

اثر کیفیت نور با منبع LED بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی گیاه نشخود گل آبی (*Clitoria ternatea*)

چکیده

به منظور بررسی اثر نور LED تکمیلی بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیتوشیمیایی نخود گل آبی، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۱ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل شاهد (بدون نور تکمیلی)، نور آبی تکمیلی، نور فرابنفش A تکمیلی، نور آبی + فرابنفش A با نسبت ۱:۱، نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A، نور فرابنفش A و به دنبال آن نور آبی بودند. نتایج نشان داد نور تکمیلی آبی و فرابنفش A به طور معنی‌داری ارتفاع بوته نخود گل آبی را کاهش داد. وزن تر و خشک اندام‌هوایی در تیمار تابش نور آبی بیشتر از سایر تیمارهای نور تکمیلی بود اما تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت. محتوای رنگرزه‌های فتوسنتزی با تابش نور تکمیلی آبی افزایش یافت و تابش نور آبی توانست محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئید را به ترتیب ۲/۳۹، ۲/۳۱ و ۳/۳۲ برابر افزایش دهد. نور LED آبی منجر به افزایش ۲/۸۴ و ۲/۳۹ برابری محتوای آنتوسیانین و فلاونوئید نسبت به نور خورشید شد. تغییرات محتوای فنل نشان داد تابش متناوب نور فرابنفش A سپس نور آبی منجر به افزایش ۲/۱۸ برابری محتوای فنل نسبت به شاهد شد. محتوای تانن گلبرگ با کاربرد نور آبی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و نور آبی محتوای تانن گلبرگ را نسبت به تیمارهای شاهد، تابش نور فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش A سپس نور آبی به ترتیب ۱/۶۳، ۱/۶۷ و ۱/۵۴ برابر افزایش داد. به طور کلی به نظر می‌رسد نور تکمیلی آبی منجر به بهبود خصوصیات کیفی نخود گل آبی می‌شود.

کلیدواژه‌ها:

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، آنتوسیانین، نور مصنوعی، نور LED آبی، نور LED فرابنفش.

Effect of LED light quality on the morphological and phytochemical characteristics of blue flower peas (*Clitoria Ternatea*)

ABSTRACT

In order to evaluate the effect of supplemental LED light on morphological and phytochemical characteristics of *Clitoria*, an experiment was conducted in 2023. The experimental treatments included the control (without supplemental light), supplemental blue light, supplemental UVA light, blue light + UVA with a ratio of 1:1, blue light followed by UVA, UVA light followed by blue light. The results showed that supplementary blue light and UVA significantly reduced the height of the blue pea. The fresh and dry weight of shoot in the blue light treatment was higher than other supplementary light treatments, but there was no significant difference with the control. The content of photosynthetic pigments increased with supplementary blue light irradiation, and blue light irradiation could increase the content of chlorophyll a, b and carotenoid by 2.39, 2.31 and 3.32 times, respectively. Blue LED light led to an increase of 2.84 and 2.39 times in the content of anthocyanin and flavonoid compared to sunlight. Changes in phenol content showed that alternating exposure to UVA then blue light led to a 18.2 fold increase in phenol content compared to the control. The activity of tannins increased significantly with blue light. Blue light increased the tannin content compared to the control, UVA light irradiation and alternating UVA then blue irradiation by 1.63, 1.67 and 1.54 times, respectively. In general, it seems that blue supplementary light leads to the improvement of the quality characteristics of *Clitoria*.

Keywords:

Anthocyanin, Antioxidant enzymes, Artificial light, Blue LED light, UVA LED light.

Extended Abstract

Introduction

Clitoria ternatea commonly known as Butterfly pea belonging to the Fabaceae family. This perennial plant is adapted to tropical regions of Asia and America. *Clitoria ternatea* commonly also called Clitoria, blue-pea, kordofan pea (Sudan), cunha (Brazil or pokindong (Philippines) is a vigorous, summer growing, legume of old world origin. It is characterised as a woody genus with showy, papilionaceous flowers, an infundibular calyx with persistent bracteoles, stipules and stalked ovaries.

Roots, seeds and leaves are medicinal organs of this plant. The major phytoconstituents found in *Clitoria ternatea* are the pentacyclic triterpenoids such as taraxerol and taraxerone. Phytochemical screening of the roots shows the presence of ternatins, alkaloids, flavonoids, saponins, tannins, carbohydrates, proteins, resins, starch, taraxerol and taraxerone. A wide range of secondary metabolites including triterpenoids, flavonol glycosides, anthocyanins and steroids has been isolated from *Clitoria ternatea* Linn. Four kaempferol glycosides I, II, III and IV were isolated from the leaves of *Clitoria ternatea* L. People use different species of *Clitoria* as a medicinal agent to enhance fertility, to control menstrual discharge, to treat gonorrhea and as a sexual stimulant.

To ensure optimal plant performance in crops, it is required to understand how growth and development are affected by environmental factors. Light is a key environmental factor that not only affects growth through photosynthesis, but also steers development. Blue light (400-500 nano meter) is effective in the stimulation of photomorphogenesis and adaptive phenomena such as the regulation of stoma opening/closing, as well as biomass accumulation and chlorophyll and anthocyanin biosynthesis. UVA (315-400 nano meter) is the main component of solar UV radiation reaching the Earth's surface. Although it shares photoreceptors with blue light, its function in plant biology is unclear to a large extent. The purpose of this research was investigating the effect of LED light quality on the morphological and phytochemical characteristics of blue flower peas.

Material and methods

In order to evaluate the effect of supplemental LED light on morphological and phytochemical characteristics of *Clitoria*, an experiment was conducted in 2023 at the greenhouse of the Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, University of Zabol. *Clitoria* seeds were purchased from the Bank Bazr Jonoub Company. Seeds were planted in one-kilogram plastic pots (mixture of sand: cow manure: garden soil in a ratio of 1:1:1). The pots were kept in greenhouse conditions including: average daily and night temperatures in the greenhouse were 27 and 18°C, with a light period of 16 hours and a dark period of 8 hours. Lighting treatments were applied as soon as flower buds began to form. The experimental treatments included the control (without supplemental light), supplemental blue light, supplemental UVA light, blue light + UVA with a ratio of 1:1, blue light followed by UVA, UVA light followed by blue light. The measured traits included plant height, number of flowers per plant, fresh weight and dry weight of flowers, fresh weight and dry weight of shoots, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, anthocyanin, phenol, flavonoid, tannin, and antioxidant capacity of petals.

Results and Discussion

The obtained results showed that supplementary blue light and UVA significantly reduced the height of the blue pea plant and led to the creation of more compact plants. The fresh and dry weight of shoot in the blue light treatment was higher than other supplementary light treatments, but there was no significant difference with the control. The content of photosynthetic pigments increased with supplementary blue light irradiation, and blue light irradiation could increase the content of chlorophyll a, b and carotenoid by 2.39, 2.31 and 3.32 times, respectively. Blue LED light led to an increase of 2.84 and 2.39 times in the content of anthocyanin and flavonoid compared to sunlight. Changes in phenol content showed that alternating exposure to UVA then blue light led to 18.20-time increase in phenol content compared to the control. The activity of tannins increased significantly with blue light. Blue light increased the tannin content compared to the control, UVA light irradiation and alternating UVA then blue irradiation by 1.63, 1.67 and 1.54 times, respectively.

Conclusion

According to the results, Changes in light quality led to changes in the morphological and biochemical characteristics of *Clitoria*. The use of blue LED light increased the quality of *Clitoria* flowers by increasing the content of photosynthetic pigments, anthocyanins, flavonoids, phenols, and antioxidant capacity.

Author Contributions

D. Ramezan, Z. Mohkami and Y. Farrokhzad conceived and planned the experiments. H. Noori carried out the experiments. Z. Mohkami and M. Rahimi analyzed data. D. Ramezan and H. Noori wrote the first manuscript. Y. Farrokhzad, M. Rahimi and Z. Mohkami contributed to the interpretation of the results. All authors provided critical feedback and helped shape the research, analysis and manuscript.

Data Availability

Statement Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the University of Zabol and Research Institute of Zabol, Iran for the financial and technical support of this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

نخود گل آبی که معمولاً با نام‌های نخود آبی، نخود گل پروانه‌ای و نخود داروین نیز شناخته می‌شود؛ گیاهی بومی جزیره ترنات در کشور اندونزی، مناطق جنوبی آسیا و آسیای جنوب شرقی است؛ اما در آفریقا، استرالیا و قاره آمریکا نیز کشت می‌شود (Vidana, 2021).

نخود گل آبی یا کلیتوریا (*Clitoria ternatea* L.) گیاهی علفی و چندساله از خانواده بقولات دارای طیف وسیعی از کاربردها به عنوان گیاهان زینتی، محصولات علوفه‌ای (برگ‌ها و غلاف‌ها به عنوان منبع پروتئین)، دارو (گل‌های خشک به عنوان چای حاوی آنتی-اکسیدان) و منابع رنگدانه‌های طبیعی و آنتی‌اکسیدان‌هاست. این گیاه نسبت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نسبتاً مقاوم است (Suarna & Wijaya, 2021). بارزترین ویژگی این گیاه رنگ گل‌هایش است و علت نام‌گذاری این گیاه به دلیل رنگ گل آن می‌باشد. رنگ‌های مختلف گل به طور معمول به دلیل ساختار شیمیایی انواع آنتوسیانین‌های سنتز شده در گل است. غلاف‌های سطح این گیاه به طور معمول به طول ۵-۷ سانتی‌متر بوده و ۱۰-۶ دانه در هر غلاف دیده می‌شود (Silalahi, 2021). نخود گل آبی از معدود بقولات علفی است که به خوبی با خاک‌های رسی سنگین در مناطق نیمه‌خشک سازگار شده است. نیاز نوری این گیاه بالاست و شدت نور بالا را ترجیح می‌دهد همچنین نیاز آبی گیاه تقریباً کم است (Suarna & Wijaya, 2021).

رنگرزه‌های آنتوسیانینی گیاه دارای خواص ضدویروسی، ضدالتهابی، ضد میکروبی، جلوگیری از دیابت، محافظت از سیستم قلبی-عروقی بوده و نیز گل نخود گل آبی با دارا بودن طیف وسیعی از ترکیبات گیاهی به عنوان یک داروی گیاهی کارآمد برای مبارزه با بیماری‌های عصبی نیز شناخته شده است (Harikrishnan, 2023). همچنین آنتوسیانین موجود در گل این گیاه به عنوان رنگ طبیعی در صنایع غذایی و آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این عصاره این گیاه در صنایع غذایی برای افزایش محتوای پلی فنل کاربرد دارد (Jiji & Muralidharan, 2020). رنگرزه‌های آنتوسیانینی موجود در گل نخود گل آبی از مهم‌ترین ترکیبات فیتوشیمیایی موجود در این گیاه می‌باشد؛ بنابراین ثبات رنگ و خواص آنتی‌اکسیدانی آن تحت تأثیر چندین پارامتر محیطی متفاوت از جمله نور، pH، رطوبت، کود، هوادهی خاک و دما است. با توجه به استانداردهای محیط زیستی و نگرانی‌ها پیرامون مسائل سلامتی‌بخش و سیاست افزایش تنوع زیستی کشورهای مختلف در پاسخ به واکنش‌های آلرژیک رنگ غذاهای مصنوعی، توجه به تهیه رنگرزه‌ی طبیعی از گل‌های نخود گل آبی می‌تواند دارای ارزش سلامتی‌بخش و بهداشتی باشد و به عنوان رنگ طبیعی مجاز به محصولات خوراکی اضافه شود (Jamil et al., 2018). بنابراین، با درک فواید فراوان نخود گل آبی برای انسان، بررسی خصوصیات فیتوشیمیایی این گیاه با تغییر عوامل محیطی برای بهبود کیفیت آن بسیار مهم است. بر همین اساس، تحقیق حاضر با هدف مهندسی نور محیطی به عنوان یک تیمار ارگانیک و افزایش خصوصیات کمی و کیفی گل این گیاه طراحی و اجرا شده است. نور از جنبه‌های مختلف مانند کیفیت، شدت و طول مدت نوردهی بر رشد و عملکرد گیاهان اثرگذار است. کیفیت نور می‌تواند تغییرات فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و فیتوشیمیایی متعددی را در گیاهان ایجاد کند. نور نه تنها منبع تأمین انرژی لازم برای فتوسنتز در گیاهان بوده بلکه در مراحل مختلف چرخه زندگی گیاه نقش کلیدی ایفا می‌کند (Zhao et al., 2020). تحقیقات اخیر بیانگر تجمع انواع آنتوسیانین و فلاونوئیدها تحت نورپردازی LED¹ بوده است (Liu et al., 2022) و در سال‌های اخیر کاربرد لامپ‌های LED مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این منابع نوری می‌توان به عدم تولید گرما، عمر بالا و تولید طیف‌های اختصاصی نور همانند نورهای آبی و قرمز اشاره کرد که از این طریق تحریک گیرنده‌های نوری خاص در گیاهان را امکان‌پذیر می‌سازد (رشیدی و همکاران، ۱۳۹۸). گزارش‌ها نشان می‌دهد نور LED آبی در بهبود کیفیت تغذیه‌ای گیاه نیز مفید است. به گونه‌ای که نور LED می‌تواند منجر به تحریک سطوح آنتی‌اکسیدانی نظیر افزایش ترکیبات فنلی (Rafeie et al., 2022)، اسید آسکوربیک (Zhuang et al., 2022)، کاروتنوئیدها، محتوای آنتوسیانین و رنگ برگ گیاهان (Kowalczyk et al., 2022) شود. با توجه به نقش مهم نور LED در تولید متابولیت‌های ثانویه مانند آنتوسیانین و فلاونوئید،

¹. Light Emitting Diode

هدف از این مطالعه بررسی اثرات طیف نور آبی و فرابنفش پیوسته، آبی و فرابنفش ضربان‌دار در مرحله گلدهی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی گیاه نخود گل آبی بوده است.

پیشینه پژوهش

مطالعات بسیار کمی در مورد اثر کیفیت نور با منابع LED بر پاسخ‌های رشدی و بیوشیمیایی نخود گل آبی در مقایسه با دیگر گونه‌ها انجام گرفته است. محققان اذعان نمودند که منبع نوری یک عامل ضروری در یاززایی شاخساره در کشت بافت دارد. در واقع استفاده از لامپ‌های LED ابزاری برای بهبود شاخه ریزازدیادی *Syngonium podophyllum* بود. به طوری که کاربرد نور بنفش بالاترین تعداد شاخه، قطر گل و نسبت وزن تر/ وزن خشک گردید. تابش نور سفید نیز منجر به بالاترین سطح برگ و طول ساقه شد؛ درحالی‌که نور آبی با تولید کوتاهترین طول ساقه همراه بود (Taghizadeh, 2025).

پژوهشگران با بررسی اثر نور LED بر رشد و غلظت آنتوسیانین کاهوی قرمز در شرایط هیدروپونیک گزارش کردند تیمار نور آبی منجر به تجمع بیشتر آنتوسیانین در مقایسه با سایر تیمارهای نوری شد و نور قرمز سبب افزایش رشد و زیست توده کاهو گردید (Bunghthong & Lapjit, 2020). مقایسه اثر نور سفید، آبی، قرمز و ماورای بنفش بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای آنتوسیانین مارچوبه (*Asparagus officinalis*) نشان داد در تیمار نور آبی بیشترین محتوای آنتوسیانین مشاهده شد و بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تابش نور سفید به دست آمد (Huyskens-Keil et al., 2021). در آزمایشی دیگر ترکیب نور LED آبی و قرمز در مقایسه با ۱۰۰ درصد نور قرمز میزان آنتوسیانین برگ کاهو را ۴۳ درصد افزایش داد (Nagano et al., 2022). افزایش محتوای آنتوسیانین در شرایط نور تکمیلی آبی در سبزیجات مختلف مانند گوجه‌فرنگی (Kim et al., 2021) و ریحان (*Ocimum basilicum*) (Lin et al., 2021) نیز گزارش شده است. قابلیت فناوری فعلی LED گزینش طیف و شدت نور مناسب در طول موج‌های خاص از ناحیه فرابنفش تا فروسرخ را امکان‌پذیر نموده که این امر می‌تواند سبب افزایش محتوای کارتنوئید در سبزیجات گلخانه‌ای و در محیط‌های سرپسته گردد (Wargent, 2016). بررسی اثر دیودهای ساطع‌کننده نور UV_A بر محتوای آسکوربیک اسید اسفناج نشان داد محتوای ویتامین C در برگ‌های تیمار شده با نور فرابنفش به میزان ۲۶ درصد بیشتر از شاهد (نور مرئی) گزارش شد (Park et al., 2019). محققان گزارش کردند افزودن نور UV_A به نور آبی و قرمز به‌طور معنی‌داری موجب تحریک رشد برگ کاهو و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تولید متابولیت‌های ثانویه شد (Chen et al., 2019). بررسی‌ها نشان داد کاربرد نور UV_A در گوجه‌فرنگی موجب افزایش ۱۸ درصدی وزن خشک اندام هوایی و افزایش ۲۱ درصدی سطح برگ در مقایسه با نور قرمز گردید (Zhang et al., 2020). محققان افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، پراکسیداز، فنیل آلانین آمونیلایز و محتوای آنتوسیانین را در شرایط نور UV_A در کلم برگ گزارش کردند (Lee et al., 2019).

روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زابل انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل منابع مختلف نور LED به صورت زیر بود: (۱) شاهد (بدون نور تکمیلی)، (۲) نور آبی (۴۷۰-۴۴۰ نانومتر)، (۳) نور فرابنفش A (۳۶۰-۴۰۰ نانومتر)، (۴) نور آبی + نور فرابنفش A با نسبت ۱:۵، (۵) نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A، (۶) نور فرابنفش A و به دنبال آن نور آبی. در تیمار ۲، ۳ و ۴ اثر تابش دو ساعته و در تیمار ۵ و ۶ (تیمارهای نوری متناوب) اثر هر طیف به میزان یک ساعت (در مجموع دو ساعت) همزمان با طلوع خورشید اجرا و مورد بررسی قرار گرفت. شدت نور تکمیلی هر یک از تیمارها ۱۵ میکرومول بر متر مربع در ثانیه بود که به پس زمینه نور خورشید در ساعت ۷ صبح اضافه شد. با احتساب نور تکمیلی اضافه شده به نور خورشید در طی آزمایش،

انتگرال نور روزانه 40 ± 5 میکرومول بر متر مربع بر ثانیه بود. بذور نخود گل آبی رقم Blue Sail از شرکت بانک بذر جنوب تهیه شد. قبل از انجام آزمایش به منظور تعیین بافت و خصوصیات فیزیکوشیمیایی از خاک نمونه برداری شد (جدول ۱). به منظور ضد عفونی و استریل کردن بذرها، ابتدا بذور با مایع ظرف شویی آغشته و سه بار با آب مقطر شست و شو شدند. در نهایت بذرها با قارچ کش بنومیل به میزان ۲ گرم در یک لیتر آب به مدت ۴۵ دقیقه ضد عفونی شدند. در آذر ماه سال ۱۴۰۰ بذور نخود گل آبی در کیسه های پلاستیکی یک کیلو گرمی (مخلوط ماسه بادی، کود دامی پوسیده و خاک باغچه با نسبت ۱:۱:۱) در عمق یک سانتی متری کشت و در فروردین ماه سال ۱۴۰۱، به گلدان های اصلی منتقل شدند. واحدهای آزمایشی شامل گلدان های با قطر ۲۵ و ارتفاع ۳۵ سانتی متر بودند که با پنج کیلو گرم خاک (مخلوط کوکوپیت، پرلیت و خاک باغچه با نسبت ۱:۱:۱) پر و **یک عدد نشاء در هر گلدان کشت شد. این آزمایش با ۶ تیمار در سه تکرار و سه گلدان برای هر تکرار انجام شد.** میانگین دمای روزانه و شبانه در گلخانه ۲۷ و ۱۸ درجه سانتی گراد با طول دوره روشنائی ۱۶ ساعت و دوره تاریکی ۸ ساعت بود. اعمال تیمارهای روشنائی به محض شروع تشکیل غنچه های گل و هنگام طلوع خورشید انجام شد. جهت تکمیل نور خورشید از لامپ LED آبی رنگ و لامپ LED فرابنفش A استفاده شد. **اعمال تیمارهای نور تکمیلی تا پایان فصل رشد ادامه یافت.** آبیاری گلدان ها در طی فصل رشد با توجه به ظرفیت زراعی گلدان تنظیم شد. بدین صورت که هر ۲-۵ روز یک بار بسته به شرایط فصل رشد و شدت تبخیر، آبیاری انجام گرفت. **گیاهان در طول دوره کشت در گلدان، به طور منظم با محلول غذایی متعادل تغذیه شدند.** این محلول شامل ترکیبی از عناصر پر مصرف مانند نیتروژن (به صورت نترات کلسیم)، فسفر (از مونوپتاسیم فسفات)، و پتاسیم (از سولفات پتاسیم) و همچنین عناصر کم مصرف (شامل آهن، منگنز، روی، مس، بور و مولیبدن) بود که بر اساس فرمول عمومی هوگلدن و با هدایت الکتریکی (EC) حدود $1/5 - 1/2$ dS/m تهیه گردید. تغذیه هر ۷ روز یک بار همراه با آبیاری انجام شد تا از بروز تنش تغذیه ای جلوگیری شود و رشد یکنواخت گیاهان تضمین گردد. دو هفته پس از شروع تیمار نوردهی، نمونه برداری انجام و گل ها برداشت شد. نمونه های برداشت شده بلافاصله در ازت مایع قرار داده شد و به فریزر با دمای -80°C درجه سانتی گراد جهت انجام آنالیزهای بیوشیمیایی منتقل گردید.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده

EC	pH	نیتروژن (%)	فسفر (%)	پتاسیم (%)	سیلیت (%)	رس (%)	شن (%)	بافت خاک
۴/۳۳	۷/۵۱	۰/۱۲	۱۲	۶۴۹	۱۱	۹	۸۰	شنی لومی

صفات مورفولوژیکی و عملکرد

یک ماه بعد از شروع اعمال تیمار روشنائی، ارتفاع بوته از سطح خاک تا انتهای ساقه به صورت غیر تخریبی با استفاده از خط کش و بر حسب سانتی متر اندازه گیری شد همچنین یک ماه بعد از شروع اعمال تیمار روشنائی تعداد گل در هر بوته شمارش و ثبت شد. در زمان برداشت پس از جداسازی گل، وزن تر با ترازوی دیجیتال (دقت $0/001$ گرم) ثبت شد. سپس وزن خشک گل ثبت گردید. پس از برداشت گل، بوته ها از محل طوقه قطع شده و به آزمایشگاه انتقال یافت. هر یک از بوته ها به دو قسمت اندام هوایی و ریشه تقسیم و بلافاصله با ترازوی دیجیتال با دقت $0/001$ گرم توزین و وزن تر ریشه و اندام هوایی ثبت شد. سپس بخش های جداسازی شده در پاکت کاغذی قرار گرفت، نام گذاری شد و به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای 65°C درجه سانتی گراد قرار گرفت. پس از گذشت این مدت زمان، وزن خشک ریشه و اندام هوایی به وسیله ترازوی دیجیتال با دقت $0/001$ گرم اندازه گیری و ثبت شد.

صفات بیوشیمیایی

رنگرزه‌های فتوستنزی

۰/۱ گرم برگ تازه در هاون چینی با ازت مایع کاملاً پودر شده و با ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ درصد مخلوط گردید و جهت تجزیه کامل کلروفیل به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار گرفت. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۶، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. برای محاسبه میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید بر حسب میلی گرم در گرم وزن تر برگ از روابط زیر استفاده شد (Arnon, 1974).

$$Chla \text{ (mg / g FW)} = 12 \cdot 21 A663 - 2 \cdot 81 A 646 \quad \text{رابطه ۱)}$$

$$Chlb \text{ (mg / g FW)} = 20 \cdot 13 A646 - 5 \cdot 03 A663 \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$Car \text{ (mg / g FW)} = (1000 A470 - 3 \cdot 27 Chla - 140 Chlb) / 198 \quad \text{رابطه ۳)}$$

در این روابط، Chla کلروفیل a، Chlb کلروفیل b، Car کاروتنوئید و A، میزان جذب قرائت شده در هر طول موج می‌باشد.

آنتوسیانین کل گلبرگ

ابتدا مقدار یک گرم از بافت تازه گلبرگ برداشته و در ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی به طور کامل خرد و هموژن گردید. سپس عصاره استخراج حاصل با سرعت ۴۰۰۰ دور به مدت پنج دقیقه سانتریفیوژ شد و سوپرناتانت روئی به مدت یک شبانه روز در تاریکی و در یخچال قرار گرفت. پس از گذشت زمان مورد نظر، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و در نهایت میزان جذب محلول بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) قرائت شد. در نهایت با استفاده از فرمول‌های زیر غلظت آنتوسیانین کل گلبرگ محاسبه گردید (Wanger, 1979).

$$A = \varepsilon \times C \times L \quad \text{رابطه ۴)}$$

$$C = \frac{A}{\varepsilon} \times L \quad \text{رابطه ۵)}$$

در این روابط، A میزان جذب، ε ضریب خاموشی (۳۳۰۰۰ مول بر سانتی‌متر)، C غلظت آنتوسیانین بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر گلبرگ و L عرض کووت (یک سانتی‌متر) است.

اسید آسکوربیک گلبرگ

غلظت اسید آسکوربیک (ویتامین ث) گلبرگ بر اساس کاهش رنگ ترکیب دی کلروفل ایندو فنول^۱ توسط اسید آسکوربیک اندازه‌گیری شد. بدین صورت که ابتدا یک میلی گرم گل با سه میلی لیتر اسید متافسفربیک یک درصد به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط و عصاره استخراج به دست آمد. سپس عصاره با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس ۵۰ میکرولیتر از مایع رویی برداشته و به آن ۲۰۰ میکرولیتر DCPIP اضافه شد. میزان جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید. غلظت اسید آسکوربیک با استفاده از خط درجه‌بندی تهیه شده از غلظت‌های

^۱ 2,6-Dichlorophenolindophenol (DCPIP)

مختلف اسید آسکوربیک (۶/۲۵، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) در حضور DCPIP محاسبه گردید و بر حسب میلی گرم بر گرم وزن تر گزارش شد (Chang et al., 2002).

فلاونوئید کل گلبرگ

به یک گرم گل خشک ۷۰ میلی لیتر متانول ۷۰ درصد اضافه شد و پس از قرارگیری بر روی دستگاه شیکر با شدت ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت، توسط دستگاه سانتیفیوژ به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۶۰۰۰ سانتیفیوژ شد. در نهایت از کاغذ صافی واتمن عبور داده شد و به عنوان عصاره استخراج مورد استفاده قرار گرفت. محتوای فلاونوئید کل با روش رنگ سنجی آلومینیوم کلرید تعیین شد. بدین صورت که به ۰/۵ میلی لیتر عصاره متانولی تهیه شده برای اندازه گیری فعالیت آنتی اکسیدانی گلبرگ، ۱/۵ میلی لیتر متانول، ۰/۱ میلی لیتر محلول دو درصد آلومینیوم کلرید، ۰/۱ میلی لیتر محلول پتاسیم استات یک مولار و ۱/۷ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد. پس از ۴۰ دقیقه نگهداری در دمای محیط، جذب نمونه ها در طول موج ۴۵۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) قرائت گردید (Quettierdeleu et al., 2000). جهت رسم منحنی استاندارد از غلظت های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر استاندارد کوئرستین استفاده شد. محتوای فلاونوئید کل گلبرگ بر حسب میلی گرم بر گرم وزن خشک گزارش شد.

فنل کل گلبرگ

اندازه گیری فنل کل با استفاده از معرف فولین سیوکالچو انجام شد. بدین منظور ۴۰ میکرولیتر از عصاره تهیه شده گلبرگ با ۱/۶ میلی لیتر آب مقطر مخلوط و ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین به محلول اضافه شد. پس از گذشت مدت زمان پنج دقیقه ۳۰۰ میکرولیتر محلول سدیم کربنات ۲۰ درصد به محلول اضافه شد. سپس نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در بن ماری با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. در نهایت جذب نمونه ها با دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت گردید (Ozarowski et al., 2017). برای رسم منحنی کالیبراسیون از غلظت های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر گالیک اسید در متانول ۸۰ درصد استفاده شد. محتوای فنل کل گلبرگ بر حسب میلی گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک گزارش شد.

ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ

ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ با روش ارزیابی میزان مهار رادیکال های DPPH¹ سنجش شد. بدین صورت که سه میلی لیتر عصاره استخراج درون لوله آزمایش ریخته و یک میلی لیتر محلول متانولی DPPH (با غلظت ۰/۱ میلی مولار) به هر لوله آزمایش اضافه شد و مخلوط حاصله به شدت شیکر گردید. سپس لوله های آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق و تاریکی قرار گرفتند. پس از گذشت ۳۰ دقیقه، میزان جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) قرائت شد. درصد مهار رادیکال های آزاد بر حسب درصد با فرمول زیر محاسبه شد (Kedare & Sing, 2011):

$$DPPH = AC - AS / AS \times 100$$

رابطه ۶)

در این رابطه، Ac و As به ترتیب میزان جذب شاهد و جذب نمونه می باشند.

¹. 1,1-Diphenyl-2-picryl- hydrazyl

نان گلبرگ

محتوای تانن‌های محلول گلبرگ به صورت رنگ‌سنجی توسط معرف فولین دنیس اندازه‌گیری شد. بدین صورت که ابتدا ۱ گرم گل خشک با ۷۰ میلی‌لیتر متانول ۷۰ درصد خوب ساییده و هموژن گردید. سپس عصاره استخراج به دست آمده با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه سانتی‌فیوژ شد. مخلوط واکنش برای اندازه‌گیری محتوای تانن شامل ۰/۱ گرم PVP، یک میلی‌لیتر عصاره استخراج و یک میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۵ دقیقه با شدت ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتی‌فیوژ شد و محلول شفاف رویی جدا گردید. سپس جذب مخلوط واکنش در طول موج ۷۲۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Unic, UV, 2100) قرائت شد و میزان تانن با استفاده از منحنی استاندارد اسید تانیک برآورد گردید و بر حسب میلی‌گرم بر گرم ماده خشک گزارش شد (Makker et al., 1993).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ انجام شد. رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel 2019 انجام گرفت.

یافته‌های پژوهش

ارتفاع بوته

اثر منابع مختلف نور LED بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد بیشترین و کمترین ارتفاع بوته به ترتیب در تیمار شاهد (۳۳۶/۶۷ سانتی‌متر) و کاربرد نور فرابنفش A (۱۸۶/۶۷ سانتی‌متر) به دست آمد. تابش نور LED منجر به کاهش ارتفاع بوته شد. به نحوی که کاربرد نور آبی، نور آبی + فرابنفش A، نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A به ترتیب سبب کاهش ۱۴/۱۴، ۲۹/۳۰ و ۴۴/۵۵ درصدی ارتفاع بوته نسبت به تابش نور خورشید (شاهد) شد. تابش نور فرابنفش A نیز کاهش ۴۴/۵۵ درصدی ارتفاع بوته در مقایسه با شاهد را به دنبال داشت (شکل ۱، تصویر a).

تعداد گل در بوته

اثر منابع مختلف نور تکمیلی بر تعداد گل بوته در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). تابش نور تکمیلی موجب افزایش تعداد گل در بوته نخود گل آبی شد. بیشترین تعداد گل در بوته در تیمار تابش متناوب نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A (۲۹/۶۶) به دست آمد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمار کاربرد نور تکمیلی آبی (۲۷/۶۶) بود. کمترین تعداد گل در بوته (۱۵/۶۶) نیز در شرایط تابش نور خورشید (شاهد) مشاهده شد (شکل ۱، تصویر b). تابش متناوب نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A توانست تعداد گل در بوته را در مقایسه با شاهد، ترکیب نور آبی و فرابنفش A با نسبت ۱:۱، نور فرابنفش A و به دنبال آن نور آبی به ترتیب ۲۰/۲۷، ۵۸/۹۴ و ۵۰/۸۶ درصد افزایش دهد. همچنین تیمار تابش متناوب نور آبی و فرابنفش A نسبت به کاربرد نور فرابنفش A تعداد گل در بوته را ۸۹/۳۹ درصد افزایش داد (شکل ۱، تصویر b).

وزن تر گل

اثر منابع مختلف نور تکمیلی بر وزن تر گل‌ها در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج حاکی از آن بود که بیشترین وزن تر گل در تیمار تابش نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A (۵۵/۱۳ گرم در بوته) به دست آمد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمارهای شاهد (۴۳/۷۴ گرم در بوته) و تابش نور آبی (۴۲/۷۷ گرم در بوته) بود. کمترین وزن تر گل نیز در تیمار تابش نور

فرابنفش A (۱۹/۶۰ گرم در بوته) به دست آمد (شکل ۱، تصویر c). تابش نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A منجر به افزایش ۲۰/۸۱ برابری وزن تر گل نسبت به تیمار تابش نور فرابنفش A و افزایش ۱/۵۵ برابری وزن تر گل نسبت به تیمار تابش همزمان نور آبی و نور فرابنفش A شد (شکل ۱، تصویر c). بیشتر بودن تعداد گل‌های تولید شده در تیمار تابش متناوب نور آبی و سپس نور فرابنفش A منجر به افزایش وزن تر گل در بوته در این تیمار نیز شده است (شکل ۱، تصویر b و c).

وزن خشک گل

اثر منابع مختلف نور LED بر وزن خشک گل‌ها در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج به‌دست آمده نشان داد بیشترین وزن خشک گل (۲۰/۷۶ گرم در بوته) در تیمار نور آبی مشاهده شد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمارهای تابش متناوب نور فرابنفش A و سپس نور آبی (۱۹/۸۱ گرم در بوته) و شاهد (۱۷/۳۹ گرم در بوته) بود. همچنین کمترین وزن خشک گل نیز در تیمار نور فرابنفش A (۸/۸۱ گرم در بوته) مشاهده شد که با تیمارهای تابش همزمان نور آبی و فرابنفش A (۱۲/۹۱ گرم در بوته) و تابش متناوب نور فرابنفش A و به دنبال آن نور آبی (۱۲/۰۰) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱). تابش نور آبی نسبت به تابش نور فرابنفش A توانست وزن خشک گل را ۲/۳۵ برابر افزایش دهد. همچنین تابش متناوب نور آبی و سپس فرابنفش A منجر به افزایش ۲/۲۴ برابری وزن خشک گل نسبت به تابش نور فرابنفش A شد (شکل ۱، تصویر d).

وزن تر اندام هوایی

اثر منابع مختلف نور LED بر وزن تر اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد بیشترین وزن تر اندام هوایی در تیمار تابش نور آبی به دست آمد که با تیمار تابش نور خورشید (شاهد) در یک گروه آماری قرار گرفتند و اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند. کمترین وزن تر اندام هوایی نیز در تیمار تابش متناوب نور فرابنفش A و سپس نور آبی مشاهده شد که با تیمارهای تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش، تابش همزمان نور آبی و فرابنفش A و تابش نور فرابنفش A به‌تنهایی اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱، تصویر e). تابش نور آبی توانست وزن تر اندام هوایی را نسبت به تیمار تابش نور فرابنفش A ۴۳/۳۷ درصد افزایش دهد. همچنین تیمار نور آبی منجر به افزایش ۳۶/۰۳ درصدی وزن تر اندام هوایی نسبت به تابش متناوب نور آبی و سپس نور فرابنفش A شد (شکل ۱، تصویر e).

وزن خشک اندام هوایی

روند تغییرات وزن خشک اندام هوایی در تیمارهای مختلف نوری مشابه با وزن تغییرات وزن تر اندام هوایی بود. بدین صورت که بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار تابش نور آبی (۳۰۴/۳۳ گرم در بوته) به دست آمد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمار شاهد (۲۷۹/۰۰ گرم در بوته) بود. کمترین وزن خشک اندام هوایی نیز در تیمار تابش نور فرابنفش A (۲۰۹/۴۳ گرم در بوته) به‌دست آمد که با تیمارهای تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش (۲۸۴/۶۷ گرم در بوته)، تابش همزمان نور آبی و فرابنفش A (۲۵۴/۳۳ گرم در بوته) و تابش متناوب نور فرابنفش سپس نور آبی (۲۲۶/۶۵ گرم در بوته) در یک گروه آماری قرار گرفته و اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۱، تصویر f). تابش نور آبی توانست وزن خشک اندام هوایی را نسبت به تیمارهای تابش نور

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر منابع نور LED بر صفات مورفولوژیکی نخود گل آبی

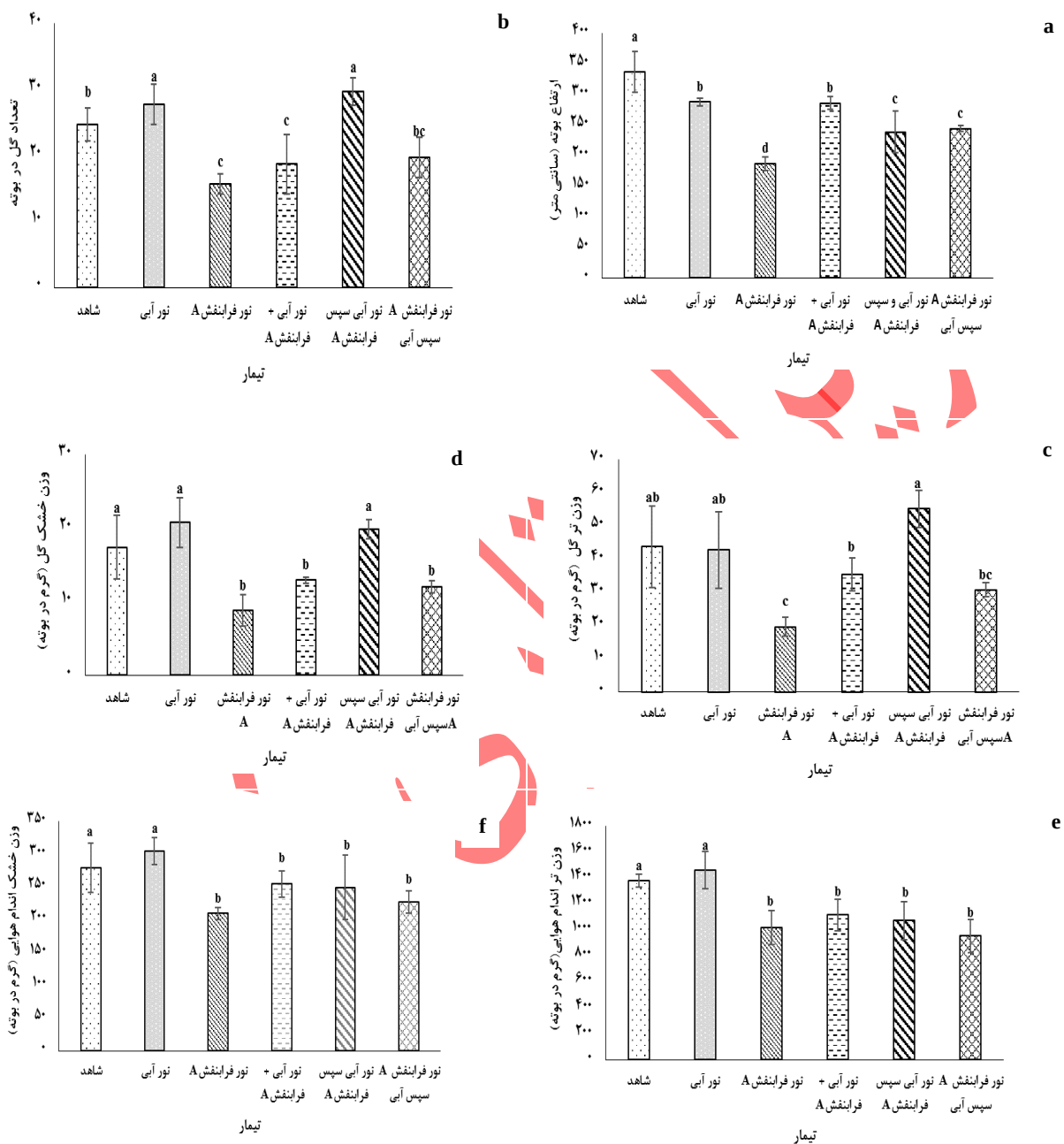
میانگین مربعات						
منبع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	تعداد گل در بوته	وزن تر گل	وزن خشک گل	وزن خشک اندام هوایی
تیمار	۵	۸۰۰۷/۲۵***	۹۱/۲۰***	۴۴۰/۳۱***	۶۴/۶۷***	۱۱۶۱۱۸/۱۶***
خطای آزمایشی	۱۲	۴۳۳/۳۸	۸/۶۶	۵۸/۴۵	۶/۲۶	۱۵۳۵۷/۸۸
ضریب تغییرات	-	۷/۹۱	۱۲/۹۸	۲۰/۱۳	۱۶/۲۰	۱۰/۵۰

NS غیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر منابع نور LED بر صفات فیتوشیمیایی نخود گل آبی

میانگین مربعات						
منبع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	آنتوسیانین کل گلبرگ	اسید اسکوربیک گلبرگ
تیمار	۵	۵۳/۰۳***	۱۶/۴۳***	۶/۹۴***	۲/۱۳***	۳۹۹۴/۸۱*
خطای آزمایشی	۱۲	۱/۲۰	۱/۳۱	۰/۴۰	۰/۲۰	۱۱۳۰/۵۰
ضریب تغییرات	-	۸/۲۳	۱۶/۴۳	۱۶/۱۹	۲۱/۸۵	۱۵/۲۷

NS غیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد



شکل ۱. اثر منابع نور LED بر ارتفاع بوته (a)، تعداد گل در بوته (b)، وزن تر گل (c)، وزن خشک گل (d)، وزن تر اندام هوایی (e) و وزن خشک اندام هوایی (f) در گیاه نخود گل آبی

میانگین‌های با حروف مشابه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($LSD \leq 5\%$).

فرابنفش A، تابش همزمان نور آبی + فرابنفش، تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش و تابش متناوب نور فرابنفش سپس آبی به ترتیب ۴۵/۳۱، ۱۹/۶۵، ۲۲/۳۸ و ۳۴/۲۷ درصد افزایش دهد (شکل ۱، تصویر f). با این حال وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار نور آبی نسبت به سایر تیمارهای نور تکمیلی به طور معنی داری بیشتر بود.

کلروفیل a

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی دار بود (جدول ۳).

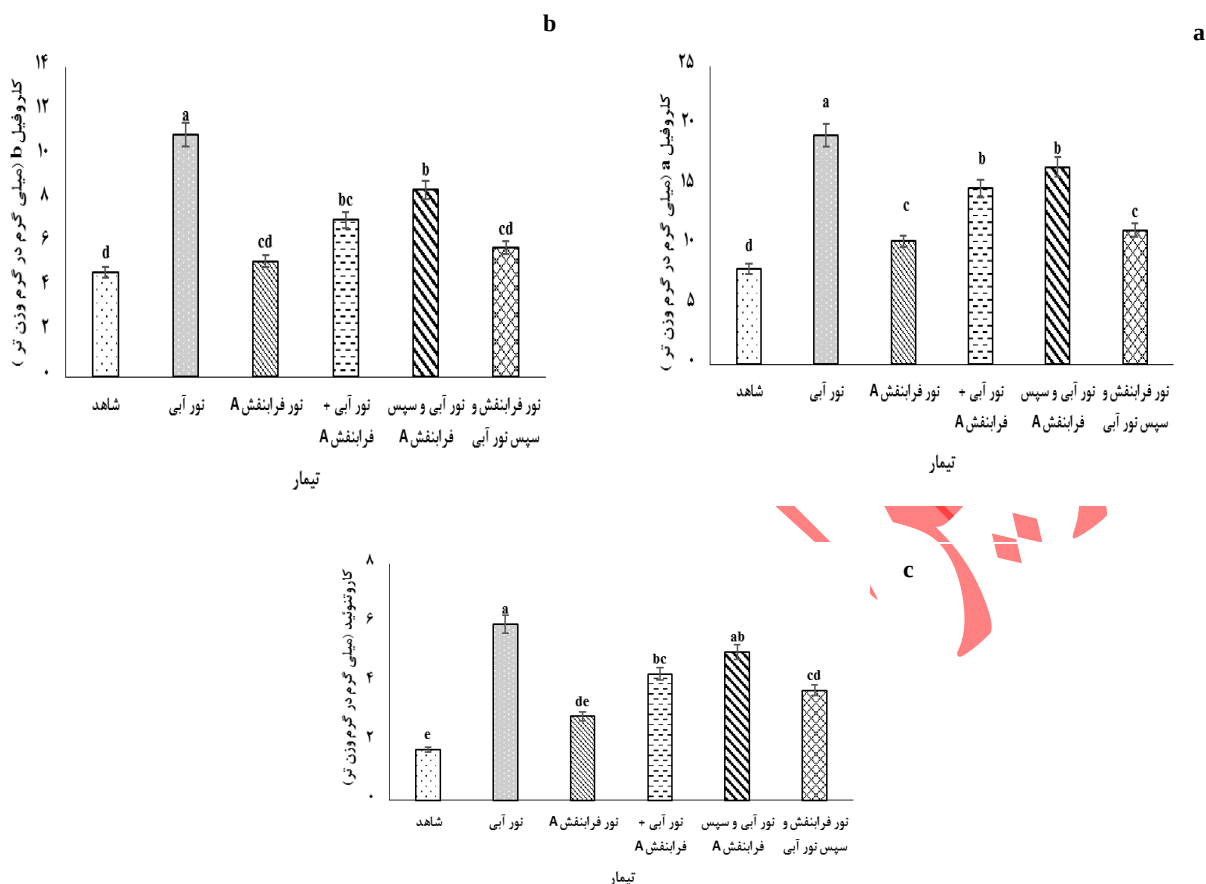
میزان کلروفیل a تحت تاثیر کیفیت نور قرار گرفت؛ بدین صورت که تابش نور آبی و فرابنفش A منجر به افزایش محتوای کلروفیل نسبت به شاهد شد. بیشترین و کمترین میزان کلروفیل a به ترتیب در تیمارهای کاربرد نور آبی (۱۹/۲۱ میلی گرم در گرم وزن تر) و شاهد (۸/۰۲ میلی گرم در گرم وزن تر) به دست آمد. تابش نور آبی توانست میزان کلروفیل a موجود در برگ نخود گل آبی را در مقایسه با نور خورشید ۲/۳۹ برابر افزایش دهد. همچنین نور آبی منجر به افزایش ۱/۸۶، ۱/۳۰، ۱/۱۶ و ۱/۷۰ برابری محتوای کلروفیل a نسبت به نور فرابنفش A، تابش همزمان نور آبی + فرابنفش A، تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش A سپس نور آبی شد (شکل ۲، تصویر a).

کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای کلروفیل b در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی دار بود (جدول ۳). روند تغییرات محتوای کلروفیل b تقریباً مشابه با کلروفیل a بود. بدین ترتیب که بیشترین محتوای کلروفیل b در شرایط تابش نور آبی (۱۰/۹۵ میلی گرم در گرم وزن تر) و کمترین محتوای کلروفیل b در تیمار شاهد (۴/۷۲ میلی گرم در گرم وزن تر) به دست آمد. تابش نور آبی محتوای کلروفیل b موجود در برگ نخود گل آبی را در مقایسه با شاهد ۲/۳۱ برابر افزایش داد. همچنین نور آبی منجر به افزایش ۲/۰۸، ۱/۵۴، ۱/۲۹ و ۱/۸۷ برابری محتوای کلروفیل b نسبت به نور فرابنفش A، تابش همزمان نور آبی + فرابنفش A، تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش A سپس آبی شد (شکل ۲، تصویر b).

کاروتنوئید

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد بیشترین محتوای کاروتنوئید برگ در تیمار تابش نور آبی (۵/۹۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد. کمترین میزان کاروتنوئید نیز در تیمار شاهد (۱/۷۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد که اختلاف معنی داری با تیمار تابش نور فرابنفش A (۲/۸۴ میلی گرم بر گرم وزن تر) نداشت. تابش نور آبی توانست منجر به افزایش ۳/۳۲، ۲/۴۰، ۱/۳۹، ۱/۱۸ و ۱/۶۰ برابری محتوای کاروتنوئید نسبت به نور خورشید، نور فرابنفش A، تابش همزمان نور آبی + فرابنفش A، تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش A سپس نور آبی شود (شکل ۲، تصویر c).



شکل ۲. اثر منابع نور LED بر کلروفیل a (a)، کلروفیل b (b) و کاروتنوئید (c) در گیاه نخود گل آبی میانگین‌های با حروف مشابه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($LSD \leq 5\%$).

محتوای آنتوسیانین کل گلبرگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای آنتوسیانین در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد کاربرد نور تکمیلی منجر به افزایش محتوای آنتوسیانین کل گلبرگ شد. بیشترین میزان آنتوسیانین کل گلبرگ (۳/۳۶ میکرومول در گرم وزن تر) در تیمار تابش نور آبی به‌دست آمد. کمترین محتوای آنتوسیانین کل گلبرگ نیز در تیمار شاهد (۱/۱۹ میکرومول در گرم وزن تر) به‌دست آمد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمارهای تابش نور فرابنفش A (۱/۳۰ میکرومول در گرم وزن تر) و تابش متناوب نور فرابنفش A سپس نور آبی (۱/۷۰ میکرومول در گرم وزن تر) بود. تابش نور آبی توانست محتوای آنتوسیانین کل گلبرگ را نسبت به شاهد و تابش نور فرابنفش A به‌ترتیب ۲/۸۴ و ۲/۵۸ برابر افزایش دهد (شکل ۳، تصویر a).

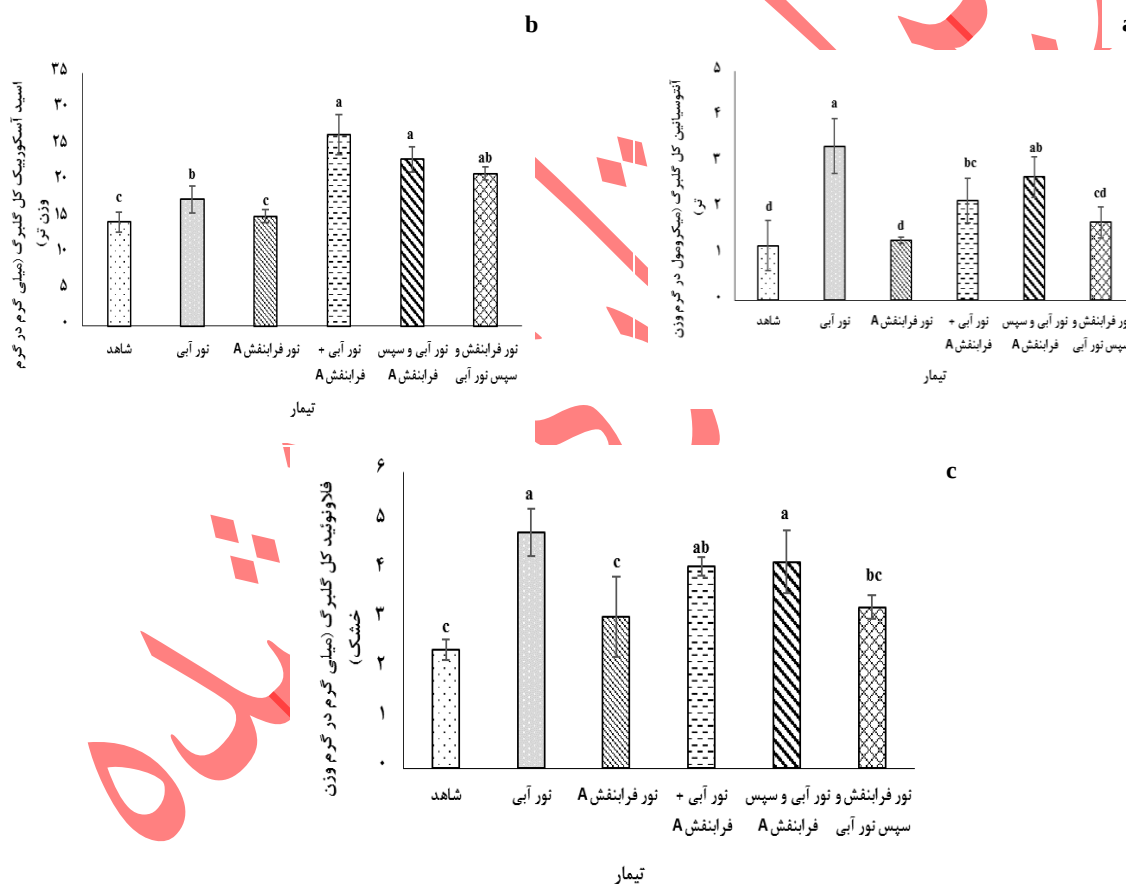
محتوای اسید آسکوربیک کل گلبرگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای اسید آسکوربیک گلبرگ در سطح احتمال پنج درصد ($p \leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد تیمار تابش همزمان نور آبی و فرابنفش A بالاترین محتوای اسید آسکوربیک را به خود اختصاص داد. هر چند این تیمار فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمارهای تابش متناوب نور آبی و فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش A و آبی بود.

تیمارهای شاهد و تابش نور فرابنفش A نیز کمترین محتوای اسید آسکوربیک را به خود اختصاص دادند. در شرایط تابش همزمان نور آبی و فرابنفش A محتوای اسید آسکوربیک کل گلبرگ نسبت به شاهد ۸۴/۰۲ درصد افزایش یافت (شکل ۳، تصویر b).

محتوای فلاونوئید کل گلبرگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای فلاونوئیدی گلبرگ در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد تابش نور آبی بیشترین محتوای فلاونوئید کل را به خود اختصاص داد. هر چند این تیمار اختلاف معنی‌داری با تیمار تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش A نداشت. کمترین میزان فلاونوئید کل در تیمار شاهد مشاهده شد که فاقد اختلاف معنی‌دار با تیمار تابش نور فرابنفش A بود. نور تکمیلی آبی توانست محتوای فلاونوئید کل را نسبت به شاهد، نور فرابنفش A و تابش متناوب نور فرابنفش و سپس نور آبی به ترتیب ۹۹/۱۶، ۵۶/۲۰ و ۴۶/۶۲ درصد افزایش دهد (شکل ۳، تصویر c).



شکل ۳. اثر منابع نور LED بر آنتوسیانین کل گلبرگ (a)، اسید آسکوربیک کل گلبرگ (b) و فلاونوئید کل گلبرگ (c) در گیاه نخود گل آبی میانگین‌های با حروف مشابه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($LSD \leq 5\%$).

محتوای فنل کل گلبرگ

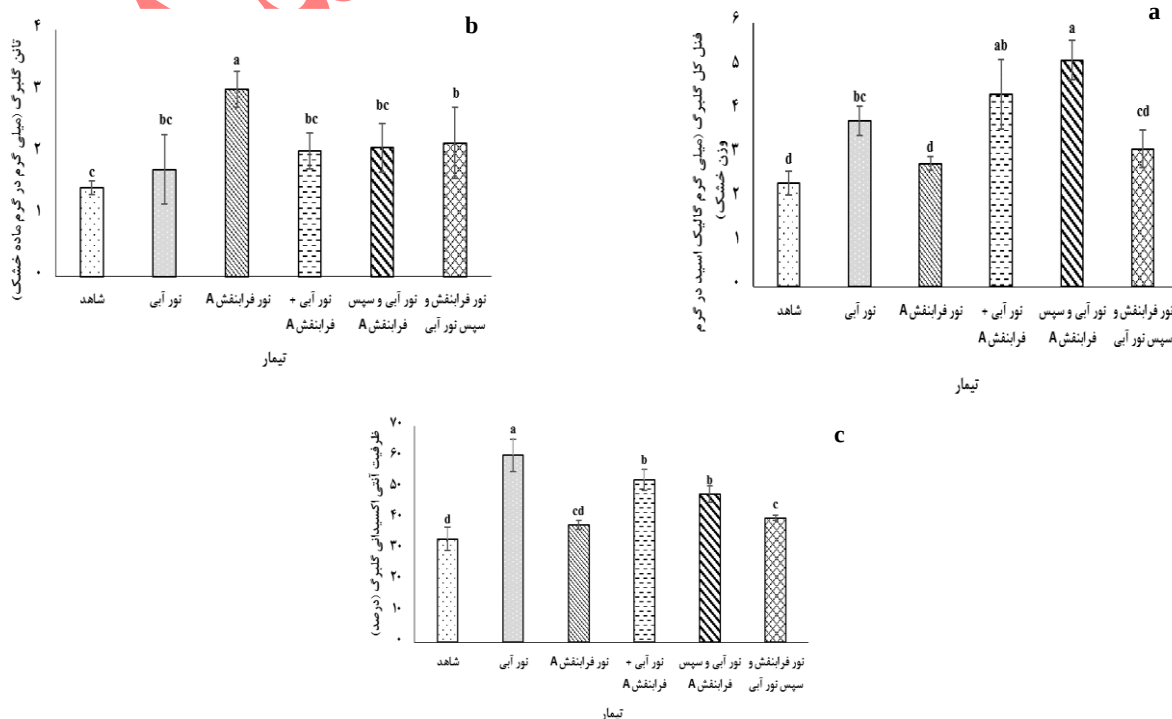
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر فنل کل در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد تابش متناوب نور آبی سپس نور فرابنفش A بیشترین میزان فنل برگ را به خود اختصاص داد. هر چند بین این تیمار و تیمار تابش همزمان نور آبی و فرابنفش اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در تیمارهای شاهد و تابش نور فرابنفش A کمترین میزان فنل مشاهده شد. تابش متناوب نور آبی و به دنبال آن نور فرابنفش A توانست محتوای فنل کل گلبرگ را نسبت به شاهد و نور فرابنفش A به میزان ۲/۱۸ و ۱/۳۶ برابر افزایش دهد (شکل ۴، تصویر a).

محتوای تانن گلبرگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر محتوای تانن در سطح احتمال پنج درصد ($p \leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد بیشترین میزان تانن در شرایط تابش نور فرابنفش A (۳/۰۴ میلی گرم در گرم ماده خشک) مشاهده شد. اضافه شدن نور آبی به فرابنفش محتوای تانن را کاهش داد. کمترین محتوای تانن گلبرگ در شرایط تابش نور خورشید (۱/۴۴ میلی گرم در گرم ماده خشک) به دست آمد. تابش نور فرابنفش A منجر به افزایش ۲/۱۱، ۱/۷۴ و ۱/۴۹ برابری محتوای تانن گلبرگ نسبت به تیمارهای تابش نور خورشید، تابش نور آبی و تابش همزمان نور آبی و فرابنفش شد. همچنین تابش نور فرابنفش A توانست محتوای تانن گلبرگ را در مقایسه با تابش متناوب نور آبی سپس نور فرابنفش A و تابش متناوب نور آبی سپس فرابنفش A به میزان ۱/۴۵ و ۱/۴۰ برابر بهبود بخشد (شکل ۴، تصویر b).

ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نور تکمیلی بر ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ در شرایط تابش نور آبی و تابش متناوب نور LED نسبت به شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین و کمترین ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ به ترتیب در تیمار نور آبی (۶۰/۵۸ درصد) و شاهد (۳۳/۴۷ درصد) به دست آمد. تابش نور آبی ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ را نسبت به تابش نور خورشید ۸۰/۹۹ درصد افزایش داد. همچنین نور LED توانست ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ را در مقایسه با تیمارهای تابش نور فرابنفش، تابش متناوب نور آبی و سپس فرابنفش، تابش متناوب نور آبی و سپس فرابنفش A و تابش متناوب نور آبی و سپس فرابنفش A به ترتیب ۵۹/۲۹، ۲۶/۱۵ و ۵۰/۳۵ درصد افزایش دهد (شکل ۴، تصویر c).



شکل ۴. اثر منابع نور LED بر فنل کل گلبرگ a (a)، تانن کل گلبرگ (b) و ظرفیت آنتی اکسیدانی گلبرگ (c) در گیاه نخود گل آبی میانگین‌های با حروف مشابه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($LSD \leq 5\%$).

بحث

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش تابش نور فرابنفش A موجب کاهش رشد رویشی و زایشی **نخود گل آبی** گردید. افزایش شدت نور آبی و به دنبال آن افزایش فعالیت کریپتوکروم‌ها با کاهش بیان ژن‌های تأثیرگذار بر تولید هورمون جیبرلین موجب جلوگیری از ترشح این هورمون و کاهش ارتفاع بوته و ایجاد گیاهان متراکم‌تر می‌شود (Chen et al., 2024). گزارش‌های زیادی حاکی از کاهش ارتفاع بوته خیار (Wang et al., 2024)، گوجه‌فرنگی (Yuan et al., 2024)، اسفناج (Nguyen et al., 2021) و کاهو (Luo et al., 2024) به دلیل کاهش غالبیت انتهایی در شرایط تابش نور LED آبی بوده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. در این گزارش‌ها بیان شده نور آبی به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد عمل کرده که سبب تولید گیاهان با ارتفاع کوتاه‌تر، با قطر ساقه بیشتر، متراکم‌تر و با میزان کلروفیل بیشتر می‌گردد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد نور فرابنفش A موجب کاهش شدیدتر ارتفاع بوته نسبت به نور آبی شد که این موضوع می‌تواند به دلیل حساسیت بیشتر کریپتوکروم ۱ به نور فرابنفش نسبت به نور آبی باشد (Zhang et al., 2020). در برخی گزارش‌ها به کاهش ارتفاع بوته گیاهان با اضافه کردن نور فرابنفش به محیط اشاره شده که شدت این کاهش ارتفاع در شرایط تابش متناوب نور آبی و فرابنفش کمتر از تابش نور فرابنفش به تنهایی بوده است. هرچند اثر نور فرابنفش بر تغییر ارتفاع بوته به شدت نور و طول موج نور استفاده شده بستگی دارد (Alrifai et al., 2021).

تعداد گل در بوته نیز با تابش نور آبی و سپس فرابنفش افزایش یافت. به نظر می‌رسد تابش متناوب نورهای LED آبی و سپس فرابنفش A با افزایش ظرفیت فتوسنتزی و حفظ پتانسیل اسمزی سلول‌ها و ایجاد شرایط نسبتاً مطلوب برای رشد گیاه منجر به توسعه رشد می‌گردد و این امر افزایش تعداد و زیست توده گل را در پی داشته است (Soufi et al., 2024). گزارش‌ها نشان می‌دهد شدت‌های کم نور آبی (۱-۲ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) نمی‌تواند در تنظیم گلدهی گیاهان حساس به طول روز اثر گذار باشد اما شدت‌های بالای نور آبی (۲۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) می‌تواند گلدهی گیاهان روز بلند را افزایش دهد (Zhang et al., 2020). بنابراین با توجه به روز بلند بودن نخود گل آبی می‌توان گفت کاربرد ۱۵ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه نور آبی می‌تواند سبب افزایش تعداد گل در بوته شود. گزارش‌ها افزایش تعداد گل و گلدهی سریع‌تر گل داوودی (Park & Jeong, 2020) و لیسیانثوس (Shibuya et al., 2019) در شرایط حضور نور LED آبی بوده است. کاربرد نور فرابنفش به تنهایی منجر به کاهش تعداد گل در بوته شد. برخی محققان معتقدند نور فرابنفش به تنهایی می‌تواند به‌عنوان یک عامل ایجاد کننده تنش غیرزیستی در گیاهان به‌شمار آید و موجب کاهش تعداد گل در بوته شود (Zhang et al., 2020).

نتایج این تحقیق همچنین حاکی از این بود وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار تابش نور آبی بیشتر از سایر تیمارهای دیگر بود که علت آن می‌تواند ناشی از افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، سرعت فتوسنتز بالاتر، تولید مواد پرورده بیشتر و در نهایت افزایش وزن تر گیاه باشد. بیشتر بودن وزن تر اندام هوایی در تیمار تابش نور آبی همچنین می‌تواند به دلیل تأثیر نور آبی بر توسعه کلروپلاست، شکل‌گیری کلروفیل، باز شدن روزنه‌ها و هدایت روزنه‌ای باشد (Park & Jeong, 2020). همچنین بیان شد تابش نور آبی منجر به افزایش تجمع عناصر پتاسیم و کلسیم در اندام‌هوایی کاهو و افزایش وزن تر شاخساره از طریق تأثیر نور آبی بر پمپ پروتونی، نفوذپذیری غشای سلولی و فعالیت کانال‌های یونی شد (Soufi et al., 2024). افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی گوجه‌فرنگی (Ke et al., 2024)، کلم چینی (Fan et al., 2013) با تابش نور آبی به دلیل اثر بر تقسیم سلولی منجر به افزایش اندازه سلول‌های برگ و

تولید زیست توده بیشتر گزارش شده است. با توجه به تحقیقات گذشته، نور فرابنفش سبب باز شدن روزنه‌ها و افزایش تبخیر و تعرق می‌شود. با خروج آب، وزن تر گیاه می‌تواند کاهش یابد. کاهش وزن تر و خشک اندام‌هوایی در شرایط اضافه شدن نور فرابنفش به محیط می‌تواند به دلیل اثر نور فرابنفش بر باز شدن روزنه و کاهش آب بافت گیاه و کاهش نسبی وزن باشد (Chen et al., 2019). از طرفی کاهش وزن تر و خشک اندام‌هوایی با اضافه شدن نور فرابنفش به محیط رشد به می‌تواند ناشی از کاهش ارتفاع بوته بوده باشد. روند کاهش وزن تر و خشک اندام‌هوایی با تابش متناوب نور آبی و فرابنفش در گوجه‌فرنگی (Zhang et al., 2020) گزارش شده است. در تحقیق حاضر تابش نور آبی منجر به افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی گردید. نور آبی یک طول موج ضروری برای توسعه کلروپلاست‌ها، کلروفیل، سنتز آنتوسیانین و فوتومورفوژن است. افزودن نور آبی به محیط برای افزایش سرعت رشد، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان بسیار ضروری است (Ahmed et al., 2020). نور آبی می‌تواند از طریق افزایش فعالیت کریپتوکروم منجر به افزایش سنتز رنگریزه‌های فتوسنتزی گردد. همچنین نور آبی برای بیان برخی ژن‌های درگیر در بیوسنتز کلروفیل و بلوغ کلروپلاست ضروری است. (He et al., 2020). افزایش محتوای کلروفیل a و b در کاهو چینی (Fan et al., 2013)، ژربرا (Meng et al., 2019) و درمنه (Su et al., 2023) گزارش شده است. همچنین محققان گزارش کردند رشد و توسعه کلروپلاست در شرایط حضور نور آبی در بهترین و بالاترین سطح ممکن قرار می‌گیرد (Park & Jeong, 2020) به همین دلیل تیمارهای فاقد نور آبی کمترین محتوای کلروفیل را دارا بودند. نتایج برخی تحقیقات حاکی از کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تابش نور فرابنفش A در برگ‌های گوجه‌فرنگی به دلیل تأثیر مخرب نور فرابنفش بر ساختمان کلروپلاست و بیوسنتز مولکول کلروفیل بود. همچنین با توجه به اینکه طول موج نور فرابنفش A کوتاه‌تر از طول موج نور آبی و دارای انرژی بالاتری است بنابراین می‌توان گفت تابش نور فرابنفش A به تنهایی موجب ایجاد نوعی تنش در برگ گیاه شده و با کاهش محتوای رنگریزه‌های فتوسنتزی موجب کاهش کارایی کوانتومی فتوسنتز II به میزان قابل توجهی می‌گردد (Gao et al., 2022).

کاروتنوئیدها به عنوان درپچه ایمنی سلول عمل کرده و با آزاد کردن انرژی اضافی، از سلول‌ها در برابر اکسیداسیون نوری محافظت می‌کنند. کاروتنوئید همچنین مسئول از بین بردن رادیکال سوپراکسید و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها می‌باشد. محققان بر این باورند که افزایش محتوای کاروتنوئیدهای در شرایط تابش نور آبی ممکن است به دلیل تبدیل بیوشیمیایی یک رنگدانه به رنگدانه دیگر مانند **ویالاکسانتین^۱ به زئزانانتین^۲** در پاسخ به افزایش شدت نور آبی در محیط باشد (Alrifai et al., 2021). افزایش تجمع کاروتنوئید با تابش نور آبی در خردل (Alrifai et al., 2021) گزارش شده است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد تجمع آنتوسیانین به کیفیت نور بستگی دارد و نور آبی می‌تواند سنتز آنتوسیانین را افزایش دهد. آنتوسیانین‌ها بزرگ‌ترین و مهم‌ترین گروه رنگدانه‌های محلول در آب و مسئول اصلی ایجاد رنگ قرمز، آبی و بنفش بسیاری از میوه‌ها، گل‌ها و سبزی‌ها هستند (Alrifai et al., 2021). افزایش محتوای آنتوسیانین با تابش نور LED آبی در کاهوی برگ قرمز (Shoji et al., 2010) به دلیل افزایش به افزایش بیان ژن‌های تنظیم‌کننده آنتوسیانین سنتز در شرایط تابش نور آبی گزارش شده است. همچنین برخی محققان بیان کردند ساز و کار نور فرابنفش در افزایش تجمع آنتوسیانین تا حدودی شبیه به نور آبی است (Zhang et al., 2020). اضافه شدن نور فرابنفش به محیط منجر به افزایش ۱۱ درصدی محتوای آنتوسیانین برگ کاهو قرمز نسبت به نور خورشید شد (Li & Kubota, 2019). محققان اثر نور فرابنفش و آبی را بر متابولیت‌های ثانویه انگور بررسی و گزارش کردند تابش نورهای LED منجر به افزایش قابل توجه آنتوسیانین شد (Azuma et al., 2019).

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، تابش نور آبی و سپس نور فرابنفش موجب افزایش میزان اسید آسکوربیک گلبرگ شد. اسید آسکوربیک یکی از مهم‌ترین متابولیت‌های اولیه است و نقش اساسی در سوخت و ساز گیاه بازی می‌کند. برخی محققان بر

¹Viyalaxanthine

² Zeaxanthine

این باورند که نور آبی و اشعه فرابنفش سبب ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه شده و گیاه در رویارویی با اشعه فرابنفش ترکیبات فلاونوئیدی، اسید آسکوربیک و آنتوسیانین تولید می‌کند تا مقاومت به شرایط تنش را افزایش دهد (Ahmed et al., 2020).

نتایج این پژوهش همچنین حاکی از آن بود که تابش نور تکمیلی میزان فلاونوئید گلبرگ را افزایش داد. فلاونوئیدها به دلیل داشتن توانایی آنتی‌اکسیدانی بالا، ظرفیت انتقال الکترون، کاهش پراکسیداسیون هیدروژن و کاهش رادیکال‌های آلفاتوکوفرول^۱ دارای اثرات حفاظتی مفیدی هستند (Zhang et al., 2020). بسیاری از محققان معتقدند رشد بیشتر گیاه و افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی به طور معمول با سطوح کم تولید متابولیت‌های ثانویه به‌عنوان یک استراتژی مبادله‌ای (ترید-آف^۲) همراه است. زیرا القای بیوستنز و تجمع متابولیت‌های ثانویه با هدف ارتقای سیستم آنتی‌اکسیدانی ممکن است در شرایط دسترسی به عوامل مناسب برای رشد، تحت تأثیر قرار گرفته و حتی محدود شود (Treutter, 2006). بنابراین کمتر بودن میزان فنل و فلاونوئید در شرایط تابش نور خورشید ممکن است به رشد بیشتر گیاه و افزایش وزن تر و خشک اندام‌هوائی کمک کند. با این حال ساز و کار دقیق این نوع مبادله بین رشد و تولید متابولیت‌های ثانویه هنوز به درستی مشخص نیست (Zhang et al., 2020). قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش نیز می‌تواند برخی فرایندهای متابولیکی مانند پاسخ‌های مربوط به سیستم آنتی‌اکسیدانی، تولید رنگدانه فتوسنتزی، بیان ژن‌های تأثیرگذار بر افزایش فعالیت آنزیم‌ها و تولید متابولیت‌های ثانویه به‌منظور محافظت در برابر اشعه ماوراء بنفش را تحریک کند (Zhang et al., 2020). نور فرابنفش A با طول موج ۳۱۵-۳۹۵ نانومتر کم‌خطرترین بخش تابش ماوراء بنفش است. مطالعه بیوستنز فلاونوئید در شرایط تابش نور فرابنفش A نشان داد نور فرابنفش منجر به افزایش تولید فلاونوئید در شلغم از طریق افزایش بیان ژن‌های تولیدکننده برخی آنزیم‌ها مانند چالکون سنتتاز^۳، فلاونوئید-۳-هیدروکسیلاز^۴ و دی‌هیدروفلاونول-۴-ریداکتاز^۵ شد (Zhou et al., 2017). گزارش‌ها همچنین نشان می‌دهد ژن‌های کد کننده سنتز چالکون‌ها به‌عنوان اولین مرحله از مسیر بیوستنز فلاونوئید شناخته شده‌اند که بیان این ژن‌ها در شرایط تابش نور آبی و نور فرابنفش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. البته بیان این ژن‌ها توسط نور به شکل بسیار پیچیده‌ای کنترل می‌شود (Zhang et al., 2020). از آنجا که نور فرابنفش و آبی به ترتیب سیگنال‌های موقتی و پایدار در گیاهان ایجاد می‌کنند، در نتیجه مسیرهای انتقال نور نیز در شرایط تابش این دو نوع نور متفاوت است و ممکن است در تحریک فعالیت چالکون‌ها متفاوت عمل کنند (Zhang et al., 2020). اما بیشترین حد از بیان چالکون‌ها نیازمند حضور متناوب نور آبی و فرابنفش است که می‌تواند بیانگر افزایش تولید فلاونوئید در شرایط تابش متناوب این دو نوع نور باشد (Chen et al., 2019).

نتایج نشان داد فنل کل گلبرگ نیز با تابش نورهای تکمیلی LED افزایش یافت. ترکیبات فنلی نوعی آنتی‌اکسیدان محسوب شده که از نظر بیولوژیکی بسیار فعال بوده و در شرایط تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی مانند زخم، آلودگی به بیماری و نور شدید یا اشعه فرابنفش در گیاهان سنتز شده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ساز و کار دفاعی در گیاهان شناخته می‌شوند (Yuan et al., 2024). افزایش محتوای ترکیبات فنلی در شرایط تابش نور آبی و فرابنفش چه به صورت همزمان و چه به صورت متناوب می‌تواند ناشی از اثر حضور نور فرابنفش به‌عنوان یک تنش باشد (Ahmed et al., 2020). گزارش‌های متعدد حاکی از افزایش تجمع فنل‌ها در شرایط تابش نور آبی و نور فرابنفش در کلم چینی (Brazaityte et al., 2015) است. به‌نظر می‌رسد نور آبی با تنظیم بیان ژن‌های اثرگذار بر بیوستنز فلاونوئید منجر به افزایش تولید ترکیبات فنلی در گیاهان می‌شود که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد (Zhang et al., 2020).

تان‌ها گروهی از متابولیت‌های ثانویه فنلی با وزن مولکولی بین ۳۰۰-۵۰۰ دالتون و قابل حل در آب هستند. نقش عمده تان‌ها در ارتباط با دفاع از گیاه در برابر تنش‌های زیستی می‌باشد. تان‌ها همچنین به‌عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شناخته می‌شوند. نتایج

¹ α -Tocopherol

² Tried off

³ Chalcone synthase (CHS)

⁴ Flavonoid-3-hydroxylase

⁵ Dihydroflavonol-4-reductase

برخی تحقیقات حاکی از افزایش محتوای تانن در گیاه ریحان در شرایط تابش نور فرابنفش A بوده است (Alrifai et al., 2019) که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گلبرگ نیز با تابش نور تکمیلی افزایش یافت. افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بسیاری از سبزیجات مانند کلم‌چینی (Lee et al., 2016)، گوجه‌فرنگی (Yuan et al., 2024) و ریحان (Alrifai et al., 2019) با تابش نور آبی گزارش شده است. تابش همزمان نور آبی و فرابنفش نیز موجب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی فلفل قرمز نسبت به تابش نور خورشید شده است. کیفیت نور و تابش نور آبی با تعدیل سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و افزایش فعالیت‌های کلیدی آنزیم‌های متابولیک، بر اکسیداتیو نوری و فرایندهای مربوط به سیستم دفاعی گیاه تأثیر می‌گذارد (Pérez-Ambrocio et al., 2018).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر نشان داد تغییر در کیفیت نور منجر به تغییر خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نخود گل آبی گردید. تابش نور آبی و نور فرابنفش A سبب کاهش ارتفاع بوته شد و شدت این کاهش ارتفاع در تیمار تابش نور فرابنفش A شدیدتر بود. تابش نور آبی همچنین افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی را به دنبال داشت. کاربرد نور LED آبی از طریق افزایش محتوای رنگرزه‌های فتوسنتزی، آنتوسیانین، فلاونوئید، فنل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی منجر به افزایش کیفیت گل‌های نخود گل آبی شد.

REFERENCES

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. *South African Journal of Botany*, 130, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Alrifai, O., Hao, X., Liu, R., Lu, Z., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2021). LED-induced carotenoid synthesis and related gene expression in Brassica microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(16), 4674-4685. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00200>
- Arnon, D. I. (1974). Photochemical activity and components of membrane preparations from blue-green algae. I. Coexistence of two photosystems in relation to chlorophyll a and removal of phycocyanin. *Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics*, 357(2), 231-245. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(74\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0005-2728(74)90063-2)
- Azuma, A., Yakushiji, H., & Sato, A. (2019). Postharvest light irradiation and appropriate temperature treatment increase anthocyanin accumulation in grape berry skin. *Postharvest Biology and Technology*, 147, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.008>
- Brazaityte, A., Virsile, A., Jankauskiene, J., Sakalauskienė, S., Samuoliene, G., Sirtautas, R., & Duchovskis, P. (2015). Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens. *International Agrophysics*, 29(1), 56-49.
- Bunthong, P., & Lapjit, C. (2020). The effect of different LED light on growth and anthocyanin of hydroponic red oak lettuce in a closed system. In *III Asian Horticultural Congress-AHC2020* 1312 (pp. 227-234). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1312.33>
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 3-15. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Chen, X., Fan, Y., Guo, Y., Li, S., Zhang, B., Li, H., & Liu, L. J. (2024). Blue light photoreceptor cryptochrome 1 promotes wood formation and anthocyanin biosynthesis in *Populus*. *Plant, Cell and Environment*, 47(6), 2044-2057. <https://doi.org/10.1111/pce.14866>
- Chen, Y., Li, T., Yang, Q., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., & Wen, X. (2019). UVA radiation is beneficial for yield and quality of indoor cultivated lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 10 (12), 1563. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563>
- Fan, X., Zang, J., Xu, Z., Guo, S., Jiao, X., Liu, X., & Gao, Y. (2013). Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 2721-2726. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1304-z>

- Gao, M., Li, Y., Jiang, H., He, R., Shi, R., Song, S., & Liu, H. (2022). UVA-radiation exposure of different durations promoted the growth, phytochemicals and glucosinolate biosynthesis of *Chinese Kale*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(14), 7619. <https://doi.org/10.3390/ijms23147619>
- He, R., Gao, M., Shi, R., Song, S., Zhang, Y., Su, W., & Liu, H. (2020). The combination of selenium and LED light quality affects growth and nutritional properties of broccoli sprouts. *Molecules*, 25(20), 4788. <https://doi.org/10.3390/molecules25204788>
- Hui, X. U., FU, Y. N., LI, T. L., & Rui, W. A. N. G. (2017). Effects of different LED light wavelengths on the resistance of tomato against *Botrytis cinerea* and the corresponding physiological mechanisms. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(1), 106-114. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61435-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61435-1)
- Huyskens-Keil, S., Eichholz-Dündar, I., Hassenberg, K., & Herppich, W. B. (2020). Impact of light quality (white, red, blue light and UV-C irradiation) on changes in anthocyanin content and dynamics of PAL and POD activities in apical and basal spear sections of white asparagus after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 161, 111069. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111069>
- Jamil, N., Zairi, M. N. M., Nasim, N. A. I. M., & Pa'ee, F. (2018). Influences of environmental conditions to phytoconstituents in *Clitoria ternatea* (butterfly pea flower)—A review. *Journal of Science and Technology*, 10(2).
- Jiji, K., & Muralidharan, P. (2020). Neuropharmacological potential of *Clitoria ternatea* L. A review. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 13(11), 5497-5502.
- Ke, X., Yoshida, H., Hikosaka, S., & Goto, E. (2024). Effect of red and blue light versus white light on fruit biomass radiation-use efficiency in dwarf tomatoes. *Frontiers in Plant Science*, 15 (4), 1393918. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1393918>
- Kedare, S. B., & Singh, R. P. (2011). Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay. *Journal of Food Science and Technology*, 48 (7), 412-422. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0251-1>
- Kim, Y. J., Kim, Y. B., Li, X., Choi, S. R., Park, S., Park, J. S., & Park, S. U. (2015). Accumulation of phenylpropanoids by white, blue, and red light irradiation and their organ-specific distribution in Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(30), 6772-6778.
- Kowalczyk, K., Sieczko, L., Borucki, W., Sujkowska-Rybkowska, M., Mirgos, M., Niedzińska, M., & Gajc-Wolska, J. (2022). The effect of LED and HPS assimilation lighting on leaf anatomy, chlorophyll and carotenoid autofluorescence signals, and some physiological and chemical leaf traits related to the productivity of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in high-wire cultivation. *Agronomy*, 12(9), 2004. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092004>
- Kurniawati, E. Y., Pramono, N., Hidayat, S. T., & Mahati, E. (2024). Effect of *Clitoria ternatea* on follicle stimulating hormone receptor: Molecular docking study. *Berkala Penelitian Hayati*, 30(1), 29-34. <https://doi.org/10.23869/bphjbr.30.1.20245>
- Lee, J. H., Oh, M. M., & Son, K. H. (2019). Short-term ultraviolet (UV)-A light-emitting diode (LED) radiation improves biomass and bioactive compounds of kale. *Frontiers in Plant Science*, 10(11), 1042. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01042>
- Lin, K. H., Huang, M. Y., & Hsu, M. H. (2021). Morphological and physiological response in green and purple basil plants (*Ocimum basilicum*) under different proportions of red, green, and blue LED lightings. *Scientia Horticulturae*, 275(9), 109677. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109677>
- Liu, Y., Schouten, R. E., Tikunov, Y., Liu, X., Visser, R. G., Tan, F., & Marcelis, L. F. (2022). Blue light increases anthocyanin content and delays fruit ripening in purple pepper fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 192(14), 112024. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112024>
- Luo, S., Zou, J., Shi, M., Lin, S., Wang, D., Liu, W., & Jiang, Y. (2024). Effects of red-blue light spectrum on growth, yield, and photo-synthetic efficiency of lettuce in a uniformly illumination environment. *Plant, Soil and Environment*, 70(5). <https://doi.org/10.17221/480/2023-PSE>
- Makkar, H. P., Blümmel, M., Borowy, N. K., & Becker, K. (1993). Gravimetric determination of tannins and their correlations with chemical and protein precipitation methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61(2), 161-165. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740610205>
- Meng, X. Y., Wang, Z., He, S. L., Shi, L. Y., Song, Y. L., Lou, X. Y., & He, D. (2019). LED-Supplied red and blue light alters the growth, antioxidant status, and photochemical potential of in vitro-grown *gerbera jamesonii* plantlets. *Horticultural Science and Technology*, 37(4), 473-789. <https://doi.org/10.7235/HORT.20190048>
- Nagano, S., Mori, N., Tomari, Y., Mitsugi, N., Deguchi, A., Kashima, M., & Watanabe, H. (2022). Effect of differences in light source environment on transcriptome of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) to optimize cultivation conditions. *PloS one*, 17(3), e0265994. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265994>

- Park, S., Cho, E., An, J., Yoon, B., Choi, K., & Choi, E. (2019). Plant growth and ascorbic acid content of *Spinacia oleracea* grown under different light-emitting diodes and ultraviolet radiation light of plant factory system. *Journal of Bio-Environment Control*, 28(1), 1-8. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2019.28.1.1>
- Park, Y. G., & Jeong, B. R. (2020). How supplementary or night-interrupting low-intensity blue light affects the flower induction in chrysanthemum, a qualitative short-day plant. *Plants*, 9(12), 1694. <https://doi.org/10.3390/plants9121694>
- Pérez-Ambrocio, A., Guerrero-Beltrán, J. A., Aparicio-Fernández, X., Ávila-Sosa, R., Hernández-Carranza, P., Cid-Pérez, S., & Ochoa-Velasco, C. E. (2018). Effect of blue and Ultraviolet-C light irradiation on bioactive compounds and antioxidant capacity of habanero pepper (*Capsicum chinense*) during refrigeration storage. *Postharvest Biology and Technology*, 135, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.08.023>
- Quettier-Deleu, C., Gressier, B., Vasseur, J., Dine, T., Brunet, C., Luyckx, M., & Trotin, F. (2000). Phenolic compounds and antioxidant activities of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) hulls and flour. *Journal of Ethnopharmacology*, 72(1-2), 35-42. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00196-3](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00196-3)
- Ozarowski, M., Piasecka, A., Gryszczyńska, A., Sawikowska, A., Pietrowiak, A., Opala, B., & Seremak-Mrozikiewicz, A. (2017). Determination of phenolic compounds and diterpenes in roots of *Salvia miltiorrhiza* and *Salvia przewalskii* by two LC-MS tools: Multi-stage and high resolution tandem mass spectrometry with assessment of antioxidant capacity. *Phytochemistry Letters*, 20, 331-338. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2016.12.001>
- Rafeie, M., Shabani, L., Sabzalian, M. R., & Gharibi, S. (2022). Pretreatment with LEDs regulates antioxidant capacity and polyphenolic profile in two genotypes of basil under salinity stress. *Protoplasma*, 259(6), 1567-1583. <https://doi.org/10.1007/s00709-022-01746-1>
- Shibuya, T., Takahashi, T., Hashimoto, S., Nishiyama, M., & Kanayama, Y. (2019). Effects of overnight radiation with monochromatic far-red and blue light on flower budding and expression of flowering-related and light quality-responsive genes in *Eustoma grandiflorum*. *Journal of Agricultural Meteorology*, 75(3), 160-165. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-18-00041>
- Shoji, K. A. Z. U. H. I. R. O., Goto, E. I. J. I., Hashida, S. H. I. N. N. O. S. U. K. E., Goto, F. U. M. I. Y. U. K. I., & Yoshihara, T. (2010). Effect of red light and blue light on the anthocyanin accumulation and expression of anthocyanin biosynthesis genes in red-leaf lettuce. *Journal of Science and High Technology in Agriculture*, 22(2), 107-113.
- Silalahi, M. (2021). *Clitoria ternatea* L. Fabaceae. In *Ethnobotany of the Mountain Regions of Southeast Asia* (pp. 317-322). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38389-3_113
- Soufi, H., Kalaji, H. M., Hamidpour, M., & Malekzadeh, K. (2024). The roles of light in a plant factory: photosynthesis efficiency and gas exchange parameters of lettuce as a function of light spectra. *Greenhouse Plant Production Journal*, 1(1), 1-26. <https://doi.org/10.61186/gppj.1.1.1>
- Su, P., Ding, S., Wang, D., Kan, W., Yuan, M., Chen, X., & Wu, L. (2024). Plant morphology, secondary metabolites and chlorophyll fluorescence of *Artemisia argyi* under different LED environments. *Photosynthesis Research*, 159(2), 153-164. <https://doi.org/10.1007/s11120-023-01026-w>
- Suarna, I. W., & Wijaya, I. M. S. (2021). Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.: Fabaceae) and its morphological variations in Bali. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 6(2), 63013. <https://doi.org/10.22146/jtbb.63013>
- Treutter, D. (2006). Significance of flavonoids in plant resistance: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 4(3), 147-157. <https://doi.org/10.1007/s10311-006-0068-8>
- Taghizadeh, M. (2025). Light quality, cytokinin type, and media affect the regeneration, growth, and fluorescence parameters of *Syngonium podophyllum* Schott “Emerald Green” in vitro plantlets. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology Latest Articles*, 73, 1-14. <https://doi.org/10.1080/14620316.2025.2475252>
- Vidana Gamage, G. C., Lim, Y. Y., & Choo, W. S. (2021). Anthocyanins from *Clitoria ternatea* flower: Biosynthesis, extraction, stability, antioxidant activity, and applications. *Frontiers in Plant Science*, 12, 792303. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792303>
- Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology*, 64(1), 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>
- Wang, T., Sun, Q., Zheng, Y., Xu, Y., Liu, B., & Li, Q. (2024). Effects of red and blue light on the growth, photosynthesis, and subsequent growth under fluctuating light of cucumber seedlings. *Plants*, 13(12), 1668. <https://doi.org/10.3390/plants13121668>
- Wargent, J. J. (2016, May). UV LEDs in horticulture: from biology to application. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture*, 1134 (pp. 25-32). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.4>
- Yuan, L. U. O., Lin, Y. E., Wen-zhong, G. U. O., Xin, Z. H. A. N. G., Yi-han, L. I. U., & Xiao-li, C. H. E. N. (2024). Influence by supplementary red and blue light on the growth and development of greenhouse tomatoes and fluorescence characteristics. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 45(05), 506. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6362.2024.05.006>

- Zhang, X., Bian, Z., Yuan, X., Chen, X., & Lu, C. (2020). A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science and Technology*, 99, 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.031>
- Zhao, J., Thi, L. T., Park, Y. G., & Jeong, B. R. (2020). Light quality affects growth and physiology of *Carpesium triste* Maxim. cultured in vitro. *Agriculture*, 10(7), 258. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070258>
- Zheng, L., He, H., & Song, W. (2019). Application of light-emitting diodes and the effect of light quality on horticultural crops: A review. *Horticultural Science*, 54(10), 1656-1661. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14109-19>
- Zhou, B., Li, Y., Xu, Z., Yan, H., Homma, S., & Kawabata, S. (2007). Ultraviolet A-specific induction of anthocyanin biosynthesis in the swollen hypocotyls of turnip (*Brassica rapa*). *Journal of Experimental Botany*, 58(7), 1771-1781. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm036>
- Zhuang, L., Huang, G., Li, X., Xiao, J., & Guo, L. (2022). Effect of different LED lights on aliphatic glucosinolates metabolism and biochemical characteristics in broccoli sprouts. *Food Research International*, 154, 111015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111015>

مجله علمی پژوهشی