

Research Paper

Evaluation of UV-A Irradiation and Silver Nanoparticle Treatment on some of Growth, Physiological and Biochemical Characteristics of Dill (*Anethum graveolens* L.)

Mahboubeh Sadat Hoseini, Mehrnaz Mahmoudi-Zarandi*

Department of Biology, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran

Received: 29/07/2025, Accepted: 24/09/2025

Abstract

The global security of agricultural products has been threatened due to climate changes and the increase in ultraviolet radiation. Considering the effectiveness of nanoparticles in improving plant resistance to stress, nanotechnology can be used to reduce the effects of stress. This research aims to investigate the UV-A stress on the dill and evaluate the effect of silver nanoparticles in reducing the damage of this stress on the plant. First, pot cultivation of dill seeds was done, when the plant grew to 8 cm, UV-A stress was applied at three levels (0, 30 minutes, and 60 minutes), at the same time, the samples were treated with silver nanoparticles at three levels (0, 50 and 100 mg/L). The growth parameters (fresh and dry weight of stem and root, length of stem and root), physiological parameters (photosynthetic pigments), biochemical parameters (catalase activity, ascorbate peroxidase activity, protein content). The results showed that ultraviolet radiation causes a significant decrease in the growth parameters and photosynthetic pigments of chlorophyll a, b, and total Chl., however, the amount of carotenoids decreased less compared to chlorophylls, so the ratio of carotenoids to total chlorophyll increased. Ultraviolet radiation significantly reduced catalase enzyme activity and protein content, while significantly increasing ascorbate peroxidase enzyme activity. Treatment of plants with silver nanoparticles mitigated the damaging effects of UV radiation, and a concentration of 100 mg/L was identified as the optimal concentration of silver nanoparticles for improving both growth and biochemical parameters of plants exposed to 30 minutes of UV-A radiation. Therefore, application of silver nanoparticles at an appropriate concentration is recommended to enhance plant growth and performance under the detrimental effects of ultraviolet radiation.

Keywords: Ultraviolet radiation, Antioxidant enzymes, Growth parameters, Protein, Stress, Photosynthetic pigments

Citation: Sadat Hoseini M, Mahmoudi-Zarandi M, Evaluation of UV Irradiation and Silver Nanoparticle Treatment on some of Growth, Physiological and Biochemical Characteristics of Dill (*Anethum graveolens* L.). *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2025; 5(1): 75-93.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216299>



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

*Corresponding Author: Mehrnaz Mahmoudi-Zarandi, Email: mehrnaz.mahmoudi@iau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Ultraviolet (UV) radiation, particularly UV-A (315–400 nm), is an abiotic stress factor that significantly influences plant growth and physiological processes. While UV-A is less energetic than UV-B or UV-C, prolonged exposure can still induce oxidative stress by generating reactive oxygen species (ROS), leading to cellular damage, impaired photosynthesis, and reduced biomass accumulation. Plants have evolved both enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense systems to mitigate such stress, including the synthesis of UV-absorbing compounds like flavonoids and anthocyanins, as well as activation of antioxidant enzymes such as catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX). In parallel, nanotechnology has emerged as a promising approach to enhance plant resilience under environmental stresses. Silver nanoparticles (AgNPs) have shown potential in improving growth parameters, modulating antioxidant activity, and increasing tolerance to various abiotic stresses, including salinity and heavy metals. However, limited information exists on the interactive effects of UV-A radiation and AgNPs, especially in medicinal and aromatic plants like dill (*Anethum graveolens* L.). This study aimed to evaluate the protective role of AgNPs against UV-A-induced stress in dill by assessing morphological, physiological, and biochemical responses.

Methods

A pot experiment was conducted under controlled greenhouse conditions using a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications. Two factors were examined: (1) foliar application of AgNPs at three concentrations (0, 50, and 100 mg/L), and (2) UV-A radiation exposure at three

durations (0, 30, and 60 minutes per day) using a 40-W fluorescent UV-A lamp (365 nm) placed 40 cm above the plants. Dill seeds were sown in plastic pots filled with a 1:2 mixture of leaf compost and perlite. After thinning to five uniform seedlings per pot at the 8-cm height stage, treatments were applied daily for 30 days. Two weeks after treatment termination, plants were harvested for analysis. Growth parameters (fresh and dry weights of shoots and roots, shoot and root lengths) were recorded. Photosynthetic pigments (chlorophyll a, b, total chlorophyll, and carotenoids) were quantified spectrophotometrically using Arnon's method. Antioxidant enzyme activities, catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) were assayed using standard protocols. Total soluble protein content was determined via the Bradford method with a BSA standard curve. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and means were compared using Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$.

Results and Discussion

UV-A radiation significantly suppressed all growth parameters in a time-dependent manner, with 60-minute exposure causing more severe reductions than 30 minutes. Both shoot and root fresh/dry weights and lengths declined under UV-A, consistent with previous reports in other species such as *Melissa officinalis* and pepper. This growth inhibition is attributed to oxidative damage, DNA lesions, and disruption of photosynthetic machinery. Conversely, AgNP application, especially at 100 mg/L, significantly enhanced growth traits and mitigated UV-A-induced suppression. The protective effect of AgNPs is likely linked to their ability to modulate antioxidant systems and reduce ROS accumulation. Photosynthetic pigment contents (chlorophyll a, b, total chlorophyll, and carotenoids) were markedly reduced by UV-A exposure, with greater losses at 60 minutes. However, AgNP treatments, particularly at 100 mg/L, alleviated these

declines, suggesting a protective role in chloroplast integrity. The increase in carotenoid content under AgNP + UV-A may reflect enhanced photoprotection, as carotenoids quench ROS and dissipate excess light energy. Interestingly, the ratio of carotenoids to total chlorophyll increased under UV-A but was unaffected by AgNPs, indicating that this ratio is primarily stress-responsive rather than nanoparticle-mediated.

Enzymatic responses showed a dual pattern: CAT activity decreased under UV-A but was restored by AgNPs, whereas APX activity increased under UV-A but was suppressed by AgNPs. This suggests that AgNPs may shift the antioxidant defense strategy enhancing CAT-mediated H_2O_2 decomposition while reducing reliance on the ascorbate-glutathione cycle. Total soluble protein content followed a similar trend to growth and pigment data: UV-A reduced protein levels, while AgNPs counteracted this effect, possibly by stabilizing protein synthesis or reducing proteolytic degradation under stress. These findings align with prior studies demonstrating the ameliorative effects of nanoparticles under abiotic stress. The efficacy of AgNPs appears concentration-dependent, with 100 mg/L consistently outperforming 50 mg/L across most parameters. The observed benefits are likely due to the high surface-to-volume ratio of nanoparticles, facilitating interactions with cellular components and enhancing stress signaling or ROS scavenging.

Conclusion

This study demonstrates that UV-A radiation imposes significant oxidative stress on dill plants, leading to reduced growth, photosynthetic pigment degradation, and protein loss. However, foliar application of silver nanoparticles particularly at 100 mg/L effectively mitigates these adverse effects by enhancing antioxidant enzyme activity (notably catalase) and preserving

photosynthetic and protein integrity. The results highlight the potential of AgNPs as a nano-priming agent in sustainable agriculture to improve plant resilience against UV stress. The combination of short-term (30 min) UV-A exposure with AgNP treatment may even serve as a hormetic strategy to boost secondary metabolite production without compromising growth. Future research should explore field applicability, nanoparticle uptake mechanisms, and potential phytotoxicity at higher concentrations or prolonged exposure.

Keywords: Ultraviolet radiation, antioxidant enzymes, growth parameters, protein, stress, photosynthetic pigments

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

بررسی اثرات تابش اشعه ماوراءبنفش-A و نانوذرات نقره بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.)

محبوبه سادات حسینی، مهرناز محمودی زرنندی*

گروه زیست‌شناسی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

چکیده

امنیت جهانی محصولات کشاورزی با توجه به تغییرات آب و هوایی و افزایش شدت تابش اشعه ماوراءبنفش مورد تهدید قرار گرفته است. با توجه به اثربخشی نانوذرات در افزایش مقاومت گیاهان به تنش، می‌توان از فن‌آوری نانو برای کاهش اثرات سوء تنش استفاده کرد. هدف این پژوهش، بررسی آسیب‌های وارد شده بر گیاه شوید با تابش اشعه ماوراءبنفش-A و ارزیابی تأثیر نانوذرات نقره در کاهش آسیب‌های این تنش بر گیاه بود. به این منظور ابتدا کشت گلدانی بذرهای شوید انجام و بعد از رشد گیاه به اندازه‌ی حدود ۸ سانتیمتر، گیاهان در دو مدت‌زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه تحت تابش نور UV-A قرار گرفتند و همزمان تیمار نمونه‌ها با نانوذرات نقره در سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر به مدت ۳۰ روز به‌صورت محلول‌پاشی بر روی برگ‌ها صورت گرفت. سپس پارامترهای رشد (وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک ریشه، طول ساقه و ریشه)، پارامترهای فیزیولوژیک (رنگدانه‌های فتوسنتزی) و پارامترهای بیوشیمیایی (فعالیت آنزیم کاتالاز، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز، مقدار پروتئین) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد تابش اشعه ماوراءبنفش موجب کاهش معنی‌دار پارامترهای رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی کلروفیل a، b و کل می‌شود، اما کاهش مقدار کاروتنوئید نسبت به کلروفیل‌ها کمتر بود. تابش اشعه ماوراءبنفش منجر به کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان پروتئین در گیاه شد، درحالی‌که فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. تیمار گیاه با نانوذرات نقره توانست اثرات تخریبی این تابش را تعدیل کند؛ به‌طوری‌که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌عنوان بهترین غلظت نانوذرات نقره برای بهبود پارامترهای رشدی و بیوشیمیایی گیاه تحت تابش ۳۰ دقیقه‌ای اشعه ماوراءبنفش-A شناسایی گردید. بنابراین، استفاده از نانوذرات نقره در غلظت مناسب به‌منظور تقویت رشد و عملکرد گیاه در شرایط تنش ناشی از اشعه ماوراءبنفش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اشعه ماوراءبنفش، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پارامترهای رشد، پروتئین، تنش، رنگیزه‌های فتوسنتزی

استناد: محبوبه سادات حسینی، مهرناز محمودی زرنندی، بررسی اثرات تابش اشعه ماوراءبنفش-A و نانوذرات نقره بر ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.)، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی، (۱۴۰۴)، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۹۳-۷۵.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216299>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

© نویسندگان



* نویسنده مسئول: مهرناز محمودی زرنندی، پست الکترونیک: mehrnaz.mahmoudi@iau.ac.ir

مقدمه

گیاهان در سراسر جهان با تنش‌های غیرزیستی متعددی از جمله شوری، خشکی و حضور فلزات سنگین مواجه هستند که رشد و عملکرد آن‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. اگرچه نور برای فتوسنتز و رشد گیاهان ضروری است، اما شدت بالای نور یا تابش پرتوهای ماوراءبنفش (UV) می‌تواند به عنوان یک عامل تنش‌زا عمل کرده و به ساختارها و فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه آسیب برساند (۱). نازک شدن لایه اوزون منجر به افزایش تابش UV-B یکی از طول موج‌های پرنرژی نور خورشید به سطح زمین شده است. گیاهان به این پرتو حساس هستند و گونه‌های مختلف آن‌ها واکنش‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. با توجه به اینکه گیاهان برای بقا و رشد به نور خورشید وابسته‌اند، اثرات مخرب تابش UV-B بر سلامت و عملکرد آن‌ها نیازمند توجه ویژه‌تری است (۲). تابش ماوراءبنفش منجر به تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن، از جمله پراکسید هیدروژن، می‌شود. این رادیکال‌ها به شدت فعال هستند و با اجزای حیاتی سلولی از قبیل لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک واکنش داده، باعث آسیب به آن‌ها می‌شوند. در نتیجه، عملکرد طبیعی سلول‌ها دچار اختلال شده و یکپارچگی فیزیولوژیک گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۳). بخشی از پاسخ‌های دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های اکسیداتیو ناشی از تابش UV، القای ترکیبات آنتی‌اکسیدان است. در اکثر گونه‌ها، علاوه بر این مکانیسم، گیاهان با تولید ترکیبات جاذب UV مانند آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها و تجمع آن‌ها در بافت‌های اپیدرمی، از نفوذ پرتوهای مضر به سلول‌ها و بافت‌های داخلی جلوگیری می‌کنند (۴). گیاهان برای مقابله با پرتوهای ماوراءبنفش، از دو مکانیسم دفاعی آنزیمی و غیرآنزیمی بهره می‌برند. در مکانیسم آنزیمی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همچون کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز فعال شده و نقش محافظتی ایفا می‌کنند. در مقابل، در مکانیسم غیرآنزیمی، سطح ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند مالون‌دی‌آلدهید افزایش می‌یابد (۵). حسینی‌سرقین و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی اثر تابش ماوراءبنفش بر برخی پارامترهای فیزیولوژیک گیاه فلفل قلمی پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز

در پاسخ به تنش ناشی از اشعه ماوراءبنفش افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج پژوهش‌های دیگری که به بررسی تأثیر تنش اشعه‌های فرابنفش B و C بر کالوس‌های گیاه پنیرک پرداخته‌اند، افزایش چشمگیر سطح فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها به عنوان ترکیبات جاذب پرتوهای فرابنفش را در مقایسه با نمونه‌های شاهد گزارش کرده‌اند (۶). در یک پژوهش دیگر مشخص شد که تابش ماوراءبنفش در مرحله شش‌برگی گیاه بادرنجبویه منجر به کاهش صفاتی همچون وزن تر و خشک، رشد طولی ریشه و اندام هوایی می‌شود. همچنین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در پاسخ به این تنش افزایش یافت، در حالی که فعالیت آنزیم کاتالاز کاهش نشان داد. علاوه بر این، تیمار گیاه با اسید سالیسیلیک توانست به‌طور مؤثری آسیب‌های ناشی از تابش ماوراءبنفش را کاهش دهد (۷). در مطالعه دیگری، نانوذرات بر تمام صفات به استثناء طول ساقچه، فقط تا سطح خشکی $0/3 -$ مگاپاسکال تأثیر بهبود دهنده‌گی داشتند (۸). محققان نشان دادند که اثرات تابش خفیف فرابنفش، هورمون آبسزیک اسید و فاکتور آبیاری بر عملکرد میوه و وزن تازه میوه گوجه‌فرنگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در مقابل، اثر هورمون آبسزیک اسید به‌تنهایی بر تعداد میوه و وزن خشک میوه معنی‌دار نبوده است (۹). گزارش‌ها نشان داده‌اند که محلول‌پاشی با نانوذرات نقره منجر به بهبود ویژگی‌های رشدی گیاه می‌شود. همچنین، سطح ترکیبات فیزیولوژیک مؤثر از جمله فلاونوئیدها، فنل‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاه افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نانوذرات نقره توانایی گیاه را در مقابله با تنش شوری تقویت کرده و مقاومت آن را در برابر این تنش افزایش می‌دهند (۱۰). تحقیق دیگری نشان داد که تابش UV-C در سه رقم تربچه منجر به کاهش وزن خشک ساقه و ریشه، سطح برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی، قندها و پروتئین‌های محلول گردید. در مقابل، میزان فنول کل، آمینواسیدها و ترکیبات جاذب پرتو UV از جمله آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها افزایش یافت. در میان این ارقام، رقم تربچه قرمز بیشترین سازگاری و مقاومت نسبت به تنش ناشی از تابش UV-C را از خود نشان داد (۱۱). در یک تحقیق دیگر مشخص شد که تابش‌های UV-B و UV-C سبب کاهش طول ریشه و ساقه گردیدند، اما به‌طور همزمان منجر به افزایش معنی‌دار

نانوذرات نقره

نانوذرات نقره از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، ساخت ایران با قطر متوسط ۲۰ نانومتر خریداری شد.

طرح آزمایشی تیمارهای UV-A و نانوذرات نقره بر گیاه شوید

گیاهان شوید به صورت همزمان تحت دو عامل تنش UV-A و تیمار نانوذرات نقره قرار گرفتند. تابش UV-A با لامپ فلورسنت (طول موج ۳۶۵ نانومتر، توان ۴۰ وات، ولتاژ ۲۲۰ ولت) در فاصله ۴۰ سانتی متری از سطح گیاه به مدت ۳۰ روز و در سطوح ۰ (شاهد)، ۳۰ و ۶۰ دقیقه در روز اعمال شد. همزمان، محلول پاشی نانوذرات نقره با غلظت‌های ۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر (۲۰ میلی لیتر به ازای هر گلدان) روزانه روی برگ‌ها انجام گرفت. دو هفته پس از پایان دوره تیمار، گیاهان برداشت و برای آنالیزهای آزمایشگاهی آماده شدند.

اندازه‌گیری وزن تر و خشک اندام هوایی و

ریشه و بررسی طول ساقه و ریشه

ریشه نمونه‌های شوید بعد از برداشت با آب مقطر شسته شد و با دستمال کاغذی خشک گردید. سپس ریشه‌ها از بخش هوایی جدا و وزن هر کدام جداگانه با استفاده از ترازوی دیجیتال (دقت ۰/۰۱) اندازه‌گیری شد. وزن تر ساقه‌ها نیز به همین صورت اندازه گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری وزن خشک، اندام‌های ریشه و بخش هوایی به طور جداگانه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شده و سپس وزن شدند. بعد از برداشت نمونه‌های شوید از گلدان‌ها، اندام‌های ساقه از ریشه جدا شد و طول هر کدام با خط کش اندازه‌گیری شد.

بررسی رنگدانه‌های فتوسنتزی

جهت اندازه‌گیری مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید از روش آرنون (۱۴) استفاده شد. برای این منظور ۰/۲ گرم از بافت سبز برگ‌های جوان در ۱۰ میلی لیتر استون ۸۰ در صد سائیده، سپس نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه و با سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ

سطح پروتئین، آنتوسیانین، فلاونوئید، اتیلن، یون‌های کلسیم، پتاسیم و منیزیم، و همچنین فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز شدند. در مقابل، تابش UV-A تأثیر معنی‌داری بر این پارامترها نداشت. افزایش این ترکیبات به عنوان بخشی از مکانیسم‌های دفاعی گیاه در برابر آسیب‌های ناشی از پرتوهای فرابنفش عمل می‌کند؛ زیرا این ترکیبات با جذب تابش‌های مضر و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، از بافت‌های حساس گیاه در برابر استرس اکسیداتیو محافظت می‌کنند (۱۲). در این پژوهش، اثر برهم‌کنش نانوذرات نقره و تابش ماوراءبنفش، به ویژه نقش نانوذرات نقره در تعدیل تنش ناشی از تابش UV-A، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی مطالعه، تعیین میزان اثربخشی نانوذرات نقره در افزایش مقاومت گیاه شوید در برابر تابش ماوراءبنفش بود که از طریق ارزیابی پارامترهای رشدی و برخی شاخص‌های بیوشیمیایی گیاه انجام شد. همچنین، یکی از اهداف کلیدی این تحقیق، پیشنهاد غلظت بهینه نانوذرات نقره برای بهبود عملکرد و مقاومت گیاه تحت تنش UV بود.

روش کار

کشت گلدانی گیاه شوید

به منظور بررسی دو فاکتور نانوذرات نقره (در ۳ سطح شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و فاکتور UV (در سه سطح شاهد، ۳۰ و ۶۰ دقیقه در روز) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار بر روی گیاه شوید اجرا شد. بذره‌های گیاه شوید از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شدند. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ۲ درصد ضد عفونی و در گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۴ سانتی متر و ارتفاع ۱۳ سانتی متر که با الکل ضد عفونی شده بودند، کاشته شدند. بستر مورد استفاده شامل کمپوست خاک برگ و پرلیت به نسبت ۱ به ۲ بود. آبیاری گلدان‌ها به صورت یک روز در میان تا حد ظرفیت زراعی خاک انجام شد. گیاهچه‌ها در دوره‌ی نوری ۱۶ و ۸ ساعت به ترتیب روشنایی و تاریکی رشد نمودند (۱۳). با رسیدن طول ساقه گیاهچه‌ها به حدود ۸ سانتی متر تعداد گیاهچه‌ها در هر گلدان به پنج گیاهچه با طول تقریباً یکسان تقلیل داده شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

بر اساس روش Biles & Abeles، عصاره آنزیمی از ۰/۵ گرم بافت تازه گیاه با بافر تریس-گلاسیسین سرد تهیه و پس از سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ دور، 4°C ، ۶ دقیقه)، مایع رویی جمع‌آوری شد. برای سنجش فعالیت آنزیم، به لوله‌های حاوی عصاره، بافر استات سدیم (۰/۴ مولار، اسیدیته ۵)، آب اکسیژنه ۳٪ و بنزیدین ۲٪ در متانول ۵۰٪ اضافه شد. تغییرات جذب نور در طول موج ۵۳۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید (۱۶).

اندازه‌گیری غلظت پروتئین محلول با روش برادفورد

دو گرم بافت برگ شوید در هاون چینی روی یخ با ۶ میلی‌لیتر بافر تریس-ساکارز و نیتروژن مایع ساییده شد. عصاره حاصل پس از سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور، 4°C ، ۲۵ دقیقه) فیلتر شد و مایع رویی برای سنجش پروتئین استفاده گردید. در روش برادفورد، رنگ کوماسی در محیط اسیدی به پروتئین متصل شده و رنگ آن از قهوه‌ای به آبی تغییر می‌کند. جذب نور در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد که به‌طور مستقیم با غلظت پروتئین رابطه دارد (۱۷).

رسم منحنی استاندارد پروتئین

برای تهیه منحنی استاندارد، ۱/۴ گرم آلومین سرم گاوی در یک لیتر آب مقطر حل شد و غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر از آن تهیه گردید. جذب نوری این محلول‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری و منحنی استاندارد بر اساس رابطه جذب-غلظت رسم شد. سپس، همین روش بر روی عصاره‌های پروتئینی نمونه‌های شوید اجرا و غلظت پروتئین آن‌ها با استفاده از منحنی استاندارد تعیین و گزارش شد (نمودار ۱).

شدند. سوسپانسیون به دست آمده جهت بررسی مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید استفاده شد. از استون به عنوان شاهد در این آزمون استفاده گردید (۱۴). جهت بررسی میزان کلروفیل a در تنش‌های اشعه فرابنفش و تیمارهای نانوذرات نقره گیاه شوید، جذب سوسپانسیون تهیه شده در طول موج ۶۶۳ نانومتر خوانده شد. آزمون در ۳ تکرار انجام شد و نتایج آن ثبت شد. با استفاده از رابطه (۱) میزان کلروفیل a موجود در گیاه برآورد شد.

$$\text{Chla} = (12.25 \times 663\text{nm} - 2.79 \times 645\text{nm}) \quad (1)$$

جهت بررسی میزان کلروفیل b، جذب نمونه‌های گیاهی مورد آزمون در طول موج ۶۴۵ نانومتر خوانده شد. آزمون در ۳ تکرار انجام شد و نتایج آن ثبت گردید. با استفاده از رابطه (۲) میزان کلروفیل b موجود در گیاه برآورد شد.

$$\text{Chlb} = (21.50 \times 645\text{ nm} - 5.10 \times 663\text{ nm}) \quad (2)$$

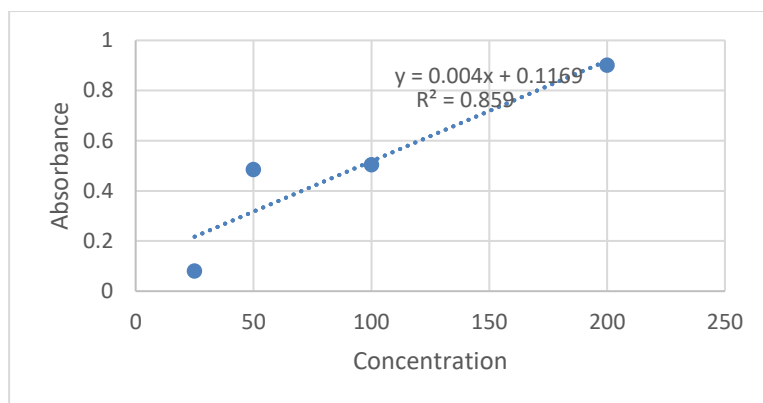
جهت بررسی میزان کاروتنوئیدها، جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. آزمون در ۳ تکرار انجام شد و نتایج آن ثبت گردید. با استفاده از رابطه (۳) میزان کاروتنوئید موجود در گیاه برآورد شد.

$$\text{Car} = [(1000 \times 470\text{ nm} - 1.82 \times \text{Chla} - 85.02 \times \text{Chlb}) / 198] \quad (3)$$

اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی کاتالاز

مخلوط واکنش (۳ میلی‌لیتر) شامل بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی و آب اکسیژنه ۰/۴۵ مولار تهیه شد. فعالیت آنزیمی با افزودن آب اکسیژنه آغاز گردید و کاهش جذب نور در طول موج ۲۴۰ نانومتر در طی یک دقیقه اول اندازه‌گیری شد (۱۵). فعالیت آنزیم با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردید که در آن A جذب نوری، b طول مسیر نور (سانتی‌متر)، و c غلظت آب اکسیژنه (مولار) است. ضریب خاموشی مولی آب اکسیژنه در این طول موج برابر با $2.8 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ در نظر گرفته شد و فعالیت آنزیم بر حسب واحد میلی‌واحد فعالیت به ازای هر میلی‌گرم پروتئین (mU/mg) بیان شد.

$$A = \epsilon b c \quad (4)$$



نمودار ۱- منحنی استاندارد پروتئین

شاهد افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. در مقابل، تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، وزن تر ساقه را نسبت به شاهد (بدون تابش) کاهش داد؛ این کاهش با افزایش مدت تابش (از ۳۰ به ۶۰ دقیقه) تشدید شد. با این حال، در گیاهان تیمار شده با ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره، کاهش وزن تر ساقه تحت تابش UV-A کمتر بود، که نشان دهنده اثر محافظتی نانوذرات نقره در برابر تنش ناشی از اشعه فرابنفش است. بیشترین وزن تر ساقه در شرایط تابش UV-A در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره ثبت شد (نمودار ۲).

سنجش غلظت پروتئین گیاه شوید با روش برادفورد

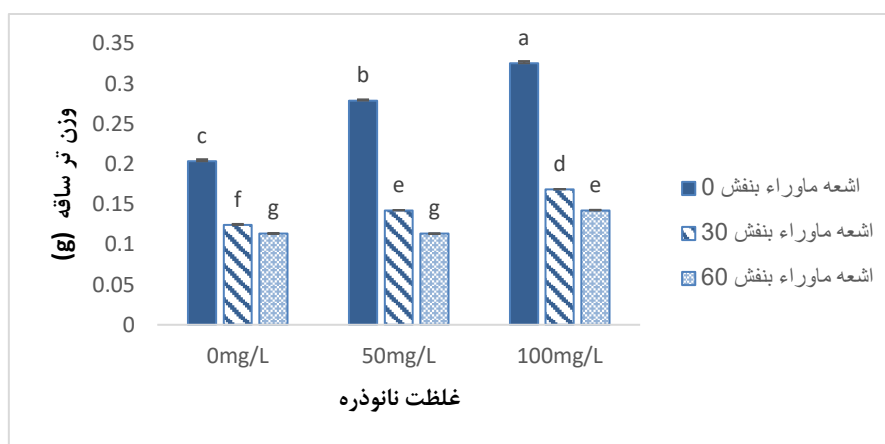
برای اندازه گیری میزان پروتئین، ۰/۱ میلی لیتر از عصاره گیاه شوید به ۵ میلی لیتر محلول برادفورد اضافه شد و سپس با دستگاه ورتکس به خوبی مخلوط گردید. پس از گذشت ۲۵ دقیقه، جذب نمونه ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد و غلظت پروتئین بر اساس منحنی استاندارد محاسبه گردید (۱۷).

نتایج

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر وزن تر

ساقه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری وزن تر ساقه را نسبت به

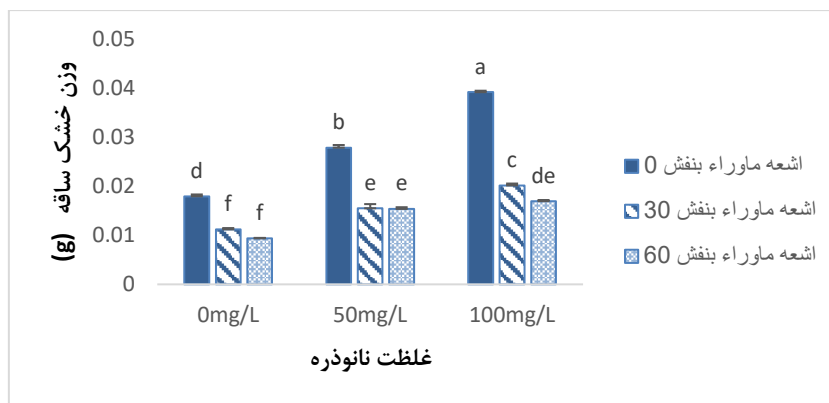


نمودار ۲- مقایسه میانگین وزن تر ساقه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

نسبت به شاهد (بدون تابش) کاهش داد. با این حال، در گیاهان تیمار شده با ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره، کاهش وزن خشک ساقه تحت تابش UV-A کمتر بود، که نشان دهنده اثر محافظتی نانوذرات در برابر تنش ناشی از اشعه فرابنفش است. بیشترین وزن خشک ساقه در شرایط تابش UV-A نیز در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره ثبت شد (نمودار ۳).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر وزن خشک ساقه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری وزن خشک ساقه را نسبت به شاهد (بدون نانوذره) افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، وزن خشک ساقه را

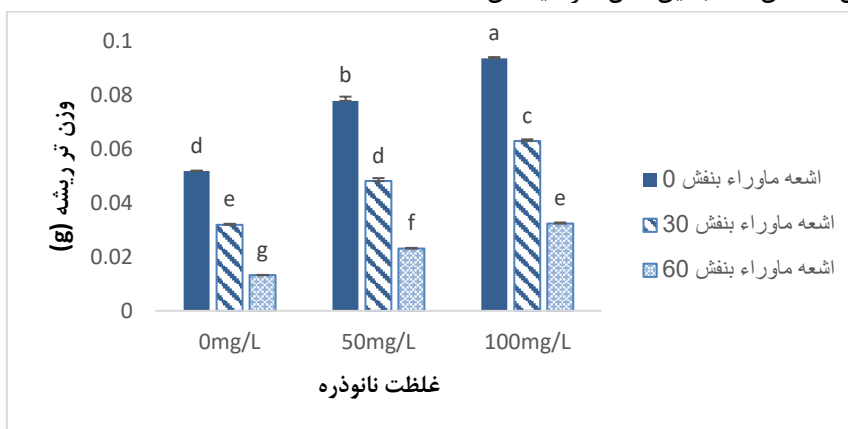


نمودار ۳- مقایسه میانگین وزن خشک ساقه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

تیمار شده با ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره، کاهش وزن تر ریشه تحت تابش UV-A کمتر بود، که نشان دهنده اثر محافظتی نانوذرات در برابر تنش ناشی از اشعه فرابنفش است. بیشترین وزن تر ریشه در شرایط تابش UV-A نیز در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره ثبت شد (نمودار ۴).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر وزن تر ریشه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری وزن تر ریشه را نسبت به شاهد (بدون نانوذره) افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، وزن تر ریشه را نسبت به شاهد (بدون تابش) کاهش داد. با این حال، در گیاهان



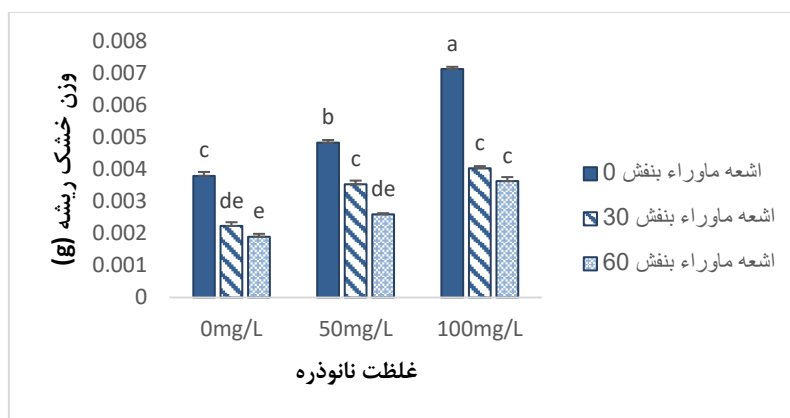
نمودار ۴- مقایسه میانگین وزن تر ریشه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

UV-A در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره نقره مشاهده شد، که نشان دهنده اثر محافظتی معنی دار این نانوذرات در برابر تنش ناشی از اشعه فرابنفش است (نمودار ۵).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر وزن خشک

ریشه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات نقره، وزن خشک ریشه را نسبت به شاهد (بدون تابش) کاهش داد. با این حال، تیمار با نانوذرات نقره—به ویژه در غلظت های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر—کاهش وزن خشک ریشه را تحت تابش UV-A تعدیل کرد. بیشترین وزن خشک ریشه در شرایط تابش



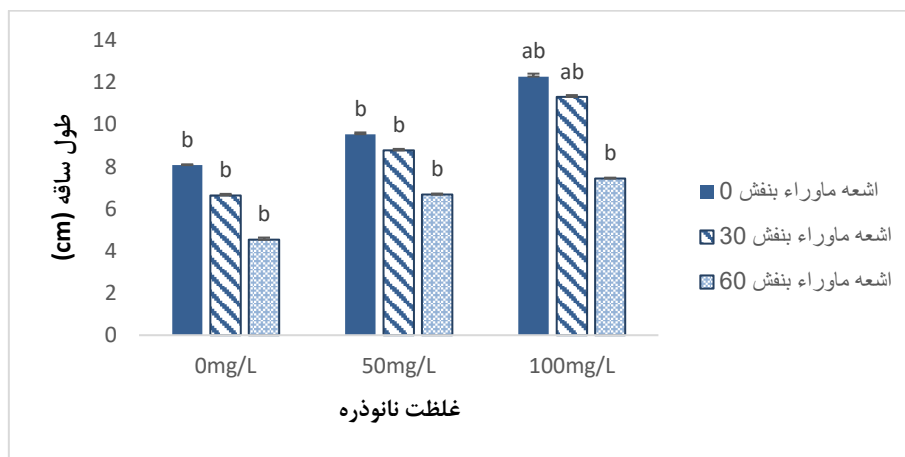
نمودار ۵- مقایسه میانگین وزن خشک ریشه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

شاهد (بدون تابش) کاهش داد. با این حال، استفاده از نانوذرات نقره در غلظت های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، طول ساقه را تحت تنش UV-A (در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه) بهبود بخشید. در این شرایط، غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر عملکرد بهتری نسبت به ۵۰ میلی گرم در لیتر داشت و بیشترین طول ساقه را ایجاد کرد (نمودار ۶).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر طول

ساقه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری طول ساقه را نسبت به شاهد (بدون نانوذره) افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، طول ساقه را نسبت به

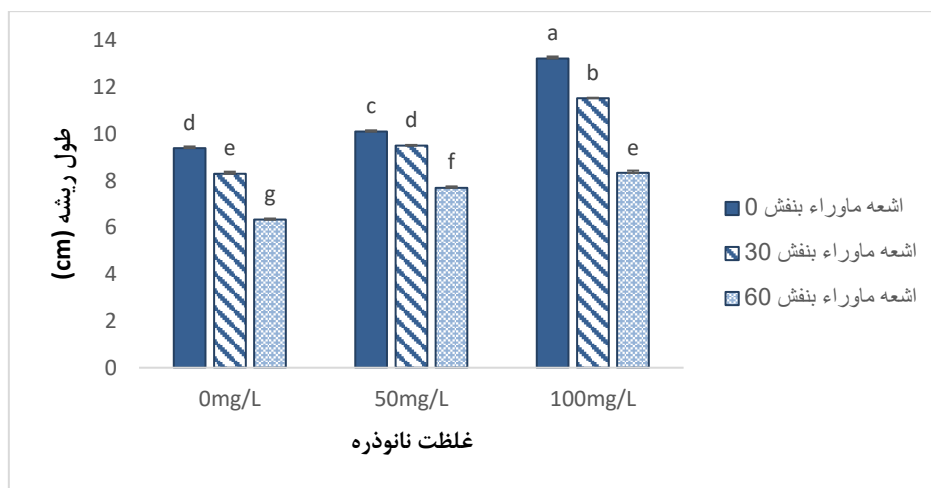


نمودار ۶- مقایسه میانگین طول ساقه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

۶۰ دقیقه) بهبود بخشید. در این شرایط، غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر عملکرد بهتری نسبت به ۵۰ میلی گرم در لیتر داشت. همچنین، در هر دو غلظت، طول ریشه در مدت تابش ۳۰ دقیقه بیشتر از ۶۰ دقیقه بود، که نشان دهنده تشدید تنش با افزایش زمان تابش است (نمودار ۷).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر طول ریشه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0/05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری طول ریشه را نسبت به شاهد (بدون نانوذره) افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، طول ریشه را نسبت به شاهد (بدون تابش) کاهش داد. با این حال، استفاده از نانوذرات نقره در غلظت های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، طول ریشه را تحت تنش UV-A (در هر دو مدت ۳۰ و

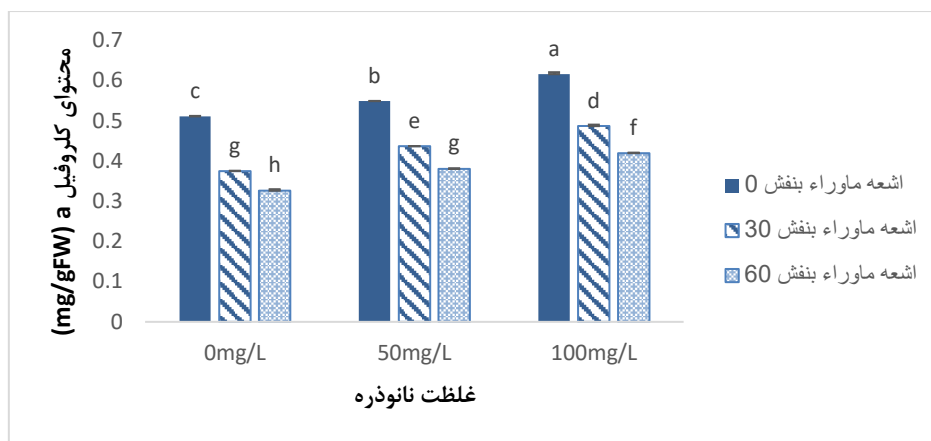


نمودار ۷- مقایسه میانگین طول ریشه در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

افزایش مدت تابش (از ۳۰ به ۶۰ دقیقه) تشدید گردید. با این حال، تیمار با نانوذرات نقره - به ویژه در غلظت های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر - از کاهش کلروفیل a جلوگیری کرد. همچنین، افزایش غلظت نانوذرات از ۵۰ به ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در تمام شرایط، منجر به افزایش بیشتر محتوای کلروفیل a شد (نمودار ۸).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر محتوای کلروفیل a در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0/05$)، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی داری محتوای کلروفیل a را افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، کلروفیل a را کاهش داد و این کاهش با

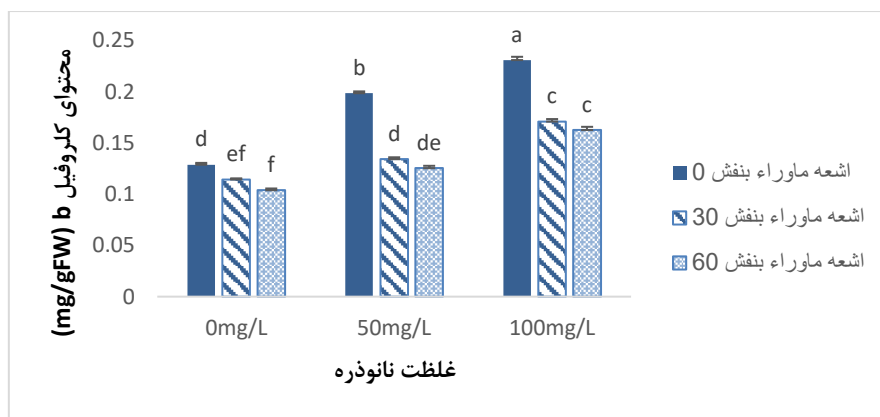


نمودار ۸- مقایسه میانگین محتوای کلروفیل a در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

تشدید گردید. با این حال، حضور نانوذرات نقره به‌ویژه در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، کاهش ناشی از تابش را تعدیل کرد. همچنین، افزایش غلظت نانوذرات از ۵۰ به ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در تمام شرایط، منجر به افزایش بیشتر محتوای کلروفیل b شد (نمودار ۹).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر محتوای کلروفیل b در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری محتوای کلروفیل b را نسبت به شاهد افزایش داد، به‌طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، کلروفیل b را کاهش داد و این کاهش با افزایش مدت تابش (۳۰ به ۶۰ دقیقه)



نمودار ۹- مقایسه میانگین محتوای کلروفیل b در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

کاهش با افزایش مدت تابش (از ۳۰ به ۶۰ دقیقه) تشدید گردید؛ به‌طوری که اختلاف معنی‌داری بین دو زمان تابش در همه غلظت‌ها دیده شد. با این حال، افزایش غلظت نانوذرات نقره از ۵۰ به ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، کاهش کلروفیل کل ناشی از تابش UV-A را به‌طور معنی‌داری تعدیل کرد و نشان داد که نانوذرات نقره اثر محافظتی در برابر تنش نوری دارند.

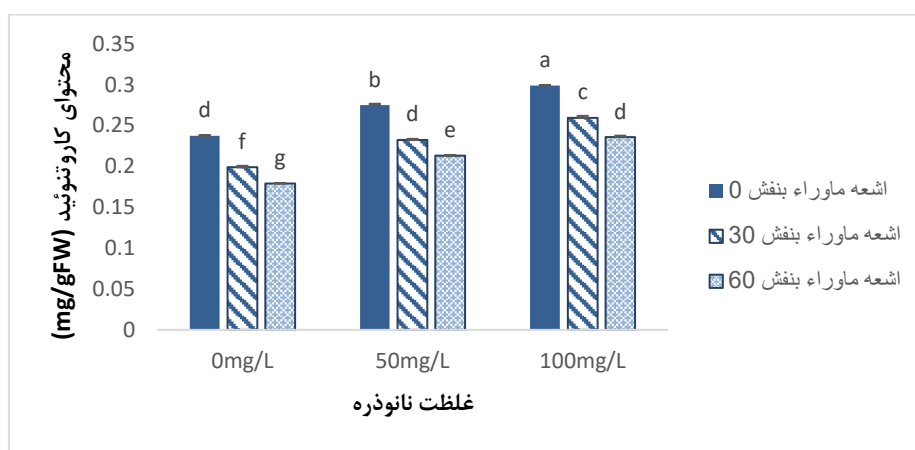
تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر محتوای کلروفیل کل در گیاه شوید

بر اساس نتایج آماری ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری محتوای کلروفیل کل را نسبت به شاهد افزایش داد، به‌طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، کلروفیل کل را کاهش داد و این

به کاهش کاروتنوئید شد و این کاهش با افزایش زمان تابش (به‌ویژه در ۶۰ دقیقه) تشدید گردید. با این حال، تیمار با نانوذرات نقره- به‌ویژه در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر- کاهش ناشی از تابش UV-A را تعدیل کرد. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات، محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش نوری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر ثبت شد (نمودار ۱۰).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر محتوای کاروتنوئید در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0/05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری محتوای کاروتنوئید را نسبت به شاهد افزایش داد، به‌طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد و این مقدار به‌طور معنی‌داری بیشتر از غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود. تابش UV-A در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه منجر



نمودار ۱۰- مقایسه میانگین محتوای کاروتنوئید در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0/05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری فعالیت آنزیم کاتالاز را نسبت به شاهد افزایش داد، به‌طوری که بیشترین فعالیت در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، فعالیت کاتالاز را نسبت به نمونه بدون تابش کاهش داد. با این حال، استفاده از نانوذرات نقره در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، فعالیت آنزیم را تحت تنش UV-A (در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه) بهبود بخشید. همچنین، فعالیت کاتالاز در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در هر دو زمان تابش، به‌طور معنی‌داری بیشتر از غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود، که نشان‌دهنده نقش تقویت‌کننده نانوذرات نقره در سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه تحت تنش نوری است (نمودار ۱۱).

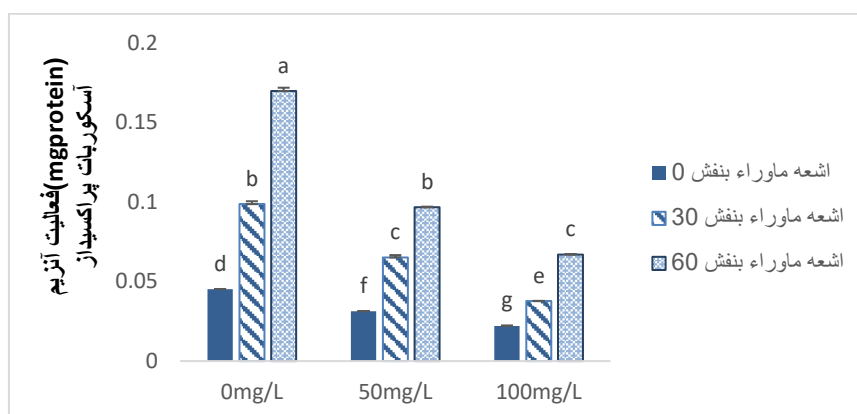
تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0/05$)، تیمار با نانوذرات نقره (در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) تأثیر معنی‌داری بر نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل نداشت. در مقابل، تابش UV-A در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه باعث افزایش معنی‌دار این نسبت نسبت به شاهد (بدون تابش) شد. همچنین، بین دو زمان تابش اختلاف معنی‌دار وجود داشت؛ به‌طوری که در مدت ۶۰ دقیقه، نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل در تمام سطوح نانوذرات به‌طور معنی‌داری بیشتر از ۳۰ دقیقه بود. این افزایش نشان‌دهنده پاسخ دفاعی گیاه به تنش نوری است، در حالی که نانوذرات نقره در این شاخص خاص تأثیر آماری مشخصی نداشتند.

تابش و بدون نانوذره ثبت شد. با این حال، حضور نانوذرات نقره در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، فعالیت آسکوربات پراکسیداز را تحت تنش UV-A (در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه) کاهش داد. همچنین، فعالیت آنزیم در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر کمتر از غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر بود. علاوه بر این، در هر دو غلظت نانوذره، فعالیت آنزیم در مدت ۳۰ دقیقه تابش کمتر از ۶۰ دقیقه بود، که نشان‌دهنده وابستگی فعالیت آنزیم به شدت و مدت تنش نوری است (نمودار ۱۲).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را نسبت به شاهد کاهش داد، به‌طوری که کمترین فعالیت در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. در مقابل، تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، فعالیت این آنزیم را نسبت به نمونه بدون تابش افزایش داد؛ به‌طوری که بیشترین فعالیت در شرایط ۶۰ دقیقه

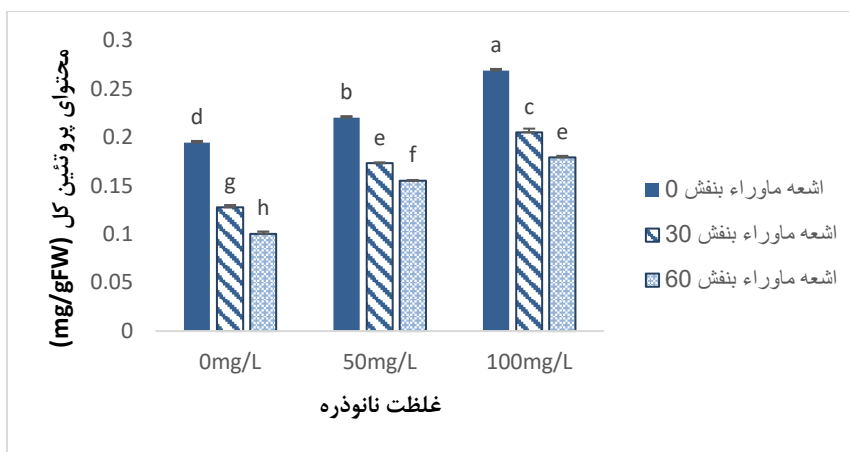


نمودار ۱۲- مقایسه میانگین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه شوید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

نقره در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، میزان پروتئین را تحت تنش UV-A (در هر دو مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه) بهبود بخشید. همچنین، در هر دو زمان تابش، مقدار پروتئین در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر به‌طور معنی‌داری بیشتر از غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر بود، که نشان‌دهنده نقش مثبت نانوذرات نقره در حفظ یا افزایش سنتز پروتئین تحت تنش نوری است (نمودار ۱۳).

تأثیر نانوذرات نقره و تابش UV-A بر محتوای پروتئین در گیاه شوید

بر اساس نتایج آزمون دانکن ($P \leq 0.05$)، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری مقدار پروتئین را نسبت به شاهد افزایش داد، به‌طوری که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد. تابش UV-A در تمام سطوح نانوذرات، محتوای پروتئین را نسبت به نمونه بدون تابش کاهش داد. با این حال، استفاده از نانوذرات



نمودار ۱۳- مقایسه محتوای پروتئین کل در گیاه شویید تحت تنش تابش UVA و تیمار با نانوذرات نقره

بحث

تابش ماوراءبنفش به عنوان یکی از عوامل تنش‌زا در محیط، تأثیرات عمیقی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان دارد. شدت و مدت مواجهه با این تابش، الگوی پاسخ گیاه را از طریق القای تغییرات مورفولوژیکی، ساختاری و عملکردی شکل می‌دهد. حساسیت گیاهان به تابش ماوراءبنفش بسیار متغیر است و تحت تأثیر عواملی همچون گونه و رقم گیاهی، مرحله رشد و نمو، شرایط محیطی رشد و همچنین دوز تابشی قرار می‌گیرد. در همین راستا، یافته‌های اخیر نشان داده‌اند که نانوفناوری می‌تواند به عنوان یک رویکرد نوین در تعدیل و کنترل پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی، از جمله تابش فرابنفش، مورد استفاده قرار گیرد. در این میان، نانوذرات نقره به دلیل خواص منحصربه‌فرد خود در حوزه نانوبیوتکنولوژی، توانسته‌اند به عنوان یک عامل مؤثر در بهبود رشد گیاه و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی آن مطرح شوند (۱۸). بر اساس یافته‌های این پژوهش، تابش UV-A به طور معنی‌داری پارامترهای رشدی گیاه شویید از جمله وزن تر و خشک ساقه و ریشه، طول ساقه و طول ریشه را کاهش داد؛ به طوری که شدیدترین تأثیر در تیمار ۶۰ دقیقه‌ای مشاهده شد. تمام گیاهان تحت تابش UV-A در مقایسه با گروه شاهد (بدون تابش) کاهش چشمگیری در شاخص‌های رشدی خود نشان دادند. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط سایر پژوهشگران در مطالعات انجام شده بر گیاهان مختلف از جمله گیاهچه بادرنجبویه (۱۹)، ذرت (۲۰) و پنبه (۲۱)، همخوانی کامل دارد. کاهش وزن در تیمارهای UV نشان‌دهنده کاهش

زیست‌توده است که یک پاسخ رایج و شناخته‌شده در گیاهان تحت تنش فرابنفش محسوب می‌شود. این پدیده عمدتاً ناشی از آسیب‌های DNA (به‌ویژه از طریق تشکیل دایمرهای پیریمیدینی)، کاهش تقسیم سلولی و همچنین کاهش سطح اکسین است که در نهایت منجر به کاهش انعطاف‌پذیری دیواره سلولی و مهار رشد گیاه می‌گردد (۱۹). در این مطالعه، تیمار با نانوذرات نقره به طور معنی‌داری پارامترهای رشد گیاه شویید (شامل وزن تر و خشک ساقه و ریشه، و طول ساقه و ریشه) را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین، ترکیب نانوذرات نقره (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و تابش UV-A (۳۰ دقیقه) منجر به بهبود بیشتر رشد نسبت به تیمارهای UV-A به تنهایی (۳۰ یا ۶۰ دقیقه) شد. این اثر مثبت ناشی از ویژگی‌های ذاتی نانوذرات به‌ویژه اندازه کوچک و سطح ویژه بالا است که واکنش‌پذیری آن‌ها را افزایش داده و توانایی تأثیرگذاری بر رشد گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه را فراهم می‌کند (۱۰). رفتار نانوذرات به دلیل وابستگی به اندازه، خواص نوری منحصربه‌فرد و سطح ویژه بالا، می‌تواند نقش کلیدی در حفاظت و تغذیه گیاه ایفا کند. کاربرد آن‌ها اثر تحریک‌کنندگی غلظت وابسته‌ای بر گیاه دارد و به طور مثبت بر رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه تأثیر می‌گذارد (۲۲). در پژوهش شهرکی و همکاران (۱۰)، تیمار با ۸۰ میلی‌مولار نانوذرات نقره منجر به افزایش وزن تر اندام‌های هوایی گیاه کنگر فرنگی تحت تنش شوری شد که به اثر بازدارنده نانوذرات بر فعالیت اتیلن نسبت داده شد. در پژوهش حاضر، نتایج نشان داد که تیمارهای نانوذرات نقره و UV-A تأثیر

معنی داری بر رنگیزه‌های فتوسنتزی داشتند؛ به‌طوری که تابش UV-A (به‌ویژه در مدت ۶۰ دقیقه) سبب کاهش معنی‌دار کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید گردید. گیاهان با گیرنده‌های نوری مانند UVR8 به پارامترهای نور (طول موج، شدت، مدت و جهت) پاسخ می‌دهند. تنش خفیف UVB پاسخ‌های فتومورفوزنی را تحریک می‌کند، اما تنش شدید UVB/UVC باعث آسیب سلولی، اختلال در کلروپلاست و تخریب DNA و در نهایت مرگ سلولی می‌شود. قرارگیری طولانی‌مدت گیاه در معرض اشعه ماوراءبنفش، از طریق مهار بیوسنتز یا تسریع تخریب کلروفیل، منجر به کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود (۱۰، ۲۳). بر اساس نتایج، تیمار با نانوذرات نقره به‌طور معنی‌داری رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه شوید را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین، ترکیب نانوذرات نقره (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و UV-A (۳۰ دقیقه) منجر به بهبود بیشتر رنگیزه‌ها نسبت به تیمارهای UV-A به‌تنهایی شد. نانوذرات نقره از طریق اتصال به دیواره سلولی، نفوذپذیری آن و تنفس سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و این مکانیسم می‌تواند در افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی مؤثر باشد (۲۴). نانوذرات نقره در غلظت مؤثر موجب افزایش کلروفیل a و کاروتنوئیدها در گیاه بنفشه سه‌رنگ شده و توانسته‌اند اثرات منفی اشعه UV-A بر رنگیزه‌های فتوسنتزی شوید را تعدیل کنند. این افزایش به نقش حفاظتی کاروتنوئیدها، مهار فعالیت اتیلن از طریق رقابت با مس در گیرنده هورمون و خاصیت آنتی‌اکسیدانی نانوذرات در مهار رادیکال‌های آزاد نسبت داده می‌شود (۲۴). هم راستا با تحقیق حاضر، هاشمی و همکاران (۲۵) بیان داشتند که نانوذرات نقره باعث افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در گندم و جو می‌شود (۲۵). مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات نقره در غلظت‌های خاص، با وارد شدن به سلول و آزاد کردن یون‌های نقره، رادیکال‌های آزاد اکسیژن تولید می‌کنند. این امر منجر به ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در فرآیندهای حیاتی گیاه مانند فتوسنتز و تنفس می‌شود. یکی از پیامدهای سمیت این نانوذرات، بازدارندگی فتوسنتز است که در نهایت رشد گیاه را کاهش می‌دهد (۲۶). در این پژوهش، در تیمار نانوذرات نقره $UV-A \times$ ، میزان کاروتنوئید در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر در ۳۰ دقیقه بیشتر از ۶۰ دقیقه

بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر در زمان کوتاه‌تر است (۲۷) و افزایش در مقدار کاروتنوئیدها در نانوذرات نقره $UV-A \times$ در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوذرات در ۳۰ دقیقه می‌تواند به دلیل افزایش خواص آنتی‌اکسیدانی و جلوگیری از تخریب ساختار آن‌ها باشد (۲۸). نانوذرات نقره با کاهش تنش اکسیداتیو موجب افزایش رنگیزه‌های گیاهی شدند. همچنین تغییرات آنزیمی معنی‌دار بود؛ به‌طوری که UV-A فعالیت کاتالاز را کاهش داد (بیشتر در ۶۰ دقیقه) و فعالیت پراکسیداز را افزایش داد (بیشتر در ۶۰ دقیقه). این نتایج با مطالعات پیشین (۷، ۲۸) همخوانی دارد که نشان داده‌اند اشعه‌های UV-B و UV-C نیز موجب کاهش کاتالاز و افزایش آسکوربات پراکسیداز می‌شوند. تابش خفیف اشعه ماوراءبنفش با تحریک سازوکارهای دفاعی آنزیمی (مانند سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز) و غیر آنزیمی (مانند آسکوربیک اسید، گلوتاتیون، کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها) موجب افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش می‌شود. این اشعه باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌گردد که می‌توانند به مولکول‌های زیستی آسیب برسانند. گیاهان با القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و سیستم جاروب‌کننده رادیکال‌ها، رادیکال‌های سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و سپس به آب و اکسیژن تبدیل کرده و از بروز آسیب‌های اکسیداتیو جلوگیری می‌کنند (۷، ۲۹). مطالعه فیروزبخت جهرمی و همکاران (۳۰)، نشان داد نانوذرات نقره موجب افزایش پروتئین کالوس در اسطوخودوس می‌شوند. در پژوهش حاضر، تابش UV-A باعث کاهش پروتئین در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه (بیشتر در ۶۰ دقیقه) شد. کاهش پروتئین تحت اشعه ماوراءبنفش پیش‌تر در گیاهانی مانند فلفل، کدو، نخود، سویا و ذرت نیز گزارش شده که به دلیل افزایش رادیکال‌های اکسیژن فعال رخ می‌دهد (۲۱، ۳۱). در پایان، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تابش UV-A، به‌ویژه در مدت‌زمان طولانی‌تر (۶۰ دقیقه)، با القای تنش اکسیداتیو، منجر به کاهش پارامترهای رشدی، رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای پروتئین در گیاه شوید می‌شود. در مقابل، کاربرد نانوذرات نقره نه تنها به‌صورت مستقل توانست شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه را بهبود بخشد، بلکه در ترکیب با تابش UV-A (به‌مدت ۳۰ دقیقه)، اثرات منفی این تنش را تعدیل کرد.

ترکیبی نانوذرات نقره با سایر تنش‌های غیرزیستی (مانند خشکی، شوری یا فلزات سنگین) در حضور یا عدم حضور تابش UV مورد بررسی قرار گیرد تا نقش چندوجهی این نانوذرات در تعدیل تنش‌های همزمان روشن شود. همچنین، مطالعه مکانیسم‌های مولکولی و ژنتیکی دخیل در پاسخ دفاعی گیاه به نانوذرات نقره و تابش UV-A می‌تواند درک عمیق‌تری از مسیرهای سیگنالینگ و تنظیم ژن‌های مرتبط با استرس فراهم آورد. از دیدگاه کاربردی، استفاده از نانوذرات نقره در غلظت بهینه همراه با تابش کنترل شده UV-A می‌تواند به عنوان یک راهبرد نوین در کشت‌های گلخانه‌ای و سیستم‌های کشاورزی دقیق مورد توجه قرار گیرد. با این حال، ارزیابی اثرات بلندمدت این نانوذرات بر سلامت خاک، میکروبیوم ریزوسفر و ایمنی زیستی محصولات کشاورزی ضروری است تا از پایداری و ایمنی این روش در کشاورزی پایدار اطمینان حاصل شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع ندارند.

این نانوذرات با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و حفاظت از ساختارهای سلولی، مقاومت گیاه شوید را در برابر تنش ناشی از پرتوهای فرابنفش افزایش دادند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مشخص شد که تابش UV-A، به‌ویژه در مدت‌زمان ۶۰ دقیقه، تأثیر منفی معنی‌داری بر پارامترهای رشدی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و سطح پروتئین گیاه شوید دارد که این اثرات عمدتاً ناشی از القای تنش اکسیداتیو، آسیب به DNA و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی است. با این حال، کاربرد نانوذرات نقره، به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، توانست اثرات مخرب UV-A را به‌طور مؤثری تعدیل کند و شاخص‌های رشد، میزان رنگدانه‌ها و فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی را بهبود بخشد. این اثر محافظتی عمدتاً به خواص آنتی‌اکسیدانی، اندازه نانومتری و سطح ویژه بالای نانوذرات نقره نسبت داده می‌شود که از طریق کاهش رادیکال‌های آزاد و تقویت دفاع‌های ذاتی گیاه، عملکرد فتوسنتزی و رشد را حفظ می‌کنند. یافته‌های این مطالعه همچنین نشان داد که ترکیب بهینه نانوذرات نقره با تابش کوتاه‌مدت UV-A (۳۰ دقیقه) می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر در کشاورزی پایدار برای افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های نوری مطرح شود. با توجه به این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اثرات

References

1. Demarsy E, Goldschmidt-Clermont M, Ulm R. Coping with 'Dark Sides of the Sun' through Photoreceptor Signaling. Trends in Plant Science. 2018;23(3):260-271 .
2. Wang J, Li M, Feng J, Yan X, Chen H, Han R. Effects of TiO₂-NPs pretreatment on UV-B stress tolerance in Arabidopsis thaliana. Chemosphere. 2021; 281:130809 .
3. Kreslavski VD, Khudyakova AY, Strokina VV, Shirshikova GN, Pashkovskiy PP, Balakhnina TI, et al. Impact of high irradiance and UV-B on the photosynthetic activity, pro-/antioxidant balance and expression of light-activated genes in Arabidopsis thaliana hy4 mutants grown under blue light. Plant Physiology and Biochemistry. 2021; 167:153-162 .
4. Turcsanyi E, Vass I. Inhibition of photosynthetic electron transport by UV-A radiation targets the photosystem II complex. Photochemistry and Photobiology. 2000;72(4):513-520 .
5. Prasad KN, Divakar S, Shivamurthy GR, Aradhya SM. Isolation of a free radical-scavenging antioxidant from water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk). Journal of the Science of Food and Agriculture. 2005;85(9):1461-1468 .

6. Sarghein Hosseini S, Carapetian J, Khara J. The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A.DC.). Turkish Journal of Biology. 2011;35(1):67-74 .
7. Pourakbar L, Abedzadeh M. Effect of UV-B and UV-C radiation on some physiological and biochemical parameters of *Melissa officinalis* and influence of salicylic acid in UV-stress ameliorations. Plant Process and Function. 2013;2(5):1-14. [In Persian]
8. Ghavam M. Effect of silver nanoparticles on seed germination and seedling growth in *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* celak under salinity stress. Journal of Rangeland Science. 2018;8(1):1-10. [In Persian]
9. Rasaei B, Jalali-Honarmand S, Ghobadi M, Zhou G. Changes of yield and yield components of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under the effects of ultraviolet radiation and abscisic acid application in water deficit stress conditions. Journal of Plant Production Research. 2019;25(4):101-117. [In Persian]
10. Shahraki H, Mahdi Nezhad N, Fakheri BA. The effect of synthesis nanosilver by plant extract on morphological and antioxidant properties of Artichoke (*Cynara scolymus* L.) under salinity stress. Plant Production. 2021;44(1):103-114. [In Persian]
11. Daeihassani B, Abedini M, Hemmati A, Fallahi S. Effect of ultraviolet radiation on physiological responses in the different varieties of radish (*Raphanus sativus* L.). Plant Process and Function. 2017;6(21):55-64. [In Persian]
12. Mahdavian K. The effect of different bands of ultraviolet radiation on some growth characters and biochemical changes in pepper (*Capsicum annum* L.) seedling. Plant Process and Function. 2018;7(23):219-232. [In Persian]
13. Setayesh-Mehr Z, Ganjeali A. Effects of Drought Stress on Growth and Physiological Characteristics of Dill (*Anethum graveolens* L.). Journal of Horticultural Science. 2013;27(1):27-35. [In Persian]
14. Lightenthaler HK. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in enzymology. 1987; 148:350-82.
15. Aebi H. Catalase in vitro. In: Methods in enzymology 1984; 105: 121-126.
16. Hassanvand A, Saadatmand S, Lari Yazdi H, Iranbakhsh AR. Evaluation of photosynthetic pigments, fluorescence indexes, gas exchange, and some active flavonoid substances Pansy (*Viola tricolor* L.) under the effect of Bio-Silver Nanoparticles. Journal of Plant Environmental Physiology. 2023;69(1):80-98 .
17. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry. 1976;72(1-2):248-254 .
18. Mahdavian K. Effects of ultraviolet radiation on plants and their protective mechanisms. Russian Journal of Plant Physiology. 2024;71(6):184 .
19. Mazaheri-Tirani M, Dayani S. Physiological responses of melissa officinalis seedling to different bands of ultraviolet (UV) radiation. Journal of Medicinal Plants and By-products. 2024;13(3):545-550. [In Persian]
20. Reddy KR, Singh SK, Koti S, Kakani VG, Zhao D, Gao W, et al. Quantifying corn growth and physiological responses to ultraviolet-B radiation for modeling. Agronomy Journal. 2013;105(5):1367-1377 .
21. Gao W, Zheng Y, Slusser JR, Heisler GM. Impact of enhanced ultraviolet-B irradiance on cotton growth, development, yield, and qualities under field conditions. Agricultural and Forest Meteorology. 2003;120(1-4):241-248 .
22. Soni S, Jha AB, Dubey RS, Sharma P. Application of nanoparticles for enhanced UV-B stress tolerance in plants. Plant Nano Biology. 2022; 5:100014 .
23. Rasaei B, Jalali Honarmand S, Abdoli M. The use of ultraviolet radiation as a way to improve the efficiency of physiological and biochemical processes to produce optimal yield in drought stress conditions Crop Science Research in Arid Regions. 2021;3(1):127-149. [In Persian]

24. Farmahini Farahani A, Tavili A, Azarnivand H, Jafari A. Effect of priming and nano particles application on seedling emergence, establishment, growth and physiological characteristics of *Sanguisorba minor* Scop. and *Agropyron intermedium* (Host) P. Beauv forage species under drought stress in natural field. *Rangeland*. 2022;16(2):236-255. [In Persian]
25. Hashemi H, Secrets Z, Poursidi S. The effect of biosynthesized silver nanoparticles on growth characteristics and flavonoid content of wheat. *Journal of Agriculture*. 2015; 111:49–54 .
26. Zare Z, Pishkar L, Iranbakhsh A, Talei D. Effects of silver nanoparticles on the growth, gas exchange capacity and photosystem II performance in purslane (*Portulaca oleracea* L.) plants. *Journal of Plant Research*. 2022;35(4):745-759. [In Persian]
27. Ramezani M, Gerami M, Majlesi Z. Comparison between various concentrations of commercial and synthesized silver nanoparticles on biochemical parameters and growth of *Stevia rebaudiana* B. *Plant Physiology Reports*. 2019;24(1):141–152 .
28. Rezayi Far Z, Fallahi S, Gholinezhad E. The effect of drought stress and Ultraviolet on antioxidant defensive system of enzyme and non-enzyme in three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Process and Function*. 2018;7(24):155-170. [In Persian]
29. Bischof K, Peralta G, Krabs G, Van de Poll WH, Pérez-Lloréns JL, Anneke M. Effects of solar UV-B radiation on canopy structure of *Ulva* communities from southern Spain. *Journal of Experimental Botany*. 2002;53(379):2411-2421 .
30. Firouzbakht Jahromi F, Behrouznam Jahromi B, Aboutalebi Jahromi A, Ejraei A, Jahromi SA. Studying the biochemical characteristics of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) as affected by metal nanoparticles in callus tissue condition. *Journal of Plant Ecophysiology*. 2022;14(50):1-16. [In Persian]
31. Mahdavian K, Ghorbanli M, Kalantari K. The effects of ultraviolet radiation on the contents of chlorophyll, flavonoid, anthocyanin and proline in *Capsicum annuum* L. *Turkish Journal of Botany*. 2008;32(1):25-33.