

ISSN: 3041-9638

<https://jrpsm.asnrkh.ac.ir/>

Open Access

Research Article

Physiological response of Periwinkle (*Vinca minor* L.) to different levels of ultraviolet radiation

A. Shayganfar¹, M. mirzaei¹, H. Mumivand² and S. F. Mirahmadi³¹Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.²Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.³Department of Agriculture and Natural Resources, Technical and Engineering Faculty, Velayat University, Iranshahr, Iran.

Received: 27 May 2026

Accepted: 01 Sep 2026

Published: 01 Sep 2026

Corresponding Author:

Alireza Shayganfar

Email:

Shyganfar.a.r@gmail.com

Keywords:

UV-B radiation, Oxidative stress, Total phenol, Intermittent irradiation pattern

Extended Abstract

Background and objectives: Ultraviolet (UV) radiation, as a part of the electromagnetic spectrum, has significant consequences for plant physiology. The increased depletion of the stratospheric ozone layer due to industrial activities has led to an increase in UV-B radiation reaching the Earth's surface. This radiation acts as an oxidative stressor and, by generating reactive oxygen species (ROS), damages cellular components such as DNA, proteins, and membrane lipids. In response, plants employ complex defense mechanisms, including enzymatic (e.g., catalase and peroxidase) and non-enzymatic (e.g., phenols and carotenoids) antioxidant systems. Among these, medicinal plants are of particular importance due to their inherent ability to produce valuable secondary metabolites. Periwinkle (*Vinca minor* L.), from the Apocynaceae family, is a medicinal and ornamental plant containing valuable indole alkaloids such as vincamine, known for its modulating effects on cerebral blood circulation and neuroprotective properties. However, the physiological responses of this plant to UV radiation, especially considering the variable of radiation pattern (intermittent vs. continuous), have been less studied. This research was designed and conducted to investigate the effect of different types of UV radiation (UV-A and UV-B) under two patterns of intermittent and continuous irradiation on the physiological characteristics, antioxidant defense system, and secondary metabolite content of periwinkle.

Materials and Methods: This research was conducted as a completely randomized design with 7 treatments and 3 replications in the greenhouse of Malayer University (Hamedan, Iran). Periwinkle plantlets, after in vitro culture in MS medium and rooting, were transferred to pots containing Hoagland's solution. After one week of establishment, they were exposed to UV radiation treatments for 9 days. The treatments included: control (only fluorescent light), intermittent UV-A, continuous UV-A, intermittent UV-B, continuous UV-B, intermittent UV-AB, and continuous UV-AB. UV radiation was applied using 40-watt broadband lamps manufactured by Q-Lab (USA), providing the closest match to the natural solar spectrum, for 45 minutes in the middle of the 16-hour photoperiod. The intermittent pattern consisted of three 15-minute periods with 15-minute intervals, and the continuous pattern involved 45 minutes of uninterrupted radiation. At the end of the treatment period, leaf samples were harvested and immediately frozen in liquid nitrogen. The measured traits included the activity of antioxidant enzymes (catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase), malondialdehyde (MDA) content, photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, and carotenoids), total phenol, proline, soluble sugars, and fresh and dry root weight.

Results: The results showed that UV radiation had a significant effect on most of the measured physiological traits. In the enzymatic defense sector, the highest catalase enzyme activity was observed in the intermittent UV-A treatment (0.44), and the highest ascorbate peroxidase activity was recorded in the intermittent UV-AB treatment (0.55), both showing a significant difference from the control. However, guaiacol peroxidase activity was not affected by the treatments. Regarding photosynthetic pigments, the intermittent UV-B treatment exhibited a powerful photoprotection strategy, marked by a significant peak in carotenoids (0.93 mg/g) and a sharp decline in chlorophyll b (0.1 mg/g). The continuous UV-B treatment also showed the highest chlorophyll a (0.85 mg/g) but failed to increase carotenoids significantly. Total phenol content increased significantly compared to the control only in the intermittent UV-B treatment (28.49 mg GAE/g), identifying it as the most effective elicitor of the phenylpropanoid pathway. A key and unexpected finding was the significant decrease in malondialdehyde in all UV treatments compared to the control, indicating the remarkable efficiency of the plant's antioxidant defense system. Soluble sugar content decreased significantly in the intermittent UV-B treatment, reflecting the consumption of carbon reserves to supply the energy and carbon skeletons required for the biosynthesis of defensive metabolites. Proline changes were significant only in the continuous UV-B treatment, showing a decrease compared to the control. Fresh and dry root weight showed no significant change under any treatment.

Conclusion: This study demonstrated, for the first time, that the physiological response of periwinkle to UV radiation depends not only on the type of spectrum but also on the irradiation pattern. Intermittent UV-B, as the most efficient elicitor, achieved a level of cellular protection by coordinated induction of enzymatic (increased catalase) and non-enzymatic (significant increase in total phenol and carotenoids) antioxidant defenses, reducing lipid peroxidation even below the control level. This defensive success was accompanied by the consumption of sugar reserves, highlighting the metabolic cost of these responses. In contrast, continuous UV-B, by decreasing proline and failing to increase phenols and carotenoids, likely exceeded the plant's tolerance threshold. From a practical perspective, intermittent UV-B irradiation could be considered as a targeted, non-chemical strategy to enhance valuable secondary metabolites in the commercial cultivation of this medicinal plant.

Citation:

Shayganfar, A., mirzaei, M., Mumivand, H., & Mirahmadi, S. F. (2026). Physiological response of Periwinkle (*Vinca minor* L.) to different levels of ultraviolet radiation. *Journal of Research in Plant Metabolites*, 4(2), 69-84. Doi:10.22034/jrpsm.2026.588772.1123



پاسخ فیزیولوژیک پیچ تلگرافی (*Vina minor L.*) به سطوح مختلف پرتو فرابنفش

علیرضا شایگان فر^۱، مرجان میرزایی^۱، حسن مومیوند^۲ و سیدفاضل میراحمدی^۳

^۱گروه علوم و مهندسی باغبانی و فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

^۲گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

^۳گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶

نویسنده مسئول:

علیرضا شایگان فر

ایمیل:

Shayganfar.a.r@gmail.com

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: پرتو فرابنفش (UV) به عنوان بخشی از طیف الکترومغناطیسی، پیامدهای قابل توجهی برای فیزیولوژی گیاهان به همراه دارد. افزایش تخریب لایه اوزون استراتوسفر ناشی از فعالیت‌های صنعتی بشر، به افزایش میزان پرتو فرابنفش B در سطح زمین منجر شده است. این پرتو به عنوان یک تنش اکسیداتیو عمل کرده و با تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، به اجزای سلولی از جمله DNA، پروتئین‌ها و لیپیدهای غشایی آسیب می‌رساند. در پاسخ، گیاهان سازوکارهای دفاعی پیچیده‌ای شامل سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی (مانند کاتالاز و پراکسیداز) و غیر آنزیمی (مانند فنل‌ها و کاروتنوئیدها) را به کار می‌گیرند. در این میان، گیاهان دارویی به دلیل توانایی ذاتی در تولید متابولیت‌های ثانویه ارزشمند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. پیچ تلگرافی (*Vina minor L.*) از خانواده خرزهره (Apocynaceae)، گیاهی دارویی و زینتی است که دارای آلکالوئیدهای ایندولی ارزشمندی نظیر وینکامین با اثرات تعدیل‌کنندگی بر گردش خون، مغز و محافظت عصبی است. با این حال، پاسخ‌های فیزیولوژیک این گیاه به پرتو فرابنفش، به ویژه با در نظر گرفتن متغیر الگوی تابش (منقطع در مقابل پیوسته)، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر انواع مختلف پرتو فرابنفش (UV-A و UV-B) در دو الگوی تابش منقطع و پیوسته بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و محتوای متابولیت‌های ثانویه گیاه پیچ تلگرافی طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها: این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار در گلخانه دانشگاه ملایر (همدان) اجرا گردید. نشاهای پیچ تلگرافی پس از کشت درون‌شیشه‌ای در محیط MS و ریشه‌دار شدن، به گلدان‌های حاوی محلول هوگلدن منتقل و پس از یک هفته استقرار، به مدت ۹ روز تحت تیمارهای پرتو فرابنفش قرار گرفتند. تیمارها شامل شاهد (فقط نور فلورسنت)، UV-A منقطع، UV-A پیوسته، UV-B منقطع، UV-B پیوسته، UV-AB منقطع و UV-AB پیوسته بودند. تابش فرابنفش با استفاده از لامپ‌های ۴۰ واتی باند پهن ساخت شرکت Q-Lab آمریکا (با بیشترین تطبیق با طیف طبیعی خورشید) به مدت ۴۵ دقیقه در میانه دوره نوری ۱۶ ساعته اعمال شد. الگوی منقطع شامل سه دوره ۱۵ دقیقه‌ای با فواصل ۱۵ دقیقه‌ای و الگوی پیوسته شامل ۴۵ دقیقه تابش مداوم بود. پس از پایان دوره تیمار، نمونه‌های برگ‌ی برداشت و در نیتروژن مایع منجمد گردیدند. صفات اندازه‌گیری شده شامل فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز)، محتوای مالون‌دی‌آلدهید (MDA)، رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، b و کاروتنوئید)، فنل کل، پرولین، قندهای محلول و وزن تر و خشک ریشه بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پرتو فرابنفش تأثیر معنی‌داری بر اغلب صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده داشت. در بخش دفاع آنزیمی، بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار UV-A منقطع (۰/۴۴) و بیشترین فعالیت آسکوربات پراکسیداز در تیمار UV-AB منقطع (۰/۵۵) مشاهده شد که هر دو اختلاف معنی‌داری با شاهد داشتند. با این حال، فعالیت گایاکول پراکسیداز تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت. در بخش رنگیزه‌های فتوسنتزی، تیمار UV-B منقطع با بیشینه معنی‌دار کاروتنوئیدها (۰/۹۳ میلی‌گرم بر گرم) و کاهش شدید کلروفیل b (۰/۱۱ میلی‌گرم بر گرم)، استراتژی حفاظت نوری قدرتمندی را به نمایش گذاشت. تیمار UV-B پیوسته نیز با بیشینه کلروفیل a (۰/۸۵ میلی‌گرم بر گرم) همراه بود، اما در افزایش کاروتنوئیدها ناموفق بود. محتوای فنل کل تنها در تیمار UV-B منقطع افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد یافت (۲۸/۴۹ میلی‌گرم GAE بر گرم) و آن را به عنوان مؤثرترین محرک مسیر فنیل پروپانوئید معرفی کرد. یافته‌های کلیدی و غیرمنتظره، کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید در تمام تیمارهای پرتو فرابنفش نسبت به شاهد بود که بر کارایی چشمگیر سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه دلالت داشت. میزان قندهای محلول در تیمار UV-B منقطع به طور معنی‌داری کاهش یافت که نشان‌دهنده مصرف ذخایر کربنی برای تأمین انرژی و اسکلت‌های کربنی مورد نیاز بیوسنتز متابولیت‌های دفاعی بود. تغییرات پرولین تنها در تیمار UV-B پیوسته معنی‌دار شد که به صورت کاهش نسبت به شاهد مشاهده گردید. وزن تر و خشک ریشه در هیچ‌یک از تیمارها تغییر معنی‌داری نشان نداد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش برای نخستین بار نشان داد که پاسخ فیزیولوژیک پیچ تلگرافی به پرتو فرابنفش، نه تنها به نوع طیف، بلکه به الگوی تابش نیز وابسته است. تیمار فرابنفش B منقطع به عنوان کارآمدترین محرک، با القای هماهنگ دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی (افزایش کاتالاز) و غیر آنزیمی (افزایش معنی‌دار فنل کل و کاروتنوئیدها)، به چنان سطحی از محافظت سلولی دست یافت که پراکسیداسیون لیپیدی را حتی به زیر سطح شاهد کاهش داد. این موفقیت دفاعی با مصرف ذخایر قندی همراه بود که نشان‌دهنده هزینه متابولیکی این پاسخ‌هاست. در مقابل، تیمار UV-B پیوسته با کاهش پرولین و ناتوانی در افزایش فنل و کاروتنوئید، احتمالاً آستانه تحمل گیاه را پشت سر گذاشت. از منظر کاربردی، تابش منقطع UV-B می‌تواند به عنوان یک راهبرد غیرشیمیایی و هدفمند برای افزایش متابولیت‌های ثانویه ارزشمند در کشت تجاری این گیاه دارویی مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پرتو

فرابنفش B، تنش

اکسیداتیو، فنل کل، الگوی

تابش منقطع.

نحوه استناد:

شایگان‌فر، ع.، میرزایی، م.، مومیوند، م.، میراحمدی، ف. (۱۴۰۵). پاسخ فیزیولوژیک پیچ تلگرافی (*Vina minor L.*) به سطوح مختلف پرتو فرابنفش. مجله پژوهش در متابولیت‌های گیاهی، دوره ۴، شماره ۲، صفحات: ۶۹-۸۴.

Doi:10.22034/jrpsm.2026.588772.1123

مقدمه

پرتو فرابنفش (UV) بخشی از طیف الکترومغناطیسی بین اشعه X و نور مرئی است که به‌طور متداول به پرتوهای فرابنفش A (۴۰۰-۳۱۵ نانومتر)، فرابنفش B (۳۱۵-۲۸۰ نانومتر) و فرابنفش C (۲۸۰-۱۰۰ نانومتر) تقسیم می‌شود. اگرچه لایه اوزون استراتوسفری عملاً همه پرتوهای فرابنفش C و بخش عمده فرابنفش B را جذب می‌کند، اما افزایش تخریب این لایه به‌علت فعالیت‌های بشر منجر به افزایش میزان پرتو فرابنفش B در سطح زمین شده است (Paul and Gwynn-Jones, 2003). پرتو فرابنفش B به‌عنوان زیان‌بارترین شکل از نور خورشید که به سطح زمین می‌رسد، می‌تواند به اجزای سلولی گیاهان آسیب وارد کند و به‌عنوان یک تنش اکسیداتیو عمل نماید (Johnny et al., 2010). این تنش اثرات مستقیم و غیرمستقیمی از جمله تغییرات ساختار سه‌بعدی و تخریب DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها، و همچنین ایجاد اختلال در فتوسنتز، رشد و مورفولوژی گیاهان دارد. در پاسخ به این تنش، گیاهان مکانیسم‌های حفاظتی متنوعی را به کار می‌گیرند. در بعد فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، آن‌ها ممکن است ترکیبات جذب‌کننده پرتو فرابنفش B مانند فلاونوئیدها را در اپیدرم برگ تولید کنند و بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه خود را افزایش دهند (Searles et al., 2001). این متابولیت‌های ثانویه، از جمله آلکالوئیدها، فلاونوئیدها و سایر ترکیبات فنولی، علاوه بر نقش غربالگری پرتوهای فرابنفش، به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های قوی نیز عمل کرده و به بقای گیاه تحت شرایط نامساعد کمک می‌کنند (Jacobs, 2014). با این حال، پاسخ گیاهان به پرتو فرابنفش B مطلق نیست و بسته به میزان شار، طول مدت تابش و برهم‌کنش با دیگر عوامل محیطی، می‌تواند نقش تنظیم‌کنندگی یا تخریبی داشته باشد (Zhang and Björn, 2009). جالب توجه است که افزایش متابولیت‌های ثانویه حتی می‌تواند توسط شدت‌های بسیار پایین پرتوهای فرابنفش که هیچ آسیب قابل‌رؤیت یا اثر منفی بر رشد ندارند نیز القا شود (Kataria and Guruprasad, 2014).

در این میان، گیاهان دارویی به دلیل توانایی ذاتی خود در تولید متابولیت‌های ثانویه ارزشمند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. یکی از این گیاهان، پیچ تلگرافی (*Vinca minor* L.)، گیاهی پایا، علفی و خزنده از خانواده خرزهره (Apocynaceae) است. این گیاه دارای خواص قابض، تصفیه‌کننده خون، التیام‌بخش و مدر بوده و در طب سنتی برای درمان بسیاری از بیماری‌ها کاربرد داشته است (Rezaei et al., 2015). ارزش دارویی عمده این گیاه به حضور آلکالوئیدهای ایندولی آن، به‌ویژه از نوع ایورنامین^۳، مربوط می‌شود. همچنین

ترکیباتی نظیر وینکامین، وینبلاستین و وینکرسین که در این گیاه یافت می‌شوند، دارای اثرات ضد توموری، آنتی میکروتوبولی و تعدیل‌کنندگی بر گردش خون مغز هستند (Vas and Gulyas, 2005).

اهمیت بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه پیچ تلگرافی به پرتو فرابنفش با مرور پژوهش‌های پیشین آشکارتر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که پرتو فرابنفش می‌تواند به‌عنوان یک محرک مؤثر، بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه ارزشمند را در گیاهان دارویی تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور مشخص، در گیاه پرپوش (*Catharanthus roseus* L.) که خوشاوند نزدیک پیچ تلگرافی است و مسیر بیوسنتزی مشابهی برای تولید ایندول آلکالوئیدها دارد، تابش پرتو فرابنفش B منجر به تغییرات دینامیکی در متابولیت‌ها، به‌ویژه آلکالوئیدها، و افزایش تجمع آن‌ها شده است (Zhang and Björn, 2009). حتی ترکیب تحریک‌کننده‌هایی نظیر متیل جاسمونات و پرتو فرابنفش B، تجمع وینبلاستین و وینکریستین را بیش از سایر تیمارها افزایش داده است (Rady et al., 2021). علاوه بر این، مشخص شده است که گونه‌های مختلف جنس *Vinca* دارای پروفایل‌های فیتوشیمیایی متنوعی هستند؛ به‌طوری‌که *V. minor* L. از نظر محتوای آلکالوئیدی غنی‌ترین است و خوشاوندان آن می‌توانند سرشار از فلاونوئیدها و سایر ترکیبات فنلی باشند (Chen et al., 2017). این ترکیبات فنلی، از جمله فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها، نه‌تنها به‌عنوان فیلترهای محافظ در برابر پرتو فرابنفش در اپیدرم برگ تجمع می‌یابند، بلکه خاصیت آنتی‌اکسیدانی قدرتمندی نیز دارند (Leelaprakash et al., 2011). از سوی دیگر، واکنش گیاهان به پرتو فرابنفش صرفاً به افزایش متابولیت‌های ثانویه محدود نمی‌شود و شبکه پیچیده‌ای از پاسخ‌های فیزیولوژیک را در بر می‌گیرد. پرتو فرابنفش B می‌تواند به‌طور مستقیم با کاهش فعالیت روبیسکو، تخریب یکپارچگی تیلاکوئیدها و غیرفعال‌سازی فتوسیستم II، آهنگ فتوسنتز را کاهش دهد (Barbato et al., 1995). این تنش اکسیداتیو، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را نیز به چالش می‌کشد. پژوهش‌ها حاکی از آن است که تابش پرتو فرابنفش می‌تواند منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همچون کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز شود (Sarghein et al., 2011)؛ و هم‌زمان، شاخص‌های آسیب‌غشایی مانند مالون‌دی‌آلدهید را افزایش دهد (Pourakbar and Abedzadeh, 2014). حتی گزارش‌هایی مبنی بر تشکیل کریستال‌هایی در پراکسی‌زوم سلول‌ها به دلیل افزایش فعالیت کاتالاز تحت تنش پرتو فرابنفش وجود دارد که نشان از

³. Eburnamine

ریزنمونه‌ها در اتاقک رشد به مدت دو ماه، مریستم انتهایی در محیط کشت MS ریشه‌دار شد. گیاهچه‌های ریشه‌دار شده برای توسعه بیشتر سیستم ریشه، به گلدان‌های حاوی محلول هوگلند (با ترکیب استاندارد) منتقل گردیدند. پس از یک هفته استقرار در محیط کشت هیدروپونیک، تیمارهای پرتو فرابنفش بر روی گیاهان اعمال شد.

مکان و زمان اجرای آزمایش: این تحقیق طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در گلخانه و آزمایشگاه گروه علوم ومهندسی باغبانی دانشگاه ملایر واقع در استان همدان به اجرا درآمد. این مکان در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۸۴ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۶ دقیقه و در ارتفاع ۱۷۸۰ متری از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه منطقه ۲۴۲ میلی‌متر است. گلخانه مورد استفاده دارای جهت شمالی-جنوبی، پوشش پلی‌کربنات و مجهز به سیستم خنک‌کننده (پوشال و پنکه)، تهویه جانبی و سایبان بود. میانگین دمای روزانه گلخانه در طول دوره آزمایش بین ۲۲ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بین ۶۰ تا ۷۰ درصد ثبت گردید.

تیمارهای آزمایشی و شرایط اعمال پرتو فرابنفش: این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. به این منظور، پس از طی دوره استقرار در محلول هوگلند، گلدان‌ها به مدت ۹ روز تحت تیمارهای مختلف پرتو فرابنفش قرار گرفتند. برای کنترل شرایط نوری، از اتاقک‌های رشد با ابعاد ۱۲۰ × ۷۰ × ۴۰ سانتی‌متر مستقر در فضای گلخانه استفاده شد؛ بنابراین دما و رطوبت اتاقک‌ها تابع شرایط گلخانه بود. هر اتاقک رشد به ۴ لامپ فلورسنت مهتابی جهت تأمین روشنایی پایه و بسته به تیمار، یک یا دو لامپ پرتو فرابنفش مجهز بود. لامپ‌های فرابنفش مورد استفاده، ساخت شرکت Q-Lab آمریکا و از نوع لامپ‌های ۴۰ وات و باند پهن بودند که بیش‌ترین تطبیق را با پرتو فرابنفش B و پرتو فرابنفش A دریافتی از نور خورشید در سطح زمین داشتند و بنابراین بهترین شبیه‌سازی ممکن از شرایط طبیعی را فراهم می‌نمودند. فاصله لامپ‌ها از سطح گلدان‌ها ۵۰ سانتی‌متر تنظیم گردید. در هر اتاقک، سه گلدان به‌عنوان سه تکرار زیست‌شناختی قرار داده شدند.

دوره نوری پایه برای تمامی تیمارها ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی بود و اعمال پرتو فرابنفش در میانه دوره روشنایی انجام می‌شد. تیمارهای آزمایشی به‌شرح زیر تعریف شدند:

۱. شاهد: تنها ۵ لامپ فلورسنت (بدون هیچ‌گونه پرتو فرابنفش).
۲. فرابنفش A منقطع: یک لامپ UV-A؛ تابش به مدت ۴۵ دقیقه در میانه دوره روشنایی به‌صورت ناپیوسته در سه دوره ۱۵ دقیقه‌ای با فواصل ۱۵ دقیقه‌ای.
۳. فرابنفش A پیوسته: یک لامپ UV-A؛ تابش به مدت ۴۵ دقیقه پیوسته در میانه دوره روشنایی.

واکنش ساختاری گیاه به این تنش است (Sarghein et al., 2011). بنابراین، واضح است که مطالعه هم‌زمان تغییرات در محتوای متابولیت‌های ثانویه و پاسخ‌های دفاعی فیزیولوژیک در گیاه پیچ تلگرافی، برای ترسیم تصویری جامع از چگونگی پاسخ این گیاه دارویی ارزشمند به سطوح مختلف پرتو فرابنفش و بهره‌برداری هدفمند از آن ضروری است.

شدت و کیفیت نور از فاکتورهای اقلیمی بسیار مهم و غیرقابل کنترلی هستند که بر رشد، نمو و تولید متابولیت‌های گیاهی تأثیر می‌گذارند. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش پرتو فرابنفش در سطح زمین، بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاهان به این پرتو اهمیتی دوچندان یافته است. رهیافت‌های تجربی نشان می‌دهند که درک کامل روند رویدادهای سیگنال‌دهی و پارامترهای مسئول اولیه القاشده به وسیله پرتو فرابنفش، به‌ویژه در گیاهان دارویی، می‌تواند به بهره‌برداری هدفمند از این عامل محیطی برای افزایش کمی و کیفی مواد مؤثره کمک کند. با این وجود، واکنش گیاهان زینتی-دارویی ارزشمندی مانند پیچ تلگرافی به سطوح مختلف پرتو فرابنفش کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر انواع مختلف پرتو فرابنفش بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی در گیاه پیچ تلگرافی طراحی شد تا از این طریق بتوان به بهترین ترکیب تیماری برای افزایش راندمان کمی و کیفی مواد مؤثره دست یافت. در راستای این اهداف، فرض شد که برای کاهش اثرات نامطلوب پرتو فرابنفش، علاوه بر بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز افزایش می‌یابد و سایر شاخص‌های فیزیولوژیک نظیر آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی (پرولین، مالون‌دی‌آلدید) نیز تحت تأثیر این تیمارها قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و شرایط کشت اولیه: در این پژوهش، نشاهای گیاه پیچ تلگرافی (*V. minor* L.) از پژوهشکده گل و گیاهان زینتی محلات تهیه و به گلدان‌هایی با قطر دهانه ۱۵ سانتی‌متر منتقل شدند. ترکیب بستر کشت برای کلیه نشاها به‌صورت یکسان و شامل مخلوطی از خاک باغچه، پرلیت، ماسه و کوکوپیت با نسبت‌های حجمی مساوی (۱:۱:۱:۱) در نظر گرفته شد. پس از طی یک دوره تقریبی ۲۰ روزه برای استقرار و سازگاری گیاهان با شرایط جدید و حصول اطمینان از شروع رشد رویشی، برگ‌های جوان از بخش رأسی گیاهان جدا شده و برای کشت درون‌شیشه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. برای ضدعفونی سطحی، ریزنمونه‌های برگ‌ی ابتدا به مدت ۵ ثانیه در اتانول ۹۶ درصد غوطه‌ور و سپس با آب مقطر استریل شستشو داده شدند. در مرحله بعد، ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم ۳ درصد به مدت ۲۰ دقیقه انجام گرفت. پس از قرار دادن

میلی‌لیتری منتقل شد. نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. مخلوط واکنش شامل ۴۰۰ میکرولیتر بافر، ۳۰۰ میکرولیتر H_2O_2 و ۳۰ میکرولیتر از عصاره روشناور (سوپرناتانت) بود. تغییرات جذب نور بلافاصله هر ۱۰ ثانیه به مدت ۲ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800) ثبت گردید.

رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئید): محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید کل به روش (1987) Lichtenthaler اندازه‌گیری شد. به این منظور، ۰/۱ گرم از برگ تازه وزن شد و در هاون چینی با نیتروژن مایع به‌خوبی پودر گردید. پودر حاصل با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص مخلوط و عصاره به فالتکون ۱۵ میلی‌لیتری منتقل گردید. پس از سانتریفیوژ به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، جذب محلول رویی در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۲ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. از استون خالص به‌عنوان بلانک (شاهد) برای صفر کردن دستگاه استفاده گردید و غلظت رنگیزه‌ها بر اساس روابط استاندارد زیر محاسبه و مقدار رنگیزه بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر گزارش شد.

$$Ca (\mu g/mL) = (11.24 \times A662) - (2.04 \times A645)$$

کلروفیل a

$$Cb (\mu g/mL) = (20.13 \times A645) - (4.19 \times A662)$$

کلروفیل b

$$C(a+b) (\mu g/mL) = (7.05 \times A662) + (18.09 \times A645)$$

کلروفیل کل

$$C(x+c) (\mu g/mL) = (1000 \times A470 - 1.90 \times Ca - 63.14 \times Cb)$$

214 / غلظت کاروتنوئید

$$(mg/g FW) = (C \times V) / (C \times 10) / (0.1 \times 1000) = C \times 0.1$$

(W × 1000) مقدار رنگیزه

C: غلظت رنگیزه V ; (μg/mL) حجم حلال (استون) بر حسب میلی‌لیتر؛ W: وزن تر نمونه گیاهی بر حسب گرم؛ ضریب تبدیل میکروگرم به میلی‌گرم: ۱۰۰۰

فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD): فعالیت آنزیم پراکسیداز طبق روش MacAdam et al. (1992) سنجش شد. مشابه مراحل قبل، ۰/۳ گرم از نمونه برگ با نیتروژن مایع پودر شد و ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم به آن افزوده گردید. پس از سانتریفیوژ در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه، از روشناور برای سنجش فعالیت آنزیم استفاده شد. تغییرات جذب نور در طول موج ۴۷۵ نانومتر هر ۱۰ ثانیه به مدت ۲ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرائت و ثبت گردید. فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی. $(26/6 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1})$ بر اساس میزان H_2O_2 احیا

۴. فرابنفش B منقطع: یک لامپ UV-B؛ تابش به مدت ۴۵ دقیقه ناپیوسته در سه دوره ۱۵ دقیقه‌ای با فواصل ۱۵ دقیقه‌ای.

۵. فرابنفش B پیوسته: یک لامپ UV-B؛ تابش به مدت ۴۵ دقیقه پیوسته.

۶. فرابنفش AB منقطع: یک لامپ UV-A و یک لامپ UV-B؛ تابش هم‌زمان هر دو به مدت ۴۵ دقیقه ناپیوسته در سه دوره ۱۵ دقیقه‌ای.

۷. فرابنفش AB پیوسته: یک لامپ UV-A و یک لامپ UV-B؛ تابش هم‌زمان هر دو به مدت ۴۵ دقیقه پیوسته.

نمونه‌برداری: پس از پایان دوره ۹ روزه اعمال تیمارها، بخش هوایی گیاهان (شامل ساقه و برگ) جدا شد. بلافاصله، هر نمونه گیاهی به‌طور جداگانه درون کیسه‌های زیپ‌کیپ قرار گرفته، در معرض نیتروژن مایع منجمد و سپس برای نگهداری تا زمان انجام سنجش‌های بیوشیمیایی، به فریزر با دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد منتقل گردید.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک

پراکسیداسیون لیپیدهای غشا (مالون‌دی‌آلدهید): میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشا از طریق سنجش محتوای مالون‌دی‌آلدهید (MDA) و بر اساس روش واکنش با تیوباربیتوریک اسید (TBA) مطابق با پروتکل Buege and Aust (1978) اندازه‌گیری شد. به این منظور، ۰/۵ گرم از نمونه برگ تازه در هاون چینی حاوی ۵ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید ۲۰ درصد (TCA) آسیاب گردید. عصاره حاصل به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه (rpm) سانتریفیوژ شد. سپس، محلول رویی به مدت ۲۵ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از کاهش سریع دما با یخ خردشده، مجدداً به مدت ۵ دقیقه با همان سرعت قبل سانتریفیوژ گردید. در نهایت، جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر قرائت شد. برای حذف اثر ترکیبات اضافی، مقدار جذب در ۶۰۰ نانومتر (A_{600}) از جذب در ۵۳۲ نانومتر (A_{532}) کسر گردید و غلظت مالون دی‌آلدئید با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

$$MDA(\mu mol/gFW^{-1}) = [(A_{532} - A_{600})/155.5] \times 1000$$

فعالیت آنزیم کلتالاز (CAT): فعالیت آنزیم کلتالاز با استفاده از روش Chance and Maehly (1955) و بر اساس سنجش کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر ناشی از تجزیه پراکسید هیدروژن (H_2O_2) اندازه‌گیری شد. ابتدا ۰/۳ گرم از نمونه برگ منجمد در هاون چینی روی یخ با نیتروژن مایع به‌طور کامل پودر گردید. سپس ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم حاوی EDTA و PVP به آن اضافه و سوسپانسیون حاصل به میکروتیوب‌های ۲

ریشه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به وزن ثابت برسند و سپس توزین شدند.

تجزیه و تحلیل آماری: داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) تجزیه واریانس (ANOVA) شدند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

تأثیر پرتو فرابنفش بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی: فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به شدت تحت تأثیر پرتوهای فرابنفش قرار می‌گیرد. پرتو فرابنفش سبب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) شده که باعث ایجاد تنش اکسیداتیو می‌گردند (Rao et al., 1996).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر پرتو فرابنفش بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاه پیچ تلگرافی در سطح یک درصد معنی‌دار شد، اما فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز تفاوت معنی‌داری را در بین تیمارها نشان نداد (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۴۴ واحد) در تیمار فرابنفش A منقطع مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (۰/۰۵ واحد) داشت (شکل ۱). همچنین، بیشترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۰/۵۵ واحد) به تیمار فرابنفش AB منقطع اختصاص یافت که نسبت به سایر تیمارها و شاهد (۰/۴ واحد) افزایش معنی‌داری را نشان داد (شکل ۲).

شده در دقیقه بر اساس رابطه زیر محاسبه و به صورت واحد بر گرم وزن تر برگ بیان شد.

$$\text{میزان فعالیت} = E \times VS / [VT \times (A100 - A40)]$$

اختلاف میزان جذب در ثانیه ۱۰۰ و ۴۰ در طول A100-A40

ضریب E: حجم کل نمونه داخل کووت Vt: موج ۴۷۵ نانومتر

حجم روشن‌آور Vs: خاموشی

محتوای فنل کل: محتوای فنل کل به روش اسپکتروفتومتری با استفاده از معرف فولین-سیوکالتیو (Folin-Ciocalteu) مطابق با پروتکل McDonald et al. (2001) اندازه‌گیری شد. به این منظور، یک گرم از نمونه برگ خشک شده وزن و به فالكون‌های ۱۵ میلی‌لیتری منتقل گردید و ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد به آن اضافه شد. پس از ۴۸ ساعت عصاره‌گیری در تاریکی و دمای اتاق، محلول از کاغذ صافی عبور داده شد. برای واکنش، ۰.۵ میلی‌لیتر از معرف فولین-سیوکالتیو با ۴ میلی‌لیتر محلول کربنات سدیم (Na_2CO_3) یک مولار مخلوط و سپس ۰.۵ میلی‌لیتر از عصاره گیاهی به آن افزوده شد. مخلوط واکنش به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفت و سپس جذب آن در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت گردید. غلظت فنل کل با استفاده از منحنی استاندارد اسید گالیک (در محدوده ۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) محاسبه و نتایج به صورت میلی‌گرم معادل اسید گالیک در گرم وزن خشک (mg GAE/g DW) گزارش گردید.

وزن تر و خشک ریشه: در پایان دوره آزمایش و پس از نمونه‌برداری از بخش هوایی، ریشه‌ها به دقت از گلدها خارج و با آب مقطر شستشو داده شدند. پس از خشک کردن کامل سطح ریشه‌ها با دستمال کاغذی، وزن تر آن‌ها بلافاصله با ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری گردید. برای تعیین وزن خشک،

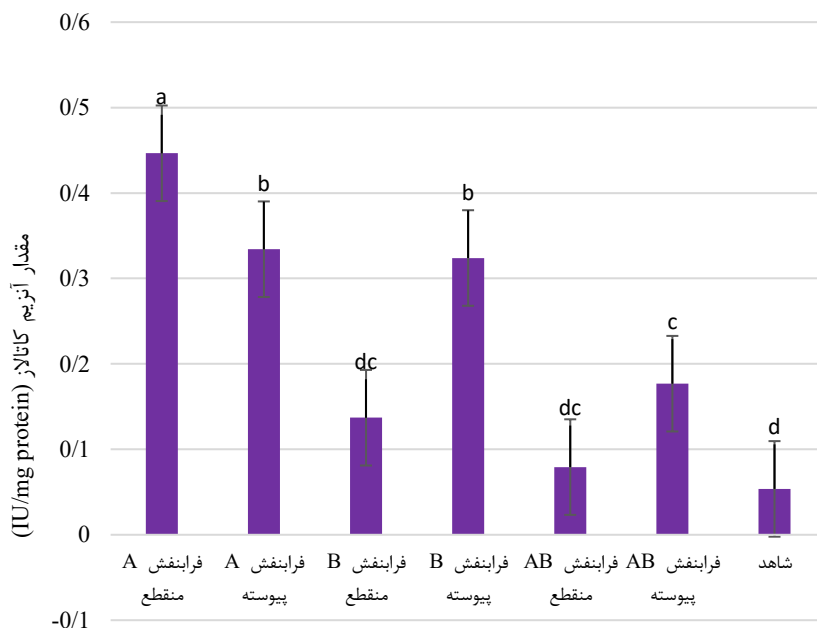
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر پرتو فرابنفش بر آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پروکسیداز، گایاکول پروکسیداز در گیاه پیچ تلگرافی

Table 1- Results of variance analysis of the effect of ultraviolet radiation on catalase, ascorbate peroxidase, and guaiacol peroxidase enzymes in *V. minor* L.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات mean squares		
		گایاکول پروکسیداز Guaiacol peroxidase	آسکوربات پروکسیداز Ascorbate peroxidase	کاتالاز Catalase
تیمار Treatment	6	0.001 ^{ns}	0.058 ^{**}	0.065 ^{**}
خطا Error	12	0.002	0.002	0.003
ضریب تغییرات CV (%)	-	31.16	15.52	27.12

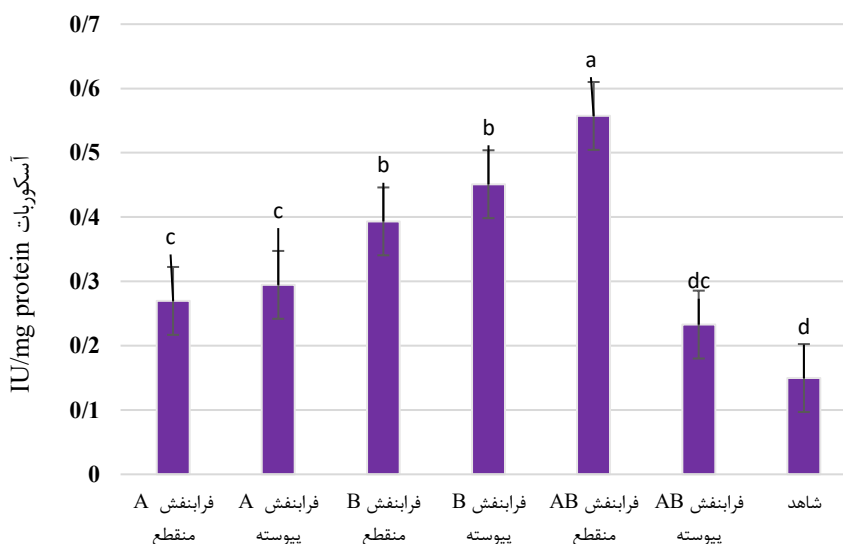
ns و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

ns, **: non-significant, significant at $p \leq 0.01$, respectively



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 1- Comparison of the average effect of ultraviolet radiation on catalase enzyme activity in *V. minor* L.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر فعالیت آنزیم آسکوربات پروکسیداز در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 2- Comparison of the average effect of ultraviolet radiation on the activity of ascorbate peroxidase enzyme in *V. minor* L.

و کاتالاز و پراکسیدازها، پراکسید هیدروژن را به آب تجزیه می‌نمایند (Scandalios, 1993). در حقیقت، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان یک مکانیسم دفاعی کلیدی برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن در برابر پرتو فرابنفش است و باعث حفظ و پایداری تمامیت غشای سلولی و دیگر ساختارهای زیر سلولی می‌شود (Ghasemi *et al.*, 2023).

در پژوهش حاضر، افزایش معنی‌دار فعالیت کاتالاز تحت تیمار فرابنفش A منقطع و افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز تحت تیمار فرابنفش AB منقطع، نشان‌دهنده القای مؤثر سیستم دفاع

سلول‌های گیاهی برای حفاظت در مقابل آسیب‌های اکسیداتیو مجهز به سیستم جاروب‌کننده رادیکال‌های آزاد هستند. این سیستم‌ها شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و سیستم‌های غیر آنزیمی شامل آسکوربیک اسید، کاروتنوئیدها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها است (Booij-James *et al.*, 2000). این آنزیم‌ها گیاهان را در برابر تنش اکسایشی با تبدیل رادیکال‌های سوپراکسید به پراکسید هیدروژن و تجزیه H_2O_2 به آب و اکسیژن محافظت می‌کنند؛ به‌طوری‌که سوپراکسید دیسموتاز (SOD) رادیکال‌های سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن تبدیل کرده

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز و پراکسیداز در شنبلیله شد (Hajipour et al., 2022). (et al. Rastegar, 2021) نیز گزارش کردند که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز در گل گندم با تیمار فرابنفش B افزایش یافت. Pourakbar and Abedzadeh (2014) نیز در تحقیق خود روی بادرنجبویه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز را تحت تیمارهای UV-B و UV-C گزارش کردند. هم‌چنین، Sarghein et al. (2011) در مطالعه خود بر روی فلفل قلمی مشاهده کردند که اشعه فرابنفش باعث تشکیل کریستال‌هایی در پراکسی‌زوم سلول‌های مزوفیل شد که این کریستال‌ها به علت افزایش فعالیت کاتالاز تشکیل می‌شوند. این مشاهدات با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی داشته و تأیید می‌کند که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، یک پاسخ حفاظتی عمومی در گیاهان در برابر تنش پرتو فرابنفش است. با این حال، عدم معنی‌داری فعالیت گایاکول پراکسیداز در مطالعه حاضر ممکن است به دلیل کوتاه‌بودن دوره تیمار (۹ روز) یا شدت متوسط تابش به کار رفته باشد که برای تحریک این آنزیم کافی نبوده است.

تأثیر پرتو فرابنفش بر رنگیزه‌های فتوسنتزی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پرتو فرابنفش بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

آنزیمی در پیچ تلگرافی برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از پرتو فرابنفش است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، پرتو فرابنفش B به‌عنوان یک تنش اکسیداتیو عمل می‌کند و فرآیندهای فتوشیمیایی مختلف می‌توانند انواع گونه‌های فعال اکسیژن را تولید کنند (Johnny et al., 2010). بنابراین، گیاه با افزایش فعالیت کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز تلاش می‌کند تا تعادل اکسایش-کاهش سلولی را حفظ نماید. نکته جالب توجه، پاسخ متفاوت آنزیم‌ها به نوع تیمار فرابنفش است؛ به‌طوری‌که کاتالاز بیش‌ترین واکنش را به فرابنفش A منقطع و آسکوربات پراکسیداز بیش‌ترین واکنش را به ترکیب فرابنفش AB منقطع نشان داد. این امر می‌تواند بیانگر آن باشد که مسیرهای سیگنال‌دهی و پاسخ این دو آنزیم به طیف‌های مختلف پرتو فرابنفش متفاوت است و ترکیب UV-A و UV-B به‌صورت هم‌افزا، سیستم آسکوربات-گلوتاتیون را که آسکوربات پراکسیداز جزئی از آن است، بیش‌تر تحریک می‌کند. هم‌چنین، جالب توجه است که در این مطالعه، الگوی منقطع تابش نسبت به پیوسته در القای فعالیت آنزیمی مؤثرتر بوده است که می‌تواند به دلیل فرصت ترمیم و پاسخ تطبیقی گیاه در فواصل بین دوره‌های تابش باشد.

در تطابق با نتایج مطالعه حاضر، در سه گونه آویشن دناپی، قره‌باغی و باغی نیز مقدار مالون‌دی‌آلدهید، نشت الکترولیتی و فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون ردوکتاز و آسکوربات پراکسیداز تحت تیمار فرابنفش B افزایش نشان داد (شایگان فر و همکاران، ۱۳۹۶). پرتو فرابنفش هم‌چنین باعث افزایش

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر پرتو فرابنفش بر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در گیاه پیچ تلگرافی

Table 2- Results of analysis of variance of the effect of ultraviolet radiation on chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids in *V. minor* L.

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
تیمار Treatment	6	0.069**	0.027**	0.1**	0.032**
خطا Error	12	0.007	0.001	0.001	0.006
ضریب تغییرات CV (%)	-	14.35	18.35	15.35	10.23

ns و ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد.

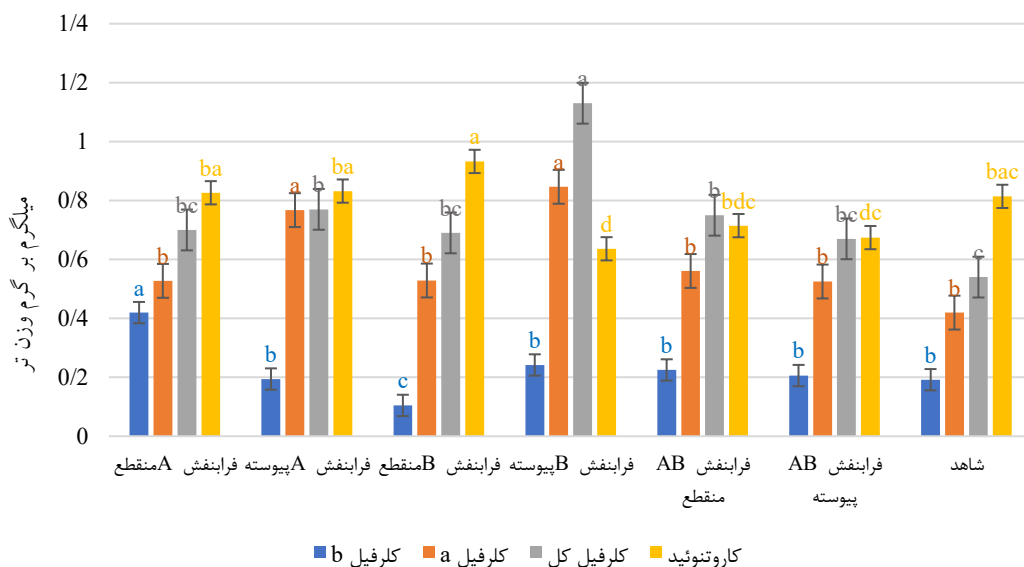
ns, **: non-significant, significant at $p \leq 0.01$, respectively

بیشترین و کمترین محتوای کلروفیل b به‌ترتیب به تیمارهای فرابنفش A منقطع (۰/۴۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) و فرابنفش B منقطع (۰/۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) اختصاص داشت که هر دو با شاهد (۰/۱۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) اختلاف معنی‌دار نشان دادند. هم‌چنین، بیشترین محتوای کاروتنوئید در تیمار فرابنفش B منقطع

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین محتوای کلروفیل a در تیمار فرابنفش B پیوسته (۰/۸۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کمترین آن در شاهد (۰/۴۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. تیمار فرابنفش B پیوسته با فرابنفش A پیوسته اختلاف معنی‌دار داشت، اما با سایر تیمارها و شاهد اختلاف معنی‌داری نشان نداد.

داشت، اما فرابنفش B پیوسته با شاهد اختلاف معنی‌دار نشان نداد (شکل ۳).

(۰/۹۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کمترین آن در فرابنفش B پیوسته (۰/۶۴ میلی گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. تیمار فرابنفش B منقطع با شاهد (۰/۸۱ میلی گرم بر گرم وزن تر) اختلاف معنی‌دار



شکل ۳- تاثیر تابش های مختلف پرتو فرابنفش بر محتوای کلروفیل a, b, کل و کاروتنوئید در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 3- The effect of different ultraviolet radiations on the content of chlorophyll a, b, total and carotenoids in *V. minor* L.

کاهش آن)، نشان می‌دهد که این رژیم تابشی احتمالاً فراتر از آستانه تحمل گیاه بوده و نه تنها نتوانسته سیستم دفاعی را فعال کند، بلکه ممکن است به مسیرهای بیوسنتزی یا خود مولکول‌های کاروتنوئید آسیب زده باشد. این تفسیر با کاهش شدید کلروفیل b در تیمار B منقطع نیز هم‌خوانی دارد. کلروفیل b عمدتاً در کمپلکس‌های جمع‌آوری نور (LHCII) که به فتوسیستم II متصل هستند، قرار دارد. کاهش معنی‌دار این رنگیزه می‌تواند یک استراتژی گیاه برای کاهش سطح جذب نور و به تبع آن، کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش ناشی از UV-B باشد. در مقابل، افزایش معنی‌دار کلروفیل b در تیمار فرابنفش A منقطع نشان می‌دهد که UV-A احتمالاً تأثیر تنظیمی متفاوتی بر ساختار کمپلکس‌های برداشت نور داشته است. این مشاهده که هیچ‌یک از تیمارها منجر به کاهش معنی‌دار کلروفیل a نشدند و حتی B پیوسته تمایل به افزایش آن را نیز نشان داده، شاید دلالت دارد که مراکز واکنش فتوسیستم‌ها احتمالاً از طریق همین مکانیسم‌های حفاظتی و تنظیمی، تا حدی از تخریب کامل مصون مانده‌اند.

در تطابق با نتایج مطالعه حاضر، Kumari et al. (2009) در گیاه سوسن صغیر گزارش کردند که پرتو فرابنفش B منجر به افزایش معنی‌دار کاروتنوئیدها گردید. همچنین، در مطالعه‌ای روی گیاه پنیرباد، کاروتنوئیدها تحت پرتو فرابنفش B افزایش یافتند و به نظر

پرتو فرابنفش می‌تواند به‌طور مستقیم با آسیب به پروتئین D1 در مرکز واکنش فتوسیستم II و همچنین کاهش فعالیت آنزیم روبیسکو، آهنگ فتوسنتز را مختل کند (Ghasemi et al., 2023). کاهش روبیسکو یک پدیده عمومی در تخریب پروتئین‌ها تحت پرتو فرابنفش است، زیرا این آنزیم دارای اسید آمینه تریپتوفان بوده و جذب پرتو فرابنفش توسط این اسید آمینه منجر به اکسیداسیون و تخریب آن می‌گردد (Greenberg et al., 1996). با این حال، گیاهان سازوکارهای حفاظتی متنوعی را در برابر این تنش به کار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین این سازوکارها، افزایش بیوسنتز کاروتنوئیدهاست که به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های قوی، دستگاه فتوسنتزی را از طریق سرکوب کلروفیل سه‌تایی، اکسیژن منفرد و سایر رادیکال‌های آزاد مضر محافظت می‌کنند (Cockell and Horneck, 2001).

در پژوهش حاضر، دو یافته کلیدی و متضاد، پیچیدگی پاسخ رنگیزه‌های فتوسنتزی پیچ تلگرافی به پرتو فرابنفش را آشکار می‌سازد. نخست، افزایش چشمگیر و معنی‌دار کاروتنوئیدها در تیمار فرابنفش B منقطع (نسبت به شاهد)، یک پاسخ دفاعی کلاسیک و قدرتمند را نشان می‌دهد. این امر حاکی از آن است که گیاه با موفقیت، مسیر بیوسنتز این محافظ‌های نوری را در پاسخ به تنش القاشده توسط UV-B منقطع فعال کرده است. در نقطه مقابل، عدم افزایش معنی‌دار کاروتنوئیدها در تیمار فرابنفش B پیوسته (و حتی

می‌تواند نقش تنظیم‌کنندگی یا تخریبی داشته باشد (Zhang and Björn, 2009). نتایج تحقیق حاضر به‌طور مشخص نشان می‌دهد که در گیاه پیچ تلگرافی، نه‌تنها نوع طیف پرتو فرابنفش (UV-A) در مقابل (UV-B)، بلکه الگوی تابش (منقطع در مقابل پیوسته) نیز عامل تعیین‌کننده‌ای در جهت و شدت پاسخ‌های دفاعی و تنظیمی رنگیزه‌های فتوسنتزی است.

تأثیر پرتو فرابنفش بر وزن تر، خشک و قند در گیاه پیچ تلگرافی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر پرتو فرابنفش بر میزان قند در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر وزن تر و خشک ریشه تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

می‌رسد این ترکیبات گیاه را از آسیب پرتو فرابنفش B مزاد حفاظت می‌کنند (Takshak and Agrawal, 2014). در گیاه علف لیمو (*Cymbopogon citrates*) نیز Kumari and Agrawal (2010) افزایش اولیه کاروتنوئیدها تحت پرتو فرابنفش B را گزارش کردند. در تطابق با نتایج مطالعه حاضر، Maffei *et al.* (1999) گزارش کردند که تابش پرتو فرابنفش A باعث افزایش کلروفیل b در سویا (*Glycine max* L.) شد. با این وجود، نتایج مطالعه Enteshari *et al.* (2005) نشان داد که تفاوت معنی‌داری در میزان کلروفیل a و b بین گیاهان سویای تیمار شده با پرتو فرابنفش A و گیاهان شاهد وجود نداشت. این تناقض‌ها در نتایج پژوهش‌های مختلف، با این دیدگاه هم‌خوانی دارد که اثر پرتو فرابنفش B صرفاً یک اثر مخرب مطلق نیست، بلکه بسته به میزان شار، طول مدت تابش و گونه گیاهی،

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر پرتو فرابنفش بر وزن تر، وزن خشک و قند در گیاه پیچ تلگرافی

Table 3- Results of analysis of variance of the effect of ultraviolet radiation on fresh weight, dry weight and sugar in *V. minor* L.

منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares		
		وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	قند Sugar
تیمار Treatment	6	0.08 ns	0.002 ns	40.75 **
خطا Error	12	0.12	0.002	6.71
ضریب تغییرات CV (%)	-	27.71	37.6	8.66

ns و ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد.

ns, **: non-significant, significant at $p \leq 0.01$, respectively

کاهش اتلاف آب است، می‌تواند جذب CO_2 و در نتیجه فتوسنتز را محدود کرده و محتوای قند را تحت تأثیر قرار دهد.

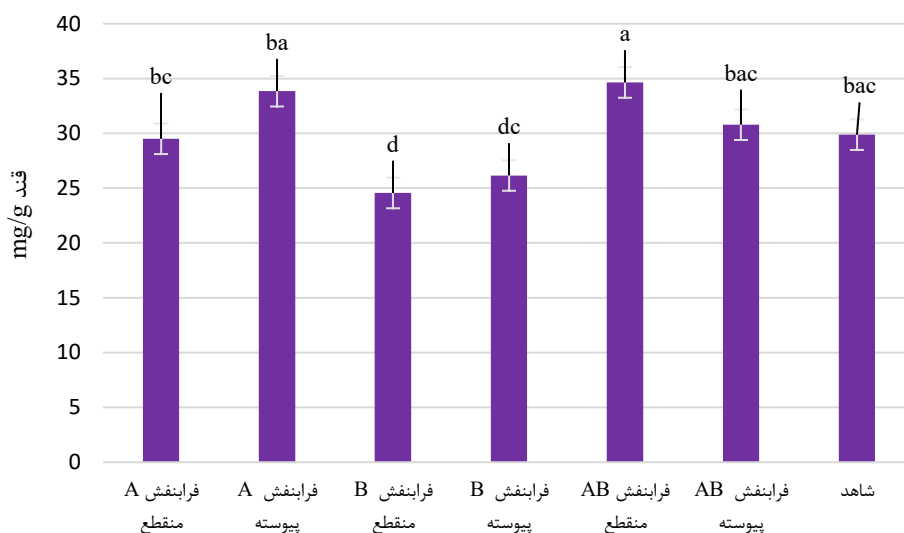
در پژوهش حاضر، افزایش معنی‌دار قند در تیمار فرابنفش AB پیوسته نسبت به شاهد، یک یافته قابل تأمل است. این نتیجه می‌تواند ناشی از چندین سازوکار باشد. نخست، ممکن است ترکیب هم‌زمان UV-A و UV-B به‌صورت پیوسته، با تحریک سنتز ترکیبات محافظتی (نظیر فلاونوئیدها که پیش‌تر به افزایش آن‌ها اشاره شد)، از دستگاه فتوسنتزی در برابر تخریب گسترده محافظت کرده و حتی با ایجاد یک تنش ملایم، کارایی فتوسنتز را افزایش داده باشد. دوم، این احتمال وجود دارد که افزایش قند، ناشی از هیدرولیز نشاسته و سایر پلی‌ساکاریدهای ذخیره‌ای برای تأمین اسکلت‌های کربنی مورد نیاز جهت بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه دفاعی باشد. در واقع، گیاه تحت تنش، ذخایر خود را بسیج کرده و آن‌ها را به قندهای ساده‌تر قابل استفاده تبدیل می‌کند. نکته جالب توجه آن است که تیمار B منقطع با وجود القای قوی‌ترین پاسخ‌های دفاعی در بخش‌های قبلی (مانند افزایش فعالیت کاتالاز و کاروتنوئیدها)، کمترین میزان قند را

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین میزان قند در تیمار فرابنفش AB منقطع ($34/63$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کمترین آن در تیمار فرابنفش B منقطع ($24/56$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. تیمار AB پیوسته با شاهد اختلاف معنی‌دار نداشت، اما تیمار B منقطع با شاهد اختلاف معنی‌دار نشان داد (شکل ۴).

پرتو فرابنفش می‌تواند با تأثیر بر فتوسنتز و تنفس، تعادل کربن گیاه را دستخوش تغییر کند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، آسیب به پروتئین D1 در فتوسیستم II و کاهش فعالیت روبیسکو از پیامدهای شناخته‌شده تابش پرتو فرابنفش B است (قاسمی، ۱۳۸۲). این اختلالات فتوسنتزی می‌توانند به کاهش تولید قندهای احیاکننده منجر شوند. از سوی دیگر، بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه به‌عنوان یک فرآیند سازش‌پذیری کلیدی در پاسخ به پرتو فرابنفش، می‌تواند باعث تغییر در تسهیم کربن از ذخیره رشد گیاه به سمت مسیر تولید این متابولیت‌ها شود (Kataria and Guruprasad, 2014). این امر به نوبه خود می‌تواند بر ذخایر قندی گیاه تأثیر بگذارد. همچنین، بسته شدن روزنه‌ها در پاسخ به پرتو فرابنفش که یک مکانیسم دفاعی برای

ثانویه فرآیندهایی انرژی بر هستند که به سرعت ذخایر قندی گیاه را مصرف می‌کنند.

نشان داد. این امر می‌تواند بیانگر مصرف سریع قندها برای سوخت‌رسانی به همان مسیرهای دفاعی فعال باشد؛ به عبارت دیگر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و بیوسنتز متابولیت‌های



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر محتوای قند گیاهان پیچ تلگرافی تحت تیمار

Figure 4- Comparison of the average effect of ultraviolet radiation on the sugar content of treated *V. minor* L.

به شاهد داشتند. در همان مطالعه، کاهش میزان قندهای احیاکننده به‌خصوص در ساقه تحت تیمار UV مشاهده شد که بیانگر کاهش میزان فتوسنتز است؛ اما در ریشه کاهش معنی‌داری در میزان قندهای احیاکننده دیده نشد. این تفاوت در نتایج، بر پیچیدگی پاسخ گیاهان مختلف به پرتو فرابنفش تأکید دارد و نشان می‌دهد که گونه گیاهی، اندام مورد مطالعه، نوع طیف پرتو و الگوی تابش، همگی در تعیین نتیجه نهایی دخیل هستند. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در گیاه پیچ تلگرافی، ترکیب UV-A و UV-B به‌صورت پیوسته می‌تواند به‌عنوان یک محرک ملایم، تجمع قندها را افزایش دهد، در حالی که UV-B منقطع با وجود القای قوی‌ترین پاسخ‌های دفاعی، ذخایر قندی گیاه را به مصرف می‌رساند.

تأثیر پرتو فرابنفش بر مالون‌دی‌آلدهید، فنل کل و پرولین: مالون‌دی‌آلدهید (MDA) حاصل تجزیه اسیدهای چرب غیراشباع بوده و به‌عنوان شاخص زیستی پراکسیداسیون لیپیدها در مواجهه با گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) شناخته می‌شود. پرتوهای فرابنفش با افزایش تولید ROS، موجب پراکسیداسیون لیپیدهای غشای پلاسمایی و غشاهای درونی اندام‌هایی نظیر کلروپلاست و میتوکندری می‌شوند که محصول نهایی آن ترکیباتی مانند MDA است. وقوع پراکسیداسیون در لیپیدهای غشا، ساختار غشا را منفذدار کرده و کاهش شاخص پایداری غشای سلولی و نشت مواد را به همراه دارد (Eraslan et al., 2008). در مقابل، گیاهان برای مقابله با آسیب

عدم معنی‌داری وزن تر و خشک ریشه در پژوهش حاضر با برخی مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که دوره ۹ روزه تیمار پرتو فرابنفش، اگرچه برای القای پاسخ‌های بیوشیمیایی کافی بوده، اما برای ایجاد تغییرات معنی‌دار در زیست‌توده ریشه کوتاه بوده است. از سوی دیگر، از آنجا که پیچ تلگرافی گیاهی چندساله و دارای ریشه‌های نابجای گسترده است، ممکن است منابع ذخیره‌ای موجود در ریشه، آن را در برابر نوسانات کوتاه‌مدت محیطی مقاوم ساخته باشد. همچنین، با توجه به اینکه در آزمایش حاضر از محلول هوگلند برای کشت استفاده شده و عناصر غذایی به‌راحتی در دسترس ریشه بودند، گیاه نیازی به توسعه بیشتر سیستم ریشه‌ای احساس نکرده است. این یافته با دیدگاهی هم‌خوانی دارد که پرتو فرابنفش B را بیش‌تر به‌عنوان یک تعدیل‌کننده متابولیسم ثانویه مطرح می‌کند تا یک عامل بازدارنده رشد، مشروط بر اینکه شدت و مدت تابش از آستانه تحمل گیاه فراتر نرود (Zhang and Björn, 2009).

در تحقیقات متعدد بیان شده است که اشعه فرابنفش A قسمت کم‌خطر پرتو فرابنفش است و می‌تواند سبب انواع واکنش‌های رشدی شود (Tezuka et al., 1993; Chen et al., 2019; Zhang et al., 2020). با این حال، Rashidi Ravari et al. (2003) در پژوهشی بر روی کلزا نشان دادند که طول اندام هوایی، طول ریشه، وزن خشک ریشه و ساقه تحت تیمار UV-B و UV-C کاهش چشمگیری نسبت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پرتو فرابنفش بر محتوای مالون دی آلدئید، فنل کل و پرولین در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۴).

نوری، مقادیر بالایی فیلترهای نوری شامل فنل ها و فلاونوئیدها را در اپیدرم برگ های خود تولید می کنند. این ترکیبات جزو آنتی اکسیدان های غیر آنزیمی محسوب شده و در شرایط تنش های غیرزیستی، نقش فعالی در جاروب کردن رادیکال های آزاد و گونه های فعال اکسیژن ایفا می کنند.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر پرتو فرابنفش بر فنل کل، پرولین و مالون دی آلدئید در گیاه پیچ تلگرافی

Table 4- Results of variance analysis of the effect of ultraviolet radiation on total phenol, proline and MDA in *V. minor* L.

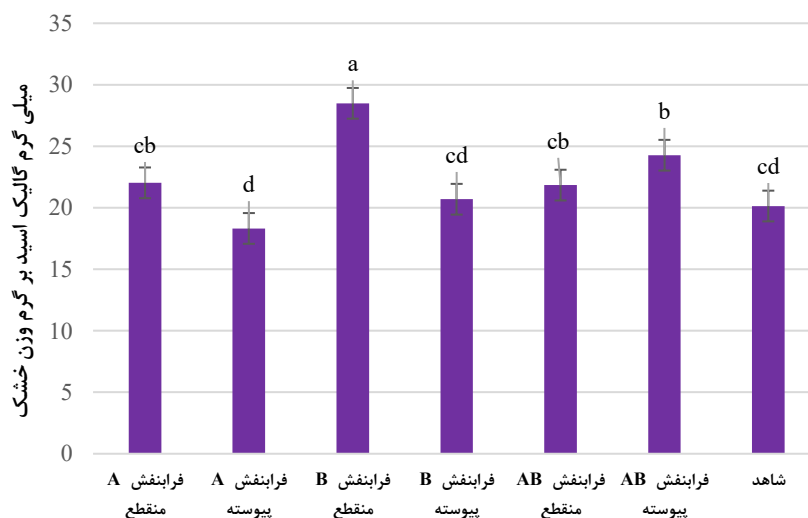
منابع تغییرات S.O. V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares		
		فنل کل Total phenol	پرولین Proline	مالون دی آلدئید MDA
تیمار Treatment	6	32.25 **	0.07**	11674.62 **
خطا error	12	3.18	0.008	1288.93
ضریب تغییرات CV (%)	-	8.01	6.77	11.89

** : معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد.

***: significant at $p \leq 0.01$.

نتایج مقایسه میانگین ها برای فنل کل نشان داد که بیشترین مقدار آن در تیمار فرابنفش B منقطع (۲۸/۴۹ میلی گرم معادل اسید گالیک در گرم وزن خشک) مشاهده شد که اختلاف معنی داری با

شاهد داشت. کمترین مقدار فنل کل نیز به تیمار فرابنفش A پیوسته (۱۸/۳۲ میلی گرم معادل اسید گالیک در گرم وزن خشک) اختصاص یافت که آن با شاهد اختلاف معنی دار نشان نداد (شکل ۵).



شکل ۵- نمودار مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر فنل در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 5- Chart comparing the average effect of ultraviolet radiation on phenol in *V. minor* L

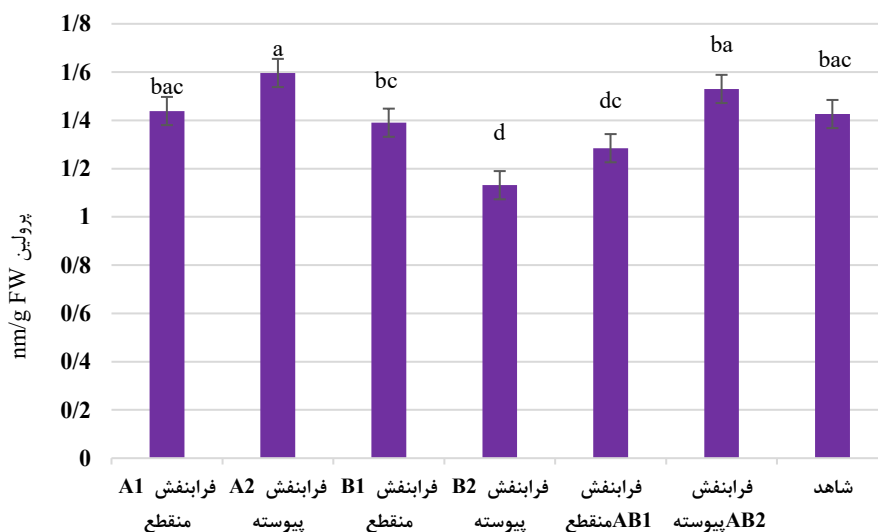
نتایج مقایسه میانگین پرولین نشان داد که تیمار فرابنفش A پیوسته (۱/۶۰ میلی گرم بر گرم وزن تر) بیشترین مقدار پرولین را داشت که با شاهد (۱/۴۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) اختلاف معنی دار نشان نداد. در مقابل، تیمار فرابنفش B پیوسته (۱/۱۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) کمترین مقدار پرولین را به خود اختصاص داد و با شاهد اختلاف معنی دار داشت (شکل ۶).

نتایج مقایسه میانگین مالون دی آلدئید نشان داد که بیشترین مقدار MDA به طور غیرمنتظره ای در تیمار شاهد (۵/۴۲ نانومول بر گرم

یکی از مسیرهای متابولیکی گیاهان که به شدت تحت تأثیر پرتو فرابنفش قرار می گیرد، مسیر بیوسنتز ترکیبات فنولی است. در این مسیر، علاوه بر فلاونوئیدها، فنول های ساده، تانن ها و لیگنین ها نیز سنتز می شوند. ترکیبات فنلی از طریق یک تبدیل یک طرفه به رادیکال های فنوکسی (توسط آنزیم یا به طور غیرمستقیم)، خاصیت پاداکسایشی خود را اعمال می کنند. این رادیکال ها می توانند به وسیله ترکیبات دیگری مانند آسکوربیک اسید احیا شوند (Eraslan et al., 2008).

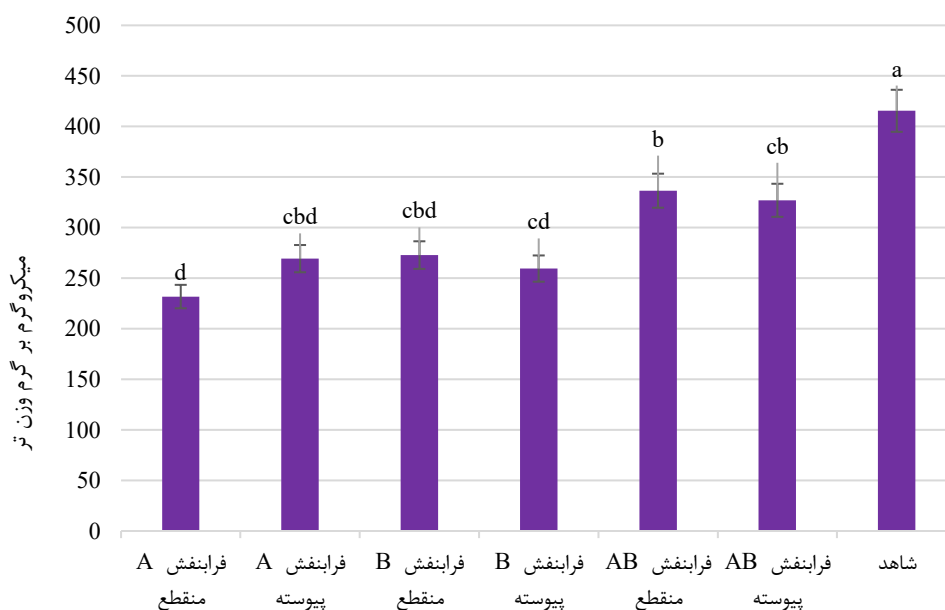
شاهد) با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نشان ندادند، اما همگی با شاهد اختلاف معنی‌دار داشتند (شکل ۷).

وزن تر) و کمترین آن در تیمار فرابنفش A منقطع (۸/۲۳) نانومول بر گرم وزن تر) مشاهده شد. کلیه تیمارهای پرتو فرابنفش (به استثنای



شکل ۶- نمودار مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر پرولین در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 6- Comparison chart of the average effect of ultraviolet radiation on proline in *V. minore* L.



شکل ۷- نمودار مقایسه میانگین اثر پرتو فرابنفش بر مالون دی آلدهید در گیاه پیچ تلگرافی

Figure 7- Comparison chart of the average effect of ultraviolet radiation on MDA in *V. minore* L.

تیمار A منقطع و آسکوربات پراکسیداز در تیمار AB منقطع، نشان‌دهنده یک بسیج دفاعی هماهنگ و تمام‌عیار در پاسخ به پرتو فرابنفش است که در آن UV-B منقطع نقشی محوری در القای شاخه غیرآنزیمی این دفاع ایفا می‌کند.

نکته بسیار جالب و تأییدکننده اثربخشی این پاسخ‌های دفاعی، کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید (MDA) در تمامی تیمارهای پرتو فرابنفش نسبت به شاهد است. کاهش MDA در تیمارهایی که اتفاقاً بالاترین سطح دفاع آنتی‌اکسیدانی را نشان می‌دهند، گواه آن است

نتایج این بخش، همراه با یافته‌های قبلی، تصویر بسیار منسجمی از یک استراتژی دفاعی موفق و چندلایه در گیاه پیچ تلگرافی ترسیم می‌کند. محور مرکزی این داستان دفاعی، تیمار فرابنفش B منقطع است. این تیمار به‌عنوان تنها تیماری که توانسته محتوای فنل کل را به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش دهد، جایگاه ویژه‌ای در القای سپر دفاعی غیرآنزیمی گیاه دارد. این افزایش قدرتمند فنل، در کنار رکورد بیشینه کاروتنوئیدها (دفاع آنتی‌اکسیدانی در کلروپلاست) و در هماهنگی کامل با اوج فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز در

توانسته است چرخه مخرب اکسیداتیو را در همان مراحل اولیه مهار کند. این مشاهده با این دیدگاه همخوانی دارد که آسیب پرتو فرابنفش محیطی یک قاعده نیست و نتیجه نهایی به برهم کنش پیچیده بین میزان شار، طول مدت تابش و ظرفیت ذاتی سیستم دفاعی گونه گیاهی بستگی دارد (Zhang and Björn, 2009). نتایج این تحقیق به روشنی نشان می‌دهد که پیچ تلگرافی، با به کارگیری یک استراتژی دفاعی پیش‌گیرانه و چندلایه، به‌ویژه در پاسخ به تابش منقطع UV-B، نه تنها در برابر تنش اکسیداتیو مقاومت می‌کند، بلکه به سطحی از آمادگی دفاعی دست می‌یابد که فراتر از شرایط عادی است.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر به روشنی نشان داد که پاسخ فیزیولوژیک گیاه دارویی پیچ تلگرافی (*V. minor* L.) به پرتو فرابنفش، نه تنها به نوع طیف (UV-A یا UV-B)، بلکه به الگوی تابش (منقطع یا پیوسته) نیز به‌طور معنی‌داری وابسته است. در میان تیمارهای اعمال‌شده، تابش فرابنفش B منقطع به‌عنوان مؤثرترین و کارآمدترین محرک در القای هماهنگ سیستم دفاعی گیاه ظاهر شد. شواهد این برتری عبارت بودند از: (۱) افزایش معنی‌دار فنل کل به‌عنوان تنها تیمار موفق در تقویت سپر دفاعی غیرآنزیمی و فیلترهای نوری اپیدرم، (۲) دستیابی به بیشینه محتوای کاروتنوئیدها برای حفاظت از دستگاه فتوسنتزی، و (۳) حفظ کمترین سطح پراکسیداسیون لیپیدی (MDA) در کنار سایر تیمارها. جالب آنکه این بسیج دفاعی قدرتمند، با وجود مصرف بخشی از ذخایر قندی گیاه، نه تنها به دستگاه فتوسنتزی آسیب نزد، بلکه با حفظ محتوای کلروفیل a، پایداری نسبی آن را تضمین نمود. در مقابل، تابش پیوسته UV-B با کاهش معنی‌دار پرولین و ناتوانی در افزایش معنی‌دار کاروتنوئیدها و فنل کل، احتمالاً از آستانه تحمل فیزیولوژیک گیاه فراتر رفته و به‌جای القای یک پاسخ سازگارانه، موجب نوعی فرسودگی دفاعی شد. از منظر کاربردی، این نتایج سرخ‌های ارزشمندی برای بهره‌برداری زیست‌فناورانه از پرتو فرابنفش ارائه می‌دهد بطوریکه استفاده از تابش منقطع UV-B با شدت و مدت بهینه می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد کارآمد و غیرشیمیایی برای افزایش محتوای متابولیت‌های ثانویه ارزشمند (به‌ویژه ترکیبات فنلی و کاروتنوئیدی) در کشت گلخانه‌ای پیچ تلگرافی و احتمالاً سایر گیاهان دارویی هم‌خانواده به کار گرفته شود. از منظر نظری نیز، این پژوهش با معرفی مفهوم الگوی تابش به‌عنوان یک متغیر مستقل و تأثیرگذار، بر ضرورت بازنگری در طراحی آزمایش‌های تنش نوری

که این سپر دفاعی چندلایه (متشکل از فیلترهای نوری فنلی، خاموش‌کننده‌های کاروتنوئیدی و آنزیم‌های جاروب‌کننده ROS) به‌قدری کارآمد عمل کرده که نه تنها از پراکسیداسیون لیپیدی ناشی از تنش جلوگیری کرده، بلکه سطح آسیب اکسیداتیو را حتی به زیر سطح پایه سلول‌های شاهد نیز تقلیل داده است. این پدیده، یک مثال عالی از مفهوم پیش‌آمادگی دفاعی^۴ است که در آن، مواجهه با یک محرک تنش‌زا، گیاه را برای مقابله مؤثرتر با چالش‌های اکسیداتیو آتی آماده می‌سازد.

در مقابل، تیمار فرابنفش A پیوسته با کمترین میزان فنل کل، ظاهراً نتوانسته است این سپر دفاعی را به‌طور مؤثر فعال کند. این تفاوت فاحش در پاسخ به UV-A و UV-B، نشان‌دهنده مسیرهای سیگنال‌دهی متمایز برای این دو طیف در گیاه پیچ تلگرافی است. عدم معنی‌داری پرولین نیز نشان می‌دهد که این اسمولیت، برخلاف تنش‌های اسمزی، نقش محوری در پاسخ فوری پیچ تلگرافی به تنش پرتو فرابنفش ایفا نمی‌کند و گیاه عمدتاً به سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و ترکیبات فنلی متکی است.

در تطابق با نتایج مطالعه حاضر، et al Erkan (2008) افزایش میزان فنل کل را در میوه توت‌فرنگی تحت تأثیر پرتو فرابنفش گزارش کردند. مطالعات روی بامیه (Kargar Khorrami et al., 2013)، ریحان (Mohammady et al., 2020)، آفتابگردان (Costa et al., 2002)، سه رقم سویا (Nouri et al., 2012) و فلفل (Mahdavian et al., 2006) نیز نشان داده است که میزان فنل کل تحت تأثیر پرتو فرابنفش افزایش می‌یابد. et al Luis (2007) نیز افزایش محتوای فنل کل و فلاونوئید را در گیاه رزماری تحت تابش UV-B گزارش کردند. نتایج et al Shayganfar (2019) در گونه آویشن دنیایی و et al Rastegar (2021) روی سه گونه گل‌گندم نیز نشان داد که میزان فنل کل و سایر ترکیبات محافظتی در نتیجه تابش پرتو فرابنفش B افزایش یافت. در خصوص پرولین، et al Rezayi Far (2018) افزایش آن را در گندم و Vaziri (2020) در آلوئه‌ورا تحت تنش فرابنفش گزارش کرده‌اند که با عدم معنی‌داری پرولین در مطالعه حاضر متفاوت است و احتمالاً به تفاوت‌های گونه‌ای و شدت تنش مربوط می‌شود.

در مقابل، نتایج MDA در مطالعه حاضر با برخی پژوهش‌های پیشین که افزایش آن را تحت UV-B گزارش کرده‌اند مانند (Hajipour et al., 2022؛ Rastegar et al., 2021؛ Shayganfar et al., 2019) تفاوت دارد. این تفاوت را نه به‌عنوان یک تناقض، بلکه به‌عنوان نشانه‌ای از قدرت استثنایی سیستم دفاعی پیچ تلگرافی می‌توان تفسیر کرد. این گیاه دارویی که به‌طور طبیعی غنی از متابولیت‌های ثانویه است، با فعال‌سازی هماهنگ و قدرتمند دفاع آنزیمی و غیرآنزیمی خود،

⁴- Defense priming

تأکید دارد و چهارچوبی برای تفکیک پاسخ‌های سازگاری از پاسخ‌های آسیب‌شناسی در مطالعات فیزیولوژی تنش فراهم می‌آورد.

منابع

- Barbato, R., Frizzo, A., Friso, G., Rigoni, F. & Giacometti, G. M. (1995). Degradation of the D1 protein of photosystem-II reaction centre by ultraviolet-B radiation requires the presence of functional manganese on the donor side. *European Journal of Biochemistry*, 227(3), 723-729.
- Booij-James, I. S., Dube, S. K., Jansen, M. A., Edelman, M. & Mattoo, A. K. (2000). Ultraviolet-B radiation impacts light-mediated turnover of the photosystem II reaction center heterodimer in Arabidopsis mutants altered in phenolic metabolism. *Plant Physiology*, 124(3), 1275-1284.
- Buege, J. A. & Aust, S. D. (1978). [30] Microsomal lipid peroxidation. In *Methods in Enzymology* (Vol. 52, pp. 302-310). Academic Press.
- Chance, B. & Maehly, A. C. (1955). [136] Assay of catalases and peroxidases. In *Methods in Enzymology* (Vol. 2, pp. 764-775). Academic Press.
- 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, 1563.
- Chen, Q., Lu, X., Guo, X., Guo, Q. and Li, D. (2017). Metabolomics characterization of two Apocynaceae plants, *Catharanthus roseus* and *Vinca minor*, using GC-MS and LC-MS methods in combination. *Molecules*, 22(6), 997.
- Cockell, C. S. & Horneck, G. (2001). The history of the UV radiation climate of the earth—Theoretical and space-based observations. *Photochemistry and Photobiology*, 73(4), 447-451.
- Costa, H., Gallego, S. M. & Tomaro, M. L. (2002). Effect of UV-B radiation on antioxidant defense system in sunflower cotyledons. *Plant Science*, 162(6), 939-945.
- Enteshari, Sh., Torkzadeh, M., Manouchehr Kalantari, Kh. & Ghorbani, M. L. (2005). The effect of different bands of ultraviolet radiation on pigments content in *Glycine max* L. Iranian Journal of Biology, 18(1), 77-84. (In Persian)
- Eraslan, F., Inal, A., Pilbeam, D. J. & Gunes, A. (2008). Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regulation*, 55, 207-219.
- Erkan, M., Wang, S. Y. & Wang, C. Y. (2008). Effect of UV treatment on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity and decay in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 48(2), 163-171.
- Ghasemi, R., Talebloo, N., Parsa, P., Saffarian, P., Baradaran, S., Zarei, M. & Fatemi, F. (2023). Effects of UV stress on *Shewanella azerbaijanica* bioremediation response. *Radiochimica Acta*, 111(4), 301-315.
- Greenberg, B. M., Wilson, M. I., Huang, X. D., Duxbury, C. L., Gerhardt, K. E. & Gensemer, R. W. (1996). The effects of ultraviolet-B radiation on higher plants. In *Plants for Environmental Studies* (pp. 1-35). CRC Press.
- Hajipour, Z., Mumivand, H., Shayganfar, A. & Ebrahimi, A. (2022). Effect of ultraviolet irradiation and foliar application of some plant growth regulators on biomass and morphological characteristics of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 29(1), 133-154.
- Kargar Khorrami, S., Jamei, R. & Hosseini Sarghein, S. (2013). Changes in physiological and anatomical indices of okra (*Hibiscus esculentus* L.) under different bands of ultraviolet radiation. *Plant Biological Sciences*, 5(1), 13-26. (In Persian)
- Kataria, S. & Guruprasad, K. N. (2014). Exclusion of solar UV components improves growth and performance of *Amaranthus tricolor* varieties. *Scientia Horticulturae*, 174, 36-45.
- Kumari, R. & Agrawal, S. B. (2010). Supplemental UV-B induced changes in leaf morphology, physiology and secondary metabolites of an Indian aromatic plant *Cymbopogon citratus* (DC) Stapf under natural field conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 67(5), 655-675.
- Kumari, R., Singh, S. & Agrawal, S. B. (2009). Effects of supplemental ultraviolet-B radiation on growth and physiology of *Acorus calamus* L. (sweet flag). *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 51(2), 19-27.
- Leelaprakash, G., Mohan Dass, S. & Sivajothi, V. (2011). Antioxidant and hepatoprotective activities of *Vernonia cinerea* extract against CCl₄ induced hepatotoxicity in albino rats. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 10(2), 30-34.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350-382). Academic Press.
- Luis, J. C., Pérez, R. M. & Valdés, F. G. (2007). UV-B radiation effects on foliar concentrations of rosmarinic and carnolic acids in rosemary plants. *Food Chemistry*, 101(3), 1211-1215.
- MacAdam, J. W., Nelson, C. J. & Sharp, R. E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, 99(3), 872-878.
- Maffei, M., Canova, D., Berteà, C. M. & Scannerini, S. (1999). UV-A effects on photomorphogenesis and essential-oil composition in *Mentha piperita*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 52(1-3), 105-110.
- Mahdavian, K., Ghorbanli, M., Manouchehr Kalantari, Kh. & Mohammadi, Gh. (2006). The effect of different bands of ultraviolet radiation on physiological and morphological factors of pepper (*Capsicum annuum* L.). Iranian Journal of Biology, 19(1), 43-0. (In Persian)

McDonald, S., Prenzler, P. D., Antolovich, M. & Robards, K. (2001). Phenolic content and antioxidant activity of olive extracts. *Food Chemistry*, 73(1), 73-84.

Mohammady, W. A., Zarei, H. & Mousavizadeh, S. J. (2020). Morphological and biochemical responses of basil plant under ultraviolet radiation-B and deficit irrigation under greenhouse conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 11(1), 85-101.

Nouri, M., Pouraimani, R. & Khodaei, M. (2012). Study the effect of UV-C radiation on chlorophyll and flavonoids of *Coronilla varia* L. (Fabaceae). *Cell and Tissue*, 3(1), 43-51. (In Persian)

Paul, N. D. & Gwynn-Jones, D. (2003). Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(1), 48-55.

Pourakbar, L. & Abedzadeh, M. (2014). Effect of UV-B and UV-C radiation on antioxidant enzymes activity in lemon balm (*Melissa officinalis* L.) and the role of salicylic acid in alleviating UV-induced stress. *Iranian Journal of Plant Biology*, 6(20), 23-34. (In Persian)

Rady, M. R., Gierczik, K., Ibrahem, M. M., Matter, M. A. & Galiba, G. (2021). Anticancer compounds production in *Catharanthus roseus* by methyl jasmonate and UV-B elicitation. *South African Journal of Botany*, 142, 34-41.

Rao, M. V., Paliyath, G. & Ormrod, D. P. (1996). Ultraviolet-B-and ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 110(1), 125-136.

Rashidi Ravari, M., Nasibi, F. & Manouchehr Kalantari, Kh. (2003). Investigation of physiological and morphological changes in some growth parameters of rapeseed seedlings under UV-A, UV-B and UV-C radiation bands. *Pajouhesh & Sazandegi*, 16(3), 97-103. (In Persian)

Rastegar, M., Mumivand, H., Shayganfar, A. & Rezaeinejad, A. (2021). The effect of ultraviolet radiation on growth, morphology and phenology of three cultivars of *Centaurea cyanus*. (In Persian)

Rezaei, A., Eisa Beiglou, E. & Pashazadeh, M. (2015). Investigating the sedative and pre-anesthetic effects of polar, semi-polar and non-polar fractions of periwinkle (*Vinca minor*) extract compared to midazolam in rats. *Comparative Pathobiology*, 11(4), 1447-1452. (In Persian)

Rezayi Far, Z., Fallahi, S. & Gholinezhad, E. (2018). The effect of drought stress and ultraviolet (UV-C) on

enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense system in three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 7(24), 155-170. (In Persian)

Sarghein, S. H., Carapetian, J. & Khara, J. (2011). The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A. DC.). *Turkish Journal of Biology*, 35(1), 69-77.

Scandalios, J. G. (1993). Oxygen stress and superoxide dismutases. *Plant Physiology*, 101(1), 7-12.

Searles, P. S., Flint, S. D. & Caldwell, M. M. (2001). A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia*, 127, 1-10.

Shayganfar, A., Azizi Arani, M. & Rasouli, M. (2019). Investigating the effect of different levels of ultraviolet radiation along with the application of antioxidant compounds on the physiological characteristics of *Thymus daenensis*. In *Proceedings of the 11th Iranian Horticultural Science Congress*, Urmia, Iran. (In Persian)

Takshak, S. & Agrawal, S. B. (2014). Secondary metabolites and phenylpropanoid pathway enzymes as influenced under supplemental ultraviolet-B radiation in *Withania somnifera* Dunal, an indigenous medicinal plant. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 140, 332-343.

Tezuka, T., Hotta, T. & Watanabe, I. (1993). Growth promotion of tomato and radish plants by solar UV radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 19(1), 61-66.

Vas, A. & Gulyas, B. (2005). Eburnamine derivatives and the brain. *Medicinal Research Reviews*, 25(6), 737-757.

Vaziri, A. (2020). Applications of UV-B lighting to increase phenolic accumulation of *Aloe vera* L. plants. *Journal of Plant Process and Function*, 9(1), 411-421. (In Persian)

Zhang, W. J. & Björn, L. O. (2009). The effect of ultraviolet radiation on the accumulation of medicinal compounds in plants. *Fitoterapia*, 80(4), 207-218.

Zhang, Y., Kaiser, E., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., Yang, Q. & Li, T. (2020). UVA radiation promotes tomato growth through morphological adaptation leading to increased light interception. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104073.