می‌شود. بدون مساعدت این شرکت، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید.

مراجع

- Aalifar, M., Aliniaiefard, S., Arab, M., Zare Mehrjerdi, M., Dianati Daylami, S., Serek, M., Woltering, E., & Li, T. (2020). Blue light improves vase life of carnation cut flowers through its effect on the antioxidant defense system. *Frontiers in Plant Science*, 11, 511. doi: 10.3389/fpls.2020.00511.
- Aliniaiefard, S., Seif, M., Arab, M., Zare Mehrjerdi, M., Li, T., & Lastochkina, O. (2018). Growth and photosynthetic performance of *Calendula officinalis* under monochromatic red light. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 5(1), 123-132. doi: 10.22059/ijhst.2018.261042.248.

- Anon. (2020). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bantis, F., Koukounaras, A., Siomos, A. S., Fotelli, M. N., & Kintzonidis, D. (2020). Bichromatic red and blue LEDs during healing enhance the vegetative growth and quality of grafted watermelon seedlings. *Scientia Horticulturae*, 261, 109000. doi: 10.1016/j.scienta.2019.109000.
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. doi.: 10.1080/15487733.2017.1394054.
- Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., & Cheng, R. (2020). A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments. *Foods*, 9, 732. doi: 10.3390/foods9060732.
- Clavijo-Herrera, J., Van Santen E., & Gómez, C. (2018). Growth, water-use efficiency, stomatal conductance, and nitrogen uptake of two lettuce cultivars grown under different percentages of blue and red light. *Horticulturae*, 4(3), 16. doi: 10.3390/horticulturae4030016.
- Dănilă, E., & Lucache, D. D. (2016). *Efficient lighting system for greenhouses. Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering EPE*. Oct. 20-22. Iasi, Romania. doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781379.
- Esmaili, M., Aliniaiefard S., Mashal M., Vakilian K.A., Ghorbanzadeh P., Azadegan, B., Seif, M., & Didaran, F. (2021). Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to predict production and water productivity of lettuce in response to different light intensities and CO₂ concentrations. *Agricultural Water Management*, 258, 107201. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107201.
- Ghorbanzadeh, P., Aliniaiefard, S., Esmaeili, M., Mashal, M., Azadegan, B., & Seif, M. (2021). Dependency of growth, water use efficiency, chlorophyll fluorescence, and stomatal characteristics of lettuce plants to light intensity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(5), 2191-2207. doi: 10.1007/s00344-020-10269-z.
- Graamans, L., van den Dobbelen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138-147. 10.1016/j.agsy.2017.01.003.
- Hiyama, A., Takemiya, A., Munemasa, S., Okuma, E., Sugiyama, N., Tada, Y., Murata, Y., & Shimazaki, K. I. (2017). Blue light and CO₂ signals converge to regulate light-induced stomatal opening. *Nature Communications*, 8, 1-13. doi: 10.1038/s41467-017-01237-5.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil*. Vol. 347. 2nd Ed. University of California Pub.
- Hojjati, M., & Noshad, M. (2019). Challenges in health, quality and food security in Iran. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 4, 81-94. (in Persian)
- Kaiser, E., Ouzounis, T., Giday, H., Schipper, R., Heuvelink, E., & Marcelis, L.F. (2019). Adding blue to red supplemental light increases biomass and yield of greenhouse-grown tomatoes, but only to an optimum. *Frontiers in Plant Science*, 9, 2002. doi: 10.3389/fpls.2018.02002.
- Khan, F. A. (2018). A review on hydroponic greenhouse cultivation for sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2, 59-66. doi: 10.31015/jaefs.18010.
- Kim, H. H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2004). Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *Hortscience*, 39, 1617-1622.
- Kong, Y., & Nemali, K. (2021). Blue and far-red light affect area and number of individual leaves to influence vegetative growth and pigment synthesis in lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 12, 667407.

doi: 10.3389/fpls.2021.667407.

- Kong, Y., Stasiak, M., Dixon, M. A., & Zheng, Y. (2018). Blue light associated with low phytochrome activity can promote elongation growth as shade-avoidance response: A comparison with red light in four bedding plant species. *Environmental and Experimental Botany*, 155, 345-359. doi: 10.1016/j.envexpbot.2018.07.021.
- Kuno, Y., Shimizu, H., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2017). Effects of irradiation patterns and light quality of red and blue light-emitting diodes on growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. "Greenwave"). *Environmental Control in Biology*, 55, 129-135. doi: 10.2525/ecb.55.129.
- Li, J., Wu, T., Huang, K., Liu, Y., Liu, M., & Wang, J. (2021). Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1159. doi: 10.3389/fpls.2021.678197.
- Lu, N., & Shimamura, S. (2018). *Protocols, issues and potential improvements of current cultivation systems*. In: Kozai, T. (Ed) Smart Plant Factory. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-1065-2_3.
- Meng, Q., Kelly, N., & Runkle, E. S. (2019). Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 383-391. doi: 10.1016/j.envexpbot.2019.03.016.
- Moosavi-Nezhad, M., Salehi, R., Aliniaiefard, S., Tsaniklidis, G., Woltering, E. J., Fanourakis, D., Żuk-Gołaszewska, K., & Kalaji, H. M. (2021). Blue light improves photosynthetic performance during healing and acclimatization of grafted watermelon seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(15), 8043. doi: 10.3390/ijms22158043.
- Moradi, S., Kafi, M., Aliniaiefard, S., Salami, S. A., Shokrpour, M., Pedersen, C., Moosavi-Nezhad, M., Wróbel, J., & Kalaji, H. M. (2021). Blue Light Improves Photosynthetic Performance and Biomass Partitioning toward Harvestable Organs in Saffron (*Crocus sativus* L.). *Cells*, 10, 1994. doi: 10.3390/cells10081994.
- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64, 3983-3998.
- Nicole, C., Charalambous, F., Martinakos, S., Van De Voort, S., Li, Z., Verhoog, M., & Krijn M. (2016). *Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. VIII International Symposium on Light in Horticulture*. May 22-26. East Lansing, MI (United States of America). doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.31.
- Paradiso, R., & Proietti, S. (2021). Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 742-780.
- Park, Y., & Runkle, E. (2016). *Investigating the merit of including far-red radiation in the production of ornamental seedlings grown under sole-source lighting. VIII International Symposium on Light in Horticulture*, May 22-26. East Lansing, MI (United States of America).
- Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J.A., & Stanghellini, C. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red: blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*, 9, 1-11. doi: 10.1038/s41598-019-50783-z.

- Sago, Y. (2016). Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce. *HortScience*, 51, 1087-1091. doi: 10.21273/HORTSCI10668-16.
- Seif, M., Aliniaiefard, S., Arab, M., Mehrjerdi, M. Z., Shomali, A., Fanourakis, D., Li, T., & Woltering, E. (2021). Monochromatic red light during plant growth decreases the size and improves the functionality of stomata in chrysanthemum. *Functional Plant Biology*, 48, 515-528. doi: 10.1071/FP20280.
- Sheng, L., Shen, D., Luo, Y., Sun, X., Wang, J., Luo, T., Zeng, Y., Xu, J., Deng, X., & Cheng, Y. (2017). Exogenous γ -aminobutyric acid treatment affects citrate and amino acid accumulation to improve fruit quality and storage performance of postharvest citrus fruit. *Food Chemistry*, 216, 138-145. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.08.024.
- Tsirogiannis, I., Karras, G., Lambraki, E., Varras, G., Savvas, D., & Castellano, S. (2014). *Evaluation of a plastic tube based hydroponic system for horizontal and vertical green surfaces on buildings. XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014): V International Conference on Landscape and Urban Horticulture and International Symposium on Sustainable Management in the Urban Forest*, Aug. 17-22. Brisbane, Australia.
- Viczián, A., Klose, C., Ádám, É., & Nagy, F. (2017). New insights of red light-induced development. *Plant, Cell & Environment*, 40, 2457-2468. doi: 10.1111/pce.12880.
- Whippo, C., & Hangarter, R. (2004). Phytochrome modulation of blue-light-induced phototropism. *Plant, Cell & Environment*, 27, 1223-1228. doi: 10.1111/j.1365-3040.2004.01227.x.
- Xie, D., Tarin, M. W. K., Chen, L., Ren, K., Yang, D., Zhou, C., Wan, J., He, T., Rong, J., & Zheng, Y. (2021). Consequences of LED lights on root morphological traits and compounds accumulation in *Sarcandra glabra* seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 7179. doi: 10.3390/ijms22137179.
- Yabuki, K. (2004). *Photosynthetic rate and dynamic environment*. Springer Science & Business Media.

Research Paper

Effect of Different Light Spectra on Growth and Morphology of Lettuce in Plant Factory System

M. Karimi, S. Aliniaefard*, M. Mohammadian, A. R. Hami, M. Seifkalthor,
M. R. Roozban and S. H. Mousavi

*Corresponding Author: Associate professor of Department of Horticulture Sciences, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: aliniaefard@ut.ac.ir
Received: 4 December 2022, Accepted: 1 May 2023
[http://doi: 10.22092/AMSR.2023.360729.1433](http://doi:10.22092/AMSR.2023.360729.1433)

Abstract

In recent decades, production of crops in plant factory vertical systems attracted lots of attention since it makes possible crop production with optimum consumption of resources, irrespective of climate conditions. In the present study, growth and yield of the lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the plant factory vertical system under artificial light were investigated. To do so, the plants were grown in a hydroponic system using nutrition film Technique (NFT). Completely randomized design was used to study the impact of different light spectra using light emitting diodes (LED), modules including red and blue (RB) lights with different ratios (RB,90:10 – RB, 80:20 – RB, 70:30), red, blue, and far red (RBFr in 3:1:1 ratio), and red and white (RW in 1:1 ratio). Lighting period was set to 18 h at an intensity of $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The highest leaf area and plant weight, as the main yield characteristics of lettuce, were detected under RB 80:20 treatments. The plants grown under RBFA showed shade avoidance responses (tall plants with low leaf area), which is not favourable for lettuce production. In conclusion, due to having the best growth and yield under RB 80:20 light spectra, it is introduced as the best light spectrum for production of lettuce plants in plant factory system.

Keywords: Controlled Environment Agriculture, LED, Light Quality, Vertical Farming



© 2022 Agricultural Mechanization 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)