Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

Effects of adding far-red light to the photosynthetic active spectrum on growth and morphological characteristics of basil (*Ocimum basilicum* L.) under controlled conditions

Hossein Mazari Manghabi[1], Mojtaba Delshad[*2], Sasan Aliniaeifard[3]

1. Ph.D. Student, Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mazari678@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: delshad@ut.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Horticultural Sciences, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: aliniaeifard@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 06.23.2022
Revised: 08.14.2022
Accepted: 09.26.2022

Keywords:
Daily light integral,
Light intensity,
Light spectrum,
Yield

ABSTRACT

Background and Objectives: Light is an essential factor for growth and development in agricultural production. Vertical agriculture has been increasingly developed to produce leafy vegetables and herbs. High light consumption is the most important obstacle in the development of vertical farming system. Basil (*Ocimum basilicum* L.) is one of the most popular leafy vegetables and is suitable for growing in plant factories. Therefore, the aim of the present study was to reveal the yield and dry matter production response of basil to add far-red light to the photosynthetic active spectrum, and finally to investigate the interaction of far-red light and daily light integral (DLI) on growth, morphology and light use efficiency in basil.

Materials and Methods: The research was performed in a split plot experiment based on a randomized complete block design. Treatments included daily light integral (DLI) at two levels of 6.4 and 10.8 (mol m^{-2} d^{-1}), and far-red light at three levels of 0, 5 and 20% based on the light recipe of the LEDs DLI. The measured traits included morphological traits (fresh and dry weight of leaves, stems and plants, plant height and leaf area), growth (specific leaf area (SLA), and partitioning to leaves), and determining the efficiency of light and radiation use efficiency.

Results: The results showed that the plant fresh and dry weight increased by far-red light at the level of 20% in high DLI conditions (10.8), which was due to the increase in stem fresh and dry weight. As a result, the partitioning to leaves decreased slightly, although it was not statistically significant. Similar to high DLI conditions, the plant fresh and dry weight increased with the addition of far-red light (5 and 20%) at low DLI conditions (6.4), but this increase was due to the increase in leaves fresh and dry weight, and eventually led to the more partitioning to leaves. SLA in plants grown in low DLI decreased significantly by decreasing the phytochrome stationary state (PSS) as a result of adding far-red light from 0.88 to 0.82, which was due to the increase in leaves dry matter. In this regard, in plants grown at high DLI, with decreasing the PSS as a result of adding far-red light from 0.88 to 0.85, the SLA did not change.

Conclusion: In general, the response of shade avoidance syndrome (SAS) seems to be more associated with increased stem height when plants grown under high DLI, and is more associated with increased leaf area and stem height when plants grown under low DLI and high levels of far-red light.

Cite this article: Mazari Manghabi, Hossein, Delshad, Mojtaba, Aliniaeifard, Sasan. 2023. Effects of adding far-red light to the photosynthetic active spectrum on growth and morphological characteristics of basil (*Ocimum basilicum* L.) under controlled conditions. *Journal of Plant Production Research*, 30 (1), 149-164.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2022.20312.2943
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

اثرات افزودن نور قرمز دور به طیف فعال فتوسنتزی، بر خصوصیات رشدی و ریخت‌شناسی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در محیط کنترل‌شده

حسین مزاری منقابی[۱]، مجتبی دلشاد*[۲]، ساسان علی‌نیایی‌فرد[۳]

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mazari678@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم باغبانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: delshad@ut.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliniaeifard@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

واژه‌های کلیدی:
شدت نور،
طیف نور،
عملکرد،
مجموع تابش فعال فتوسنتزی

چکیده

سابقه و هدف: نور عامل اساسی برای رشد و نمو در تولید محصولات کشاورزی است. کشاورزی عمودی به‌طور فزاینده‌ای برای تولید سبزی‌ها برگی و گیاهان دارویی توسعه‌یافته است. مصرف نوربالا مهم‌ترین مانع در توسعه سیستم کشاورزی عمودی هست. ریحان (*Ocimum basilicum* L.) یکی از محبوب‌ترین سبزی‌ها برگی و دارویی مناسب جهت پرورش در کارخانه‌های گیاهی هست. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، آشکار ساختن پاسخ عملکرد و تولید ماده خشک گیاه ریحان به افزودن نور قرمز دور به طیف فعال فتوسنتزی و در نهایت بررسی اثرات متقابل نور قرمز دور و مجموع تابش روزانه (DLI) بر رشد، ریخت‌شناسی و کارایی مصرف نور در گیاه ریحان هست.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در قالب آزمایش اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو تکرار به مرحله اجرا درآمد. عامل اصلی مجموع تابش فعال فتوسنتزی روزانه (DLI) در دو سطح ۶/۴ و ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) و عامل فرعی نور قرمز دور در سه سطح صفر، ۵ و ۲۰ درصد بر اساس DLI (به عبارتی درصد نور دریافت شده از LEDها) بود. صفات اندازه‌گیری شده شامل صفات ریخت‌شناسی (وزن‌تر و خشک برگ، ساقه و گیاه، ارتفاع گیاه و سطح برگ)، رشدی (سطح ویژه برگ و تخصیص ماده خشک به برگ) و تعیین کارایی مصرف نور و تشعشع بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد وزن‌تر و خشک گیاه، با افزودن نور مادون‌قرمز در سطح ۲۰ درصد در شرایط DLI بالا (۱۰/۸) افزایش یافت که این تغییر به علت افزایش وزن‌تر و خشک ساقه بود. درنتیجه تخصیص ماده خشک به برگ‌ها اندکی کاهش یافت، اگرچه به لحاظ آماری معنی‌دار نبود. مشابه با شرایط DLI بالا، وزن‌تر و خشک کل، با افزودن نور مادون‌قرمز (۵ و ۲۰ درصد)

در شرایط DLI پایین (۶/۴)، نیز افزایش یافت، اما این افزایش درنتیجه افزایش وزن‌تر و خشک برگ‌ها بود و نهایتاً منجر به تخصیص ماده خشک بیش‌تر به برگ‌ها گردید. سطح ویژه برگ به‌طرز قابل‌توجهی در گیاهان رشدیافته در DLI پایین (با کاهش سطح ایستایی فیتوکروم (PSS) درنتیجه افزودن نور مادون‌قرمز از ۰/۸۸ به ۰/۸۲) کاهش یافت که این نتیجه به علت افزایش ماده خشک برگ بود. در همین راستا در گیاهان رشد یافته در DLI بالا با کاهش سطح ایستایی فیتوکروم درنتیجه افزودن نور مادون‌قرمز از ۰/۸۸ به ۰/۸۵ سطح ویژه برگ تغییری نکرد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی به نظر می‌رسد پاسخ سندروم اجتناب از سایه در ریحان، هنگامی‌که در شرایط DLI بالا قرار دارد بیش‌تر مرتبط با افزایش ارتفاع ساقه باشد و احتمالاً تحت شرایط DLI پایین و سطح بالای نور مادون‌قرمز، بیش‌تر مرتبط با افزایش سطح برگ و افزایش ارتفاع ساقه باشد.

استناد: مزاری منقابی، حسین، دلشاد، مجتبی، علی‌نیایی‌فرد، ساسان (۱۴۰۲). اثرات افزودن نور قرمز دور به طیف فعال فتوسنتزی، بر خصوصیات رشدی و ریخت‌شناسی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در محیط کنترل‌شده. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰ (۱)، ۱۶۴-۱۴۹.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.20312.2943

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

نور عامل اساسی برای رشد و نمو گیاهان و تولید محصولات کشاورزی است. کشاورزی در محیط‌های کنترل‌شده عمودی یک سیستم نسبتاً جدید تولید گیاهان هست که گیاهان در طبقه‌های روی‌هم رشد می‌کنند. در این سیستم تمام شرایط رشد به‌طور کامل قابل‌کنترل هستند و کنترل فاکتورهای دوران پرورش می‌تواند تأثیر زیادی بر رشد و ریخت‌شناسی و هم‌چنین کیفیت پس از برداشت محصول داشته باشد (۱). علاوه بر این، این سیستم تولید در واقع یک کشاورزی پایدار بدون استفاده از آفت‌کش‌ها و هدررفت مواد غذایی و افزایش راندمان آب و زمین هست (۲). مهم‌ترین چالش کشاورزی در محیط‌های کنترل‌شده نور هست. نور منبع اصلی انرژی برای گیاهان است. در کشت‌های کنترل‌شده و عمودی، لامپ‌های LED منبع نوری مناسبی هستند که موجب ایجاد یک مزرعه عمودی کارآمد می‌شوند. در حال حاضر بزرگ‌ترین مانع بر سر راه توسعه مزرعه‌های عمودی و یا کارخانه‌های گیاهی، محدودیت انرژی نورانی هست (۳).

سبزی‌های برگی به دلیل رشد سریع، ارتفاع کم گیاه و ارزش فروش بالا اغلب محصول مناسبی برای مزارع عمودی هستند (۴). یکی از این سبزی‌های برگی محبوب، ریحان است. ریحان بانام علمی *Ocimum basilicum* L. در بسیاری از کشورهای دنیا به‌عنوان یک سبزی یا گیاه دارویی کشت می‌شود. ریحان گیاهی یک‌ساله، علفی، ایستاده، تقریباً بدون کرک، معطر و به ارتفاع ۶۰-۳۰ سانتی‌متر است که متعلق به تیره نعناعیان (Lamiaceae) هست (۵).

با توجه به این‌که در سیستم کشاورزی عمودی در محیط‌های کنترل‌شده میزان مصرف انرژی برای نوردهی، بالا هست، ضروری است کارایی مصرف نور تا حد ممکن افزایش یابد. کارایی مصرف نور (LUE[1]) را می‌توان به روش‌های مختلفی تعریف کرد. میزان محصول تازه برداشت‌شده به‌ازای هر واحد نور ساطع‌شده توسط منبع نور، رایج‌ترین تعریف کلی مرتبط با عملکرد در کشاورزی عمودی است. بازده روشنایی هم‌چنین می‌تواند به نسبت بین وزن خشک کل (زیست‌توده) گیاه و کل فوتون‌های رسیده به کانوپی گیاه اشاره داشته باشد که به آن کارایی استفاده از تابش (RUE[2]) گفته می‌شود، یا نسبت بین وزن خشک گیاه و کل فوتون‌های فتوسنتزی دریافت شده توسط کانوپی که به آن راندمان استفاده از نور دریافت شده (LUE_{int}[3]) گفته می‌شود. RUE به‌طور مستقیم به کارایی استفاده از انرژی مربوط می‌شود (۶) و LUE_{int} نشان‌دهنده میزان کارایی گیاهان در تبدیل فوتون‌های رهگیری شده به زیست‌توده هست (۷).

گیاهان به‌طور انتخابی طول‌موج‌های محدوده طیفی قرمز (R) را از طریق رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی جذب می‌کنند. ترکیب طیف نور اطراف گیاهان در شرایطی تغییر می‌کند. مثلاً، نور قرمز دور درنتیجه انعکاس و یا انتقال از طریق برگ‌های سبز گیاهان مجاور افزایش می‌یابد (۸ و ۹) و در نتیجه کاهش نسبت نور قرمز به قرمز دور در یک محیط بسته مشاهده می‌گردد (۱۰ و ۱۱). شرایط کم‌نور ناشی از استفاده از نایلون سیاه یا پارچه، ممکن است ترکیب طیفی نور به‌ویژه نسبت قرمز به قرمز دور را تغییر ندهد (۱۲)؛ بنابراین باید برای تغییرات درشدت و ترکیب طیف نور تحت شرایط سایه‌اندازی سایر گیاهان با شرایط نور کم طبیعی، تمیز قائل شد.

فیتوکروم‌ها نقش مهمی در دریافت سیگنال حاصل از نسبت نور قرمز به قرمز دور (R/Fr) و تنظیم فوتومورفوژنز گیاه از طریق بیان ژن و فرایندهای فیزیولوژیکی دارند (۱۳). نسبت بین نور قرمز به قرمز دور تعیین‌کننده تعادل بین فیتوکرم قرمز (Pr) به فیتوکروم قرمز دور (Pfr) در گیاهان است (۱۴). فیتوکرم قرمز به فیتوکروم قرمز دور دو ایزومر

1- Light use efficiency

2- Radiation use efficiency

3- Intercepted light use efficiency

قابل‌تبدیل فیتوکروم هستند که می‌توانند با جذب نور قرمز و قرمز دور به یکدیگر تبدیل شوند (۱، ۱۳ و ۱۵). موازنه مجدد تعادل بین فیتوکروم‌ها با کاهش نسبت نور قرمز به قرمز دور محرک سندروم اجتناب از سایه (SAS[1]) در گیاهان هست که پاسخ‌هایی شامل افزایش طول ساقه، افزایش طول برگ، حرکت برگ‌ها به سمت بالا، انتقال کسر بیشتری از آسیمیلات‌ها به سمت ساقه و یا افزایش سطح ویژه برگ درنتیجه آن هست (۱۶، ۱۷ و ۱۸). نسبت کم‌نور قرمز به قرمز دور در شرایط نرمال یا نور کم، به‌طور قابل‌توجهی زیست‌توده سویا (وزن خشک) را در مقایسه با نسبت طبیعی نور قرمز به قرمز دور (تقریباً ۱:۲) افزایش می‌دهد (۱۹ و ۲۰).

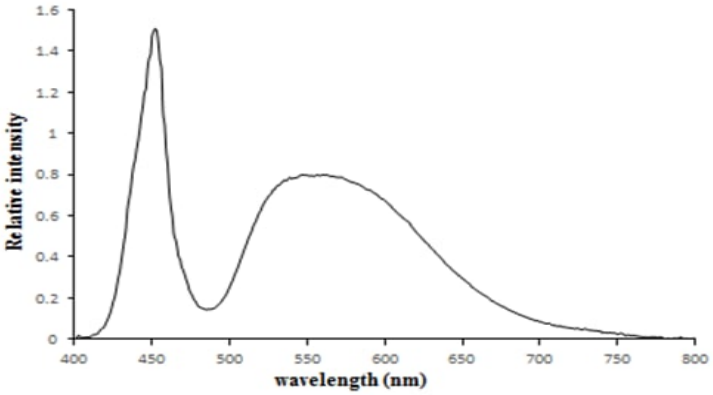
کاهش نسبت نور قرمز به قرمز دور درواقع نشان‌دهنده افزایش نور قرمز دور در کانوپی گیاه هست. برگ‌های گیاه مقدار کم‌تری از نور Fr را جذب می‌کنند (λ>۷۰۰ نانومتر) چون در عملکرد کوانتومی فتوسنتز مشارکت کم‌تری دارند (۲۱). بااین‌حال، ژن و وان‌ایرسل (۲۰۱۷) گزارش دادند که نور قرمز دور برای کارایی فیتوشیمیایی و فتوسنتزی لازم است (۲۲). به‌طورمعمول برای افزایش کارایی فتوسنتزی طول‌موج‌های بلند، یک طول‌موج کوتاه‌تر با آن‌ها استفاده می‌شود و این پدیده کلی را اثر تقویت آمرسون[2] می‌نامند (۲۲). در خصوص حالت معکوس این پدیده یعنی افزایش عملکرد کوانتومی طول‌موج‌های کوتاه به‌وسیله نور قرمز دور (شدت‌های پایین نسبت نور قرمز به قرمز دور) در شدت‌های مختلف نور، مطالعات اندکی وجود دارد. برخی مطالعات فقط نشان می‌دهد که نور قرمز دور می‌تواند فتوسنتز و زیست‌توده گیاه را افزایش دهد (۲۲ و ۲۳). این‌که آیا نسبت کم‌نور قرمز به قرمز دور (غنی‌سازی نور قرمز دور) در شدت‌ها و شرایط مختلف نور، فرآیند فوتومورفوژنیک را تنظیم می‌کند یا نه نیاز به تجزیه‌وتحلیل بیش‌تر دارد.

با گسترش استفاده از LED[3]ها در دهه گذشته، چندین مطالعه بر روی نور قرمز دور برای درک بیش‌تر تأثیر آن بر رشد گیاهان انجام‌شده است. پارک و رونکل (۲۰۱۷) گزارش کردند درنتیجه افزودن ۱۶ تا ۶۴ میکرومول بر مترمربع در ثانیه نور قرمز دور به طیف نور آبی (۱۲۸ $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) و قرمز (۳۲ $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$) وزن خشک اندام هوایی شمعدانی و گل میمون به ترتیب ۲۸ و ۵۰ درصد افزایش یافت (۲۳). زو و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده کردند در طول دوره رشد کاهو، افزودن ۵۰ میکرو مول متر بر مربع بر ثانیه نور قرمز دور به طیف نوری آبی–قرمز (۳:۷، ۲۰۰ $\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$)، منجر به ۴۹ درصد افزایش سطح برگ و ۳۹ درصد افزایش زیست‌توده گردید (۲۴)؛ بنابراین افزودن نور قرمز دور یک روش ممکن جهت افزایش دریافت نور و زیست‌توده گیاه هست. افزودن نور قرمز دور به طیف فعال فتوسنتزی (۴۰۰–۷۰۰ نانومتر) ممکن است باعث افزایش کارایی انتقال الکترون در سیستم فوتوسیستم II شود و بنابراین نرخ فتوسنتز خالص لحظه‌ای را افزایش دهد (۱۷). برخی از پژوهش‌گران پیشنهاد کرده‌اند که بخشی از نور قرمز دور را به‌عنوان PAR[4] (۷۰۰–۷۵۰ نانومتر) در نظر بگیرند و در ترکیب با طیف فعال فتوسنتزی (۴۰۰–۷۰۰ نانومتر) مانند نور آبی و قرمز به‌کار برده شود (۲۵)؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، آشکار ساختن پاسخ عملکرد و تولید ماده خشک گیاه ریحان به افزودن نور قرمز دور به طیف فعال فتوسنتزی و درنهایت بررسی اثرات متقابل نور قرمز دور و مجموع تابش روزانه (DLI[5]) بر رشد، ریخت‌شناسی و کارایی مصرف نور در گیاه ریحان هست.

1- Syndrome shade avoidance
2- Emerson enhancement effect
3- Light-emitting diode
4- Photosynthetic active radiation
5- Daily light integral

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط جوانه‌زنی: در این آزمایش از ریحان (*Ocimum basilicum* L.) رقم Emilly شرکت Enza Zaden استفاده گردید. رشد گیاهان ریحان در یک اتاقک رشد در یک مجموعه کشاورزی عمودی در دانشگاه تهران صورت گرفت (دمای شب و روز ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۵ درصد و CO_2 در غلظت محیط). بذور ریحان در یک سینی کشت ۱۰۸ تایی پرشده از مخلوط کوکوپیت و پرلیت کاشته شدند. در مرحله اولیه از طیف نور سفید LED با طول‌موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و با شدت ۱۵۰ (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) و ۱۲ ساعت در شبانه‌روز استفاده گردید (شکل ۱). پس از پایان جوانه‌زنی بذور (۷ روز)، گیاهان همسان ازنظر اندازه انتخاب شدند و تیمارها اعمال گردید.



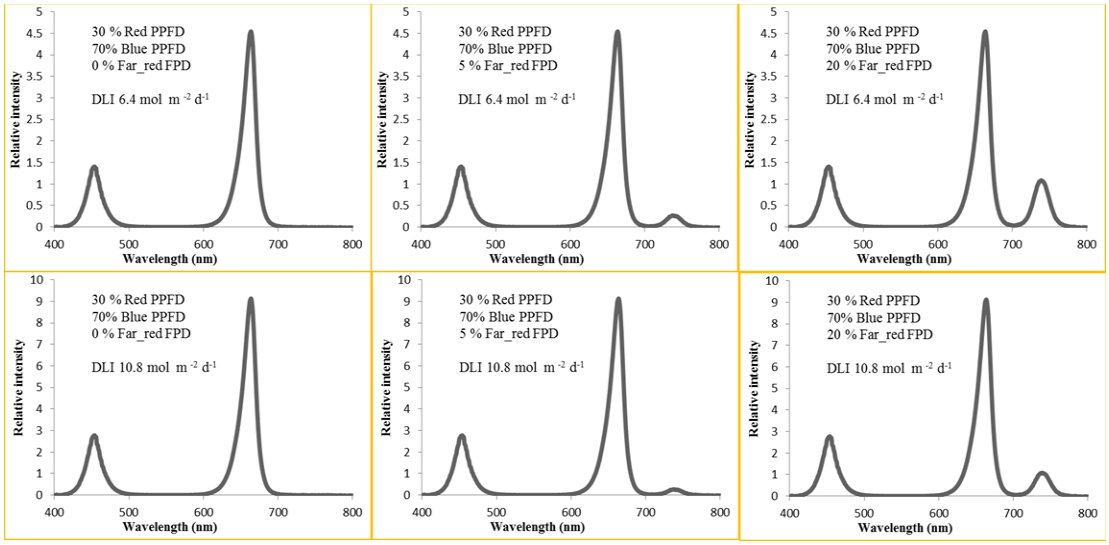
شکل ۱- طیف نوری استفاده‌شده در مرحله جوانه‌زنی.

Fig. 1. Light spectrum distribution used in the germination stage.

اعمال تیمارها: به‌منظور بررسی اثر افزودن نور قرمز دور (۷۰۰-۸۰۰ نانومتر) و تابش فعال فتوسنتزی روزانه (۴۰۰-۷۰۰ نانومتر) (DLI) از آزمایش اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو تکرار استفاده گردید. این آزمایش در دو زمان مختلف تکرار گردید و هر زمان نماینده یک بلوک هست. هر بلوک به ۶ بخش ایزوله شده از هم تقسیم‌شده بود و تیمارها به‌صورت تصادفی در هر بلوک اعمال گردید. فاکتور اصلی DLI و شامل دو سطح ۶/۴ (۱۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه به‌مدت ۱۲ ساعت در شبانه‌روز) و ۱۰/۸ (۳۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه به‌مدت ۱۰ ساعت در شبانه‌روز) مول بر مترمربع بر روز بود و فاکتور فرعی شامل نور قرمز دور بود که در سه سطح صفر، ۵ و ۲۰ درصد نور قرمز دور از مجموع DLI به طیف فعال نوری اضافه گردید (شکل ۲). در هر بلوک مجموعاً ۷۳۸ گیاه (۶ بخش هرکدام ۱۲۳ گیاه) تحت تیمار قرار گرفت. میانگین ۱۰-۸ نمونه از هر یک از تیمارها در یک بلوک به‌عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. آبیاری گیاهان بر اساس نیاز و مرحله رشدی گیاه صورت می‌گرفت. تغذیه گیاهان نیز با محلول غذایی عموی (۲۶) و در بستر پرلیت-کوکوپیت (۷۰:۳۰) صورت می‌گرفت. برداشت گیاهان سه هفته پس از اعمال تیمارها انجام شد. طیف نوری با دستگاه اسپکترومتر (Apogee Instruments, Logan, UT, United States, SS-110;) اندازه‌گیری گردید. وضعیت ایستایی فیتوکروم (PSS[1]) با روش ساگر و همکاران (۱۹۸۸) محاسبه گردید (۲۷). شدت جریان فوتون‌های فتوسنتزی (PPFD[2]) یا به عباراتی

1- Phytochrome photostationary state
2- Photosynthetic photon flux density

شدت نور به‌طور منظم به‌وسیله کوانتوم‌متر (United States, LI-190SB quantumsensor, LI-1400 Datalogger, LI-COR Bioscience, Lincoln, NE) اندازه‌گیری شد و در طول آزمایش در یک شدت ثابت نگه‌داشته شد.



شکل ۲- توزیع طیف نوری (تیمارهای) استفاده‌شده.

Fig. 2. Light spectrum distribution (treatments) used.

صفات ریخت‌شناسی: ارتفاع گیاه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. برگ‌های با حداقل اندازه سطح ۲ سانتی‌متر مربع به‌عنوان برگ واقعی شمارش شدند و اندازه‌گیری سطح برگ با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج (Leaf area meter-LI COR, model Li-1300, Lincoln, NE, USA) صورت گرفت. با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم ابتدا وزن‌تر کل بوته اندازه‌گیری شد. سپس برگ‌ها و ساقه‌ها جدا شدند و وزن‌تر هر کدام جداگانه اندازه‌گیری گردید. برای به‌دست آوردن وزن خشک برگ و ساقه و کل گیاه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، سپس اندازه‌گیری وزن خشک صورت گرفت.

صفات رشدی: سطح ویژه برگ (SLA) و تخصیص ماده خشک به برگ به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ تعیین شد (۱۲).

$$\text{Specific leaf area } (cm^2\ g^{-1}) = \text{Leaf area } (cm^2) / \text{Leaf dry mass } (g) \quad (1)$$

$$\text{Leaf mass fraction or Partitioning to leaves} = \text{Leaf dry matter} / \text{Total dry matter} \times 100 \quad (2)$$

تعیین کارایی مصرف نور (LUE) و تشعشع (RUE): ابتدا مجموع تابش فعال فتوسنتزی روزانه (DLI) و مجموع تابش روزانه (DRI[1]) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه شد، سپس کارایی مصرف نور (LUE) و کارایی مصرف تابش (RUE) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶ تعیین گردید (۲۳).

$$\text{Daily light integral } (mol_{400\text{-}700nm}\, m^{-2} d^{-1}) = PPFD\ (\mu\, mol\, m^{-2}\, s^{-1}) \times \text{day length (h)} \times 0.0036 \quad (۳)$$

(۴)

$$\text{Daily radiation integral } (mol400\text{-}800\ nm\ m^{-2}\ d^{-1}) = PFD\ (\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}) \times \text{day length (h)} \times 0.0036$$

(۵)

$$\text{Light use efficiency } (g\ mol_{400\text{-}700\ nm}^{-1}) = \text{plant mass (g)} \times \text{plant density } (plants\ m^{-2}) / \text{Daily light integral } (_{400\text{-}700nm})\ (mol\ m^{-2}\ d^{-1}) \times \text{days of cultivation (d)}$$

(۶)

$$\text{Radiation use efficiency } (g\ mol_{400\text{-}700\ nm}^{-1}) = \text{plant mass (g)} \times \text{plant density } (plants\ m^{-2}) / \text{Daily radiation integral } (_{400\text{-}700nm})\ (mol\ m^{-2}\ d^{-1}) \times \text{days of cultivation (d)}$$

تجزیه آماری: تجزیه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری همه صفات با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از تیمار افزودن نور قرمز دور به مجموع تابش فعال فتوسنتزی گیاه ریحان در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، اثر متقابل میزان نور قرمز دور و مقدار DLI بر وزن‌تر و خشک برگ، کارایی مصرف نور (LUE) وزن‌تر گیاه و تسهیم ماده خشک به برگ در سطح احتمال ۱ درصد ($P\leq ۰/۰۱$) و سطح برگ، وزن‌تر و خشک ساقه، وزن‌تر و خشک کل گیاه، ارتفاع گیاه، کارایی مصرف نور (LUE) وزن خشک گیاه، کارایی مصرف تابش (RUE) وزن‌تر و خشک گیاه و سطح ویژه برگ در سطح احتمال ۵ درصد ($P\leq ۰/۰۵$) معنی‌دار بود.

1- Daily radiation integral

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر افزودن نور قرمز دور به تابش فعال فتوسنتزی بر صفات موردبررسی در گیاه ریحان.

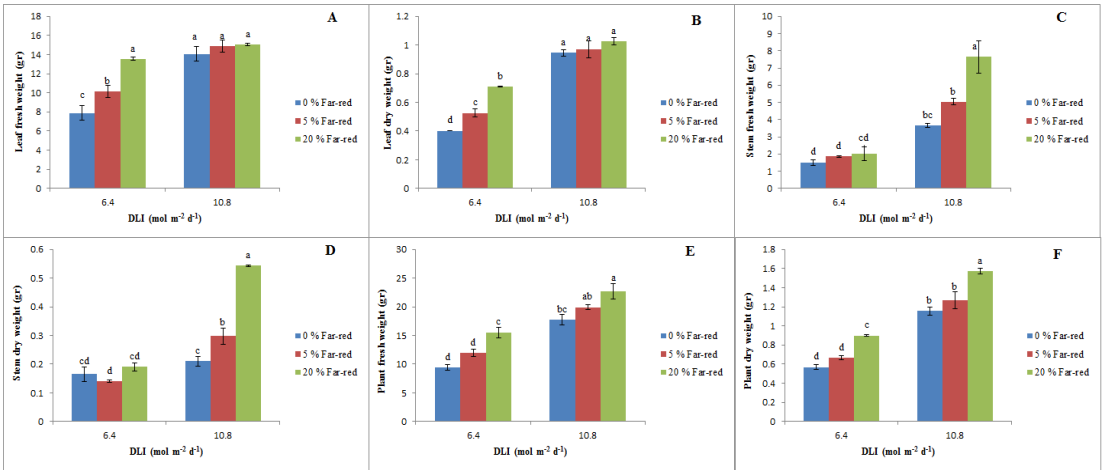
Table 1. Analysis of variance the effect of adding far-red light to daily light integral (DLI) on the studied traits in basil.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Means of Square												
		وزن تر برگ Leaf fresh weight	وزن خشک برگ Leaf dry weight	سطح برگ Leaf area	وزن تر ساقه Stem fresh weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	وزن تر گیاه Plant fresh weight	وزن خشک گیاه Plant dry weight	ارتفاع گیاه Plant height	LUE (Based on fresh weight)	LUE (Based on dry weight)	RUE (Based on fresh weight)	RUE (Based on dry weight)	سطح خاص برگ Specific leaf area	تخصیص ماده خشک به برگ Partitioning to leaves
تکرار Relication	1	3.11	0.07	492.5	0.04	0.005	3.8	0.007	2.3	1.2	0.002	0.54	0.002	3802.8	5.39
تابش فعال فتوسنتزی DLI	1	51.5**	0.37**	9917.4**	20.7**	0.04**	137.7**	0.66**	125.2**	1.4*	0.0009^{ns}	1.05^{ns}	0.07^{ns}	4896.4^{ns}	0.001^{ns}
تکرار × تابش فعال فتوسنتزی Repeat × DLI	1	0.11	0.01	2057.1	0.009	0.003	0.1	0.0005	0.9	0.2	0.0002	0.57	0.001	3591.4	5.32
مادون‌قرمز Far-red	2	10.9**	0.03**	1730.8^{ns}	1.49*	0.01*	20.4**	0.09**	35.4**	7.1**	0.03**	2.27*	0.02**	42348.4**	22.35*
مادون‌قرمز × تابش فعال فتوسنتزی Far-red × DLI	2	5.6**	0.04**	8942.7*	0.64*	0.07*	2.4*	0.02*	0.9*	2.3**	0.01*	2.07*	0.006*	4085.3*	108.3**
اشتباه Error	4	0.25	0.05	1019.9	0.09	0.009	0.3	0.002	0.3	0.7	0.0009	0.31	0.008	1758.2	5.01
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	4.04	3.07	7.8	9.7	13.7	3.6	5.21	2.9	3.4	6.09	7.3	6.03	7.4	2.9

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری

**, * Significantly differences at the 1 and 5% of probability levels, respectively, and ^{ns} represent non-significant

مطابق نتایج مقایسه میانگین، افزودن نور قرمز دور به تابش فعال فتوسنتزی (DLI) در سطح ۶/۴ (مول بر متر بر روز)، سبب افزایش وزن‌تر و خشک برگ گردید و با افزایش نور قرمز دور از سطح صفر درصد به بیست درصد اختلاف معنی‌داری وجود داشت (شکل ۳ A و B). بااین‌حال افزودن سطوح نور قرمز دور به تیمار ۱۰/۸ مول بر مترمربع بر روز DLI تأثیری در وزن‌تر و خشک برگ گیاهان نداشت (شکل ۳ A و B). افزودن نور قرمز دور در سطوح مختلف تأثیری بر وزن خشک و تر ساقه تحت تیمار ۶/۴ (مول بر مترمربع بر روز) DLI نداشت (شکل ۳ C و D)، درحالی‌که با افزودن نور قرمز دور به گیاهان تحت تیمار ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) DLI، وزن‌تر و خشک ساقه افزایش یافت (شکل ۳ C و D). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌های حاصل از وزن‌تر و خشک کل نشان می‌دهد که افزودن نور قرمز دور در سطح ۲۰ درصد به هر دو تیمار ۶/۴ و ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) DLI سبب افزایش وزن‌تر و خشک گیاه گردید، اگرچه افزودن ۵ درصد نور قرمز دور به DLI تأثیری بر وزن‌تر و خشک کل نداشت (شکل ۳ E و F). وزن‌تر و خشک کل، با افزودن نور قرمز دور (۲۰ درصد) در شرایط DLI بالا، افزایش یافت (شکل ۳ E و F) که این تغییر به‌علت افزایش وزن‌تر و خشک ساقه بود (شکل ۳ C و D) و درنتیجه تخصیص ماده خشک به برگ‌ها اندکی کاهش یافت اگرچه به لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۴ C). مشابه با شرایط DLI بالا، وزن‌تر و خشک کل، با افزودن نور قرمز دور (۵ و ۲۰ درصد) در شرایط DLI پایین، نیز افزایش یافت (شکل ۳ E و F)، اما این افزایش درنتیجه افزایش وزن‌تر و خشک برگ‌ها بود (شکل ۳ A و B) و نهایتاً منجر به تخصیص ماده خشک بیش‌تر به برگ‌ها گردید (شکل ۴ D). این افزایش می‌تواند ناشی از افزایش در سطح برگ گیاه و میزان فتوسنتز خالص در اثر نور قرمز دور باشد. گزارش شده است که وزن تر (۱۰) و وزن خشک (۲۸) گیاه کاهو و گوجه‌فرنگی با افزودن نور قرمز دور افزایش می‌یابد. چنین نتایجی در مطالعات قبلی انجام‌شده توسط منگ و همکاران (۲۹) و زو و همکاران (۲۴) در کاهو نیز گزارش‌شده است. اخیراً، ژن و بوگبی (۲۰۲۰) پیشنهاد کرده‌اند فوتون‌های قرمز دور ازلحاظ فتوسنتزی فعال هستند (۲۵). آن‌ها دریافتند که مقدار افزایش در فتوسنتز خالص به‌طور خاص وابسته به گونه است و ریحان یکی از گونه‌های با واکنش پایین هست. افزایش در فتوسنتز خالص انتظار می‌رود که افزایش در زیست‌توده را منعکس کند.



شکل ۳- اثر متقابل افزودن نور قرمز دور (Far-red) به تابش فعال فتوسنتزی (DLI) بر وزن تر (A) و خشک (B) برگ، وزن تر (C) و خشک (D) ساقه و وزن تر (E) و خشک (F) کل گیاه ریحان. حروف مختلف، تفاوت معنی‌داری بین تیمارها با توجه به آزمون چنددامنه‌ای دانکن را نشان می‌دهد (P<۰/۰۵).

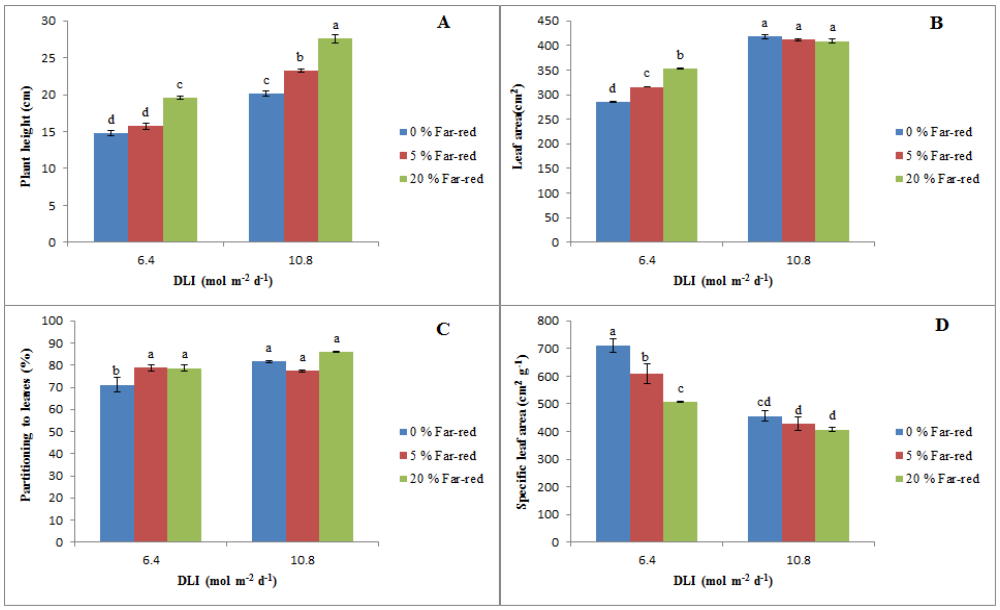
Fig. 3. Interaction effects of far-red light proportion and daily light integral (DLI) level on fresh (A) and dry (B) leaf weight, fresh (C) and dry (D) stem weight, and fresh (E) and dry (F) weight of whole basil plant. Different letters show a significant difference among the treatments according to Duncan's multiple range test (P<0.05).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل DLI و نور قرمز دور بر ارتفاع گیاه ریحان نشان داد که افزودن نور قرمز دور در سطح ۲۰ درصد به هر دو سطح DLI، سبب افزایش ارتفاع می‌گردد، اگرچه سطح ۵ درصد نور قرمز دور فقط سبب افزایش ارتفاع در شرایط ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) DLI گردید (شکل ۴ A). پاسخ گیاه ریحان به افزودن نور قرمز دور بر ارتفاع گیاه در هر دو سطح DLI شبیه پاسخ سندروم اجتناب از سایه بود. اگرچه ارتفاع گیاهان رشد یافته در DLI ۶/۴ در مواجه با سطح ۵ درصد نور قرمز دور با سطح صفر درصد تفاوتی نداشت (شکل ۴ A)؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد گیاهان رشدیافته در DLI پایین فقط به سطوح بالای نور قرمز دور در ارتباط با ارتفاع واکنش می‌دهند. اگرچه پاسخ افزایش ارتفاع گیاهان رشد یافته در DLI بالا به هر دو سطح نور قرمز دور مثبت بود (شکل ۴ A). افزایش ارتفاع گیاه ریحان در اثر نور قرمز دور توسط کالایزوقلو و همکاران (۲۸)، کاروالهو و همکاران (۳۰) و لارسن و همکاران (۲۳) گزارش‌شده است.

افزودن نور قرمز دور در سطوح کم‌وزیاد به تیمار ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) DLI تأثیری بر سطح برگ نداشت، درحالی‌که در تیمار ۶/۴ (مول بر مترمربع بر روز) DLI با افزودن ۱۰ و ۲۰ درصد نور قرمز دور سطح برگ افزایش یافت (شکل ۴ B). نتایج حاصل از میزان تخصیص ماده خشک به برگ درنتیجه افزودن نور قرمز دور به DLI شبیه اثرات حاصل از افزودن نور قرمز دور بر سطح برگ بود (شکل ۴ C). پاسخ سطح برگ گیاه ریحان به نور قرمز دور در دو سطح بالا و پایین DLI، متفاوت بود. به‌طوری‌که با افزایش نور قرمز دور در DLI پایین سطح برگ افزایش یافت و در DLI بالا تأثیری بر سطح برگ نداشت (شکل ۴ B). افزایش سطح برگ در پاسخ به نور قرمز دور در مطالعات گسترده‌ای گزارش گردیده است (۳۰). گزارش‌ها مشابهی توسط جی و همکاران (۳۱) در گوجه‌فرنگی و زو و همکاران (۲۴) در کاهو در مورد تأثیر نور قرمز دور بر افزایش سطح برگ گزارش شده است. به نظر می‌رسد نور قرمز دور در شرایط DLI بالا منابع فتوسنتزی را برای گسترش سطح برگ محدود کرده است که این علامتی برای رخداد مکانیسم اجتناب از سایه در گیاه است. در همین راستا افزایش سطح برگ در شرایط تابش نور تجمعی پایین‌تر، نمایانگر اختصاص زیست‌توده گیاه بیش‌تر به اندام تولیدکننده و کم‌تر به اندام مصرف‌کننده مانند ساقه‌ها هست. این امر نمایانگر این است که شدت نور پایین باعث محدودیت جذب انرژی نوری شده است که در این مورد گیاه تصمیم گرفته است منابع فتوسنتزی را بیش‌تر به‌سمت افزایش سطح برگ برای جذب نور بیش‌تر ببرد.

افزودن نور قرمز دور در هر دو سطح ۵ و ۲۰ درصد به تیمار ۴/۶ (مول بر مترمربع بر روز) DLI، سبب کاهش سطح ویژه برگ گردید، درحالی‌که افزودن نور قرمز دور به سطح ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) DLI اثری بر سطح ویژه برگ نداشت (شکل ۴ C). سطح ویژه برگ به‌عنوان شاخصی از ضخامت برگ است و انتظار می‌رود با افزایش نور قرمز دور و کاهش سطح ایستایی فیتوکروم (PSS) مانند سایر گونه‌ها افزایش یابد (۳۱ و ۲۴)، اما به‌طرز قابل‌توجهی در گیاهان رشد یافته در DLI (۶/۴) پایین با کاهش سطح PSS در نتیجه افزودن نور قرمز دور از ۰/۸۸ به ۰/۸۲ سطح ویژه برگ کاهش یافت (شکل ۴ D) که این نتیجه به علت افزایش ماده خشک برگ (شکل ۳ B) و نه کاهش سطح برگ بود (شکل ۴ B). در همین راستا، در گیاهان رشد یافته در DLI بالا با کاهش سطح PSS درنتیجه افزودن نور قرمز دور از ۰/۸۸ به ۰/۸۵ سطح ویژه برگ تغییری نکرد (شکل ۴ E)، بنابراین افزایش نور قرمز دور در DLI بالا تأثیری بر

سطح ویژه برگ نداشت و با نتایج لارسن و همکاران (۲۳) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد پاسخ سندروم اجتناب از سایه در ریحان، هنگامی‌که در شرایط DLI بالا قرار دارد بیش‌تر مرتبط با افزایش ارتفاع ساقه باشد (۱۰) و احتمالاً تحت شرایط DLI پایین و سطح بالای نور قرمز دور، بیش‌تر مرتبط با افزایش سطح برگ و افزایش ارتفاع ساقه باشد.



شکل ۴- اثر متقابل افزودن نور قرمز دور (Far-red) به تابش فعال فتوسنتزی (DLI) بر ارتفاع گیاه (A)، سطح برگ (B)، تخصیص ماده خشک به برگ (C) و سطح خاص برگ (D) گیاه ریحان. حروف مختلف، تفاوت معنی‌داری را بین تیمارها با توجه به آزمون چنددامنه‌ای دانکن نشان می‌دهد (P<۰/۰۵).

Fig. 4. Interaction effects of far-red light proportion and daily light integral (DLI) levels on plant height (A), leaf area (B), dry partitioning to leaves (C), and specific leaf area (D) basil plant. Different letters show a significant difference among the treatments according to Duncan's multiple range test (P <0.05).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل DLI و نور قرمز دور بر کارایی مصرف نور (LUE) و تابش (RUE) وزن‌تر و خشک گیاه در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، بیش‌ترین کارایی مصرف نور بر اساس وزن‌تر و خشک گیاه در تیمار ۶/۴ و ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز)، در گیاهانی که ۲۰ درصد نور قرمز دور دریافت کردند حاصل گردید و کم‌ترین کارایی مصرف نور بر اساس وزن‌تر و خشک نیز در گیاهان تیمار شده با ۶/۴ (مول بر مترمربع بر روز) و صفر درصد نور قرمز دور حاصل گردید. نور قرمز دور در سطح ۲۰ درصد سبب افزایش کارایی مصرف تابش بر اساس وزن‌تر و خشک گیاه، در هر دو تیماری نوری ۶/۴ و ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) گردید و در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری نداشت. با افزایش DLI از ۶/۴ به ۱۰/۸ (مول بر مترمربع بر روز) کارایی مصرف نور و تابش بر اساس وزن‌تر و خشک گیاه (جدول ۲) تغییری نکرد، به‌عبارت‌دیگر کارایی مصرف نور و تابش تحت‌تأثیر DLI قرار نگرفت که با نتایج لارسن و همکاران (۲۳) مطابقت داشت. کارایی مصرف نور بر اساس وزن‌تر و خشک با افزودن نور قرمز دور در هر دو سطح DLI بهبود پیدا کرد اگرچه به نظر می‌رسد، پاسخ گیاه در شرایط نوری محدودتر، به افزودن نور قرمز دور بر کارایی مصرف نور شدیدتر

هست (جدول ۲) و دلیل آن واکنش مثبت گیاه به نور قرمز دور و درنتیجه افزایش وزن‌تر و خشک برگ در شرایط نوری پایین هست. هم‌چنین به‌نظر می‌رسد نور قرمز دور تنها در شرایطی که در غلظت بالا استفاده شود سبب بهبود کارایی مصرف تابش در هر دو سطح DLI می‌گردد (جدول ۲). با توجه به اثر افزایش امرسون، کارایی فتوسیستم II ممکن است با افزایش نور قرمز دور افزایش یابد (۳۲). افزودن نور قرمز دور به مجموع طیف فعال فتوسنتزی ممکن است از طریق افزایش کارایی انتقال الکترون در سیستم فوتوسیستم II، نرخ فتوسنتز خالص لحظه‌ای را افزایش دهد (۱۷).

جدول ۲- اثر متقابل افزودن نور قرمز دور (Far-red) به تابش فعال فتوسنتزی (DLI) بر کارایی مصرف نور (LUE) و کارایی مصرف تابش (RUE) وزن‌تر و وزن خشک گیاه ریحان.

Table 2. Interaction effects of far-red light proportion and daily light integral (DLI) levels on light use efficiency (LUE) and radiation use efficiency (RUE) fresh and dry weight of basil.

DLI ($mol\ m^{-2}\ d^{-1}$)	Far-red (%)	LUE (Plant fresh weight)	LUE (Plant dry weight)	RUE (Plant fresh weight)	RUE (Plant dry weight)
6.4	0	6.48^{d}	0.38^{c}	6.48^{b}	0.38^{e}
	5	8.21^{bc}	0.45^{b}	7.95^{ab}	0.44^{ed}
	20	10.67^{a}	0.62^{a}	9.4^{a}	0.54^{ab}
10.8	0	7.21^{cd}	0.47^{b}	7.21^{b}	0.47^{cd}
	5	8.1^{bc}	0.52^{b}	7.97^{ab}	0.51^{bc}
	20	9.21^{ab}	0.63^{a}	8.2^{ab}	0.59^{a}

حروف مختلف در هر ستون، تفاوت معنی‌داری را بین تیمارها با توجه به آزمون چنددامنه‌ای دانکن نشان می‌دهد (P<۰/۰۵)

Different letters in each column show a significant difference among the treatments according to Duncan's multiple range test (P<0.05)

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که رشد و ریخت‌شناسی و در نتیجه عملکرد تحت‌تأثیر مجموع تابش فعال فتوسنتزی و نور قرمز دور قرار گرفتند. افزودن نور قرمز دور به تابش فعال فتوسنتزی سبب افزایش عملکرد وزن‌تر و خشک در هر دو سطح ۴/۶ و ۱۰/۸ DLI گردید، اگرچه این افزایش زمانی که گیاهان در معرض مقدارهای بالای تابش دریافتی روزانه قرار دارند سبب تخصیص ماده خشک و تر به ساقه گردید و این پدیده تأثیر منفی بر ریخت‌شناسی (تحریک سندروم اجتناب از سایه و در نتیجه افزایش ارتفاع ساقه) و در نهایت عملکرد قسمت قابل‌استفاده گیاه ریحان گذاشت. از طرف دیگر، زمانی که گیاه در شرایط محدودیت نوری (۶/۴) قرار دارد، کاربرد نور قرمز دور در هر دو سطح ۵ و ۲۰ درصد موجب افزایش سطح برگ شد که منجر به تخصیص ماده خشک و تر کم‌تر به ساقه گردید و اثرات مثبتی بر خصوصیات ریخت‌شناسی و عملکرد قسمت قابل‌استفاده ریحان گذاشت؛ بنابراین ازآنجایی‌که در حال حاضر محدودیت انرژی بزرگ‌ترین مانع در توسعه کشت‌های عمودی و کارخانه‌های گیاهی هست، استفاده از نور قرمز دور همراه با طیف فعال فتوسنتزی به‌خصوص در شرایط DLI پایین می‌تواند اثر مثبتی بر عملکرد قابل‌استفاده ریحان و در نتیجه کارایی مصرف نور داشته باشد.

منابع

1.Ballaré, C.L. and Pierik, R. 2017. The shade-avoidance syndrome: Multiple signals and ecological consequences. Plant, Cell Environ. 40: 11. 2530-2543.

2.Sharath Kumar, M., Heuvelink, E. and Marcelis, L.F. 2020. Vertical farming: moving from genetic to environmental modification. Trends Plant Sci. 25: 8. 724-727.

3.Kusuma, P., Pattison, P.M. and Bugbee, B. 2020. From physics to fixtures to food: Current and potential LED efficacy. Hort. Res. 7p.

4.Touliatos, D., Dodd, I.C. and McAinsh, M. 2016. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. Food Energy Secur. 5: 3. 184-191.

5.Esetlili, B. Ç., Öztürk, B., Çobanoğlu, Ö. and Anaç, D. 2016. Sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) and potassium fertilization. J. Plant Nutr. 39: 1. 35-44.

6.Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S. and Marcelis, L.F. 2020. Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. Sci. Hort. 272: 109508.

7.Jin, W., Urbina, J.L., Heuvelink, E. and Marcelis, L.F. 2021. Adding far-red to red-blue light-emitting diode light promotes yield of lettuce at different planting densities. Front Plant Sci. 2219.

8.Ruberti, I., Sessa, G., Ciolfi, A., Possenti, M., Carabelli, M. and Morelli, G.J.B.A. 2012. Plant adaptation to dynamically changing environment: the shade avoidance response. Biotechnol. Adv. 30: 5. 1047-1058.

9.Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M. and Murphy, A. 2015. *Plant physiology and development* (No. Ed. 6). Sinauer Associates Incorporated.

10.Li, Q. and Kubota, C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environ. Exp. Bot. 67: 1. 59-64.

11.Yang, F., Feng, L., Liu, Q., Wu, X., Fan, Y., Raza, M.A. and Yang, W. 2018. Effect of interactions between light intensity and red-to-far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition. Environ. Exp. Bot. 150: 79-87.

12.Park, Y. and Runkle, E.S. 2017. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. Environ. Exp. Bot. 136: 41-49.

13.Yuan, H.Y., Saha, S., Vandenberg, A. and Bett, K.E. 2017. Flowering and growth responses of cultivated lentil and wild Lens germplasm toward the differences in red to far-red ratio and photosynthetically active radiation. Front Plant Sci. 8: 386.

14.Pierik, R. and de Wit, M. 2014. Shade avoidance: phytochrome signalling and other aboveground neighbour detection cues. J. Exp. Bot. 65: 11. 2815-2824.

15.Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrierec, J., Pelleschi-Travier, S. and Sakr, S. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. Environ. Exp. Bot. 121: 4-21.

16.Bongers, F.J., Evers, J.B., Anten, N.P. and Pierik, R. 2014. From shade avoidance responses to plant performance at vegetation level: using virtual plant modelling as a tool. New Phytol. 204: 2. 268-272.

17.Franklin, K.A. 2008. Shade avoidance. New Phytol. 179: 4. 930-944.

18.Vos, J., Evers, J.B., Buck-Sorlin, G.H., Andrieu, B., Chelle, M. and De Visser, P.H. 2010. Functional–structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. J. Exp. Bot. 61: 8. 2101-2115.

19.Park, Y. and Runkle, E.S. 2018. Far-red radiation and photosynthetic photon flux density independently regulate seedling growth but interactively regulate flowering. Environ. Exp. Bot. 155: 206-216.

20.Yang, F., Fan, Y., Wu, X., Cheng, Y., Liu, Q., Feng, L. and Yang, W. 2018. Auxin-to-gibberellin ratio as a signal for light intensity and quality in regulating soybean growth and matter partitioning. Front Plant Sci. 9: 56.

21.McCree, K.J. 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. J. Agric. Meteorol. 9: 191-216.
22.Zhen, S. and van Iersel, M.W. 2017. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. J. Integr. Plant Biol. 209: 115-122.
23.Larsen, D.H., Woltering, E.J., Nicole, C. and Marcelis, L.F. 2020. Response of basil growth and morphology to light intensity and spectrum in a vertical farm. Front Plant Sci. 11: 1893.
24.Zou, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Bian, Z., Fanourakis, D., Yang, Q. and Li, T. 2019. Morphological and physiological properties of indoor cultivated lettuce in response to additional far-red light. Sci. Hort. 257: 108725.
25.Zhen, S. and Bugbee, B. 2020. Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining photosynthetically active radiation. Plant, Cell Environ. 43: 5. 1259-1272.
26.Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. In *6. International Congress on Soilless Culture, Lunteren (Netherlands), 29 Apr-5 May 1984*. ISOSC.
27.Sager, J.C., Smith, W.O., Edwards, J.L. and Cyr, K.L. 1988. Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. Transactions of the ASAE, 31: 6. 1882-1889.
28.Kalaitzoglou, P., Van Ieperen, W., Harbinson, J., Van der Meer, M., Martinakos, S., Weerheim, K. and Marcelis, L.F. 2019. Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. Front Plant Sci. 10: 322.
29.Meng, Q., Kelly, N. and Runkle, E.S. 2019. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. Environ. Exp. Bot. 162: 383-391.
30.Carvalho, S.D., Schwieterman, M.L., Abrahan, C.E., Colquhoun, T.A. and Folta, K.M. 2016. Light quality dependent changes in morphology, antioxidant capacity, and volatile production in sweet basil (*Ocimum basilicum*). Front Plant Sci. 7: 1328.
31.Ji, Y., Ouzounis, T., Courbier, S., Kaiser, E., Nguyen, P.T., Schouten, H.J. and Heuvelink, E. 2019. Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato. Environ Exp. Bot. 168: 103889.
32.Emerson, R., Chalmers, R. and Cederstrand, C. 1957. Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 43: 1. 133.