



Evaluation of Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) response to magnesium and manganese application under ultraviolet stress

Mehri MahdaviFard¹ | Sadegh Mousavi-Fard² | Abdolhossein Rezaei Nejad³ |
Hasan Mumivand⁴ | Mohammad Kazem Souri⁵

1. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: mahdaviFard.me@fa.lu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: MousaviFard.S@sku.ac.ir
3. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: rezaeinejad.h@lu.ac.ir
4. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: mumivand.h@lu.ac.ir
5. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: mk.souri@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 11 January 2025
Received in revised form
15 May 2025
Accepted 19 June 2025
Published online 29 September 2025

ABSTRACT

Objective: This study aimed to evaluate the combined effects of ultraviolet (UV) radiation and nutrient supplementation with magnesium (Mg) and manganese (Mn) on mitigating oxidative stress, regulating biochemical pathways, and enhancing essential oil yield in *Lavandula angustifolia* grown under hydroponic conditions.

Method: The experiment was conducted over two consecutive harvests (2021–2022) in the research greenhouse of Lorestan University. A split-plot time design in a randomized complete block design (RCBD) with three replications was employed. Nutritional treatments used a Hoagland-based control solution containing 2 mM Mg and 2.9 μM Mn, with additional treatments formed by halving or doubling these concentrations. Main plots were allocated to three UV levels: no exposure (control), UV-A, and UV-B; subplots encompassed 11 nutrient treatments. Measured variables included essential oil content and yield, total chlorophyll, carotenoids, proline, and catalase (CAT) activity, among other physiological and biochemical traits.

Result: UV-A combined with high Mg and Mn (4 mM Mg and 4.18 μM Mn) produced the highest essential oil percentage (4.03–4.48%) and yield (4.13–5.01 kg ha⁻¹) across both harvests. UV-B reduced chlorophyll content, with a less pronounced decline in the second harvest. High Mg with baseline Mn mitigated light stress, yielding the highest chlorophyll content under non-stress conditions in the second harvest. Carotenoid content was greater in the first harvest and generally increased with greater UV stress, reaching a maximum of 2.26 mg g⁻¹ fresh weight under UV-B with low Mg and Mn; the lowest carotenoids (1.06 mg g⁻¹ FW) occurred in the second harvest under no UV with high Mg and moderate Mn. UV-B combined with low Mg and Mn significantly elevated proline accumulation, whereas higher Mg and Mn levels reduced proline under the same conditions.

Conclusion: A nutrient combination of 4 mM Mg and 4.18 μM Mn, especially under UV-A, effectively alleviates UV stress and enhances physiological status and essential oil production in *Lavandula angustifolia*. The UV-A treatment with 4 mM Mg and 4.18 μM Mn was the most effective, reducing UV-induced stress and improving chlorophyll and carotenoid contents and essential oil yield. The second harvest exhibited superior performance, likely due to improved physiological conditions. Overall, integrating UV-A exposure with optimized Mg and Mn nutrition appears to be a promising strategy to improve both quantity and quality of *Lavandula angustifolia* under stressful growing conditions.

Keywords:

Essential oil percentage
Catalase
harvest stage
UV radiation

Cite this article: MahdaviFard, M., Mousavi-Fard, S., Rezaei Nejad, A., Mumivand, H., & Souri, M. K. (2025). Evaluation of Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) response to magnesium and manganese application under ultraviolet stress. *Journal of Crops Improvement*, 27 (3), 485-503. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388573.2914>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388573.2914>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی پاسخ گیاه اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia* Mill.) به کاربرد منیزیم و منگنز تحت تنش فرابنفش

مهتری مهدوی فرد^۱ | صادق موسوی فرد^۲ | عبدالحسین رضایی نژاد^۳ | حسن مومیوند^۴ | محمد کاظم سوری^۵

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: mahdavifard.me@fa.lu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: Mousavifard.S@sku.ac.ir
۳. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: rezaeinejad.h@lu.ac.ir
۴. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: mumivand.h@lu.ac.ir
۵. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: mk.souri@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: این مطالعه با هدف بررسی تأثیر توأم اشعه UV همراه با تغذیه عناصر منیزیم و منگنز برای کاهش تنش اکسیداتیو، تنظیم مسیرهای بیوشیمیایی و بهبود عملکرد اسانس در گیاه اسطوخودوس در شرایط کشت هیدروپونیک انجام شده است.

روش پژوهش: این مطالعه طی دو مرحله برداشت متوالی در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در گلخانه پژوهشی دانشگاه لرستان انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات در زمان و در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمار شاهد تغذیه‌ای شامل غلظت استاندارد محلول هوگلند (۲ میلی‌مولار منیزیم و ۹/۲ میکرومولار منگنز) بود و سایر تیمارهای تغذیه‌ای براساس کاهش و افزایش دو برابری این عناصر طراحی شد. کرت اصلی شامل سه سطح طیف فرابنفش (عدم تابش، UV-A و UV-B) و کرت فرعی شامل ۱۱ سطح تغذیه‌ای بود.

نتایج: نتایج نشان داد تیمار UV-A با تغذیه غلظت‌های بالای منیزیم (۴ میلی‌مولار) و منگنز (۱۸/۴ میکرومولار)، بیش‌ترین درصد اسانس (۴/۰۳ و ۴/۴۸ درصد) و عملکرد اسانس (۴/۱۳ و ۵/۰۱ کیلوگرم در هکتار) را در هر دو مرحله برداشت داشت. تنش نوری UV-B کلروفیل را کاهش داد، اما این کاهش در برداشت دوم کم‌تر بود. تغذیه با منیزیم زیاد و منگنز پایه، اثرات تنش نوری را تعدیل کرده و بیش‌ترین کلروفیل در برداشت دوم و شرایط بدون تنش نوری ثبت شد. میزان کاروتنوئیدها در برداشت اول بیش‌تر از برداشت دوم بود و با افزایش تنش نوری افزایش یافت. بیش‌ترین کاروتنوئید (۲/۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در برداشت اول با تنش UV-B و تغذیه کم منیزیم و منگنز و کم‌ترین مقدار (۱/۰۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در برداشت دوم بدون تنش نوری و تغذیه زیاد منیزیم و متوسط منگنز مشاهده شد. تابش UV-B در تیمار غلظت کم منیزیم و منگنز باعث افزایش پرولین شد، اما تغذیه با غلظت بالای منیزیم و منگنز در تیمارهای مربوطه میزان پرولین را کاهش داد.

نتیجه‌گیری: غلظت ۴ میلی‌مولار منیزیم و ۱۸/۴ میکرومولار منگنز، به‌ویژه همراه با UV-A، اثرات منفی UV را تعدیل کرده و وضعیت فیزیولوژیکی گیاه و عملکرد اسانس را بهبود بخشید. تیمار UV-A با تغذیه ۴ میلی‌مولار منیزیم + ۱۸/۴ میکرومولار منگنز به‌عنوان بهترین ترکیب شناخته شد، زیرا اثرات تنش UV را کاهش و کلروفیل، کاروتنوئیدها و عملکرد اسانس را افزایش داد. هم‌چنین، برداشت دوم به‌دلیل شرایط بهتر فیزیولوژیکی، عملکرد بالاتری داشت. ترکیب UV-A و تغذیه مناسب می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود کمیت و عملکرد تولید اسطوخودوس در شرایط تنش‌زا باشد.

کلیدواژه‌ها:

اشعه UV
درصد اسانس
کاتالاز
مرحله برداشت

استناد: مهدوی فرد، مهتری؛ موسوی فرد، صادق؛ رضایی نژاد، عبدالحسین؛ مومیوند، حسن و سوری، محمدکاظم (۱۴۰۴). بررسی پاسخ گیاه اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia* Mill.) به کاربرد منیزیم و منگنز تحت تنش فرابنفش. به‌زراعی کشاورزی، ۲۷ (۳)، ۴۸۵-۵۰۳.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388573.2914>



۱. مقدمه

یکی از گیاهان دارویی مهم که جایگاه ویژه‌ای در طب سنتی و مدرن دارد، اسطوخودوس^۱ است. این گیاه که به «لاوند» نیز معروف است، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود در درمان بسیاری از بیماری‌ها و اختلالات، مورد توجه پژوهشگران و متخصصان قرار گرفته است (محمدزاده^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). اسطوخودوس به دلیل دارا بودن ترکیبات فعال نظیر لینالول و لینالیل استات، دارای خواص ضدالتهابی، ضد اضطراب و آرام‌بخش است (بهشتی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴). استفاده از اسانس اسطوخودوس در آروماتراپی می‌تواند به کاهش تنش، بهبود کیفیت خواب و کاهش نشانه‌های افسردگی کمک کند. همچنین، خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی این گیاه، آن را به گزینه‌ای مناسب برای درمان زخم‌ها، مشکلات پوستی و پیشگیری از عفونت‌ها تبدیل کرده است (گیانولیس^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). یکی از چالش‌های اصلی در پرورش گیاه اسطوخودوس، تأثیر عوامل محیطی و تغذیه‌ای بر عملکرد و درصد اسانس این گیاه است، زیرا شرایط مختلف رشد می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم (از طریق تأثیر بر میزان و کیفیت متابولیت‌های ثانویه) بر کیفیت و مقدار اسانس این گیاه مؤثر باشد (بهشتی و همکاران، ۲۰۲۴).

از جمله عناصر کلیدی در تغذیه گیاهان، منیزیم و منگنز نقش مهمی در بهبود رشد، تولید متابولیت‌های ثانویه و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی دارند (یانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). منیزیم، به عنوان عنصر اصلی کلروفیل، در فرایند فتوسنتز و تولید انرژی نقش اساسی ایفا می‌کند و همچنین در تولید اسانس و ترکیبات فعال زیستی مؤثر است. در مقابل، منگنز با ایفای نقش در واکنش‌های اکسیداسیون-احیا و سنتز آنزیم‌های دفاعی، تولید ترکیبات فنولی را تقویت کرده و به بهبود کیفیت محصولات گیاهی کمک می‌کند (ال بالتاگی^۶ و همکاران، ۲۰۲۴).

نور، به ویژه اشعه‌های فرابنفش A و B، نه تنها به عنوان عامل محیطی مؤثر بر رشد و توسعه گیاهان شناخته می‌شود، بلکه می‌تواند نقش یک تنش زیستی ملایم را ایفا کرده و مسیرهای بیوسنتزی متعددی را تحریک کند. این مسیرها به ویژه در گیاهان دارویی، به تولید متابولیت‌های ثانویه‌ای چون فلاونوئیدها و ترپنوئیدها منجر می‌شوند که اغلب دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و دفاعی می‌باشند (اوغونرو^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، شدت و جهت‌گیری پاسخ گیاه به این نوع تنش نوری تا حد زیادی تحت تأثیر وضعیت تغذیه‌ای آن، به ویژه در زمینه عناصر کم مصرف کلیدی مانند منیزیم و منگنز قرار دارد. منیزیم به عنوان عنصر مرکزی در ساختار کلروفیل و تنظیم آنزیم‌های مرتبط با تثبیت کربن و فتوسنتز، نقش مهمی در حفظ تعادل نوری-انرژیکی سلول ایفا می‌کند. منگنز نیز به عنوان کواکتور اصلی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، در حفاظت سلولی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تابش UV مشارکت دارد (فیض^۸ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، ترکیب تنش نوری کنترل شده با تغذیه بهینه این عناصر، می‌تواند به صورت هم‌افزا مسیرهای زیستی تولید ترکیبات دارویی را در گیاه فعال و تقویت نماید؛ ارتباطی که مبنای طراحی تیمارهای این پژوهش قرار گرفته است.

طیف فرابنفش یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر رشد و توسعه گیاهان داشته باشد. این اشعه به ویژه در زمینه تغییرات اقلیمی و تابش‌های شدید، نقش مهمی در ایجاد تنش‌های محیطی برای گیاهان ایفا می‌کند. اشعه UV-A و UV-B به طور مستقیم به ساختار سلولی گیاهان آسیب وارد می‌کنند و در پاسخ به این

1. *Lavandula angustifolia*

2. Mohammadzadeh

3. Beheshti

4. Giannoulis

5. Yang

6. El-Beltagi

7. Ogunro

8. Faiz

تنش‌ها، گیاهان ممکن است واکنش‌های سازشی مختلفی را از خود نشان دهند (سوره^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهش حاضر، اثرات اشعه UV-A و UV-B بر گیاه اسطوخودوس در شرایط هیدروپونیک بررسی شده است. این مطالعه به‌ویژه اهمیت طیف فرابنفش را در تأثیر بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، عملکرد اسانس و ترکیبات فعال گیاه بررسی می‌کند. از آنجاکه گیاهان در معرض اشعه UV، به‌ویژه در کشت‌های کنترل‌شده مانند هیدروپونیک، ممکن است واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خاصی داشته باشند، این پژوهش می‌تواند به درک بهتری از تأثیر این تنش‌های نوری بر گیاهان کمک کند و به راه‌کارهایی برای بهبود مقاومت گیاهان در برابر اشعه UV منجر شود. در واقع، این پژوهش به‌ویژه با توجه به اهمیت روزافزون اشعه UV در محیط‌های کشت کنترل‌شده و سیستم‌های هیدروپونیک، می‌تواند به بهبود فرایندهای کشت گیاهان دارویی و ارزیابی تأثیرات نور بر رشد و کیفیت محصول کمک کند. بررسی این تأثیرات نه‌تنها در علوم گیاهپزشکی بلکه در زمینه‌های کشاورزی و دارویی نیز دارای اهمیت است.

۲. پیشینه پژوهش

۲.۱. پیشینه نظری

تابش طیف فرابنفش، به‌ویژه UV-A و UV-B، می‌تواند تأثیرات زیادی بر فرایندهای فیزیولوژیکی گیاهان، از جمله رشد و تولید متابولیت‌های ثانویه بگذارد (ال شیخ^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). اشعه UV-A که به عمق بیشتری در گیاه نفوذ می‌کند، می‌تواند به تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌های ثانویه‌ای که گیاهان را در برابر آسیب‌های ناشی از تنش‌های محیطی محافظت می‌کنند، کمک کند. اشعه UV-B نیز به‌عنوان یک عامل تنش‌زا شناخته می‌شود که می‌تواند باعث افزایش تولید ترکیبات فیتوشیمیایی در گیاهان، به‌ویژه در گیاهان دارویی شود. این ترکیبات اغلب نقش حفاظتی در برابر آسیب‌های DNA و آسیب‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد دارند و می‌توانند خواص دارویی گیاه را تقویت کنند (بلاچری^۳ و همکاران، ۲۰۲۲).

منیزیم و منگنز به‌عنوان عناصر مهم، تأثیرات مهمی بر رشد گیاهان و تولید متابولیت‌های ثانویه دارند. به‌عنوان جزء اصلی مولکول کلروفیل، نقش کلیدی در فرایند فتوسنتز ایفا می‌کند و به گیاهان کمک می‌کند تا انرژی نوری را به انرژی شیمیایی تبدیل کنند. این عنصر همچنین در فعالیت آنزیم‌ها و فرایندهای متابولیک مانند سنتز پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک دخالت دارد که می‌تواند بر رشد گیاه و تولید متابولیت‌های ثانویه تأثیر بگذارد (وانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی، منگنز در واکنش‌های آنزیمی مانند سوپراکسید دیسموتاز نقش دارد و در سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان شرکت می‌کند. این آنزیم‌ها به گیاهان کمک می‌کنند تا با تنش‌های اکسیداتیو که به‌ویژه تحت تابش UV تشدید می‌شوند، مقابله کنند (رامش^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). به‌عبارت دیگر، تابش UV ممکن است باعث افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی شود و در این بین، حضور منیزیم و منگنز به‌عنوان ریزمغذی‌ها می‌تواند این فرایند را تقویت کند. منیزیم با نقش خود در فتوسنتز و تأمین انرژی گیاه، به‌طور غیرمستقیم به افزایش تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی کمک می‌کند. منگنز نیز با دخالت در سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، به‌ویژه در واکنش‌های مقابله با تنش اکسیداتیو می‌تواند تأثیر زیادی در بهبود مقاومت گیاهان در برابر تابش UV و بهبود تولید متابولیت‌های ثانویه بگذارد (بخشی^۶ و همکاران، ۲۰۲۴).

1. Soares
2. El-Sheekh
3. Blatchley
4. Wang
5. Ramesh
6. Bakhshi

از طرف دیگر در کشت هیدروپونیک، امکان کنترل دقیق شرایط تغذیه‌ای و تیمار کنترل شده UV را فراهم می‌کند. در این سیستم، می‌توان مواد مغذی و شرایط رشد گیاهان را به‌طور کامل تنظیم کرد و تأثیرات این عوامل را بر روی متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی مورد بررسی قرار داد (سینگا^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). در سیستم هیدروپونیک بر پایه محلول غذایی هوگلند به‌ویژه برای مطالعه اثرات مواد مغذی و تابش‌های محیطی به‌دلیل فراهم آوردن یک محیط کنترل شده و عدم تأثیر متغیرهای خاکی، مناسب است. در این بستر، گیاهان قادرند به‌طور مؤثر از منابع غذایی بهره‌برداری کنند و واکنش‌های بیوشیمیایی به تابش‌های UV را به دقت نشان دهند (کوبیاش^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

۲.۲. پیشینه تجربی

نتایج پژوهش نظری^۳ و همکاران (۲۰۱۸) که به بررسی اثرات غلظت منگنز و تابش طیف فرابنفش بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نعنای آبی^۴ پرداختند نشان داد که وزن خشک ریشه و اندام هوایی و محتوای رنگیزه فتوسنتزی تحت تابش طیف فرابنفش کاهش یافت. علاوه بر این محتوای فلاونوئیدها، کربوهیدرات‌های محلول، آنتوسیانین‌ها، مالون‌دی‌آلدهید^۵ (MDA)، پراکسید هیدروژن^۶ (H_2O_2) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز) افزایش یافت. کاربرد منگنز با غلظت ۱۰۰ میکرومولار اثرات مضر طیف فرابنفش بر نعنای آبی را تعدیل کرد.

سیلوا^۷ و همکاران (۲۰۲۱) اثر حذف عناصر پر مصرف بر رشد و محتوا و ترکیب شیمیایی اسانس بادرنجبویه^۸ تحت کشت هیدروپونیک با هفت تیمار که یکی از آن‌ها شامل همه مواد مغذی (تیمار کامل) و شش تیمار دیگر حذف یک عنصر در هر محلول غذایی (-N, -P, -K, -Ca, -Mg, -S) بود را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترتیب افزایش مواد مغذی برای وزن خشک کل $N > K = Ca = P > S = Mg$ و برای محتوای اسانس $N > Ca > S = K = P > Mg$ بود. همچنین حذف مواد مغذی روی محتوای و ترکیب شیمیایی اسانس تأثیر گذاشت. افزایش منیزیم در محلول غذایی باعث افزایش کلروفیل و محتوای اسانس شد. لذا براساس نتایج این مطالعه با مدیریت مناسب درشت مغذی‌ها امکان دستیابی به رشد و محتوای بالاتر اسانس وجود دارد.

در پژوهشی اثرات سمیت منگنز و تابش اشعه UV-B بر صفات فیزیولوژی و بیوشیمیایی دو رقم بلوبری^۹ که یک رقم مقاوم به سمیت منگنز (Brigitta) و رقم دیگر حساس به سمیت منگنز (Bluegold) بود بررسی شد. نتایج نشان داد که در هر دو رقم، تیمار ترکیبی $Mn^{2+} + UV-B$ تأثیر منفی بیش‌تری بر فتوسنتز خالص، هدایت روزنه، پارامترهای فتوشیمیایی فتوسیستم II (PSII) و نسبت کلروفیل a/b در مقایسه با تیمارهای سمیت Mn^{2+} یا اشعه UV-B داشت. همچنین تیمار $Mn^{2+} + UV-B$ موجب کاهش رشد شد و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، غلظت کل ترکیبات جذب‌کننده UV، فنول و آنتوسیانین به‌ویژه در رقم Bluegold افزایش داد. در نتیجه، رقم Brigitta سازگاری بهتر و مقاومت بیش‌تری در برابر تنش ترکیبی سمیت Mn^{2+} و تابش اشعه UV-B نسبت به رقم Bluegold نشان داد (روjas لیلو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳).

1. Sinaga
2. Kobayashi
3. Nazari
4. *Mentha aquatica* L.
5. Malondialdehyde
6. Hydrogen Peroxide
7. Silva
8. *Melissa officinalis* L.
9. *Vaccinium corymbosum* L.
10. Rojas-Lillo

در پژوهش دیگری هینز^۱ و همکاران (۲۰۱۸) میزان تابش طیف فرابنفش B (UV-B) و A (UV-A) بر کلم چینی^۲ را کاهش دادند و تأثیر این کاهش را در طی چهار مرحله رشد بررسی کردند. نتایج نشان داد که تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و متابولیت‌های ثانویه، به مرحله رشد گیاه بستگی داشت. گیاهان دارای ۱۵ و ۳۰ برگ بالغ بیش‌ترین غلظت فلاونوئیدها و اسیدهای هیدروکسی سینامیک، کاروتنوئیدها و کلروفیل‌ها داشتند، درحالی‌که جوانه‌ها دارای غلظت بالایی از گلوکوزینولات‌ها و محصولات هیدرولیز آن بودند. هم‌چنین وزن خشک و سطح برگ با توجه به کاهش اشعه UV-B و UV افزایش یافت.

در بررسی چهار گونه *A. philoxeroides* و *A. tenella*، *A. brasiliensis* و *Alternanthera sessilis* که تحت تابش اشعه UV-B (۲۸۰-۳۱۵ نانومتر) بودند گزارش شد که اشعه UV-B باعث افزایش بتاسیانین و بتاگزانتین در دو گونه *A. brasiliensis* و *sessilis* شد، درحالی‌که تفاوت معنی‌داری بر گونه‌های دیگر نداشت. بیش‌ترین مقدار فلاونوئید مربوط به گونه *A. sessilis* تحت تابش UV-B به مدت هشت ساعت بود (کلین^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). در پژوهشی که فرزادفر^۴ و همکاران (۲۰۱۷) بر تأثیر منیزیم و منگنز بر فتوسنتز، ترکیب اسانس و ترکیبات فنولی بابونه گاوی^۵ انجام دادند، گزارش نمودند که جذب عناصر غذایی و فتوسنتز به مقدار منیزیم بستگی دارد و با توجه به غلظت منیزیم قابل اصلاح است. آنزیم‌های بیوسنتز فنولی و ترکیبات فنولی نه‌تنها توسط منیزیم القا شدند بلکه مقدار آن‌ها نیز به منبع منیزیم بستگی داشت. علاوه بر این، نسبت مونوترپن‌ها با کمبود منیزیم و مقدار بیش از حد منگنز افزایش یافت. هم‌چنین عدم منیزیم باعث کاهش مقدار سزکوئی‌ترین‌ها در اسانس شد. بنابراین، مقدار بالای منیزیم و مقدار پایین منگنز منجر به تغییر مشخصی از تولید مونوترپن به تولید سزکوئی‌ترین‌ها شد. ترکیبات فنولی نیز تحت غلظت‌های مختلف منیزیم و منگنز مقدار متفاوتی داشتند.

در مجموع به نظر می‌رسد که با وجود مطالعات مجزا در مورد اثرات کودهای آلی، عناصر مغذی و اشعه UV در تولید اسانس توسط گیاهان دارویی، اما اطلاعات جامع و متمرکزی در مورد تأثیر اشعه UV همراه با تغذیه عناصر منیزیم و منگنز بر ویژگی‌های مختلف گیاه اسطوخودوس وجود ندارد. بنابراین این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر توأم اشعه UV همراه با تغذیه عناصر منیزیم و منگنز بر رشد و عملکرد اسانس این گیاه تحت کشت هیدروپونیک انجام شده است. هدف از پژوهش حاضر این است که اطلاعات کاربردی در زمینه بهینه‌سازی شرایط کشت گیاهان دارویی در سیستم هیدروپونیک و تأثیرات محیطی بر روی آن‌ها ارائه دهد. هم‌چنین نتایج این مطالعه می‌تواند به درک اثرات منیزیم و منگنز در بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد اسانس گیاه اسطوخودوس تحت تأثیر طیف فرابنفش کمک کند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳.۱. زمان اجرا و طرح آزمایش

این پژوهش در دو مرحله برداشت، در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان (با مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی) و با متوسط دمای روزانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد، مدت روشنایی نور طبیعی ۱۲ ساعت و رطوبت نسبی ۷۰ درصد، با هدف بررسی تأثیر عناصر منیزیم

1. Heinze
2. *Brassica rapa* spp. *chinensis*
3. Klein
4. Farzadfar
5. *Tanacetum parthenium*

و منگنز بر رشد و متابولیت‌های ثانویه در کشت هیدروپونیک اسطوخودوس با محلول غذایی هوگلند تحت طیف فرابنفش A و B انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات در زمان و در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی در پنج تکرار انجام شد. فرمول غذایی مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول (۱) ارائه شده است. از آنجایی که یکی از اهداف مهم این طرح سنجش تأثیر غلظت منیزیم و منگنز موجود در محلول غذایی هوگلند بود، غلظت استاندارد این دو عنصر در محلول غذایی هوگلند یعنی ۲ میلی مولار منیزیم + ۹/۲ میکرومولار منگنز به عنوان تیمار شاهد انتخاب شد و تیمارهای تغذیه دیگر پژوهش براساس افزایش و کاهش دو برابری این عناصر در محلول غذایی هوگلند انتخاب شدند. به طوری که در مجموع کرت اصلی شامل تیمار طیف فرابنفش در سه سطح (عدم کاربرد طیف فرابنفش (شاهد)، طیف فرابنفش A و طیف فرابنفش B) و کرت فرعی تیمار تغذیه غلظت منیزیم و منگنز در محلول غذایی هوگلند شامل ۱۱ سطح در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. فرمول غذایی و غلظت عناصر موجود در محلول غذایی مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام ترکیب	فرمول شیمیایی	جرم مولی (گرم بر مول)	غلظت محلول ذخیره (گرم در لیتر)	میلی لیتر از محلول های ذخیره	غلظت نهایی
۱	سولفات منیزیم	MgSO ₄ .7H ₂ O	۳۴۶/۴۶	۳۴۶/۴۶	۲	۲ میلی مولار
۲	نترات کلسیم	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	۲۳۶/۱۵	۲۳۶/۱۵	۴/۶	۴/۶ میلی مولار
۳	مونو پتاسیم فسفات	KH ₂ PO ₄	۱۳۶/۰۸	۱۳۶/۰۸	۱	۱ میلی مولار
۴	نترات پتاسیم	KNO ₃	۱۰۱/۱	۱۰۱/۱	۵	۵ میلی مولار
۵	اسید بوریک	H ₃ BO ₃	۶۱/۸۳	۲/۸۶	۱	۴۶ میکرومولار
۶	کلرید منگنز	MnCl ₂ .4H ₂ O	۱۹۷/۹۱	۱/۸۲	۱	۹۰۲ میکرومولار
۷	سولفات روی	ZnSO ₄ .7H ₂ O	۲۸۷/۵۶	۰/۲۲	۱	۷۶ میکرومولار
۸	سولفات مس	CuSO ₄ .5H ₂ O	۳۴۹/۶۸	۰/۰۹	۱	۳۶ میکرومولار
۹	مولبیدات سدیم	Na ₂ MoO ₄ .5H ₂ O	۳۴۱/۹۵	۰/۰۹	۱	۳۷ میکرومولار
۱۰-۷	آهن کلاته	Fe-EDTA	۳۴۸/۰۹	۵۰	۳/۵	۵۰ میکرومولار

جدول ۲. سطوح تیمار تغذیه غلظت منیزیم و منگنز در محلول غذایی هوگلند در آزمایش

شماره تیمار	توضیحات تیمار	غلظت منیزیم (میلی مولار)	غلظت منگنز (میکرومولار)
۱	شاهد: هوگلند کامل	۲	۹/۲
۲	هوگلند با منگنز نصف	۲	۴/۶
۳	هوگلند با منگنز دو برابر	۲	۱۸/۴
۴	هوگلند با منیزیم نصف و منگنز نصف	۱	۴/۶
۵	هوگلند با منیزیم نصف و منگنز ثابت	۱	۹/۲
۶	هوگلند با منیزیم نصف و منگنز دو برابر	۱	۱۸/۴
۷	هوگلند با منیزیم دو برابر و منگنز نصف	۴	۴/۶
۸	هوگلند با منیزیم دو برابر و منگنز ثابت	۴	۹/۲
۹	هوگلند با منیزیم دو برابر و منگنز دو برابر	۴	۱۸/۴
۱۰	هوگلند بدون منگنز	۲	۰
۱۱	هوگلند بدون منیزیم	۰	۹/۲

۳.۲. نحوه اعمال تیمارها

این پژوهش با بستر ماسه و پرلایت (نسبت ۱:۱) انجام شد که پیش از شروع آزمایش در اتوکلاو ضدعفونی شده و در گلدان‌های ضدعفونی شده با حجم ۲/۳ لیتر قرار گرفت. نشاهای اسطوخودوس انگلیسی از مرکز کشت و صنعت خرم‌آباد تهیه و به هر گلدان یک عدد نشا منتقل شد. برای پیشگیری از آلودگی، پس از انتقال نشاها از قارچ کش متالاکسیل مانکوزب استفاده شد. اعمال تیمارهای نوری و تغذیه به طور هم زمان و با شروع مرحله رشد گیاهچه‌ای آغاز شد. لازم به ذکر است که در ابتدا

جهت جلوگیری از ایجاد شوک و تنش ناگهان نوری در گیاهان، به‌مدت یک هفته اعمال تیمار نوری به‌مدت سه ساعت در روز از ساعت ۱۱ - ۱۴ صورت گرفت و پس از آن اعمال تیمارهای نوری به‌مدت کامل (چهار ساعت در روز) از ساعت ۱۰-۱۴ صورت گرفت. بدین منظور از یک تایمر الکتریکی با هدف تنظیم زمان روشن و خاموش شدن لامپ‌ها استفاده شد (هینز و همکاران، ۲۰۱۸). در تیمارهای شاهد نیز یک عدد لامپ مهتابی معمولی قرار گرفت. به‌منظور استقرار لامپ‌های تأمین‌کننده پرتو فرابنفش، پایه‌های فلزی با ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر با پروفیل فلزی ساخته شدند. با توجه به تغییر ارتفاع گیاهان در طول دوره رشد و به‌منظور تیمار یکسان پرتو فرابنفش در طول زمان انجام آزمایش، ارتفاع پایه‌های نگهدارنده لامپ‌ها با گذشت زمان افزایش یافت. با تنظیم فاصله لامپ‌ها از گیاهان در فاصله حدود ۵۵ سانتی‌متری، شدت تابش پرتو فرابنفش B با شبیه‌سازی ۲۵ درصد تخریب لایه اوزون به میزان کیلوژول بر مترمربع در نظر گرفته شد و شدت تابش پرتو فرابنفش A به میزان کیلوژول بر مترمربع در نظر گرفته شد (کلین و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین به‌منظور ایجاد فضای ایزوله و با هدف جلوگیری از تداخل تأثیر تیمارهای مختلف، در فاصله بین تیمارها از ورقه‌های یونولیت جهت عایق‌سازی محیط آزمایش استفاده گردید. در مورد نحوه اعمال تیمارهای تغذیه نیز شایان ذکر است که جهت سازگارشیدن تدریجی گیاهان به شرایط تغذیه، در ابتدا به‌مدت یک هفته به کلیه گلدان‌ها، تیمار غذایی نیم هوگلدن داده شد و سپس هم‌زمان با شروع اعمال کامل تیمارهای نوری اعمال دقیق تیمارهای تغذیه‌ای نیز آغاز شد. در فرایند آماده‌سازی محلول‌های غذایی مورداستفاده در سامانه کشت هیدروپونیک، از آب شیر (آب شهری) استفاده شد که پیش از مصرف، به‌مدت ۲۴ ساعت در ظروف باز نگهداری گردید تا کلر باقی‌مانده آن به‌طور طبیعی تبخیر شود. همچنین، به‌منظور اطمینان از مناسب‌بودن کیفیت آب برای کشت هیدروپونیک، شاخص‌های هدایت الکتریکی (EC) و pH آن پیش از تهیه محلول اندازه‌گیری شد که در محدوده قابل‌قبول قرار داشت. پس از تهیه محلول غذایی تنظیم pH در محدوده ۵/۸ انجام شد. همچنین هدایت الکتریکی برابر با ۲ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود. پس از آماده‌سازی محلول، میزان ۲۰۰ میلی‌لیتر از آن برای هر گلدان در نظر گرفته شد که به‌صورت دو وعده ۱۰۰ میلی‌لیتری در روز، یکی در صبح و دیگری در عصر اعمال گردید (کوبیاش و همکاران، ۲۰۲۱). برداشت اول حدود دو ماه پس از اعمال تیمارها به‌صورت دستی انجام شد. پس از برداشت اول و سرزنی گیاهان، اعمال تیمارهای نوری و تغذیه به‌مدت دو هفته متوقف شد و رشد گیاه در شرایط بهینه گلخانه (تغذیه با هوگلدن کامل و قطع تیمارهای نوری) ادامه یافت. پس از آن در مرحله دوم پژوهش نیز نحوه اعمال تیمارها دقیقاً مشابه مرحله اول که در بالا توضیح داده شد، اعمال گردید و مرحله دوم برداشت در تاریخ ۱۷ خردادماه ۱۴۰۱ صورت گرفت.

۳.۳. صفات موردبررسی

به‌منظور بررسی پاسخ گیاه اسطوخودوس به کاربرد منیزیم و منگنز تحت تنش فرابنفش، میزان کلروفیل کل، کاروتنوئیدها، فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان پرولین در اسطوخودوس محاسبه شدند. در ادامه نحوه سنجش این صفات به اختصار توضیح داده می‌شود.

۳.۳.۱. کلروفیل و کاروتنوئیدها

مقدار ۰/۱ گرم از نمونه‌ها با ازت مایع خردشده و در ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص استخراج گردید. سپس عصاره به‌دست‌آمده به‌مدت ۱۵ دقیقه در دور ۴۰۰۰ سانتریفیوژ شد و جذب در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۲ و ۴۷۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. میزان کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از روابط زیر و براساس میلی‌گرم در گرم محاسبه گردید (لیچتن‌تالر، ۱۹۸۷).

$$\text{Chl a (mg/g FW)} = \frac{(11.24 \text{ A662}) - (2.04 \text{ A645}) \times \text{volume}}{\text{fresh weight} \times 1000} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{Chl b (mg/g FW)} = \frac{(20.13 \text{ A645}) - (4.19 \text{ A662}) \times \text{volume}}{\text{fresh weight} \times 1000} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\text{Car (mg/g FW)} = \frac{1000 \times (\text{A470} - 1.90 \text{ Chl a} - 63.14 \text{ Chl b}) \times \text{volume}}{\text{fresh weight} \times 1000 \times 214} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\text{Total Chl (mg/g FW)} = \text{chl a} + \text{chl b} \quad \text{رابطه ۴}$$

۲.۳.۳. فعالیت آنزیم کاتالاز

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز ابتدا ابتدا ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۶۰۰ میکرولیتر بافر فسفات سدیم (pH=۷)، ۱۵ میکرولیتر EDTA و ۵۴۹/۸۵ میکرولیتر آب در تیوب ریخته شد. سپس ۳۰۰ میکرولیتر آب اکسیژنه اضافه گردید و بلافاصله جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر قرائت شد. پس از یک دقیقه، جذب مجدداً اندازه‌گیری شد (بردفورد، ۱۹۷۶^۱).

۳.۳.۳. پرولین

برای اندازه‌گیری پرولین، ۰/۱ گرم از نمونه برگ با ۱۰ میلی‌لیتر اسید ۵- سولفوسالسیلیک ۳ درصد کوبیده شده و سپس سانتریفیوژ شد. به محلول حاصل، اسید گلاسیال استیک و اسید نین‌هیدرین اضافه و یک ساعت در حمام بن‌ماری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس تولوئن اضافه و جذب نوری در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. میزان پرولین براساس جدول استاندارد محاسبه گردید (بتاس، ۱۹۷۳^۲).

۴.۳.۳. عملکرد و درصد اسانس

برای اندازه‌گیری درصد و عملکرد اسانس، از روش تقطیر با بخار آب به‌کمک دستگاه کلونجر^۳ مدل CLEV-L80 ساخت شرکت پایتخت صنعت زاگرس (PZ-Lab، ایران) در سال ۱۴۰۰ استفاده شد. این دستگاه مطابق با دستورالعمل‌های فارماکوپه گیاهی اروپا^۴ عمل می‌کند. در این روش، ابتدا نمونه‌های خشک‌شده گیاهی در بالن مخصوص قرار گرفتند. سپس بخار آب از میان بافت گیاهی عبور داده شد و ترکیبات فرار تبخیر شدند. بخار حاوی اسانس پس از عبور از کندانسور دستگاه، به‌صورت فاز جداگانه جمع‌آوری گردید. درصد اسانس بر مبنای وزن خشک گیاه محاسبه شد و عملکرد آن نیز به‌صورت وزن اسانس استخراج‌شده برحسب واحد سطح گزارش گردید. در انتها داده‌های حاصل از آزمایش نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین‌ها به‌وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD)^۵ در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل‌ها از برنامه اکسل^۶ استفاده گردید.

1. Bradford
2. Bates
3. Clevenger apparatus
4. European Pharmacopoeia, 10th Edition
5. Least Significant Difference
6. Excel

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. عملکرد و درصد اسانس

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فصل برداشت، تابش طیف فرابنفش و غلظت‌های مختلف منیزیم و منگنز در محلول غذایی هوگلدن تأثیر چشم‌گیری بر عملکرد نهایی اسانس گیاه اسطوخودوس دارد. به‌طوری‌که اثر برهم‌کنش سه‌گانه این تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد بر عملکرد نهایی اسانس این گیاه معنی‌دار شد (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی و عملکرد گیاه اسطوخودوس تحت تأثیر مرحله برداشت، طیف فرابنفش و تغذیه

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد اسانس	درصد اسانس	کلروفیل	کاروتنوئیدها	فعالیت کاتالاز	پرولین
بلوک	۲	۰/۱۷ ^{**}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۷۵ ^{**}	۰/۴۴ ^{**}	۰/۲۳ ^{**}	۲/۸۸ ^{**}
طیف فرابنفش	۲	۰/۶۸ ^{ns}	۱۰/۹۷ ^{**}	۱۳/۶۸ ^{**}	۳/۱۰ ^{**}	۱۱/۱۷ ^{**}	۲۲۰۸/۹۸ ^{**}
خطای اصلی	۴	۰/۶۱	۰/۴۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۲/۷۲
تغذیه	۱۰	۳/۵۳ ^{**}	۲/۳۴ ^{**}	۲/۶۹ ^{**}	۰/۶۳ ^{**}	۰/۴۷ ^{**}	۲۶/۰۳ ^{**}
طیف فرابنفش × تغذیه	۲۰	۰/۲۸ ^{**}	۰/۲۶ ^{**}	۰/۱۸ ^{**}	۰/۰۶ ^{**}	۰/۰۷ ^{**}	۳/۰۷ ^{**}
خطای فرعی	۶۰	۰/۰۳	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۵
مرحله برداشت	۱	۱/۲۵ ^{ns}	۰/۷۳ ^{ns}	۶/۷۵ ^{**}	۲/۵۹ ^{**}	۰/۸۶ ^{**}	۳۲۰/۲۹ ^{**}
طیف فرابنفش × مرحله برداشت	۲	۶/۰۷ ^{**}	۹/۹۲ ^{**}	۰/۱۸ ^{**}	۰/۴۰ ^{**}	۰/۰۸ ^{**}	۶۷/۱۵ ^{**}
خطای فرعی	۶	۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱	۴/۸۸
تغذیه × مرحله برداشت	۱۰	۰/۴۶ ^{**}	۰/۳۱ ^{**}	۰/۰۷ ^{**}	۰/۰۳ ^{**}	۰/۰۳ ^{**}	۱/۵۲ ^{**}
طیف فرابنفش × تغذیه × مرحله برداشت	۲۰	۰/۳۶ ^{**}	۰/۱۷ ^{**}	۰/۰۷ ^{**}	۰/۰۳ ^{**}	۰/۰۵ ^{**}	۱/۱۷ ^{**}
خطای فرعی	۶۰	۱/۷۱	۰/۹۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۶۳
ضریب تغییرات (درصد)		۵/۴۶	۵/۰۹	۴/۵۶	۴/۰۲	۳/۷۴	۳/۲۹

ns، * و **: به‌ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

عملکرد اسانس در فصل دوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از فصل اول بود. این افزایش با بهبود محتوای کلروفیل و افزایش درصد اسانس گیاه در فصل دوم هم‌زمان بوده و نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین این دو عامل است (جدول ۴). بالاترین عملکرد اسانس در هر دو فصل برداشت مربوط به تیمارهایی بود که تحت تابش طیف فرابنفش A و تغذیه با غلظت‌های بالای منیزیم و منگنز قرار داشتند. در فصل اول، این مقدار برابر با ۴/۱۳ و در فصل دوم ۵/۰۱ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین، نتایج نشان داد که مشابه تغییرات عنوان شده در مورد درصد اسانس حتی در شرایط تابش طیف فرابنفش B، گیاهانی که تغذیه مناسبی از منیزیم و منگنز دریافت کرده بودند، عملکرد اسانس بهتری نسبت به گیاهان فاقد تابش اشعه داشتند. در مقابل، کم‌ترین عملکرد اسانس (۱/۷۴ کیلوگرم در هکتار) در گیاهانی مشاهده شد که در شرایط بدون تابش اشعه و با غلظت پایین منیزیم و منگنز رشد کرده بودند. این نتایج به‌وضوح بر اهمیت تغذیه مناسب با عناصر منیزیم و منگنز و تأثیر مثبت تابش طیف فرابنفش، به‌ویژه نوع A، در بهبود عملکرد اسانس گیاه اسطوخودوس تأکید دارد. نتایج همچنین نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه تیمارهای فصل برداشت، اشعه ماورابنفش و غلظت منیزیم و منگنز در محلول غذایی، در سطح احتمال ۱ درصد بر درصد اسانس گیاه اسطوخودوس معنی‌دار بود (جدول ۳). درصد اسانس در فصل دوم برداشت در تمام ترکیب‌های تیماری به‌طور معنی‌داری در مقایسه با فصل اول با تیمارهای مشابه بیش‌تر بود، به‌عبارت دیگر، مطابق انتظار هم‌زمان با افزایش معنی‌دار کلروفیل در فصل دوم برداشت، درصد اسانس این گیاه نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴). نتایج نشان داد که در هر دو فصل برداشت، طیف فرابنفش A به‌همراه غلظت بالای منیزیم و منگنز بیش‌ترین تأثیر را در افزایش معنی‌دار درصد اسانس در این گیاه داشته‌اند به‌طوری‌که بیش‌ترین درصد اسانس در فصل اول و دوم برداشت به‌ترتیب با مقادیر ۴/۰۳ و ۴/۴۸

درصد در دو در تیمار طیف فرابنفش A به همراه تیمار تغذیه با غلظت‌های بالای منیزیم و منگنز حاصل شد. اما نکته قابل توجه این بود که در اکثر تیمارهای غلظت بالا و متوسط منیزیم و منگنز حتی با افزایش شدت طیف فرابنفش از A به B هنوز هم درصد اسانس در گیاه اسطوخودوس از گیاهانی که تحت تنش نوری نبودند و تیمار تغذیه مشابهی دریافت کرده بودند، بیش‌تر بود، به‌طوری‌که در مجموع کم‌ترین درصد اسانس (۱/۵۲ درصد) در فصل اول برداشت و در شرایط بدون تنش نوری و با غلظت پایین منیزیم و منگنز مشاهده شد. این یافته‌ها در مجموع بیانگر نقش کلیدی عناصر منیزیم و منگنز و تأثیر مثبت تابش طیف فرابنفش در افزایش درصد اسانس گیاه اسطوخودوس می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش مرحله برداشت، طیف فرابنفش نقش و تغذیه بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکردی گیاه اسطوخودوس

طیف فرابنفش	تغذیه	عملکرد اسانس (کیلوگرم در هکتار)		درصد اسانس (درصد)		کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تر)	
		برداشت اول	برداشت دوم	برداشت اول	برداشت دوم	برداشت اول	برداشت دوم
شاهد	Mg+Mn	۲/۳۲۳h-j	۳/۴۱۰g-i	۱/۹۵۵y-c'	۲/۴۳۶n-r	۲/۱۴۷l	۲/۳۵۷h
	Mg+1/2Mn	۳/۰۰۲k-p	۳/۲۴۳h-l	۱/۷۶۶c'-f'	۲/۳۱۷q-u	۲/۰۵۰m	۲/۲۸۰i
	Mg+2Mn	۳/۰۷۰i-o	۳/۳۲۳h-j	۱/۸۰۶a'-e'	۲/۳۷۳o-t	۲/۱۸۷kl	۲/۳۶۷h
	1/2Mg+1/2Mn	۱/۷۴۱a'	۳/۰۹۲i-o	۱/۰۲۴i'	۲/۲۰۸s-w	۱/۷۹۷q	۲/۰۷۷m
	1/2Mg+Mn	۲/۲۲۰yz	۳/۱۷۶i-m	۱/۳۰۶h'	۲/۲۶۸r-v	۱/۹۱۷n	۲/۱۹۷k
	1/2Mg+2Mn	۲/۵۷۵t-w	۳/۱۶۹i-n	۱/۵۱۵g'	۲/۲۶۳r-v	۲/۰۳m	۲/۲۶۱j
	2Mg+1/2Mn	۳/۱۵۱i-n	۳/۸۷۱d-f	۱/۸۵۳z-d'	۲/۷۶۵g-k	۲/۲۲۳jk	۲/۵۸۳f
	2Mg+Mn	۳/۷۸۹ef	۳/۸۰۸ef	۲/۲۲۹s-w	۲/۷۲۰h-l	۳/۰۵۷b	۳/۴۰۷a
	2Mg+2Mn	۳/۰۳۴k-p	۳/۲۵۸h-k	۱/۷۸۵b'-e'	۲/۳۲۷q-u	۲/۴۸۷g	۲/۷۶۷d
	-Mn	۲/۷۶۲p-t	۲/۹۴۹m-q	۱/۶۲۵e'-g'	۲/۱۰۷v-y	۱/۸q	۲/۲۷۱j
UV-A	-Mg	۲/۶۶۶r-v	۲/۸۹۸n-r	۱/۵۶۸f'g'	۲/۰۷۰v-y	۱/۸۳۳o-q	۲/۰۶۳m
	Mg+Mn	۳/۹۸۱de	۳/۰۲۴k-p	۳/۶۱۹cd	۲/۵۶۳k-o	۱/۸۷۷no	۲/۳۵۷h
	Mg+1/2Mn	۳/۰۸۷j-o	۲/۳۲۸w-y	۲/۸۰۷g-j	۱/۹۷۳x-b'	۱/۶t	۲/۲۸i
	Mg+2Mn	۴/۴۰۳b	۳/۱۱۴aj-o	۲/۶۹۷i-l	۲/۶۳۹i-n	۱/۹۱۷n	۲/۳۶۷h
	1/2Mg+1/2Mn	۲/۹۷۷l-q	۲/۵۶۷t-w	۲/۷۰۷i-l	۲/۱۷۵t-x	۱/۳۱۷xw	۲/۰۷۷m
	1/2Mg+Mn	۳/۱۱۵j-o	۲/۵۹۹s-w	۲/۸۳۲g-i	۲/۲۰۳s-w	۱/۷۱۷r	۲/۱۹۷k
	1/2Mg+2Mn	۲/۷۲۱q-t	۲/۷۷۹p-s	۲/۴۷۴m-q	۲/۳۵۵p-s	۱/۸۱pq	۲/۲۶۱j
	2Mg+1/2Mn	۳/۸۳۵ef	۳/۱۲۹j-o	۳/۴۸۷ed	۲/۶۵۱i-m	۱/۸۵۳op	۲/۷۷۳d
	2Mg+Mn	۴/۱۲۷cd	۳/۴۹۱gh	۳/۷۵۲c	۲/۹۵۹g	۲/۲۶۷ij	۲/۷۹۷cd
	2Mg+2Mn	۴/۹۳۷a	۵/۰۱۲۷a	۴/۰۰۳b	۴/۴۸۸a	۲/۸۳۷c	۲/۷۶۷d
UV-B	-Mn	۳/۶۵۲fg	۲/۲۷۴x-z	۳/۳۲۰ef	۱/۹۲۸y-c'	۱/۷۳۳r	۲/۰۷۷m
	-Mg	۲/۶۱۱s-v	۲/۴۷۵u-y	۲/۳۷۳o-t	۲/۰۹۷v-y	۱/۵u	۱/۸۱۲pq
	Mg+Mn	۳/۴۷۴gh	۳/۱۶۴i-m	۲/۹۱۹gh	۲/۶۱۵i-n	۱/۲۴۷z	۱/۵۴۷u
	Mg+1/2Mn	۳/۱۰۲j-o	۳/۰۷۳j-o	۲/۶۰۷i-n	۲/۵۳۹i-p	۱/۳۰۳xy	۱/۴۱۳v
	Mg+2Mn	۳/۱۱۵j-o	۳/۳۱۵h-j	۲/۶۱۸i-n	۲/۷۴۰h-l	۱/۲۵۷yz	۱/۶۵۷s
	1/2Mg+1/2Mn	۲/۹۱۱m-r	۲/۵۴۷ t-x	۲/۴۴۷n-r	۲/۱۰۵v-y	۰/۸۵۷e'	۰/۹۵۷c'
	1/2Mg+Mn	۲/۵۳۲t-x	۲/۶۶۸r-v	۲/۱۲۸u-y	۲/۲۰۵s-w	۰/۸۸۳d'e'	۱/۱۳۳a'
	1/2Mg+2Mn	۲/۴۴۱v-y	۲/۶۶۸r-v	۲/۰۵۲w-z	۲/۲۰۵s-w	۰/۹۰۷d'	۱/۰۳۷b'
	2Mg+1/2Mn	۳/۸۶۳d-f	۳/۰۰۶k-p	۲/۷۱۳i-l	۲/۴۸۵m-q	۱/۳۵۳w	۱/۶۰۳t
	2Mg+Mn	۴/۲۵۶bc	۳/۱۵۳i-n	۳/۵۷۷cd	۲/۶۰۶i-n	۱/۶۱۷st	۲/۶۵۷e
	2Mg+2Mn	۳/۲۳۹h-l	۳/۹۶۲de	۳/۲۴۶f	۳/۲۷۴f	۲/۳۳۷h	۲/۶۷۸e
	-Mn	۲/۸۵۸o-s	۲/۲۳۳yz	۲/۴۰۱o-s	۱/۸۴۶a'-d'	۱/۰۳۳b'	۱/۵۱۳u
	-Mg	۲/۰۴۷z	۲/۴۱۶v-y	۱/۷۳۰d'-f'	۱/۹۹۷x-a'	۰/۹۱c'd'	۱/۲۶yz

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

ادامه جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش مرحله برداشت، طیف فرابنفش نقش و تغذیه بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکردی گیاه اسطوخودوس

طیف فرابنفش	تغذیه	کاروتنوئید		فعالیت کاتالاز		پرولین	
		(میلی گرم بر گرم وزن تر)		(تغییرات جذب در دقیقه به‌ازای هر میلی گرم پروتئین)		(میکرومول بر گرم وزن تر برگ)	
		برداشت اول	برداشت دوم	برداشت اول	برداشت دوم	برداشت اول	برداشت دوم
	Mg+Mn	۱/۲۳۹s-v	۱/۰۳۲yz	۰/۷۳۳c'	۰/۵۳۶f'	۷/۸۶۷i'j'	۵/۷۰۸n'
	Mg+1/2Mn	۱/۲۱۷vw	۱/۰۱۹yz	۰/۷۱۶c'	۰/۵۳۰f'	۷/۶۹۴j'k'	۵/۶۴۸n'o'
	Mg+2Mn	۱/۲۲۹t-v	۱/۰۰۶yz	۰/۷۲۷é	۰/۵۲۳f'	۷/۸۰۷j'k'	۵/۵۸۱ n'o
	1/2Mg+1/2Mn	۱/۵۲۴l-o	۱/۵۲۴l-o	۰/۹۰۲uv	۰/۷۲۹a'b'	۹/۵۱۰a'b'	۸/۱۷۲g'h'
	1/2Mg+Mn	۱/۵۹۴jk	۱/۵۹۴jk	۱/۳۲۷j'	۰/۸۲۸yz	۹/۹۰۹z	۸/۵۱۸e'f'
شاهد	1/2Mg+2Mn	۱/۴۰۸q	۱/۴۰۸q	۰/۸۳۳x-z	۰/۷۳۲c'	۸/۸۳۷d'	۷/۵۸۹k'
	2Mg+1/2Mn	۱/۰۴۷y	۱/۰۴۷y	۰/۶۱۹e'	۰/۵۴۴f'	۶/۴۸۰m'	۵/۵۱۶n'o'
	2Mg+Mn	۱/۲۳۳s-v	۱/۲۳۳s-v	۰/۷۳۰c'	۰/۶۴۱e'	۵/۴۰۴o'	۴/۶۱۴p'
	2Mg+2Mn	۱/۲۲۷uv	۱/۲۲۷uv	۰/۷۲۶c'	۰/۴۹۱g'	۷/۹۴۵h'i	۵/۵۴۶n'o'
	-Mn	۱/۵۱۹m-o	۱/۵۱۹m-o	۰/۸۹۹uv	۰/۷۹۰a'b'	۸/۱۳۲g'h'	۶/۹۷۸i'
	-Mg	۱/۵۵۷k-m	۱/۵۵۷k-m	۰/۹۲۱tu	۰/۸۰۹za'	۸/۳۴۹f'g'	۷/۱۶۶i'
	Mg+Mn	۱/۳۶۱q	۱/۱۳۸x	۰/۹۳۵t	۰/۷۸۵a'b'	۱۳/۹۰۷u	۹/۹۴۹z
	Mg+1/2Mn	۱/۴۸۱op	۱/۲۸۱rs	۱/۰۱۹rs	۰/۸۸۴vw	۱۴/۵۶۲st	۹/۲۶۱b'c'
	Mg+2Mn	۱/۵۴۹k-n	۱/۲۴۹r-v	۱/۰۶۵op	۰/۸۶۲xw	۱۴/۹۲۸r	۹/۷۹۴z
	1/2Mg+1/2Mn	۱/۸۰۰fg	۱/۴۹۲op	۱/۲۳۸l	۱/۰۲۹q-s	۱۶/۲۸۹no	۱۰/۹۲۵x
	1/2Mg+Mn	۱/۶۴۷i	۱/۵۰۶n-p	۱/۱۳۲n	۱/۰۳۹p-r	۱۵/۴۵۶p	۱۱/۰۲۳x
UV-A	1/2Mg+2Mn	۱/۵۲۸l-o	۱/۰۲۸yz	۱/۰۵۰o-q	۰/۷۰۹ c'd'	۱۴/۸۱۲rs	۸/۷۳۶d'e'
	2Mg+1/2Mn	۱/۴۶۳p	۱/۲۲۸uv	۱/۰۰۶s	۰/۸۴۷xy	۱۴/۴۶۲t	۹/۶۹۴za'
	2Mg+Mn	۱/۱۶۷wx	۱/۱۲۳x	۰/۶۱۷e'	۰/۷۷۵b'	۱۳/۴۵۴v	۹/۱۹۱c'
	2Mg+2Mn	۱/۲۷۷r-t	۰/۹۹۳z	۰/۸۷۸vw	۰/۶۸۵ d	۱۱/۵۹۶w	۸/۵۶۸ d-f
	-Mn	۱/۵۶۹kl	۱/۳۶۹q	۱/۰۷۹o	۰/۹۴۴t	۱۵/۰۳۹qr	۱۰/۳۶۹y
	-Mg	۱/۹۱۵de	۱/۳۶۵q	۱/۳۱۷jk	۰/۹۴۱t	۱۶/۹۱۰m	۱۰/۳۴۸y
	Mg+Mn	۱/۷۴۰h	۱/۲۹۳r	۱/۳۹۲i	۱/۲۹۲k	۱۸/۴۴۱j	۱۶/۴۰۲n
	Mg+1/2Mn	۱/۸۹۱de	۱/۵۴۴l-n	۱/۵۱۳h	۱/۵۴۴fg	۱۹/۴۵۷gh	۱۸/۱۶۲k
	Mg+2Mn	۱/۹۰۹de	۱/۲۳۹s-v	۱/۵۲۷f-h	۱/۲۳۹l	۱۹/۵۷۴f-h	۱۶/۰۲۴o
	1/2Mg+1/2Mn	۲/۲۶۰a	۱/۸۱۳f	۱/۲۶۰a	۱/۶۴۸de	۲۱/۹۱۶a	۲۰/۰۴۴de
	1/2Mg+Mn	۲/۰۷۷c	۱/۷۳۷h	۱/۶۶۱d	۱/۷۳۷c	۲۰/۶۹۱c	۱۹/۵۰۶gh
UV-B	1/2Mg+2Mn	۱/۸۷۸e	۱/۶۳۱ij	۱/۵۰۲h	۱/۶۳۱de	۱۹/۳۶۵h	۱۸/۷۶۵i
	2Mg+1/2Mn	۱/۸۹۳de	۱/۶۲۳ij	۱/۵۱۴gh	۱/۶۲۳e	۱۹/۴۶۸gh	۱۸/۷۱۳j
	2Mg+Mn	۱/۶۳۰ij	۱/۲۶۰r-u	۱/۳۰۴jk	۱/۲۶۰l	۱۷/۷۱۲l	۱۶/۱۶۸no
	2Mg+2Mn	۱/۵۰۳n-p	۱/۲۵۵r-v	۱/۲۰۲m	۱/۰۴۶p-r	۱۵/۲۶۷pq	۱۶/۱۳۶no
	-Mn	۱/۹۳۹d	۱/۷۵۹gh	۱/۵۵۱f	۱/۷۵۹c	۱۹/۷۷۷fe	۱۹/۶۶۷fg
	-Mg	۲/۱۹۵b	۱/۸۱۵f	۱/۷۵۶c	۱/۸۱۵b	۲۱/۴۸۱b	۲۰/۰۵۶d

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

۴.۲. کلروفیل کل

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه فصل برداشت تیمارهای نوری و تیمارهای تغذیه در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان کلروفیل گیاه اسطوخودوس معنی‌دار بود (جدول ۳). با مقایسه میانگین‌ها مشخص شد که افزایش سطوح تنش نوری (از نور کامل به طیف فرابنفش A و از طیف فرابنفش A به طیف فرابنفش B) در هر دو فصل برداشت، موجب کاهش میزان کلروفیل شده است، با این وجود در تمامی سطوح تنش نوری، نسبت کاهش کلروفیل در فصل برداشت دوم کم‌تر از برداشت اول با سطح تنش نوری مشابه بود (جدول ۴). به عبارت

دیگر، در سطوح نوری مشابه، گیاهان برداشت شده در فصل دوم در مقایسه با گیاهان برداشت شده در فصل اول، مقاومت بیش‌تری در برابر کاهش کلروفیل از خود نشان داد (جدول ۳). نتایج هم‌چنین نشان داد که در هر دو فصل برداشت و تحت تیمار هر دو طیف فرابنفش A و B، منیزیم زیاد و منگنز پایه (۴ میلی‌مولار منیزیم + ۹/۲ میکرومولار منگنز)، بیش‌ترین تأثیر را در کاهش اثرات تنش نوری در اسطوخودوس داشته است، به‌طوری‌که در مجموع کم‌ترین میزان کلروفیل (۵۸/۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در فصل برداشت اول و تحت تیمار طیف فرابنفش نقش B و تغذیه با غلظت کم منیزیم و منگنز (۱ میلی‌مولار منیزیم + ۴/۶ میکرومولار منگنز) و بیش‌ترین میزان کلروفیل نیز (۴۰/۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در فصل دوم برداشت و شرایط نوری بدون تنش و تیمار تغذیه منیزیم زیاد و منگنز متوسط حاصل شد.

۳.۴. کاروتنوئیدها

کاروتنوئیدها در گیاه اسطوخودوس تحت تأثیر تیمارهای مراحل برداشت، سطوح طیف فرابنفش و سطوح تغذیه قرار گرفت. به‌طوری‌که اثر فاکتورهای مورد مطالعه و هم‌چنین اثرات برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه این تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد بر این صفت معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) نشان داد که در برداشت اول، میزان کاروتنوئید در مقایسه میزان کاروتنوئید در برداشت دوم تحت تمامی تیمارهای نوری و تغذیه مشابه بیش‌تر بود. به‌عبارت دیگر، میزان کاروتنوئیدها که نمایانگر شدت تنش در گیاهان است، در برداشت اول به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از برداشت دوم بود (جدول ۴). نتایج هم‌چنین نشان داد که با افزایش سطح تنش طیف فرابنفش نقش، میزان کاروتنوئیدها در اسطوخودوس در تمامی تیمارهای تغذیه (در مقایسه با سطح قبلی طیف فرابنفش نقش با تیمار تغذیه مشابه) افزایش یافت. با این وجود در هر دو فصل برداشت، تیمار تغذیه با غلظت دو برابری منیزیم و منگنز (تیمار ۴ میلی‌مولار منیزیم + ۱۸/۴ میکرومولار منگنز) بیش‌ترین تأثیر را بر تعدیل اثرات طیف فرابنفش B و در نتیجه کاهش میزان کاروتنوئیدها در گیاه داشته است (جدول ۴). به‌طوری‌که در مجموع بیش‌ترین میزان کاروتنوئید اسطوخودوس (۲۶/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در برداشت اول و تحت تیمار توأم تنش شدید نور (کاربرد طیف فرابنفش B) و تیمار تغذیه با غلظت منیزیم و منگنز کم (نصف شده) یعنی تیمار ۱ میلی‌مولار منیزیم + ۴/۶ میکرومولار منگنز، ۱ میلی‌مولار منیزیم و کم‌ترین مقدار این صفت (۶/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در برداشت دوم و در شرایط عدم تنش نوری (نور کامل) و تغذیه با غلظت منیزیم متوسط و منگنز زیاد یعنی تیمار ۲ میلی‌مولار منیزیم + ۱۸/۴ میکرومولار منگنز مشاهده شد (جدول ۴).

۴.۴. فعالیت آنزیم کاتالاز

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه اسطوخودوس تحت تأثیر مراحل برداشت، شدت طیف فرابنفش و میزان تغذیه قرار دارد. به‌طوری‌که هم اثرات اصلی و هم تأثیرات متقابل دوگانه و سه‌گانه‌ی این عوامل، در سطح احتمال ۱ درصد، تفاوت معنی‌داری در این ویژگی ایجاد کرده‌اند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها بیانگر آن بود که در مرحله اول برداشت، حتی زمانی‌که شرایط نوری و تغذیه‌ای مشابه اعمال شده بود، سطح فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از برداشت دوم شد به بیان دیگر، نتایج نشان داد که برداشت اول به‌طور مشخصی با فعالیت بیش‌تر آنزیم همراه بوده است (جدول ۴). هم‌چنین، یافته‌ها حاکی از آن بود که با افزایش سطح طیف فرابنفش نقش، فعالیت آنزیم کاتالاز در تمامی شرایط تغذیه‌ای به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با سطح قبلی اشعه و در شرایط مشابه تغذیه، افزایش یافته است. به‌طوری‌که تیمار تغذیه‌ای که شامل غلظت‌های دو برابری منیزیم (۴ میلی‌مولار) و منگنز (۱۸/۴ میکرومولار) بود، در هر دو فصل برداشت، بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش کاروتنوئیدهای گیاه نشان داد. در مجموع،

بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (معادل ۱/۲۶ جذب در دقیقه به‌ازای هر میلی‌گرم پروتئین) در مرحله اول برداشت و تحت شرایط تنش شدید نوری (استفاده از طیف فرابنفش B) و تغذیه با غلظت‌های کم منیزیم (۱ میلی‌مولار) و منگنز (۴/۶ میکرومولار) مشاهده شد. در مقابل، کم‌ترین میزان این صفت (معادل ۰/۴۹۱ جذب در دقیقه به‌ازای هر میلی‌گرم پروتئین) در مرحله دوم برداشت و در شرایط بدون تنش نوری (نور کامل) و تغذیه با غلظت‌های بالای منیزیم (۴ میلی‌مولار) و منگنز (۱۸/۴ میکرومولار) ثبت گردید.

۵.۴. پرولین

نتایج نشان داد که میزان پرولین در گیاه اسطوخودوس به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تیمارهای مختلف طیف فرابنفش، غلظت‌های متفاوت منیزیم و منگنز در محلول غذایی و زمان برداشت قرار گرفت. به‌طوری‌که تمامی این عوامل و برهم‌کنش‌های آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر میزان پرولین معنی‌دار بودند (جدول ۳). بررسی میانگین‌ها حاکی از آن بود که میزان پرولین در برداشت اول نسبت به برداشت دوم در تمامی ترکیب‌های تیمارهای مشابه بیش‌تر بود (جدول ۴). که می‌توان این امر را به شدت بیش‌تر تنش‌های اولیه نسبت داد. با افزایش شدت طیف فرابنفش، میزان پرولین در تمامی تیمارهای تغذیه‌ای افزایش یافت، که نشان‌دهنده نقش پرولین به‌عنوان یک نشانگر تنش در گیاه است. با این‌حال، تغذیه گیاه با غلظت بالای منیزیم و منگنز (۴ میلی‌مولار منیزیم + ۱۸/۴ میکرومولار منگنز) منجر به کاهش قابل‌توجه میزان پرولین شد و توانست اثرات منفی طیف فرابنفش، به‌ویژه UV-B را تعدیل کند. در مقابل، تغذیه با غلظت کم منیزیم و منگنز (۱ میلی‌مولار منیزیم + ۴/۶ میکرومولار منگنز)، به‌ویژه در شرایط تنش شدید UV-B، باعث افزایش تجمع پرولین در گیاه گردید. به‌طوری‌که در مجموع بیش‌ترین میزان پرولین، معادل ۲۱/۹۱ میکرومول بر گرم وزن تر برگ، در برداشت اول و تحت تأثیر اشعه UV-B همراه با تغذیه کم‌مقدار مشاهده شد، درحالی‌که کم‌ترین میزان پرولین، معادل ۴/۶۱ میکرومول بر گرم وزن تر برگ، در برداشت دوم و در شرایط نور کامل و تغذیه با غلظت بالای منیزیم و منگنز متوسط ثبت گردید (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که تنش طیف فرابنفش منجر به افزایش پرولین به‌عنوان یک پاسخ حفاظتی در گیاه می‌شود، اما تغذیه مناسب و متعادل می‌تواند این اثرات تنش‌زا را کاهش داده و شرایط فیزیولوژیک گیاه را بهبود بخشد.

۵. بحث

منیزیم و منگنز در فرایندهای آنتی‌اکسیدانی و در محافظت از گیاه در برابر تنش‌های محیطی نقش دارد. بنابراین، افزایش غلظت این دو عنصر می‌تواند تأثیر مثبتی بر سلامت و عملکرد گیاه بگذارد (روجاس لیلو و همکاران، ۲۰۱۳). از سوی دیگر، تابش طیف فرابنفش (UV)، به‌ویژه اشعه UV-A در تحریک تولید ترکیبات ثانویه در گیاهان تأثیرگذار است. این اشعه می‌تواند موجب تولید بیش‌تر ترکیباتی همچون فلاونوئیدها و دیگر آنتی‌اکسیدان‌ها شود که علاوه بر محافظت از گیاه در برابر تنش‌های محیطی، تولید اسانس‌ها را نیز افزایش می‌دهد (هینز و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه، مشاهده شد که ترکیب اشعه UV-A با غلظت‌های بالای منیزیم و منگنز موجب بیش‌ترین افزایش در درصد اسانس شد. این تأثیر احتمالاً به‌دلیل تأثیر غیرمستقیم در تولید انرژی و متابولیت‌های ثانویه به‌واسطه فتوسنتز و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی است. فصل برداشت نیز بر میزان اسانس گیاه اسطوخودوس تأثیر گذار بوده است. در فصل دوم برداشت، که به‌طور کلی شرایط رشد گیاه بهبود یافته است و ممکن است گیاه قادر به تولید اسانس بیش‌تری باشد، درصد اسانس به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. این امر می‌تواند به‌دلیل افزایش تجمع متابولیت‌های ثانویه در فصل رشد گیاه باشد که با

شرایط بهتری برای فتوسنتز و ترکیب‌های شیمیایی همراه است (حسینی فرد^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). ترکیب تابش UV-A با غلظت‌های بالای منیزیم و منگنز بیش‌ترین تأثیر را در افزایش درصد و عملکرد اسانس داشته است. این تأثیر متقابل احتمالاً به دلیل هم‌افزایی بین تأثیرات مثبت این دو عامل بر گیاه است. منیزیم و منگنز می‌توانند فعالیت‌های آنزیمی و متابولیک گیاه را افزایش دهند، درحالی‌که تابش UV می‌تواند این فرایندها را تحریک کرده و تولید اسانس را بهبود بخشد. در نهایت، در تیمارهایی که تحت شرایط تنش نوری نبودند، مشاهده شد که در غلظت‌های پایین منیزیم و منگنز، درصد اسانس به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب منیزیم و منگنز با تابش UV در شرایط نوری مطلوب می‌تواند اثرات بسیار مؤثری در افزایش تولید اسانس داشته باشد، درحالی‌که در شرایط کمبود این عوامل، تأثیرات مثبت تابش UV کاهش می‌یابد.

طیف فرابنفش (UV-A و UV-B) با ایجاد تنش اکسیداتیو، موجب تخریب ساختارهای کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌شود. این اشعه‌ها به غشای تیلاکوئیدی کلروپلاست آسیب رسانده و سبب تجزیه کلروفیل می‌شوند (بیکر^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). کاهش اثرات منفی طیف فرابنفش در فصل دوم برداشت را می‌توان به تغییرات فیزیولوژیکی گیاه در پاسخ به طول دوره رشد نسبت داد (کوهاوی^۳ و همکاران، ۲۰۲۲) به‌عبارت دیگر، احتمالاً در فصل دوم برداشت، گیاهان مراحل رشدی کامل‌تری را طی کرده و به تعادل بهتری میان فرایندهای متابولیکی خود دست یافته‌اند. همچنین، در این مرحله، گیاهان مواد ذخیره‌ای بیش‌تری مانند کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها تولید کرده‌اند که به تقویت سازوکارهای حفاظتی، از جمله تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و ترمیم آسیب‌های سلولی ناشی از تنش محیطی کمک می‌کند (کانس^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). این فرایندها احتمالاً باعث شده‌اند که گیاهان در فصل دوم مقاومت بیش‌تری در برابر تخریب کلروفیل از خود نشان دهند. از طرفی منیزیم عنصر مرکزی در ساختار مولکول کلروفیل است و برای تثبیت فعالیت فتوسنتزی گیاه و فعال‌سازی آنزیم‌هایی مانند رویسکو نقش حیاتی دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). افزایش غلظت منیزیم در محلول غذایی احتمالاً موجب افزایش تولید و پایداری مولکول‌های کلروفیل و کاهش اثرات تخریبی طیف فرابنفش شده است. همچنین، منگنز با ایفای نقشی کلیدی در سیستم فتوسنتزی (PSII) و کاهش اثرات اکسیداتیو ناشی از طیف فرابنفش، به تعادل متابولیکی گیاه کمک کرده است (ال بالتاگی و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین ترکیب تغذیه‌ای منیزیم بالا و منگنز متوسط احتمالاً تعادلی مناسب بین تولید کلروفیل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ایجاد کرده و اثرات سینرژیکی برای مقابله با تنش نوری فراهم آورده است.

در مراحل اولیه، گیاه برای مقابله با اثرات اکسیداتیو ناشی از تنش، تولید کاروتنوئیدها را افزایش می‌دهد، اما در برداشت دوم، به دلیل کاهش تدریجی پاسخ به تنش یا مصرف انرژی در سایر فرایندها، میزان کاروتنوئیدها کم‌تر شده است. طیف فرابنفش نقش باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه می‌شود که تنش اکسیداتیو ایجاد می‌کند (ال‌آمري^۵ و همکاران، ۲۰۲۲).

بالا‌تربودن میزان کاروتنوئیدها در برداشت اول نسبت به برداشت دوم ممکن است ناشی از پاسخ گیاه به تنش نوری باشد. کاروتنوئیدها به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌ها نقش مهمی در مقابله با برخی گونه‌های فعال اکسیژن ایفا می‌کنند، به‌ویژه در حذف رادیکال‌های آزاد خاصی مانند رادیکال‌های سوپراکسید و پراکسید هیدروژن. بنابراین، با افزایش شدت طیف فرابنفش از UV-A به UV-B، تولید کاروتنوئیدها در گیاه افزایش می‌یابد، چرا که گیاه به‌منظور مقابله با آسیب‌های

1. Hosseinifard
2. Becker
3. Cochavi
4. Kunc
5. Alamer

ناشی از برخی گونه‌های فعال اکسیژن که در اثر این اشعه‌ها تولید می‌شوند، نیاز بیشتری به کاروتنوئیدها پیدا می‌کند. بالاتر بودن فعالیت آنزیم کاتالاز در مرحله اول برداشت اسطوخودوس احتمالاً به حساسیت بیشتر گیاهان به تنش‌های محیطی مرتبط است. گزارش شده است که در این مرحله، گیاهان به دلیل رشد سریع‌تر و تنظیم نشده‌تر، به تنش‌های اکسیداتیو ناشی از طیف فرابنفش و کمبود یا فراوانی عناصر غذایی، واکنش شدیدتری نشان می‌دهند. این حساسیت بیشتر، سیستم دفاعی گیاه را به فعالیت بالاتر وادار می‌کند تا بتواند اثرات منفی تنش‌ها را کاهش دهد. در واقع، گیاه در مرحله اول برداشت نسبت به تنش‌های محیطی آسیب‌پذیرتر است، بنابراین به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به‌ویژه کاتالاز، نیاز بیشتری دارد تا از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و تخریب سلولی جلوگیری کند (نظری و همکاران، ۲۰۱۸). در نتیجه کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز در مرحله دوم برداشت می‌تواند به دلیل سازگاری بیشتر گیاه با شرایط محیطی و کاهش حساسیت به تنش‌های محیطی باشد. در این مرحله، سیستم دفاعی گیاه به ثبات بیشتری رسیده و نیاز کمتری به فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارد (کانس و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش طیف فرابنفش نیز به‌طور مستقیم باعث تولید بیشتر اکسیژن فعال در سلول‌های گیاهی می‌شود. این مسئله به فعال شدن سریع مسیرهای سیگنال‌دهی تنش و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با آنزیم کاتالاز می‌انجامد. حساسیت بیشتر گیاه در مرحله اول برداشت به‌ویژه در برابر اشعه UV-B، منجر به افزایش فعالیت کاتالاز برای خنثی کردن اثرات مخرب گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود (ال‌بالتاگی و همکاران، ۲۰۲۴). غلظت‌های پایین منیزیم و منگنز نیز احتمالاً تنش تغذیه‌ای ملایمی را ایجاد می‌کنند که خود عاملی برای تحریک سیستم دفاعی گیاه است. این تنش خفیف تغذیه‌ای، تولید اکسیژن فعال را افزایش داده و گیاه را به واکنش دفاعی مؤثرتر وادار می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در مقابل، غلظت‌های بالای این عناصر می‌تواند با کاهش نیاز به پاسخ‌های دفاعی، فعالیت آنزیم کاتالاز را کاهش دهد. همچنین، در شرایط بدون تنش نوری و تغذیه با غلظت‌های بالای منیزیم و منگنز، کاهش تولید اکسیژن فعال و سرکوب مسیرهای مرتبط با تنش به کاهش فعالیت کاتالاز منجر می‌شود (ال‌بالتاگی و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج در مجموع حاکی از آن است که حساسیت بیشتر گیاه در مرحله اول برداشت به تنش‌های محیطی و تغذیه‌ای، عاملی کلیدی در افزایش فعالیت کاتالاز بوده و این حساسیت در مراحل بعدی به دلیل سازگاری تدریجی گیاه کاهش یافته است.

پرویلین به‌عنوان یک متابولیت ثانویه، نقش مهمی در پاسخ‌های سازشی گیاه به تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. در شرایط تنش UV-B، افزایش میزان پرویلین به‌عنوان یک پاسخ معمول گیاه برای مقابله با آسیب‌های ناشی از این تنش در نظر گرفته می‌شود. اگرچه در سیستم هیدروپونیک رطوبت به‌طور مداوم در دسترس گیاه قرار دارد و بنابراین تأثیر مستقیم بر فشار اسمزی کم‌تر است، این افزایش پرویلین ممکن است نشان‌دهنده سازگاری گیاه با شرایط تنش UV-B باشد، به‌ویژه برای حفظ پایداری پروتئین‌ها و آنزیم‌های کلیدی و کاهش آسیب‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژن که در اثر اشعه UV-B تولید می‌شوند (نظری و همکاران، ۲۰۱۸؛ بلاتچری و همکاران، ۲۰۲۲). منیزیم و منگنز به‌عنوان عناصر کلیدی در مسیرهای متابولیکی گیاه عمل کرده و به تنظیم فرایندهایی مانند فتوسنتز و سنتز پروتئین کمک می‌کنند. در تیمارهای تغذیه‌ای با غلظت بالای این عناصر، کاهش میزان پرویلین احتمالاً به دلیل بهبود کلی عملکرد فیزیولوژیکی گیاه و کاهش نیاز به تولید متابولیت‌های سازشی است. این امر نشان‌دهنده نقش مثبت تغذیه کافی در کاهش شدت تنش و بهبود مقاومت گیاه در شرایط تنش محیطی است. در شرایط تغذیه ناکافی، افزایش پرویلین منعکس‌کننده تلاش گیاه برای مقابله با اثرات منفی کمبود تغذیه و تنش نوری است (کچاوی، ۲۰۲۴). این افزایش ممکن است ناشی از فعال شدن مسیرهای سنتز پرویلین برای جبران اختلالات متابولیکی ناشی از کمبود عناصر تغذیه‌ای باشد. به‌طور کلی، این نتایج بر اهمیت ترکیب مدیریت مناسب تغذیه و انتخاب روش‌های تعدیل تنش برای بهبود سازگاری گیاهان در محیط‌های تنش‌زا تأکید دارد (بخشی و همکاران، ۲۰۲۲).

۶. نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیرات پیچیده و معنی دار تیمارهای نوری و تغذیه ای بر عملکرد اسانس، رنگیزه های فتوسنتزی، فعالیت آن تی کسیدانی و میزان پرولین در گیاه اسطوخودوس است. اثرات سطوح مختلف تابش طیف فرابنفش (UV) و تغذیه با منیزیم و منگنز بر میزان کلروفیل، کاروتنوئیدها، فعالیت آنزیم های آن تی اکسیدانی، تجمع پرولین و عملکرد اسانس گیاه، نشان دهنده تعاملات مستقیم و غیرمستقیم این تیمارها در بهبود تحمل گیاه به تنش های نوری و ارتقاء تولید ترکیبات ثانویه گیاهی است. در این پژوهش، افزایش شدت تابش اشعه UV، به ویژه در شرایط تابش UV-B، منجر به کاهش میزان کلروفیل در گیاهان برداشت شده در هر دو فصل برداشت شد. این کاهش در کلروفیل می تواند نشان دهنده آسیب به ساختار فتوسنتزی گیاه باشد که به طور معمول با کاهش عملکرد فتوسنتزی همراه است. با این حال، گیاه اسطوخودوس در برابر این آسیب ها واکنش دفاعی از خود نشان داده و با تجمع کاروتنوئیدها و پرولین، به مقابله با تنش های اکسیداتیو ناشی از تابش های نوری پرداخته است.

از سوی دیگر، تغذیه گیاه با غلظت های بالای منیزیم و منگنز، نقشی مهم در تعدیل اثرات منفی تابش های نوری داشت. به ویژه تیمارهای تغذیه ای که شامل غلظت های بالای منیزیم و منگنز بودند، توانستند اثرات منفی تابش های UV را تعدیل کرده و به حفظ وضعیت فیزیولوژیک بهتر گیاه کمک کنند. در خصوص عملکرد اسانس، نتایج نشان داد که عملکرد اسانس در فصل دوم برداشت به طور معنی داری بیش تر از فصل اول بود. این افزایش همزمان با افزایش سطح کلروفیل و درصد اسانس در گیاه مشاهده شد که نشان دهنده افزایش کارایی فرایندهای فتوسنتزی و تولید ترکیبات فرار در این مرحله از برداشت است. تیمارهای نوری و تغذیه ای، به ویژه تابش UV-A و تغذیه با غلظت های بالای منیزیم و منگنز، موجب افزایش درصد اسانس و عملکرد نهایی آن در هر دو فصل برداشت شدند. این ترکیب تیماری نشان دهنده پتانسیل بالای این تیمارها در بهبود کیفیت و کمیت تولید اسانس در گیاه اسطوخودوس است.

علاوه بر این، در نظر گرفتن کشت هیدروپونیک برای گیاه اسطوخودوس در این شرایط می تواند به عنوان یک گزینه قابل توجه برای بهبود عملکرد و کیفیت گیاه مطرح شود. کشت هیدروپونیک به ویژه در شرایطی که محدودیت منابع آب و خاک وجود دارد، می تواند به گیاهان اسطوخودوس کمک کند تا به شکل مؤثرتری از مواد مغذی استفاده کنند و در عین حال رشد بهینه تری را در شرایط تنش نوری تجربه کنند. این سیستم کشت، با تأمین کنترل شده تغذیه گیاهی و شرایط رطوبتی بهینه، می تواند تأثیرات مثبت بیش تری در بهبود کیفیت اسانس و ویژگی های فیزیولوژیک گیاه در برابر تنش های محیطی بگذارد. بنابراین، ترکیب تیمارهای نوری و تغذیه ای با سیستم های پیشرفته کشت هیدروپونیک می تواند به عنوان یک استراتژی نوآورانه برای بهینه سازی تولید گیاه اسطوخودوس در شرایط مختلف کشاورزی، به ویژه در شرایط تنش زا توصیه شود. در مجموع و با توجه به نتایج این پژوهش، می توان نتیجه گرفت که ترکیب تابش UV-A و تغذیه با غلظت های بالای منیزیم و منگنز (۴ میلی مولار منیزیم و ۱۸/۴ میکرومولار منگنز) به عنوان ترکیب بهینه برای بهبود کیفیت و عملکرد گیاه اسطوخودوس در برابر تنش های نوری و افزایش تولید اسانس شناخته می شود. این ترکیب موجب تعادل مناسب بین تحریک فرایندهای دفاعی گیاه و حفظ سلامت فیزیولوژیک آن در برابر تابش های نوری شدید می شود. به طور خاص، این ترکیب تیماری می تواند به عنوان یک راه کار مؤثر در مدیریت کشت اسطوخودوس در شرایط تنش زای نوری و در محیط های کشاورزی با تابش UV بالا به کار گرفته شود.

۷. تشکر و قدردانی

از کارشناسان آزمایشگاه مرکزی و گروه علوم باغبانی به‌پاس راهنمایی‌های فنی و حمایت‌های عملی در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

دوازده امامی، سعید؛ اخوان روفیگر، آزاده و اهتمام، محمدحسین (۱۴۰۱). ارزیابی صفات ریخت‌شناسی و ریزریخت‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نگاره (SEM) در تعدادی از جمعیت‌های بومی گل‌محمدی در ایران. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۵(۲)، ۳۴۲-۳۵۷.

References

- Alamer, K. H., & Attia, H. (2022). UV-C seed priming improves tomato plant growth against salt stress. *Journal of Taibah University for Science*, 16(1), 1181-1191.
- Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. *Polyphenoloxidase in Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1-15.
- Bakhshi, F., Ghasemi, K., & Haddadinejad, M. (2024). Crosstalk of sucrose, potassium, and magnesium on growth, yield, and carbohydrate partitioning in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under poor light conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 47(9), 1464-1474.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Becker, V. I., Goessling, J. W., Duarte, B., Coador, I., Liu, F., Rosenqvist, E., & Jacobsen S.-E. (2017). Combined effects of soil salinity and high temperature on photosynthesis and growth of quinoa plants (*Chenopodium quinoa*). *Functional Plant Biology*, 44(7), 665-679.
- Blatchley, E. R., III, Brenner, D. J., Claus, H., Cowan, T. E., Linden, K. G., Liu, Y., & Sliney, D. H. (2022). Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(6), 733-753.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annals of Biochemistry*, 72, 248-254.
- Cochavi, A. (2024) Dynamic responses of chlorophyll fluorescence parameters to drought across diverse plant families, *Planta*, 261, 1.
- Dazavdah-e-Emami, S., Akhavan-e-Rufiger, A., & Ehtemam, M. (2022). Evaluation of morphological and micromorphological traits using scanning electron microscopy (SEM) in a number of native populations of rosehip in Iran. *Journal of Plant Research (Journal of Iranian Biology) (Scientific)*, 35(2), 342-357. (In Persian).
- El-Beltagi, H. S., El-Nady, M. F., Al-Daej, M. I., El-Naqma, K. A., Rezk, A. A., El-Afry, M. M., & Metwally, M. M. S. (2024). Exogenous application of manganese and arginine alleviates the adverse effects of salinity stress on pea (*Pisum sativum* L.). *Cogent Food & Agriculture*, 10(1).
- El-Sheekh, M. M., Alwaleed, E. A., Ibrahim, A., & Saber, H. (2020). Detrimental effect of UV-B radiation on growth, photosynthetic pigments, metabolites and ultrastructure of some cyanobacteria and freshwater chlorophyta. *International Journal of Radiation Biology*, 97(2), 265-275.
- Faiz, S., Yasin, N. A., Khan, W. U., Shah, A. A., Akram, W., Ahmad, A., & Riaz, L. (2021). Role of magnesium oxide nanoparticles in the mitigation of lead-induced stress in *Daucus carota*: modulation in polyamines and antioxidant enzymes. *International Journal of Phytoremediation*, 24(4), 364-372.
- Farzadfar, S., Zarinkamar, F., & Hojati, M. (2017). Magnesium and manganese affect photosynthesis, essential oil composition and phenolic compounds of *Tanacetum parthenium*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 207-217.

- Heinze, M., Hanschen, F. S., Wiesner-Reinhold, M., Baldermann, S., Gräfe, J., Schreiner, M., & Neugart, S. (2018). Effects of developmental stages and reduced UVB and low UV conditions on plant secondary metabolite profiles in pak choi (*Brassica rapa subsp. chinensis*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(7), 1678-1692.
- Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, L., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5186.
- Klein, F. R. S., Reis, A., Kleinowski, A. M., Telles, R. T., Amarante, L. D., Peters, J. A., & Braga, E. J. B. (2018). UV-B radiation as an elicitor of secondary metabolite production in plants of the genus *Alternanthera*. *Acta Botanica Brasilica*, 32(4), 615-623.
- Kobayashi, N., & Yamaji, K. (2021). Leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. 'L-121') growth in hydroponics with different nutrient solutions used to generate ultrafine bubbles. *Journal of Plant Nutrition*, 45(6), 816-827.
- Kunc, N., Frlan, A., Baričević, D., Kočevr Glavač, N., & Kokalj Ladan, M. (2022). Essential Oil and Hydrosol Composition of Immortelle (*Helichrysum italicum*). *Plants*, 11(19), 2573.
- Lichtentaler, H. (1987). In *Plant Cell Membranes. Methods in Enzymology* 1987 Elsevier.
- Nazari, M., Zarinkamar, F., & Shafaghat, Z. (2018). Manganese modulates the physiological and biochemical responses of *Mentha aquatica* L. to ultraviolet radiation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 45, 1-10.
- Ramesh, P., & Rajendran, A. (2023). Green synthesis of manganese dioxide nanoparticles: photocatalytic and antimicrobial investigations. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(19), 8464-8476.
- Rojas-Lillo, Y., Alberdi, M., Acevedo, P., Inostroza-Blancheteau, C., Rengel, Z., de la Luz Mora, M., & Reyes-Díaz, M. (2013). Manganese toxicity and UV-B radiation differentially influence the physiology and biochemistry of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) cultivars. *Functional Plant Biology*, 41(2), 156-167.
- Sinaga, A. O. Y., Handayani, S. A. F., & Marpaung, D. S. S. (2024). Destructive effect of UV-C light radiation on lettuce growth: risk assessment of long time exposure. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 1-12.
- Wang, R., Yang, X., Chen, X., Zhang, X., Chi, Y., Zhang, D., & Zhou, P. (2023). A critical review for hydrogen application in agriculture: Recent advances and perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(3), 222-238.
- Yang, S., Imran, & Ortas, I. (2023). Impact of mycorrhiza on plant nutrition and food security. *Journal of Plant Nutrition*, 46(13), 3247-3272.