Journal of
Plant Environmental Physiology
Print ISSN: 2423-7671
Online ISSN: 2783-4689
Phycological Society of Iran

Effect of artificial light quality on the growth and nutritional value of broccoli microgreens (*Brassica oleracea var. italica*)

Mohaddese Moghimi Kandelousi[1], Hossein Moradi[2*], Kamran Ghasemi[3], Seyed Hamidreza Hashemi Petroudi[4]

[1] Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.Email: mohaddesemoghimi@gmail.com
[2]Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: gol7272@gmail.com
[3]Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, Email: kamranghasemi63@gmail.com
[4] Research Institute of Genetics and Biotechnology, Tabaristan, Sari, Iran. Email: irahamidreza@yahoo.com

Article type:
Research article

Article history
Received:24.07.2024
Revised: 16.12.2024
Accepted:17.12.2024
Published:21.03.2025

Keywords
Antioxidant
Flavonoid
Phenol
Photosynthetic Pigments
Plant Factory

Abstract

This research investigates the influence of light spectrum and sulfur nutrition on the production of sulfur-rich microgreens such as broccoli(*Brassica oleracea var. italica*), aiming to identify an effective treatment combination to enhance both yield and nutritional value. The experiment was designed as a factorial study, utilizing a completely randomized design with two factors and four replications under artificial light. The first factor, light spectrum, was examined at four levels, while the second factor, nutrition, was assessed at two harvest times (10 days and 14 days). The light treatments included varying ratios of red (R) and blue (B) light (R1B2, R1B1, R2B1, R3B1). Evaluated traits included morphological characteristics, biomass, photosynthetic pigments, total antioxidants, total phenols, and total flavonoids. Statistical analyses were performed using SAS 9.1 software, with averages compared accordingly. The lowest dry weight was recorded in the R1B2 treatment, which was not significantly different from R1B1 but was significantly lower than both the R2B1 and R3B1 treatments. Although light quality did not impact the length of the cotyledon leaf, it significantly affected its width. The R1B2 treatment produced the narrowest cotyledon leaf width, which was significantly less than that of the other three light treatments. Additionally, the R1B2 treatment yielded the shortest stem length; while it was not statistically different from R1B1, it was significantly shorter than the R2B1 and R3B1 treatments, which predominantly featured red light. The highest amount of chlorophyll b was found in the R2B1 light treatment harvested on day 10. In other light ratios with altered amounts of red light, chlorophyll b levels decreased. Chlorophyll a and total chlorophyll, which were affected only by the time of harvest, were significantly higher on day 10 than on day 14. The influence of light quality on carotenoid levels showed that the R1B2 treatment, with a higher blue light ratio, resulted in significantly lower carotenoid content compared to other treatments.The lowest total antioxidant activity occurred at the 10-day harvest in the R1B2 light treatment, which was significantly lower than all other treatments. In contrast, the R2B1 treatment with

dominant red light, harvested on day 10, exhibited significantly higher total phenol content than the others. The effect of harvest time on total flavonoid levels was significant, as amounts were notably higher on day 7 compared to day 10. Overall, the results suggest that LED lighting with a red light spectrum positively influences certain traits, indicating that different light combinations can be utilized based on the producer's objectives.

Introduction: Microgreens are young horticultural crops valued for their high nutritional and functional properties. Broccoli microgreens are particularly rich in antioxidants, vitamins, phenolic compounds, and bioactive metabolites such as sulforaphane. Light quality and harvest time are key factors influencing growth, photosynthetic pigments, and secondary metabolite accumulation. Although LED lighting enables precise spectral control, limited information exists on the combined effects of LED light spectra and harvest time on broccoli microgreens. This study aimed to evaluate the effects of different red and blue LED light ratios and harvest times on growth and antioxidant characteristics of broccoli microgreens.

Materials and Methods: The experiment was conducted in a controlled environment using a factorial completely randomized design with three replications. Treatments included four red and blue LED light ratios (R1B1, R2B1, R1B2, and R3B1) at a light intensity of 250 μmol m^{-2} s^{-1} and two harvest times (10 and 14 days after germination). Broccoli microgreens were grown in a cocopeat–perlite substrate. Morphological traits, biomass, photosynthetic pigments, antioxidant activity, total phenolics, and flavonoids were measured and statistically analyzed.

Results and Discussion: Light quality and harvest time significantly influenced most measured traits. Higher red light ratios increased biomass production, while blue light reduced hypocotyl elongation and excessive blue light decreased dry weight. Photosynthetic pigment content was higher at the earlier harvest. Antioxidant activity and phenolic content were enhanced by higher red light ratios, particularly at the later harvest, whereas flavonoid content declined with delayed harvest.

Conclusion: The results indicate that optimizing red and blue LED light ratios in combination with appropriate harvest timing can improve both growth and phytochemical quality of broccoli microgreens. Increased red light favors biomass and antioxidant capacity, while early harvest enhances photosynthetic pigment accumulation, supporting efficient and sustainable microgreen production under controlled environments.

Cite this article as: Moghimi Kandelousi, M., Moradi, H., Ghasemi, K., Hashemi Petroudi, S.H.R. (2025). Effect of artificial light quality on the growth and nutritional value of broccoli microgreens (*Brassica oleracea* var. italica). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 77(1): 71-88.

©The author(s) Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch
Doi: https://doi.org/10.71890/iper.2025.984441

فیزیولوژی محیطی گیاهی
شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۷۶۷۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۶۸۹
PSI
انجمن جلبک شناسی ایران
Phycological Society of Iran
دانشگاه آزاد اسلامی
واحد گرگان

تاثیر کیفیت نورمصنوعی بر رشد و ارزش غذایی ریزسبزی کلم بروکلی (*Brassica oleracea* L. var. italica)

محدثه مقیمی‌کندلوسی[۱]، حسین مرادی[۲]*، کامران قاسمی[۳]، سیدحمیدرضا هاشمی پطرودی[٤]

[۱] گیاهان دارویی، واحد ساری، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران، رایانامه: mohaddesemoghimi@gmail.com
[۲] گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، واحد ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران، رایانامه:gol7272@gmail.com
[۳] گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم زراعی، واحد ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران، رایانامه:kamranghasemi63@gmail.com
[٤] پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان ، واحد ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران ، رایانامه:irahamidreza@yahoo.com

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰۲/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱٤۰۳/۰۷/۲٤
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۸/۰٤
تـاریخ چاپ:۱٤۰٤/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
آنتی‌اکسیدان
تابش
فتوسنتز
کلروفیل
کاروتنوئید
گیاه دارویی
مواد مؤثره

چکیده

به منظور بررسی تأثیر کیفیت نور مصنوعی بر رشد و ارزش غذایی ریزسبزی(microgreens) کلم‌بروکلی (*Brassica oleracea var. italica*) پژوهشی بصورت فاکتوریل با دو فاکتور برپایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول در چهار سطح نوری با شدت نور ۲۵۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه(نورقرمز ٦٦۰ نانومتر و نورآبی ٤٤۰ نانومتر بصورت: R1B1: یک لامپ قرمز، یک لامپ آبی، R2B1: دولامپ قرمز یک لامپ آبی، R1B2: یک لامپ قرمز دولامپ آبی، R3B1: سه لامپ قرمز یک لامپ آبی) اعمال گردید. فاکتور دوم نیز زمان برداشت محصول بوده که در دو سطح ده روز پس از جوانه زنی (D1) و چهارده روز پس از جوانه‌زنی (D2) در نظرگرفته شد. مدت زمان روشنایی و تاریکی در محل پرورش گیاه به نسبت ۱٦/۸(تاریکی/روشنایی) بود. صفات اندازه‌گیری شده شامل وزن‌تر، وزن خشک، طول ساقه‌چه، طول برگ لپه‌ای، عرض برگ لپه‌ای و مقدار فنل، فلاونویید، درصد مهار رادیکال آزاد، کلروفیلa و b، کل و کارتنویید بودند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار آنتی‌اکسیدان در تیمار اثر متقابل R3B1 و D1 به مقدار۷۲/۷۳۷ درصد مهار مشاهده شد. از بین رنگیزه‌های فتوسنتری اثر متقابل تیمارها فقط بر کلروفیل b، در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد بطوریکه بیشترین مقدار کلروفیلb. در تیمار R2B1D1 به مقدار ۰/۲۲٤میلی گرم در گرم برگ تازه بدست آمد. همچنین اثر متقابل تیمارها بر مقدار ترکیبات فنلی در سطح یک درصد معنی‌دار شد و بیشترین مقدار فنل کل در تیمار R2B1D1 به مقدار ۱/۰۰٦ میلی‌گرم برگرم نشان داده شد. بیشترین مقدار فلاونوییدها نیز در برداشت روز دهم به مقدار۰/۰۲۳ میلی‌گرم درگرم برگ تازه بدست آمد. از بین صفات مورفولوژیک، کیفیت نور روی طول برگ لپه‌ای تأثیرگذار نبود اما اثر معنی‌داری را بر عرض برگ لپه‌ای نشان داد. بنابراین طبق نتایج حاصل شده باتوجه به اهداف مورد نظر می‌توان از تیمارهای مختلف استفاده کرد.

استناد: مقیمی کندلوسی، محدثه؛ مرادی، حسین؛ قاسمی، کامران؛ هاشمی پطرودی، سیدحمیدرضا (۱٤۰٤). تاثیر کیفیت نورمصنوعی بر رشد و ارزش غذایی ریزسبزی کلم بروکلی (*Brassica oleracea* L. var. italica). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۷۷ (۱)، ۸۸-۷۱.

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی گرگان
DOI: https://doi.org/10.71890/iper.2025.984441
© نویسندگان.

مقدمه

ریزسبزی‌ها (microgreens) محصولات باغی ویژه‌ای هستند که شامل سبزیجات و گیاهانی می‌شوند که در طول لپه کاملاً گسترش یافته و یا در اولین مراحل رشد برگ حقیقی برداشت و مصرف می‌شوند (Brazaityt et al., 2015). کارخانه‌های گیاهیاز سال ۱۹۸۰ در مناطقی مانند ژاپن وسیله‌ای برای تولید سبزیجات و گیاهان مختلف بوده‌اند. این سیستم‌ها معمولاً به دلیل توانایی در تولید محصولات یکنواخت در طول سال، در حالی که امکان دستکاری طعم و صفات مورفولوژی بر اساس ترجیحات مصرف کننده را نیز فراهم می‌آورد، جذابیت دارند (Goto., 2012). جنس Brassica با توجه به زمان کوتاه تولید، نیازهای جوانه‌زنی ساده و تعداد زیادی از ویژگی‌های مورفولوژیکی مناسب، برای تولید ریزسبزی به یک انتخاب محبوب تبدیل شده است(Xiao et al., 2012). سبزیجات چلیپایی (*Cruciferous vegetables*) متعلق به خانواده Brassicaceae دارای اثرات محافظتی ارزشمند در برابر سرطان هستند. یکی از اعضای خانواده Brassicaceae کلم بروکلی(*Brassica oleracea* L. var. italica) است که گونه وحشی آن در سرتاسر منطقه مدیترانه و به طور گسترده‌ای در بسیاری از کشورهای اروپایی، آمریکایی و آسیایی کشت می‌شود (Magd et al., 2013). کلم‌بروکلی(*Brassica oleracea L. var. italica*) حاوی تنوعی از پلی فنل‌ها می‌باشد به همین دلیل منبع بسیار خوبی از ترکیبات لازم برای سلامتی بدن به شمار می‌رود(Mohajeri et al., 2014). خاصیت ضدسرطانی کلم‌بروکلی به علت وجود ویتامین C(اسید اسکوربیک)، ویتامینE (آلفاتوکوفرول)، فلاونوئیدها (کوئرستین و کامپفرول)، کارتنوئیدها(کاروتن و لوتئین) و گلوکوزینولات‌ها است. پلی‌فنول‌های موجود در کلم‌بروکلی به عنوان خنثی کننده‌های بسیار قوی رادیکال آزاد اکسیژن فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی دارند(Jafarpoor et al., 2014). ریزسبزی‌های کلم‌بروکلی دارای ماده‌ای به نام سولفورافان هستند که تعداد، اندازه و تکثیر تومورهای سرطانی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این غنی از فیبر، کاروتنوئیدها، ویتامین K، ویتامین C و ویتامین A است (Zhang et al., 2021).

نور و دما از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر بیوسنتز وتجمع رنگیزه‌های گیاهی محسوب می‌شوند(Esteban et al., 2015). شرایط نور مصنوعی امکان استفاده از شدت نور متفاوت را برای تنظیم رشد گیاه و تجمع مواد شیمیایی گیاهی فراهم می‌کند، که نوعی روش سازگار با محیط زیست و مؤثر برای تولید محصولات با کیفیت بالا است. دیودهای ساطع کننده نور(LED) یکی از فناوری‌های روشنایی امیدوارکننده برای گیاهان است که می‌تواند شدت و کیفیت نور را بر رشد و محتویات شیمیایی گیاه تنظیم کند(Zhang et al., 2020). نور که شامل شدت، کیفیت و دوره نوری می‌شود، نقش مهمی در رشد و نمو گیاهان دارد. در مقایسه با منابع روشنایی معمولی که به عنوان منبع نوری اصلی یا تکمیلی برای کشت گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، دیودهای ساطع کننده نور(LED) مزایای مختلفی از جمله طیف انتشار قابل کنترل، بازده تبدیل انرژی بالا، عمر طولانی‌تر همراه با خروجی انرژی حرارتی پایین را نشان داده‌اند (Son and Oh., 2013). نور برای فتوسنتز و رشد گیاه بسیار مهم است. اثرات نور بر رشد و نمو گیاه پیچیده است. موجودات زنده عموماً طیف الکترومغناطیسی قابل مشاهده را می‌گیرند، که به عنوان نور مرئی تلقی می‌شود. به غیر از فتوسنتز، نور زمان گلدهی و فتومورفوژنز را نیز کنترل می‌کند. دو گیرنده نوری بزرگ در فیتوکروم‌ها(که نور قرمز و نور قرمز دور را جذب می‌کنند) و کریپتوکروم‌ها(که نور آبی و نور

ماورای بنفش) UV-A را جذب می‌کنند مسئول تغییرات مورفولوژیکی و رشد گیاهان هستند. گیاهان می‌توانند پارامترهای متعددی از سیگنال‌های نور محیط، کمیت، کیفیت، جهت و مدت زمان را حس کنند، اما اهمیت کیفیت طیفی نور، که با نتایج گزارش شده در ریزسبزی‌ها کاملاً قابل درک نیست، اهمیت دارد(Kopsell et al., 2006). کاهش شدت نور، بسته به نوع گیاه و نوع گونه سبب کاهش تجمع رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (Simkin et al., 2022). همچنین نور عامل مهمی برای جوانه زنی بذر است، زیرا ممکن است روی برخی از بذرها تأثیر بگذارد و یا از جوانه‌زنی جلوگیری کند(Abdollateef et al., 2011). مشخص شده است که حتی شدت کم و مدت کوتاه نور ممکن است باعث فعال شدن یا مهار جوانه‌زنی برخی از بذرها شود (Yan et al., 2020). در بسیاری از گیاهان دارویی کیفیت و شدت نور و طول موج به دلیل رابطه مستقیم نور با محتوای کلروفیل و نوسانات آن باعث افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه می‌شود(Ahmad et al., 2014). اثر محرک نور بر تجمع متابولیت‌های ثانویه مانند آرتمیزینین(De Leo et al ., 2002) فلاونوئیدها (Ferreyra et al., 2021)، آنتوسیانین‌ها (Abou El-Dis et al., 2021) و مشتقات اسید کافئیک (Abbasi et al., 2007) در مطالعات مختلف گزارش شده است. نور ارتباط تنگاتنگی با متابولیسم کلروفیل دارد (Wang et al., 2021). کلروفیل پیوسته در حضور نور سنتز می‌شود و از بین می‌رود (حاجی بلند و همکاران، ۱۳۸۹). در همین حال، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و برخی از مواد مؤثره اختصاصی گیاهان نیز می‌تواند به طور قابل توجهی با رشد تحت تاثیر نور LED متفاوت افزایش یابد. همچنین تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی که تحت تأثیر رنگ‌های مختلف LEDها بودند در بسیاری از گیاهان مثل فلفل، گندم، اسفناج، کاهو، تربچه، توت‌فرنگی و انگور مطالعه شدند. گیاهان می‌توانند پارامترهای متعددی از سیگنال‌های نور محیط مثل کمیت، کیفیت، جهت و مدت زمان را حس کنند، اما ویژگی کیفیت طیفی نور، که با نتایج گزارش شده در ریزسبزی‌ها کاملاً قابل درک نیست، اهمیت دارد(Kopsell et al., 2015). فتوسنتز را می‌توان در گیاهانی که تحت نور مصنوعی رشد می کنند تعدیل کرد و سنتز و تجمع متابولیت های ثانویه در مقایسه با نور معمولی سفید (W) در زیر نور آبی (B) یا LED قرمز (R) تک رنگ بیشتر مشهود است (Li et al., 2009). همچنین نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که مواد مؤثره در اندام‌های گیاه هیچ‌گاه ثابت نیست و متناسب با مراحل رشد گیاه و شرایط متفاوت محیطی قابل تغییر است و به فاکتورهای محیطی، شرایط رویشگاهی، زمان برداشت، تنوع ژنتیکی و فنولوژی گیاه کاملاً وابسته است. برداشت گیاهان دارویی در زمان نامناسب میزان محصول به دست آمده را کاهش می‌دهد و محصول برداشت شده نیز از کیفیت مطلوبی برخوردار نخواهد بود (Elah Dadi and Borojni., 2019).

علیرغم مطالعات متعدد در مورد تأثیر شرایط رشد و فرآوری بر محتوای ترکیبات فعال زیستی در سبزیجات چلیپایی، تنها تعداد کمی بررسی کرده‌اند که چگونه نور بر کیفیت جوانه‌های این خانواده تأثیر می‌گذارد. در این مورد گزارش شده است که غلظت کل گلوکوزینولات جوانه کلم ۲۰ برابر بافت کلم بود و غلظت گلوکوزینولات در جوانه‌هایی که در نور رشد کردند ۳۳درصد بیشتر ازجوانه‌هایی بودند که در تاریکی رشد کرده‌اند (Guo et al., 2014) و به‌نظر می‌رسد عامل نور و زمان تأثیر گذار بوده است. با توجه به مطالب یاد شده در این تحقیق اثر تیمارهای مختلف نوری و زمان برداشت به عنوان سؤال اصلی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

کاشت و نگهداری: این پژوهش بصورت فاکتوریل با دو فاکتور برپایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در آزمایشگاه فیزیولوژی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. قفسه‌های کشت افقی در ابعاد نیم مترمربع به تعداد ٤*٤ طراحی شد. درون طبقه‌ها، سینی‌های کشت دوتایی که هرکدام دارای۲۱۰ حفره بود قرار گرفت. سینی‌های کشت با مخلوط کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۱:۲ به عنوان بستر کشت پر گردید و در هر حفره یک بذر کلم بروکلی رقم Centauro تهیه شده از شرکت پاکان بذر با درصد جوانه زنی ۸۵ درصد، به تعدادکل ٦۷۲۰ بذر، کشت گردید و آبیاری بذرها هر روزه به وسیله آبپاش دستی انجام شد. دمای محیط کشت بین ٢٤ تا ٢٥ درجه سانتی‌گراد و درصد رطوبت نسبی ٦٠ تا ۷۰ درصد به وسیله دماسنج دیجیتالی اندازه‌گیری شد. تیمار اول شامل طیف‌های مختلف نوری با شدت نور ۲۵۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه در چهارسطح(نور قرمز ٦٦٠ نانومتر، نورآبی ٤٤٠ نانومتر بصورت: R1B1: یک لامپ قرمز، یک لامپ آبی، R2B1: دولامپ قرمز، یک لامپ آبی، R1B2: یک لامپ قرمز، دولامپ آبی، R3B1: سه لامپ قرمز، یک لامپ آبی) درنظرگرفته شد. تیمار دوم نیز زمان برداشت محصول بوده که در دو سطح، ده روز پس از جوانه زنی(D1) و چهارده روز پس از جوانه زنی(D2) اعمال شد. مدت زمان روشنایی و تاریکی در محل پرورش گیاه به نسبت ١٦/٨(تاریکی/ روشنایی) به وسیله تایمر خاموش/ روشن کنترل گردید و شیشه‌های داخلی محل کشت آزمایش بوسیله ورقه آلومینیومی پوشانده شد تا از تاثیر نور بیرونی جلوگیری گردد.

سنجش‌های مورفولوژیکی: پس از جدا نمودن اندام هوایی گیاهان طول ساقه چه، طول برگ لپه‌ای و عرض برگ لپه‌ای ریزسبزی با استفاده از خط کش برحسب میلی‌متر محاسبه گردید. وزن تر اندام هوایی بوسیله ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ تعیین شد. برای تعیین وزن خشک نیز ابتدا اندام هوایی در آون در دمای ٤٠ سانتیگراد به مدت٤٨ ساعت قرار گرفته و سپس وزن خشک آن‌ها توسط همان ترازو اندازه گیری شد.

سنجش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی: جهت اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی نیم گرم بافت تازه گیاه را در ۱۰ میلی لیتر استون۸۰درصد سابیده و پس از ۱۰دقیقه سانتریفیوژ ٦۰۰۰ دور در دقیقه، از عصاره بالایی برداشته و به وسیله اسپکتروفتومتر UVISCO UV-1800PCدر طول موج‌های ٦٤٥، ٤٧٠ و ٦٦٣ نانومتر قرائت گردید و بر اساس فرمول زیر محاسبه شد (Arnon et al., 1967):

Chl.a mg/g FW: [12.7(A663)-2.69(A645)]×V/1000FW

Cl.b mg/g FW: [22.9(A645)-4.68(A663)]×V/1000FW

Chl.Total mg/gFW: [20.2(A645)+8.02(A663)]×V/1000FW

Carotonoids=1000(A470)+3.27(mg Chl.a)-104(mg Chl.b)/227

V= حجم محلول صاف شده(محلول فوقانی حاصل از سانتریفیوژ)

A= جذب نور در طول موج‌های ٦٦٣، ٦٤٥ و ٤٧٠ نانومتر

W= وزن تر نمونه بر حسب گرم

سنجش میزان آنتی‌اکسیدان: جهت اندازه‌گیری درصد مهارآنتی‌اکسیدانی از رادیکال DPPH (۲دی فنیل ۱پیکریل هیدرازیل) استفاده شد. ۱/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی با ۱/۵میلی‌لیتر از محلول رادیکال DPPH ۱۰میکرومولار مخلوط شده و به مدت۳۰ دقیقه در تاریکی انکوبه شد. جذب نوری نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۷ نانومتر در مقابل شاهد قرائت شد و درصد مهار ازطریق فرمول زیرمحاسبه گردید(Ebrahimzadeh et al., 2009):

: (درصدجذب شاهد- درصدجذب نمونه /
DPPHدرصدجذب شاهد)×۱۰۰

سنجش میزان فنل کل: برای اندازه‌گیری فنل به ۲۰میکرولیتر از عصاره متانولی ۱۰۰ میکرولیتر فولین اضافه گردید. سپس ۱/٦ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و به مدت ۵ دقیقه استراحت داده شد. سپس ۳۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم یک مولار اضافه شد و ۳۰ دقیقه در حمام بخار ٤۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت سپس در نهایت میزان ترکیبات فنولی در طول موج ۷٦۵نانومتر توسط دستگاه اسپکتوفتومتری بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر بدست آمد (Slinkard and Singelton., 1977).

سنجش میزان فلاونویید کل: برای سنجش فلاونویید ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی با ۱/۵ میلی‌لیتر متانول مخلوط گردیده و۱۰۰میکرولیتر آلومینیوم کلراید به محلول اضافه شد، سپس ۱۰۰ میکرولیتر استات پتاسیم و ۲/۸ سی‌سی آب مقطر اضافه شد و ورتکس گردید. جذب هر نمونه در طول موج ٤۱۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتوفتومتر خوانده و بر حسب میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن تر اعلام گردی (Chung et al., 2002). داده‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه در نرم‌افزار آماری SAS ver 9.1 نسخه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و سپس میانگین‌ها با استفاده از روش چنددامنه‌ای دانکن مقایسه شدند. نمودارها برای مقایسه میانگین با نرم افزار Excel 2010رسم شد.

نتایج

زیست توده گیاهی: در این پژوهش از بین صفات مرتبط با زیست توده تولید شده، دو صفت وزن‌تر کل و طول برگ لپه‌ای تحت تاثیر تیمارهای بکار رفته قرارنگرفتند(جدول۱) که بنظر می‌رسد تحت تأثیر زمان کوتاه برداشت ریزسبزی باشد. مهم‌ترین معیار برداشت برای تولید تجاری ریزسبزی‌ها عملکرد تازه، یعنی کیلوگرم برمترمربع است، زیرا ریزسبزی‌ها معمولا بر اساس عملکرد تازه فروخته می‌شوند. همچنین اثر متقابل زمان برداشت و کیفیت نور نیز بر هیچ یک از شاخص‌های مرتبط با زیست‌توده اثر معنی‌داری نداشت(جدول۱). با این حال اثر ساده کیفیت نور بر سه صفت وزن خشک، عرض برگ لپه‌ای و طول ساقه‌چه به ترتیب در سطح احتمال پنج، یک و پنج درصد معنی‌دار شد(جدول۱). کمترین میزان وزن خشک تولید شده در تیمار R1B2 به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با R1B1 نداشت ولی نسبت به دو تیمار R2B1 و R3B1 به طور معنی‌داری کمتر بود(شکل۱) که نشان می‌دهد در تیمار غالب نور قرمز وزن خشک بیشتری حاصل شد. بنابراین در تیمارهایی که نسبت نور آبی به قرمز بالا بود، زیست توده کمتری تولید شد، ولی در نسبت‌های بالای قرمز به آبی زیست توده تولیدی افزایش معنی‌داری را نشان داد.

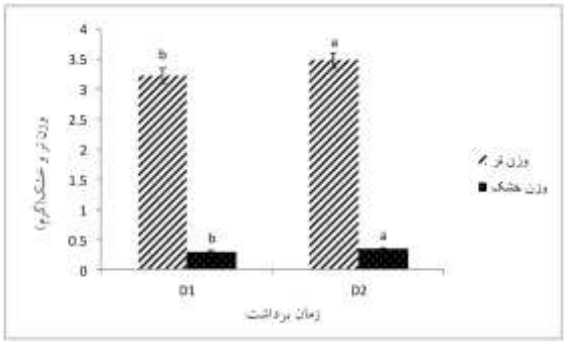
جدول ۱: تجزیه واریانس تاثیر کیفیت نور و زمان برداشت برمیزان زیست توده گیاهی ریزسبزی کلم بروکلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر (گرم)	وزن خشک (گرم)	عرض برگ لپه‌ای (میلی‌متر)	طول برگ لپه‌ای (میلی‌متر)	طول ساقه‌چه (میلی‌متر)
طیف نور	۳	۱/۵۰۱^{ns}	۰/۰۰۲*	۳/۸۹۰**	۰/۲۵۷^{ns}	۱۲۰/٤۱۲*
زمان برداشت	۱	۰/۲۸۸^{ns}	۰/۰۱۰**	۰/۰٤٦^{ns}	۲/۷۵٤^{ns}	۹۱/۲۲۱۰^{ns}
طیف نور*زمان برداشت	۳	۰/۲۸۷^{ns}	۰/۰۰۰^{ns}	۰/۸٦۸^{ns}	۰/۰٦۰^{ns}	٦۸/۳۲۳^{ns}
خطا	۱٦	۰/۹۲۳	۰/۰۰۰	۰/۵٤۸	۰/۷۳۷	۳٦/٦۵۵
ضریب تغییرات	-	۲۸/۵۵۵	۷/۵۲۰	۸/٦٤۵	۱۷/۲٦۱	۱۹/۹۵٤

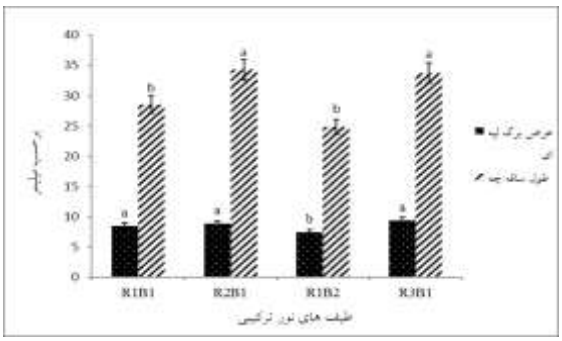
**و* به‌ترتیب معنی‌دار درسطح ۱درصد و ۵درصد

تأثیر زمان برداشت نیز بر وزن خشک تولید شده معنی‌دار بود و به طور قابل انتظاری مقدار زیست توده با گذشت زمان افزایش یافت؛ به طوری که زیست توده برداشت شده در روز چهاردهم به طور معنی‌داری بیشتر از روز دهم بود (شکل۱). هرچند کیفیت نور روی طول برگ لپه‌ای تأثیرگذار نبود ولی توانست اثر معنی‌داری را بر عرض برگ لپه‌ای داشته باشد؛ چنان که کمترین عرض برگ لپه‌ای در تیمار R1B2 دیده شد که به طور معنی‌داری نسبت به سه تیمار نوری دیگر کمتر بود (شکل۲). اختلاف در عرض برگ لپه‌ای بین سه تیمار R1B1، R2B1 و R3B1 در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نبود (شکل۱). طول ساقه‌چه شاخص مهمی در تولید ریزسبزی، نشا و سایر گیاهان تولیدی در زیر نور مصنوعی می‌باشد زیرا میزان کشیدگی گیاهچه را نشان می‌دهد. در عارضه کشیدگی، طول میان‌گره و دمبرگ افزایش می‌یابد و در نتیجه آن، حساسیت به انواع بیماری‌ها، آفات و تنش‌های محیطی به شدت بالا می‌رود. نتایج به دست آمده به روشنی نشان داد که تیمار R1B2 کمترین طول ساقه‌چه را تولید نمود که اختلاف آن با R1B1 معنی‌دار نبود ولی نسبت به دو تیمار R2B1 و R3B1 که نور قرمز غالب داشتند به طور معنی‌داری کمتر بود (شکل۲). بنابراین افزایش نور آبی می‌تواند تا اندازه زیادی از کشیدگی گیاه ممانعت نماید که این مسئله در کاهش حساسیت به بیماری‌هایی نظیر بوته میری بسیار با اهمیت است.

رنگیزه‌های فتوسنتزی: طبق جدول آنالیز واریانس، اثر متقابل زمان برداشت و کیفیت نور تنها بر کلروفیل b، معنی‌دار شد(در سطح احتمال ۵ درصد)؛ این در حالی است که اثر ساده زمان برداشت بر تمامی صفات رنگیزه‌ای در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید(جدول۲). همچنین اثر ساده کیفیت نور بر میزان کارتنوئیدها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول۲).



شکل ۱: اثر زمان برداشت بر وزن تر و خشک ریزسبزی کلم بروکلی(زمان برداشت دوم=D2، زمان برداشت اول=D1)



شکل۲: اثرکیفیت نور بر میزان زیست توده گیاهی در ریزسبزی کلم بروکلی(نورآبی=B ، نورقرمز=R)

بیشترین میزان کلروفیل b در تیمار نوری R2B1 و برداشت روز دهم بدست آمد، ولی در سایر نسبت‌های نوری که میزان نور قرمز بیشتر یا کمتر شده بود، میزان کلروفیل b نیز کاهش داشت (شکل۳).

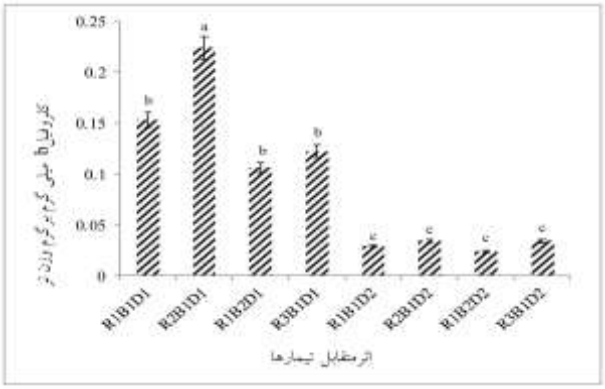
در کلروفیل a و کلروفیل کل که تنها تحت تاثیر زمان برداشت قرار گرفتند، به طور معنی‌داری میزان این دو شاخص در برداشت روز دهم بیشتر از روز چهاردهم بود(شکل٤) به بیان دیگر تأخیر زمان برداشت منجر به کاهش قابل ملاحظه میزان رنگیزه اصلی فتوسنتزی یعنی کلروفیل a و همچنین کلروفیل کل گردید. نتایج مشابهی از اثر زمان برداشت بر میزان کارتنوئید دیده شد که در برداشت روز دهم میزان این رنگیزه بیشتر از برداشت روز چهاردهم ثبت گردید(شکل٤). بررسی اثر کیفیت نور بر میزان

کارتنوئید نشان داد که تیمار R1B2 که میزان نور آبی غالب بود، میزان این رنگیزه به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر تیمارهای نوری کمتر بود (شکل۵). این نتیجه می‌تواند تاثیر منفی نور آبی زیاد بر کارتنوئید باشد و همچنین نشانگر آن است که حساسیت کارتنوئید نسبت به نور آبی در مقایسه با کلروفیل a و b بیشتر است، زیرا کاهش کلروفیل‌ها تحت تاثیر نور آبی در این آزمایش مشاهده نشد.

جدول ۲: تجزیه واریانس تاثیر کیفیت نور و زمان برداشت برمیزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در ریزسبزی کلم بروکلی

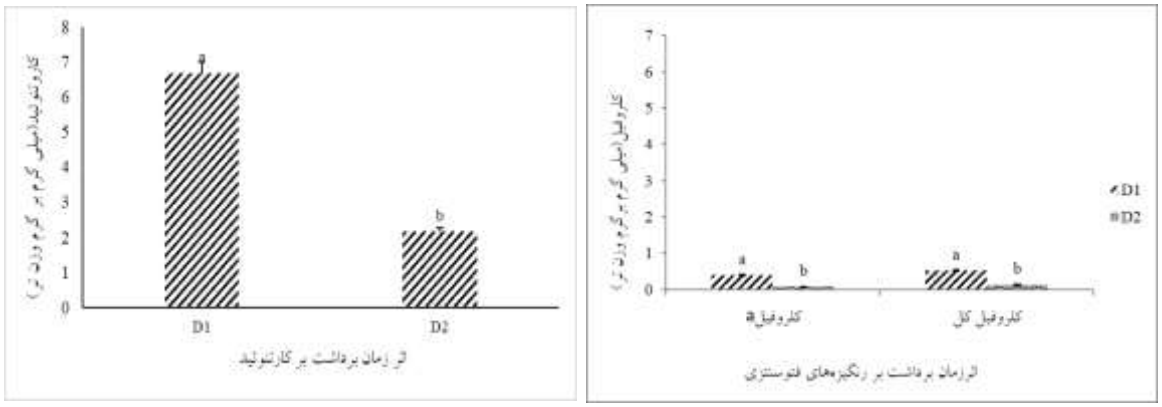
منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر)	کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر)	کاروتنوئیدها (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر)
طیف نور	۳	۰/۰۰۶ ns	۰/۰۰٤*	۰/۰۰۱ns	۲/۲۷۳ns
زمان برداشت	۱	۰/٦۲٤**	۰/۰۸۷**	۰/۹۲۵**	۱۲۳/۸۷۸**
طیف نور*زمان‌برداشت	۳	۰/۰۰۹ ns	۰/۰۰۳*	۰/۰۰۸ns	۰/۳۸۲ns
خطا	۱٦	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۵	۲/۱۸۱
ضریب تغییرات(٪)	–	۰/۰۱۷	۰/۱۵۵	۳۸/۸٦۰	۰/۵٤۸

**و* به ترتیب معنی‌دار درسطح ۱درصد و ۵درصد



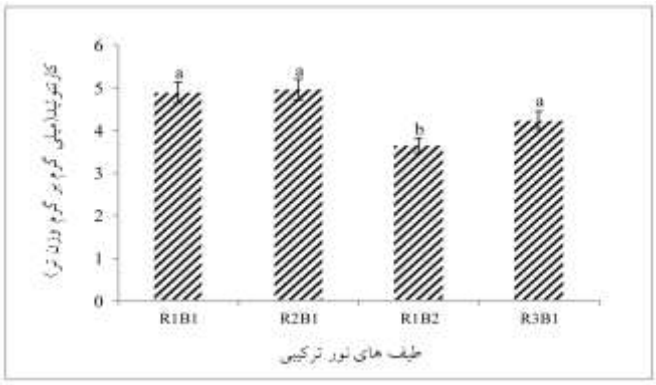
شکل ۳: اثرمتقابل کیفیت نور وزمان برداشت بر میزان کلروفیلb در ریزسبزی کلم بروکلی

(نورآبی=B ، نورقرمز=R)(زمان برداشت دوم=D2، زمان برداشت اول=D1)



شکل٤: اثر زمان برداشت بر میزان رنگیره های فتوسنتزی در ریزسبزی کلم‌بروکلی

(زمان برداشت دوم=D2 ، زمان برداشت اول=D1)



شکل ۵: اثر کیفیت نور بر میزان کاروتنوئیدها درریزسبزی کلم‌بروکلی(نورآبی=B ، نورقرمز=R)

خواص آنتی‌اکسیدانی: همانطور که جدول آنالیز واریانس نشان می‌دهد، اثر متقابل زمان برداشت و کیفیت نور بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل و فنل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی میزان فلاونوئید تنها تحت تاثیر زمان برداشت قرار گرفت (جدول۳). کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان کل در برداشت روز دهم و در تیمار نوری R1B2 مشاهده شد که به طور معنی‌داری از تمامی تیمارهای دیگر کمتر بود (شکل ٦). نکته جالب توجه آنکه تیمار نوری R1B2 در برداشت روزچهاردهم، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالایی داشت و توانست میزان پایین خود را با گذشت زمان چهار روز جبران نماید، بنابراین احتمالا برداشت روز چهاردهم از نظر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل بهتر از روز دهم باشد.

جدول ۳: تجزیه واریانس تاثیر کیفیت نور و زمان برداشت بر خواص آنتی اکسیدانی در ریزسبزی کلم بروکلی

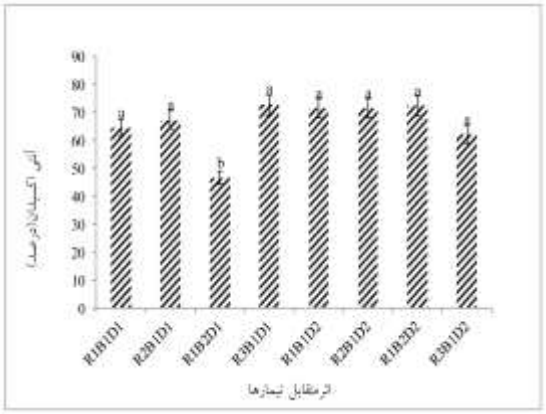
منابع تغییرات	درجه آزادی	آنتی اکسیدان (درصد مهار)	فنل (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	فلاونویید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)
طیف نور	۳	۱۱۹/۰۹۵*	۰/۰٤٥*	۰/۰۰۰ns
زمان برداشت	۱	۲٦۱/۱۹٥*	۰/۰٤٥**	۰/۰۰۰**
طیف نور*زمان برداشت	۳	۳۳٦/٦۸٥**	۰/۰۷۱**	۰/۰۰۰ns
خطا	۱٦	۳۳/۸۲۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰
ضریب تغییرات(٪)	-	۸/۷۹٦	۱۸/۸۰۹	۲۲/٤۳٤

**و* به‌ترتیب معنی‌دار درسطح ۱درصد و ۵ درصد

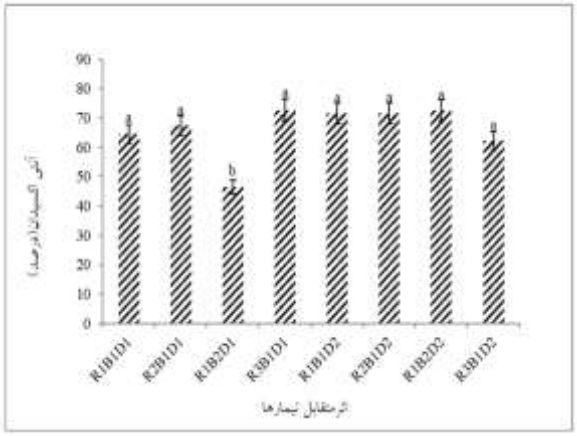
میزان فنل کل در تیمار نوری R2B1 و برداشت روز دهم به طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود(شکل۷). مقایسه تیمار نوری R2B1 در برداشت روز چهاردهم نشان داد که کاهش قابل توجهی از نظر فنل کل حاصل گردید به طوری که گیاهان تحت رژیم نوری R2B1 در برداشت روز دهم با کمترین میزان فنل که در برداشت روز چهاردهم تیمار R3B1 بدست آمد، اختلاف معنی‌داری نداشت(شکل۷).

بنابراین برخلاف آنتی‌اکسیدان کل که با گذشت زمان افزایشی بود، میزان فنل روندی کاهشی در این آزمایش نشان داد(شکل۷). اثر ساده زمان برداشت بر میزان فلاونوئید کل معنی‌دار گشت و میزان آن در روز دهم به طور معنی‌داری بیشتر از روز چهاردهم بود(شکل۸). روند کاهشی تغییرات محتوای فلاونوئید با گذشت زمان هم راستا با تغییرات میزان فنل می‌باشد. زیرا فلاونوئیدها جزء مهمترین مواد فنلی

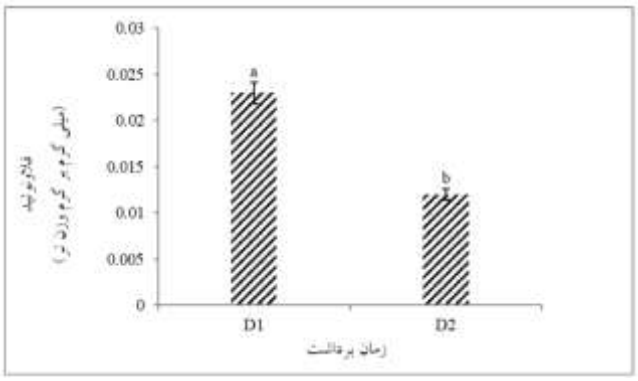
محسوب می‌گردند. ایـن هـم‌راسـتایی بیـانگر اهمیـت فلاونوئید در بین انواع فنل‌ها در کلم بروکلی است، به طوری که تغییرات فنل کل تحت تاثیر میزان فلاونوئید قرار گرفته است.



شکل ٦: اثر متقابل کیفیت نور و زمان برداشت بر میزان آنتی‌اکسیدان در ریزسبزی کلم بروکلی (نورآبی=B ، نورقرمز=R)(زمان برداشت دوم=D2 ، زمان برداشت اول=D1)



شکل ۷: اثرمتقابل کیفیت نور و زمان برداشت بر میزان فنل در ریزسبزی کلم بروکلی(نورآبی=B، نورقرمز=R) (زمان برداشت دوم=D2، زمان برداشت اول=D1)



شکل ۸: اثر زمان برداشت بر میزان فلاونوییدها در ریزسبزی کلم بروکلی (زمان برداشت دوم=D2، زمان برداشت اول=D1)

بحث

پژوهش‌های اخیر نشان داد که نور ترکیبی قرمـز و آبی وزن تازه و وزن خشک را در بسیاری از گونه‌های گیاهی مانند گل داوودی، پنبه و گوجه‌فرنگی افـزایش مـی‌دهـد (Kim et al., 2004; Lee et al., 2010). در پژوهشی نشان داده شد کـه در مـورد ریزسـبزی کلـم بروکلـی نـورآبی (B LED) منجـر بـه شـاخه-هـای بیشتری در مقایسه بـا گیاهـان در معـرض LEDهـای ترکیبی می‌شود (Kopsell and Sams, 2013). نورقرمز (R LED) در ترکیـب بـا نـور آبـی (B LED)، سـبب تکمیل اثرات نورآبی (B LED) را در افزایش زیسـت توده ریزسبزی می‌شود و با توجه به نسبت‌های نـوری متفاوتی که هر پژوهش دارد، ممکن است یک نسـبت خاص تأثیر مثبتی بر زیست توده ریزسـبزی‌هـا داشـته باشـد (Park et al., 2020). طبـق گزارشـات قبلـی تغییـرات متابولیـت سـریع در درجـه اول در معـرض مخلوطی از LEDها رخ نمی‌دهد، زیرا گیاهان به تغییر چراغ‌های تک رنگ خاص حساس‌تر هستند. بنـابراین

برای دستیابی به تغییرات مثبت، انتخاب مناسب نسبت نور مورد نیاز است (Son et al., 2017). تابش نور LED قرمز(R) در مقایسه باسفید (W) باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی در کوماتسونا (*Brassica rapa var.peruviridis*) و کاهش میزان نیترات در اسفناج شد اما تابش نور قرمز(R) به دلیل کاهش وزن خشک اندام هوایی برای کشت اسفناج مناسب نبود اگرچه منجر به افزایش مقدار کمی کاروتنوئیدها گشت (Kaneko et al., 2007). دانشمندان معتقدند که ترکیب نور آبی با قرمز، باعث باز شدن بهتر روزنه‌ها و در نتیجه فراهم شدن بهتر CO_2 برای گیاه می‌شود. همچنین از آنجایی که گیرنده‌های نورآبی عامل کنترل کننده باز شدن روزنه‌ها می‌باشند، با افزایش سطح نور آبی امکان افزایش وزن خشک گیاه وجود دارد (Schwartz and Zeiger., 1984). نور قرمز بر گسترش برگ در کاهوی قرمز تأثیر می‌گذارد و البته اثرات کیفیت نور بر روی سطح برگ در جوانه‌ها و ریزسبزی‌ها بین گونه ها متفاوت است. به عنوان مثال، در ریزسبزی نخود نور قرمز LED اثرات مثبتی بر سطح برگ نشان داد(Wu et al., 2007). در این باره Zhang و همکاران(۲۰۲۰) مشاهده کردند که کاربرد نور قرمز باعث افزایش طول میانگره و افزایش طول ساقه می‌گردد. در مقابل نور آبی باعث کاهش طول میانگره و کاهش طول ساقه می‌گردد (Zhang et al., 2020) که با نتیجه این آزمایش همخوانی دارد. Amoozgar و همکاران(۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که طولانی شدن هیپوکوتیل و کوتیلدون در کاهو بر اثر نور تک رنگ قرمز، یک فرایند وابسته به فیتوکروم است که قابل تنظیم با نور آبی اضافی می‌باشد (Amoozgar et al., 2017). به نظر می‌رسد نور آبی و نور قرمز نقش مهمی در مورفوژنسیس و رشد گیاه دارند.

رنگدانه‌های کلروفیلی و کاروتنوئیدی در برداشت نور و محافظت نوری در گیاهان عمل می‌کنند. حداکثر جذب رنگدانه‌های کلروفیلa وکلروفیلb در مناطق نور قرمز(به ترتیب ٦٦٣ و ٦٤٢ نانومتر) و آبی(به ترتیب ٤٣٠ و ٤٥٣ نانومتر) طیف نور مرئی است(Lefsrud et al., 2008). نور قرمز با حداکثر جذب کلروفیل‌ها مطابقت دارد، در حالی که نور آبی باعث باز شدن روزنه‌ها می‌شود و بنابراین، باعث تثبیت بهتر CO2 می‌شود. نسبت نور قرمز به آبی باید با دقت انتخاب شود، زیرا نور آبی ممکن است آستانه‌هایی را ایجاد کند که باعث کاهش عملکرد شود(Dou et al., 2017 ; Darko et al., 2014). طول موج‌های ٦٥٠ تا ٦٦٥ نانومتر با قله‌های جذب کلروفیل‌ها و گیرنده‌های فیتوکروم مطابقت دارد؛ بنابراین با توجه به افزایش کلروفیل bدر تیمار R2B1D1 می‌توان گفت نورقرمز(R) برای تکمیل شرایط نوری موجود برای کمک به فتوسنتز بسیار کارآمد خواهد بود(Dou et al., 2017). طول موج ٦٤٠ و ٤٤٠ نانومتر، رابطه مثبت بین طول موج و تجمع کلروفیل در گیاهان خانواده Brassica ایجاد می‌کند(Dou et al., 2008). Lefsrudو همکاران(۲۰۰۸) نشان دادند که میزان کلروفیلa و کلروفیلb در جوانه‌های کلم‌پیچ در معرض طول موج‌های LED باریک ٦٤٠ و ٤٤٠ نانومتر بیشتر بود و رابطه مثبتی بین طول موج و تجمع کلروفیل در جوانه‌های براسیکا ایجاد کرد. آن‌ها دریافتند که تابش، عامل اصلی تجمع رنگدانه در برگ کلم برگ (*Brassica oleracea var.acephala*) است. با این حال، تجمع رنگدانه همیشه به طور افزایشی برای تابش پاسخ نمی‌دهد، که منجر به این احتمال می‌شود که انتخاب طول موج نیز نقش مهمی در تولید متابولیت ثانویه ایفا می‌کند. این نتیجه با گزارش Sams و Kopsell (۲۰۱۳) که دریافتند قرار گرفتن در معرض

نور آبی منجر به افزایش رنگدانه‌های بافت گیاهی، مانند کاروتنوئیدها، در ریز سبزهای کلم بروکلی (*Brassica oleracea* L. var italica) می‌شود، مطابقت نداشت. از طرفی جذب فوتون‌های آبی باعث فعال شدن مکانیسم‌های استرس پاسخ در چرخه گزانتوفیل می‌شود و از این طریق میزان تولید رنگدانه‌های کاروتنوئیدی به عنوان محافظ در برابر آسیب های نوری افزایش می‌یابد (Dayani et al., 2016). نورLED باعث تجمع مواد شیمیایی مختلف مانند ترکیبات فنلی، ویتامین ها، گلوکوزینولات، کلروفیل و کاروتنوئیدها می‌شود. در همین حال، ظرفیت آنتی اکسیدانی نیز می‌تواند به طور قابل توجهی با رشد تحت نور LED، به ویژه نور UVB افزایش یابد. تجمع عناصر معدنی(Fe^{+2}, Ca^{+2}, K^{+}) پس از قرار گرفتن در معرض نور افزایش می‌یابد(Zhang et al., 2020). در آزمایشی در خانواده Brassicacea نیز واحد روشنایی، متشکل از LEDهای قرمز ۶۳۸ نانومتر و ۶۶۵ نانومتر، آبی ۴۵۵ نانومتر و قرمز دور ۷۳۱ نانومتر با کل تراکم شارفوتون فتوسنتز (PPFD) ۲۰۰ میکرومول ($m^{-2}s^{-1}$) برای روشنایی کاشت ریزسبزی‌ها استفاده شد و مقایسه اثرات مختلف طول موج قرمز نشان داد که آنتی‌اکسیدان‌های بیشتری، به ویژه اسید اسکوربیک و β کاروتن، در ریزنمونه‌های تحت نور قرمز ۶۳۸ نانومتر جمع شده‌اند (Brazaityte et al., 2016). Kim و همکاران (۲۰۱۳) افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات، گلوتاتیون ردوکتاز) در برگ‌ها و ساقه‌های گوجه فرنگی در نور LED آبی را نیز گزارش کردند(Kim et al., 2013). در نخود هم افزایش میزان ترکیبات آنتی‌اکسیدان تحت نور قرمز مشاهده گردید(Wu et al., 2007) که نتایج مشابهی با نتایج این آزمایش داشتند. همچنین یافته‌ها ثابت می‌کند که نور LED تکمیلی یا افزایش یافته می‌تواند محتوای کلی فنولیک و فعالیت آنتی اکسیدانی در کاهو را افزایش دهد (Alrifai et al., 2019). ترکیبات فنولیک متابولیت‌های ثانویه گیاه هستند که در بدن انسان زیست فعال بوده و دارای خواص دارویی از جمله خاصیت آنتی اکسیدانی، ضد توموری و ضدمیکروبی می‌باشند (Shirvani et al., 2016).

نور با ترویج تولید مالونیل و کوماروئیل که در سنتز ترکیبات فنلی شرکت می‌کنند، محتوای فنلی را بهبود می‌بخشد(Kim et al., 2004). گزارش شده است که نور LED قرمز می‌تواند محتوای ترکیبات فنلی را در جوانه‌های گندم سیاه افزایش دهد(Lee et al., 2014). اما در پژوهشی بر روی کیفیت نور محتوای فنلی کل جوانه‌های کلم پیچ چینی و جوانه‌های گندم سیاه معمولی تحت نور قرمز LED به طور قابل توجهی کاهش یافت، در حالی که در نور آبی LED در مقایسه با نور سفید به طور قابل‌توجهی افزایش نشان داد(Nam et al., 2018). Li و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در کاهو نور قرمز منجر به افزایش میزان ترکیبات فنولیک گیاه گردید. همچنین در کلم، Lesford و همکاران(۲۰۰۸) گزارش کردند که تحت نور قرمز LED، میزان ترکیبات آنتوسیانین گیاه که از انواع آنتی‌اکسیدان‌ها محسوب می‌شوند، افزایش یافت. در بررسی Samuoliene(۲۰۱۲) بر روی کاهوی برگ سبز که قبل از برداشت به مدت ۱۶ ساعت تحت نور LED قرمز بودند نیز غلظت ترکیبات فنولیک تقریباً دو برابر شد(Samuoliene et al., 2012). علاوه بر این، نور LED آبی اثرات افزایشی بر محتوای فلاونوئید کل جوانه‌های گندم سیاه نشان داد، در حالی که نور LED قرمز اثر معکوس را نشان داد(Nam et al., 2018). در این پژوهش مقدار فلاونویید نیز تحت تیمار R2B1 وD1 با نور غالب قرمز بیشترین مقدار خود را داشت که البته تفاوت چندانی با بقیه تیمارها نداشت، اما در گیاه نخود بیشترین مقدار فلاونوئید کل

در جوانه‌های رشد یافته LED آبی مشاهده شد (Liu et al., 2016). طی مطالعه‌ای Lobiuc و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که نور قرمز باعث افزایش ترکیبات فنولیک در ریحان سبز به مقدار ۸/۱ برابر و نور آبی باعث افزایش ۷/۱ برابر ترکیبات فنولیک ریحان بنفش نسبت به نور سفید می‌شوند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که سنتز ترکیبات فنلی در نورهای مختلف با توجه به نوع رقم متفاوت است به طوریکه بیشترین میزان ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی ارقام ریحان سبز در نور قرمز و ارقام ریحان بنفش در نور آبی مشاهده شد (Lobiuc et al., 2017) بنابراین موارد متعددی در افزایش صفات توسط نورهای ترکیبی تاثیرگذار است.

نتیجه‌گیری نهایی

استفاده از LED به عنوان منبع مصنوعی نور برای استفاده در رشد کنترل شده محیطی گیاه، دارای راندمان بالای تبدیل انرژی، حجم کم، طول عمر بیشتر، طول موج ویژه، شدت و کیفیت قابل تنظیم، نور و خروجی گرمایی کمتر می‌باشد، بنابراین استفاده از این سیستم برای بهبود صفات مورفولوژیکی و فیتوشیمیایی طی جوانه‌زنی توصیه می‌گردد. بطور کلی نتایج بدست آمده از این پژوهش افزایش معنی‌دار صفات فایتوشیمیایی و مورفولوژیکی را تحت تاثیر نورهای ترکیبی LED آبی و قرمز نشان داد. همچنین در ترکیب رنگ‌های مختلف نور، افزایش نور قرمز باعث افزایش صفت آنتی‌اکسیدانی گردید و که به همراه اثر زمان برداشت تاثیر بیشتری داشته است. در مجموع، نرخ زیست توده، میزان فتوسنتز و وزن تر کل و وزن خشک کل در تیمار دوم یعنی R2B1 نسبت به تیمارهای دیگرLED بیشتر بود. مدت زمان برداشت اول نیز به همراه کیفیت نور تاثیر در تعدادی از صفات نظیر رنگیزه‌های فتوسنتزی نتایج مطلوب‌تری نشان داد بطوریکه اگر محصول زودتر از چهارده روز برداشت شود علاوه بر تاثیر بر برخی صفات در میزان مصرف انرژی تاثیرگذار می‌باشد. اما برای باقی صفات مانند زیست توده مسلماً با گذشت زمان بیوماس بیشتری تولید شده و برداشت ریزسبزی نیز راحت‌تر می‌گردد. نتایج در کل نشان می‌دهند که نور LED با طیف نوری قرمز اثرگذاری مرغوب‌تری برای برخی از صفات دارد بنابراین بسته به هدف تولیدکننده می‌توان از ترکیبات نوری متفاوت استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام کسانی که در این پژوهش و همکاری داشتند تشکر و قدردانی می نمایند.

References

Abbasi, B. H., Tian, C. L., Murch S. J., Saxena, P. K. and Liu, C. Z. (2007). Light enhanced caffeic acid derivatives biosynthesis in hairy root cultures of *Echinacea purpurea*. Plant Cell Reports. 26(8): 1367-1372.

Abou El-Dis, G. R., Zavdetovna, K. L., Nikolaevich, A. A., Abdelazeez, W. M. A. and Arnoldovna, T. O. (2021). Influence of light on the accumulation of anthocyanins in callus culture of *Vaccinium corymbosum* L. cv. Sunt Blue Giant. Journal of Photochemistry and Photobiology. 8: 100058.

Ahmad, N., Abbasi, B. H., Fazal, H., Khan, M. A. and Afridi, M. S. (2014). Effect of reverse photoperiod on in vitro regeneration and piperine production in *Piper nigrum* L. Comptes Rendus Biologies. 337(1): 19-28.

Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M. F. and Tsao, R. (2019). Current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 67(22): 6075-6090.

Arnon, A. N.(1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal. 23:112-121

Brazaityte, A., Sakalauskiene, S., Samuolien, G., Jankauskien, J., Virsile, A., Novickovas, A., Sirtautas, R., Miliauskiene, J., Vastakaite, V., Dabasinskas, L. and Duchovskis, P. (2015). The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. Journal Agriclture Food Chemistery. 173: 600-606.

Brazaityte, A.S., Sakalauskiene, A., Virsile, J., Jankauskiene, G., Samuoliene, R., Sirtautas, V., Vastakaite, J., Miliauskiene, P., Duchovskis, A. and Dabasinskas, L. (2016). The effect of short term red lighting on Brassicaceae microgreens grown indoors .Acta Horticulturae. 1123:177-184.

Chung, Y. C., Chang, C. T., Chao, W. W., Lin, C. F. and Chou, S. T. (2002). Antioxidative activity and safety of the 50 ethanolic extract from red bean fermented by Bacillus subtilis IMR-NK1. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50(8): 2454-2458.

Darko, E., Heydarizadeh, P., Schoefs, B. and Sabzalian, M. R.(2014). Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism. Philos. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 369: 20130243.

Davis, P.A and Burns, C.(2016). Photobiology in protected horticulture. Food and Energy Security. 5: 223–238.

Dayani, S., Heydarizadeh, P. and Sabzalian, M. R. (2016). Handbook of Photosynthesis. CRC press. Florida.

De Leo, F. and Gallerani, R. (2002). The mustard trypsin inhibitor 2 affects the fertility of Spodoptera littoralis larvae fed on transgenic plants. Insect Biochemistry and Molecular Biology. 32(5): 489-496.

Demmig-Adams, B., Gilmore, A. M. and Adams, W.W. (1996). In vivo functions of carotenoids in higher plants. Faseb Journal. 10: 403–412.

Dou, H., Niu, G., Gu, M. and Masabni, J. (2017). Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments. Horticulturae. 3, 36.

Ebrahimzadeh, M. A., Nabavi, S. F. and Nabavi, S. M. (2009). Antioxidant activity of leaves and inflorescence of Eryngium Caucasicum Trautv at flowering stage. Pharmacognocy Research. 1(6): 435-439.

Elah Dadi, M. and Musharraf Borojni, L. (2019). Investigating the effect of harvesting time on some phytochemical characteristics of medicinal plant leaves(*Cynara scolymus* L.). Ecophytochemistry of Medicinal Plants. 6(4): 40-54.

Esteban, R., Barrutia, O., Artetxe, U., Fernandez Marin, B., Hernandez, A and Garcia Plazaola, J. I. (2015). Internal and external factors affecting photosynthetic pigment composition in plants: a meta- analytical approach. New Phytologist. 206(1): 268-280.

Ferreyra, M. L. F., Serra, P. and Casati, P. (2021). Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. Physiologia plantarum. 173(3): 736-749.

Gao, M., He, R., Shi, R., Zhang, Y., Song, S., Su, W. and Liu, H. (2021). Differential Effects of Low Light Intensity on Broccoli Microgreens Growth and Phytochemicals. Agronomy. 11(3): 537.

Goto, E.(2012). Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. Acta Horticultural. 956: 37–49.

Guo, L., Yang, R., Wang, Z ., Guo, Q. and Gu, Z. (2014). Glucoraphanin, sulforaphane and myrosinase activity in germinating broccoli sprouts as affected by growth temperature and plant organs. Journal of Functional Foods. 9: 70–77.

Hajiboland, R. and Farhangi, F. (2010). Growth, leaf pigments and photosynthesis of Brassica rapa under Boron element deficiency and different light intensities. Sciences, University of Tehran.(36):18.

Jafarpoor, F., Bakhshi, D., Ghasemnezhad, M. and Sajedi, R. (2014). The effect of putrescine on post-harvest quality. phenolic compounds and antioxidant capacity of *Brassica oleracea var. italica* florets. Journal of Horticultural Sciences. (3): 303-311.

Jain, M ., Mathur, G ., Koul, S. and Sarin, N. B. (2001). Ameliorative effects of proline on salt stress induced lipid peroxidation in cell lines of groundnut(*Arachis hypoeal L.*). Plant Cell Reports. 20: 463-468.

Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. and Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortScience. 45(12):1809−1814.

Kaneko, K. O., Takase, M., Kon, N., Fujiwara, K. and Kurata, K. (2007). Effect of light Quality on Growth and vegetable Quality in Leaf Lettuce,Spinach and Komatsuna.Envinmental Control Biology. 45(3): 189-198.

Kays, S. J. (1991). Postharvest physiology of perishable plant products. Van Nostrand Reinhold Publ. New York. 335 pp.

Kim, S. J., Hahn, E. J., Heo, J. W. and Paek, K. Y.(2004). Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. Scientia Horticulturae. 101(1-2): 143-151.

Kim, K., Kook, H. S., Jang, Y. J., Lee, W. H., Kamala-Kannan, S., Chae, J. C. and Lee, K. J. (2013). The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to Botrytis cinerea in tomato. Journal Plant Pathology Microbiology. 4(9).

Kopsell, D. A. and Sams, C. E. (2013). Increases in shoot tissue pigments, glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diodes. Journal of the American Society for Horticultural Science. 138: 31–37.

Kopsell, D. A., Sams, C. E. and Morrow, R. C. (2015). Blue wavelengths from led lighting increase nutritionally important metabolites in specialty crops. HortScience. 50(9): 1285−1288.

Kreuzaler, F. and Hahlbrock, K. (1973). Flavonoid glycosides from illuminated cell suspension cultures of Petroselinum hortense. Phytochemistry. 12(5): 1149-1152.

Lee, S. W., Seo, J. M., Lee, M. K., Chun, J. H., Antonisamy, P., Arasu, M. V., Suzuki, T., Naif Al-Dhabi, A. and Kim, S. J. (2014). Influence of different LED lamps on the production of phenolic compounds in common and tartary buckwheat sprouts. Industrial Crops and Products. 54: 320–326.

Lesfrud, M. G, Kopsell, D. A. and Sams, C. E. (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. HortScience. 43: 2243–2244.

Lesfrud, M. G., Kopsell, D. A. and Curran-Celentano, J. (2006). Irradiance levels affect growth parameters and carotenoid pigments in kale and spinach grown in a controlled environment. Physiologycal Plant. 127: 624–631.

Li, H., Tang, C., Xu, Z., Liu, X. and Han, X. (2012). Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris L*). Journal of Agricultural Science. 4: 262.

Li, H., Xu, Z. and Tang, C. (2010). Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets in vitro. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC). 103(2): 155-163.

Li, Q. and Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and Experimental Botany. 67(1): 59−64.

Liu, H., Chen, Y., Hu, T., Zhang, S., Zhang, Y., Zhao, T ., Yu, H. and Kang, Y. (2016). The influence of light emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts. Journal of Functional Foods. 25: 459-465.

Lobiuc, A., Vasilache, V., Oroian, M., Stoleru, T., Burducea, M., Pintilie, O and Zamfirache, M. M. (2017). Blue and red LED illumination improves growth and bioactive compounds contents in acyanic and cyanic (*Ocimum basilicum L.*) Microgreens. Molecules. 22(12): 2111.

Magd, M., Mahmoud, A. R., Hafiz, M. and Ali, A. H.(2013). Effect of different levels of mineral phosphorus fertilizer and bio-phosphorus on vegetative growth, head yield and quality of broccoli. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences. 9(5): 164-169.

Mates, J. M.(2000). Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species Toxicology. 153(1-3): 83-104.

Mohajeri, D. and Aghamohamadi, J. (2014). Experimental study of the inhibitory effect of broccoli ethanol extract on cancer induced by 4-nitroquinolone-1-oxide in Syrian rat's mouth. Comparative Pathobiology of Iran. (2): 1311-1320.

Mohr, H., Drumm-Herrel, H. and Oelmuller, R. (1984). Coaction of phytochrome and blue/UV light photoreceptors. In Blue Light Effects in Biological Systems. Springer, Berlin, Heidelberg . pp. 6–19.

Muneer, S., Kim, E.J., Park, J.S. and Lee, J. H. (2014). Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). International journal of molecular sciences. 15: 4657–4670.

Nam, T. G., Kim, D. O. and Eom, S. H. (2018). Effects of light sources on major flavonoids and antioxidant activity in common buckwheat sprouts. Food Science and Biotechnology. 27(1): 169-176.

Park, C.H., Park, Y. E., Yeo, H. J., Kim, J. K. and Park, S.U. (2020). Effects of Light-Emitting Diodes on the Accumulation of Phenolic Compounds and Glucosinolates in Brassica juncea Sprouts. Horticulturae. 6(4): 77.

Pereira, F. M. V., Rosa, E,. Fahey, J. W., Stephenson, K. K., Carvalho, R. and Aires, A. (2002). Influence of temperature and ontogeny on the levels of glucosinolates in broccoli(*Brassica oleracea var.italica*) sprouts and their effect on the induction of mammalian phase 2 enzymes. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50(21): 6239-6244.

Samuoliene, G., Sirtautas, R., Brazaityte, A. and Duchovskis, P. (2012). LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. Food Chemistery. 134: 1494-499.

Schiefthaler, U., Russell, A. W., Bolhar Nordenkampf, H. R. and Critchley, C. (1999). Photoregulation and photodamage in Schefflera arboricola leaves adapted to different light environments. Plant Physiology. 26: 485-494.

Schwartz, A. and Zeiger, E. (1984). Metabolic energy for stomatal opening. Roles of photophosphorylation and oxidative phosphorylation. Planta. 161: 129-136.

Seo, J. M., Arasu, M. V., Kim, Y. B., Park, S. U. and Kim, S. J.(2015). Phenylalanine and LED lights enhance phenolic compound production in tartary buckwheat sprouts. Food Chemistry. 77: 204-213.

Shirvani, A., Goli, S. A. H., Shahedi, M. and Soleimanian-Zad, S.(2016). Changes in nutritional value and application of thyme (Thymus vulgaris) essential oil on microbial and organoleptic markers of Persian clover (Trifolium resupinatum) sprouts. Food Scince Technology. 67: 14-21.

Simkin, A. J., Kapoor, L., Doss, C. G. P., Hofmann, T. A., Lawson, T. and Ramamoorthy, S.(2022). The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. Photosynthesis Research. 152(1): 23-42.

Slinkard, K. and Singleton, V. L. (1977). Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. American Journal of Enology and Viticulture. 28(1): 49-55.

Son, K. H. and Oh, M. M. (2013). Leaf shape growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. HortScience. 48: 988- 995.

Son, K. H., Lee, J. H., Oh, Y., Kim, D., Oh, M. M. and In, B. C. (2017). Growth and bioactive compound synthesis in cultivated lettuce subject to light-quality changes. HortScience. 52: 584–591.

Taiz, L. and Zieger, E. (2002). Plant Physiology. 5th Ed. Sinauer Associates.

Wang, P and Bernhard, G. (2021). "Connecting chlorophyll metabolism with accumulation of the photosynthetic apparatus."Trends in Plant Science. 26(5): 484-495.

Wu, M., Hou, C., Jiang, C., Wang, Y., Wang, C., Chen, H. and Chang, H. (2007) .A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings . Food Chemistry. 101: 1753-1758.

Xiao, Z., Lester, E., Luo, Y. and Wang, Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products:Edible microgreens. Journal Agriculture Food Chemistery, 60: 7644–765.

Zhang, X., Bian, Z., Yuan, X., Chen, X and Lu, C. (2020). A review on the effects of light emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. Trends Food Science Technology. 99: 203-216.

Zhang, Zhi. (2021). Effects of Maturity Stages and Growing Conditions on Phytochemical Profile and Antioxidant Ability of Brassica Vegetables. MS thesis. University of Maryland, College Park.

Zhao, J. L., Zou, L., Zhong, L. Y., Peng, L.X., Ying, P. L., Tan, M. L. and Zhao, G. (2015). Effects of polysaccharide elicitors from endophytic Bionectria pityrodes Fat6 on the growth and flavonoid production in tartary buckwheat sprout cultures. Cereal Res Commun. 43: 661–671.