

The effect of Chitosan-Coated Iron Nanoparticles on the Growth And Physiological Traits of *Melissa officinalis* under LED light conditions

Saeid Azizzadeh Namin¹, Mahdi Behnamian^{1*} , Samar Heshmati¹

Received: 13 May 2024

Accepted: 24 October 2024

1. Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author, Mahdi Behnamian Email: mbehnamian@uma.ac.ir

Abstract

Background & Objectives: The main objectives of the present study are the optimization of growth, enhancement of growth characteristics, and the increase in the levels of active compounds in the *Melissa officinalis* through the use of chitosan-coated¹ iron nanoparticles and monochromatic LED lights.

Materials and Methods: This research was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with four replications using pot cultivation. The first factor involved foliar spraying with chitosan-coated iron nanoparticles at three concentrations: 0, 10, and 20 mg/L. The second factor consisted of light treatments, including white light (100%), red light (100%), blue light (100%), and greenhouse conditions.

Results: The results showed that the foliar spraying of *Melissa officinalis* with 10 mg.l⁻¹ of iron/chitosan nanoparticles showed the greatest increase in yield, height, leaf area, stomatal conductance and photosynthetic pigments, compared to other applied concentrations and control plants. Also, iron/chitosan nanoparticles at a concentration of 20 mg. l⁻¹ showed the greatest effect on the development of the root system. The use of LED lamps often caused restrictions in the growth of the aerial parts of the lemon balm plant. The highest increase in the number of photosynthetic pigments was observed in white light combined with nano iron/chitosan at a concentration of 10 mg. l⁻¹. Also, foliar spraying of lemon balm plants with 20 mg.l⁻¹ under blue light had the greatest effect in increasing the antioxidant capacity and secondary compounds.

Conclusion: The overall results of the present study indicate that the use of chitosan-coated iron nanoparticles significantly enhances the optimal growth of *Melissa officinalis*. Additionally, the combination of LED lights and foliar application of iron/chitosan nanoparticles has the most substantial effect on increasing the levels of active compounds and antioxidant capacity in this medicinal plant.

Keywords: Chitosan, Fe Nanoparticle, LED Light, *Melissa officinalis*



This is an open-access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)

Copyright@ 2026 Mahdi Behnamian Email: mbehnamian@uma.ac.ir

[https://doi.org/ 10.22034/saps.2024.61636.3222](https://doi.org/10.22034/saps.2024.61636.3222)



تأثیر نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان بر خصوصیات رشدی و فیزیولوژیکی گیاه فرنجمشک *(Melissa officinalis)* تحت نورهای LED

سعید عزیززاده نمین^۱، مهدی بهنامیان^{۱*}، سمر حشمتی^۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

مقدمه و اهداف: بهینه‌سازی رشد و بهبود خصوصیات رشدی و افزایش میزان ترکیبات مؤثره در گیاه دارویی فرنجمشک با بهره‌گیری از نانوذرات آهن پوشش یافته با کیتوزان و نورهای تک رنگ LED از اهداف اصلی مطالعه حاضر می‌باشد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار به صورت کشت گلدانی اجرا شد. فاکتور اول شامل محلول‌پاشی برگ‌گی با نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان در ۳ غلظت صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و فاکتور دوم تیمارهای نوری شامل نور سفید (۱۰۰ درصد)، قرمز (۱۰۰ درصد)، آبی (۱۰۰ درصد) و شرایط گلخانه بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که گیاهان فرنجمشک محلول‌پاشی شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات آهن/کیتوزان بیشترین افزایش را در عملکرد، ارتفاع بوته، سطح برگ، هدایت روزنه‌ای و رنگیزه‌های فتوسنتزی، نسبت به سایر ترکیبات تیماری و گیاهان شاهد داشت. همچنین نانوذرات آهن/کیتوزان، در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین تأثیر را در توسعه سیستم ریشه نشان داد. استفاده از لامپ‌های LED موجب محدودیت در رشد اندام هوایی گیاه فرنجمشک گردید. بیشترین افزایش در میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در نور سفید توأم با نانوذرات آهن/کیتوزان در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. همچنین محلول‌پاشی گیاهان فرنجمشک با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، تحت نور آبی بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات ثانویه داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی حاصل از پژوهش حاضر، حاکی از این است که استفاده از نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان جهت افزایش رشد گیاه فرنجمشک و کاربرد لامپ‌های LED توأم با محلول‌پاشی نانوذرات آهن/کیتوزان جهت بالا بردن میزان ترکیبات مؤثره و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بیشترین تأثیر را در این گیاه دارد.

واژه‌های کلیدی: آهن، فرنجمشک، نانوذرات کیتوزان، نور LED

مقدمه

فرنجمشک با نام علمی *Melissa officinalis* L. از خانواده نعناعیان، گیاهی معطر، علفی چندساله و پایا می-باشد. خاستگاه اصلی این گیاه شرق مدیترانه بوده و به صورت بومی در ایران در نواحی جلگه خزر یافت می شود (توموا و همکاران ۲۰۲۰). امروزه فرنجمشک به منظور انواع بهره برداری های طبی و زینتی در مزارع و باغ ها کشت می شود. گیاه فرنجمشک داروی مورد علاقه پزشک بزرگ ایرانی، ابوعلی سینا بوده که برای تقویت قلب و انبساط روح، التیام دردهایی با منشأ عصبی، سردردهای میگرنی و تقویت هوش تجویز می کرد (آدامزیک و همکاران ۲۰۲۳). در اندام سبز این گیاه ترکیباتی از قبیل اسیداولئیک، ژرانیول، رزماریکاسید، لیمونن، تانن و انواع فلاونوئیدها وجود دارد و حاوی اسانس روغنی فرار غنی از سیترال است که بوی تند لیمویی دارد و در صنعت عطرسازی استفاده می شود (چریسارگریس و همکاران ۲۰۲۲).

بیوسنتز و تجمع متابولیت های ثانویه در گیاهان دارویی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند آب، نور، دما، خواص خاک و تنش های فیزیکی و شیمیایی است (ورما و شوکلا ۲۰۱۵). در این میان، نور با تأثیر بر تجمع انواع ترکیبات ثانویه در گیاه از اهمیت بالایی برخوردار می-باشد. کیفیت نور، شدت نور و دوره نوری بر محتوای ترکیبات ثانویه و همچنین سایر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه تأثیر می گذارد (لی و همکاران ۲۰۲۰). ترکیب و محتوای ترکیبات ثانویه و گاهاً ویژگی های ظاهری و فیزیولوژیکی در گونه های گیاهی یکسان در مناطق مختلف به دلیل اختلاف در شرایط نوری بسیار متفاوت است (هوانگ و لی ۲۰۱۵). در سال های اخیر استفاده از سیستم های رشد کنترل شده با استفاده از نور مصنوعی برای افزایش عملکرد و بهبود سایر خصوصیات در گیاهان دارویی رو به افزایش است (مون و همکاران ۲۰۲۰). نورهای مصنوعی در سیستم های رشد کنترل شده جایگاه مهمی دارند و دیویدهای ساطع نور (LED) در حال حاضر منابع نور مصنوعی بهینه در مقایسه با انواع دیگر لامپ ها، مانند

فلورسنت، سدیم پرفشار و متال هالید هستند (ژونگ و همکاران ۲۰۲۱). لامپ های LED، کارایی نوری معادل یا بالاتر، گرمای تابشی کمتر و طول عمر بیشتری را نشان می دهند (لویی و همکاران ۲۰۲۱). علاوه بر این، توانایی تولید طول موج نور تک رنگ توسط این لامپ ها، تغییر ساختار کیفیت نور را در سیستم های رشد کنترل شده تسهیل می کند (پالمیتسا و همکاران ۲۰۲۱).

نتایج حیدری زاده و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که گیاه نعناع فلفلی تحت تیمار نور LED از نظر درصد عملکرد اسانس و میزان فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی نسبت به شرایط مزرعه برتری داشتند.

نانوذرات، مواد آلی و معدنی یا سنتزی به اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که بهره روری محصولات را افزایش و با تسهیل تحویل کنترل شده مواد مغذی، استفاده حداقلی از نهاده های کشاورزی را تضمین می کند. علاوه بر این، جهت افزایش خواص زیست سازگاری و کارایی زیستی نانومواد، پوشش های مناسب عامل دار شده (ترکیبات آلی و غیر آلی) بر آنها اعمال می شوند (داهومانی و همکاران ۲۰۱۷). نقش بالقوه نانومواد در افزایش تولید و عملکرد متابولیت های ثانویه در گیاهان دارویی بحثی جدید در زمینه بیوتکنولوژی گیاهان دارویی است. نانوذرات به عنوان محرک های جدید و تأثیرگذار، به طور قابل توجهی متابولیت های ثانویه را در گیاهان دارویی تحریک می کنند (جاوید و همکاران ۲۰۲۲). نانوذرات اکسید فلزی و فلزی، سیستم دفاعی گیاه را برمی انگیزند و با القای تنش غیرزیستی، واکنش های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی را تحریک می کنند و در نتیجه باعث تولید مقادیر افزایش یافته و پایدار متابولیت های ثانویه می شوند (شانگ و همکاران ۲۰۱۹). آهن (Fe) یکی از ریزمغذی های ضروری برای رشد و نمو گیاه بوده و برای طیف وسیعی از فرآیندهای بیوشیمیایی از فتوسنتز تا تنفس مورد نیاز است (مای و همکاران ۲۰۱۶). در اغلب سیستم های کشت خاکی، آهن به فرم اکسید شده و غیرمحرک تبدیل می-شود، علاوه بر این اسیدیته خاک در محدوده ۷/۴ تا ۸/۵ باعث حلالیت کم و سینتیک انحلال آهسته کانی های آهن-دار می گردد (گرانجا و کواریویاس ۲۰۱۸). همچنین غلظت

فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار به صورت کشت گلدانی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل محلول‌پاشی برگی با نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان در ۳ غلظت صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و تیمارهای نوری شامل نور سفید (۱۰۰ درصد) با طول موج ۷۰۰-۴۰۰ نانومتر، نور قرمز (۱۰۰ درصد) با طول موج ۶۲۵ نانومتر، نور آبی (۱۰۰ درصد) با طول موج ۴۷۰ نانومتر و شرایط گلخانه بود. بذر گیاه (*Melissa officinalis L.*) از شرکت Hem Zaden BV با کد ثبت شده ۱۷۷۷۳۴/۶ خریداری و در سینی‌های کشت مخصوص حاوی کوکوپیت و پرلیت با نسبت مساوی کاشته شد. طی دوره نشاء کاری گیاهان با محلول غذایی هوگلند آبیاری شدند. گیاهچه‌ها بعد از رسیدن به مرحله چهار برگی به گلدان‌های پلاستیکی ۲ لیتری حاوی کوکوپیت و پرلیت با نسبت مساوی منتقل شدند. به هر یک از گلدان‌ها یک گیاهچه انتقال داده شد آبیاری گیاهان انتقال یافته به صورت مرتب با محلول غذایی هوگلند انجام شد. تعداد ۱۲ گلدان در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی با دمای 24 ± 2 درجه سانتی‌گراد روزانه و 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد شبانه و رطوبت نسبی ۵۰ تا ۶۰ درصد قرار داده شد و با نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان در غلظت‌های تعیین شده طی دوره ۳۰ روزه و ۶ مرتبه به صورت محلول-پاشی برگی تحت تیمار قرار گرفتند. تعداد ۱۲ گلدان نیز در هر یک از قفسه‌های نوری مجهز به لامپ‌های LED سفید، قرمز و آبی اتاقک رشد آزمایشگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی، با ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و دمای 24 ± 2 درجه سانتی‌گراد روزانه و 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد شبانه و رطوبت نسبی ۵۰ تا ۶۰ درصد قرار گرفته و با نانوذرات آهن در غلظت‌های تعیین شده با پوشش کیتوزان طی دوره ۳۰ روزه و ۶ مرتبه به صورت محلول‌پاشی برگی تحت تیمار قرار گرفتند. برای محلول‌پاشی گیاهان شاهد از آب سه بار تقطیر استفاده شد. لامپ‌های استفاده شده از نوع SMD LED با توان نوری ۱۱۰ لومن بر وات بود.

بی‌کربنات بالا در خاک‌های آهکی، جذب آهن توسط گیاهان را کاهش داده و منجر به کمبود آهن در گیاهان می‌شود. برای حل این مشکلات، تأمین آهن با استفاده از محلول‌پاشی در بسیاری از سیستم‌های کشاورزی انجام شده است (لوسنا و هرناوندز ۲۰۱۷). در آزمایشی مشاهده گردید که محلول‌پاشی عناصر کم مصرف از جمله آهن و روی نقش مفید و مؤثری در بهبود رشد، عملکرد اندام هوایی، خصوصیات کیفی و اسانس گیاه دارویی زوفا دارد (راعی و همکاران ۲۰۲۳). در پژوهشی دیگر میرساردو و همکاران (۲۰۲۳) بیان داشتند که کاربرد کودهای نانو کلات آهن سبب بهبود معنی دار خصوصیات رشدی و عملکرد در گیاه لوبیای چشم بلبلی می‌گردد.

توانایی تولید ترکیبات مؤثره گوناگون توسط گیاهان دارویی، با عملکردهای متفاوت در پیشگیری و درمان بسیاری از بیماری‌ها و سازگار بودن آن‌ها با بدن انسان، به دلیل منشاء طبیعی و عدم ایجاد اثرات نامطلوب با مصرف صحیح، افراد را به سمت مصرف آن‌ها سوق می‌دهد (سینخ ۲۰۱۸). استخراج و خالص‌سازی ترکیبات مؤثره از گیاهان دارویی نیازمند فرآیندهای زمان‌بر و پیچیده بوده، همچنین بازدهی مطلوب محصول نهایی، اغلب بسیار پایین می‌باشد. در نتیجه، یافتن رویکردهای جدید برای بالا بردن سطح تولید و بهبود مسیرهای بیوسنتزی این ترکیبات در گیاهان دارویی، چالشی جدی برای محققان ایجاد می‌کند (یانگ و همکاران ۲۰۱۸). در راستای این هدف، در پژوهش حاضر سعی شد تا اثر محلول‌پاشی نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان توأم نور با LED بر خصوصیات رشدی فیزیولوژیکی گیاه فرنجمشک مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

کشت گیاه و اعمال تیمار

این پژوهش در اتاقک رشد آزمایشگاه تحقیقاتی و گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی به منظور ارزیابی تأثیر محلول‌پاشی با نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان بر رشد، عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه دارویی فرنجمشک به صورت

بوته مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت اندازه‌گیری وزن تر، بوته‌ها از محل طوقه برش یافته و ریشه‌ها ابتدا با آب مقطر شست و شو داده شده و با پد رطوبت‌گیر خشک شده و توسط ترازوی حساس وزن شدند. جهت ارزیابی وزن خشک بوته و ریشه، نمونه‌ها در دمای اتاق و در شرایط تاریکی هواخشک شده و با ترازوی حساس وزن شدند.

جهت ارزیابی کلروفیل و کارتنوئید میزان ۵۰۰ میلی-گرم از هر نمونه برگگی در ۵ میلی لیتر استون ۸۰ درصد عصاره‌گیری و توسط دستگاه هموژنایزر همگن گردید. عصاره‌های همگن در دستگاه سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با ۱۰۰۰۰ دور دقیقه قرار گرفت. بعد از سانتریفیوژ محلول رویی توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر با طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر برای ارزیابی کلروفیل و ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر برای ارزیابی کارتنوئید، قرائت گردید. برای بلانک کردن دستگاه از استون ۸۰ درصد استفاده شد. جهت محاسبه میزان کلروفیل کل، کلروفیل a, b و کارتنوئید از فرمول‌های زیر استفاده شد (آرنون ۱۹۴۹).

Chlorophyll a = 12.25 A663 - 2.79 A645
 Chlorophyll b = 21.5 A645 - 5.1 A663
 Total Chlorophyll = Chlorophyll a + Chlorophyll b
 Carotenoids = (1000A470 - 1.82 Chl a - 85.25 Chl b)/198

نمونه‌های برگگی در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و بعد از خشک شدن کامل توسط آسیاب به خوبی پودر شد. مقدار ۱۰۰ میلی گرم از نمونه‌های خشک شده با ۵ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد به مدت ۴۸ ساعت هموژنیزه شده و در نهایت نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۲۰۰۰ دور دقیقه سانتریفیوژ شد. در مرحله بعد محلول رویی با دقت جدا شده و عصاره توسط دستگاه روتاری در دمای ۵۰ درجه از حلال جدا شد. جهت ارزیابی میزان فنول کل، ۱۰۰ مایکرولیتر از عصاره متانولی با ۲ میلی‌لیتر محلول کربنات سدیم (۲ درصد) و ۱۰۰ مایکرولیتر معرف فولین سیوکالچو (۵۰ درصد) به خوبی مخلوط شده و حجم مخلوط واکنش توسط آب سه

این لامپ‌ها از سطح گلدان‌ها با فاصله ۳۰ اینچ نصب شدند.

سنتز نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان

جهت سنتز نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان، ابتدا ۱ گرم پودر کیتوزان در ۱۰۰ میلی لیتر محلول استیک اسید ۱ درصد روی همزن مغناطیسی در طول شب با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حل شده و محلول کیتوزان توسط کاغذ صافی واتمن شماره ۱ جهت جداسازی ناخالصی فیلتر شد. ۲ گرم نمک آهن $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ و $4/5$ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ در ۲۰ میلی لیتر آب مقطر حل شده و توسط بورت به صورت قطره‌ای به محلول کیتوزان در حین هم زدن اضافه شد. بعد از اضافه کردن محلول نمک آهن، pH محلول توسط محلول آمونیاک ۳ مولار روی ۱۱ تنظیم شد و محلول به مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در انتها رسوبات حاصل جمع آوری شده و سه بار با آب مقطر استریل شست و شو داده شده و ۳۰ دقیقه داخل دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۵۰ هرتز قرار داده شده و سپس نانوذرات آهن پوشش دار شده با مگنت مغناطیسی جدا شده و توسط دستگاه فریز درای در دمای منفی ۵۶ درجه سانتی‌گراد خشک شد (گیگلو و همکاران ۲۰۲۲). نانوذرات حاصل جهت آنالیز و تعیین اندازه ذرات و تیمار مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی صفات رویشی و فیزیولوژیکی

اندازه‌گیری صفات رویشی و فیزیولوژیکی یک هفته بعد از اتمام دوره تیماردهی انجام شد. هدایت روزنه‌ای توسط دستگاه Leaf Prometer مدل SC-1 ساخت کشور آمریکا ارزیابی شد. دستگاه در محیط اتاقک رشد کالیبره شده و تعداد چهار برگ میانی و بالغ بوته از هر گلدان با قرار دادن برگ‌ها در گیره سنسور دستگاه، میزان هدایت روزنه‌ای هر برگ ثبت گردید. جهت اندازه‌گیری ارتفاع بوته و ریشه از خط کش فلزی مدرج استفاده شد. طول میان‌گره توسط کولیس اندازه‌گیری شد. سطح برگ توسط دستگاه سطح سنج به صورت چهار تکرار از هر

سانتریفیوژ شد. پس از سانتریفیوژ ۰/۵ میلی لیتر از محلول رویی جدا شده ۲/۵ میلی لیتر DPPH (۶۰ میکرومول در لیتر) تازه تهیه شده اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق در تاریکی نگهداری شد. بعد از اتمام مرحله استراحت، میزان جذب محلول در ۵۱۵ نانومتر ثبت گردید. آب مقطر و محلول DPPH به عنوان blank و control استفاده شد (کریمی و همکاران ۲۰۲۲).

تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

تجزیه آماری داده‌ها با نرم افزار SPSS 21 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام گردید و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

تعیین اندازه نانوذرات آهن

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش پراکنندگی نور دینامیکی DLS (شکل ۱) قطر هیدراته نانوذرات آهن به صورت میانگین ۲۱۲ نانومتر و با توجه به تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (شکل ۲) اندازه نانوذرات آهن ۴۶ تا ۴۸/۵ نانومتر مشخص گردید.

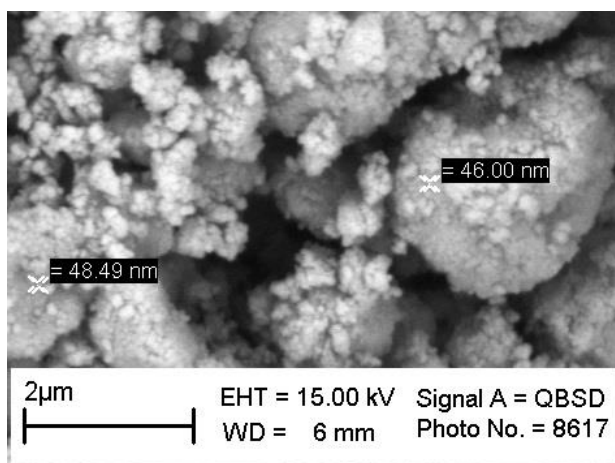
بار تقطیر استریل به ۵ میلی لیتر رسانده شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق به صورت ساکن رها شد. میزان جذب نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در ۷۲۰ نانومتر قرائت و میزان فنول کل نمونه‌ها بر اساس منحنی استاندارد اسید گالیک به صورت میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه گزارش شد (مدا و همکاران ۲۰۰۵).

جهت ارزیابی میزان فلاونوئید کل در هر نمونه، میزان ۵۰۰ میکرولیتر از عصاره متانولی تهیه شده با ۱۰۰ میکرولیتر محلول آلومینیوم کلرید (۱۰ درصد) و ۱/۵ میلی لیتر متانول (۸۰ درصد) و ۱۰۰ میکرولیتر محلول استات سدیم (۱ مولار) مخلوط شده و توسط آب مقطر سه بار تقطیر به حجم ۵ میلی لیتر رسانده شد. مخلوط واکنش به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق به حالت ساکن رها شده و در نهایت میزان جذب محلول توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۱۵ نانومتر قرائت و میزان فلاونوئید کل بر اساس منحنی استاندارد کوئرستین به صورت میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه گزارش گردید (میتا و همکاران ۱۹۹۷).

برای اندازه‌گیری ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل، رسوبات چربی دوست حاصل از عصاره آنزیمی در ۱۲ میلی لیتر کلروفورم حل شده و سوسپانسیون حاصل به مدت ۴ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد با سرعت 3500 g

جدول ۱- تعیین اندازه نانوذرات آهن توسط آنالیز DLS

Zeta potential (mV)	PI	Z-Average (nm)	Mean(nm)	S.D (nm)	Mode (nm)
۲۷	۰/۷۲۱	۲۰۱/۳	۲۱۲/۱	۷۱/۲	۱۸۲/۱



شکل ۱- تعیین اندازه نانوذرات آهن توسط SEM

صفات ریخت‌شناسی و رشدی

درصد و بر صفات وزن تر بوته و ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است و اثر نور LED نیز بر تمامی صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل این دو فاکتور نیز برای تمامی صفات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر نور LED و نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان بر شاخص‌های رشد گیاه فرنجمشک نشان داد که اثرات ساده نانواهن/کیتوزان بر صفات ارتفاع، وزن خشک بوته و ریشه، سطح برگ و طول ریشه در سطح احتمال ۱

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نور LED و نانواهن/کیتوزان بر خصوصیات مورفولوژیکی گیاه فرنجمشک

میانگین مربعات							درجه آزادی	منابع تغییر
وزن خشک ریشه	وزن تر ریشه	طول ریشه	سطح برگ	وزن خشک بوته	وزن تر بوته	ارتفاع بوته		
۰/۰۳۳**	۰/۳۵*	۴/۳۵**	۰/۴۸**	۰/۱**	۰/۸۷*	۸/۳۱**	۲	نانواهن/کیتوزان (N)
۱/۰۹**	۲۱/۶۸**	۱۴/۷۹**	۱۴۰/۵۹**	۶/۴**	۱۲۶/۶۵**	۵۵/۸۳**	۳	نور LED (L)
۰/۰۳۴**	۰/۹۲**	۲/۶۳**	۲/۸۰**	۰/۰۲۸**	۱/۳۵**	۱۶/۴۱**	۶	(N) × (L)
۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۶۶	۳۶	اشتباه آزمایشی
۷/۵	۷	۱۰/۵	۲/۳	۷/۵	۶/۷	۱۰/۹۶	-	ضریب تغییرات (%)

**، * به ترتیب وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار میباشد.

که طولی شدن ساقه می‌تواند با برهمکنش‌های مختلف و هم‌زمان گیرنده‌های نور قرمز و آبی و فیتوکروم‌ها بسته به گونه گیاهی افزایش یافته یا ممانعت شود (کیم و همکاران ۲۰۰۴). غالباً گیرنده‌های نور قرمز در میزان رشد گیاه و افزایش طول میانگره و طولی شدن برگ‌ها تأثیر زیادی دارد. نور آبی نیز در گیاهان سبب ایجاد میانگره‌های کوتاه می‌شود (جوخان و همکاران ۲۰۱۰). جایگاه درک نور برای طولی شدن ریشه در ساقه قرار دارد، ریشه‌ها نسبت به شرایط نوری بی‌تفاوت هستند. نور ممکن است طولی شدن ریشه را از طریق عمل فتومورفونزی تحت تأثیر قرار دهد (وینترهالتر و همکاران ۱۹۹۰).

آهن از اجزای مهم بسیاری از آنزیم‌ها می‌باشد و نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی مانند فتوسنتز، سنتز کلروفیل، تنفس و تثبیت نیتروژن در گیاه دارد. آهن به عنوان ناقل الکترون در فرآیند تنفس و فتوسنتز عمل می‌کند. آهن در سلول‌های فتوسنتزی نقش مهمی در بیوسنتز سیتوکروم‌ها و سایر مولکول‌های دارای

استفاده از نور LED توأم با نانوذرات آهن/کیتوزان تأثیر چشمگیری بر خصوصیات رشدی و عملکرد گیاه فرنجمشک داشت. نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل فاکتورها (جدول ۲) نشان داد که بیشترین میزان ارتفاع بوته (۲۷/۵ سانتی‌متر) مربوط به گیاهان فرنجمشک تیمار شده با نانواهن/کیتوزان در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر تحت نور قرمز بود که نسبت به گیاهان شاهد ۱۴/۵ درصد افزایش داشت. همچنین کم‌ترین میزان ارتفاع (۱۸ سانتی‌متر) در گیاهان تیمار شده با نانواهن/کیتوزان با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نور آبی بود که نسبت به شاهد ۲۵ درصد کاهش نشان داد. همچنین بیشترین میزان طول ریشه (۱۴/۸۷ سانتی‌متر) در تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانواهن/کیتوزان زیر نور سفید ثبت شد که با گیاهان تیمار شده زیر نور سفید در سایر غلظت‌ها و گیاهان شاهد در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانواهن/کیتوزان اختلاف معنی‌داری نداشت. کمترین میزان طول ریشه (۱۰/۵ سانتی‌متر) تحت نور آبی با صفر میلی‌گرم در لیتر نانو آهن مشاهده شد. به نظر می‌رسد

اکسید آهن باعث افزایش طول، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گردید. رحمتی زاده و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند نانوذرات آهن استفاده شده در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر با افزایش سنتز ترکیبات آلی در گیاه گوجه فرنگی باعث بهبود رشد و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش کادمیم می‌شود.

کلروفیل و سیستم انتقال الکترون دارد و با افزایش فتوسنتز کمک مؤثری به بهبود رشد گیاه می‌کند. احمدی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که میانگین ارتفاع ساقه در گیاه بادرنجبویه تحت تیمار نور قرمز بالاترین میزان را داشت. همچنین روضان و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که در گندم کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر نور LED و نانوذرات آهن/کیتوزان بر صفات مورفولوژیک گیاه فرنجمشک

نور LED	نانوآهن/کیتوزان (mg.L ⁻¹)	ارتفاع بوته (cm)	وزن تر بوته (g)	سطح برگ (cm ²)	طول ریشه (cm)	وزن تر ریشه (g)	وزن خشک بوته (gr)	وزن خشک ریشه (g)
سفید ٪۱۰۰	۰	۲۲/۲۵ ef	۲/۵۹ d	۱۱/۲۲ d	۱۲/۸۷ ab	۱/۱ c	۰/۶۵ c	۰/۱۸ g
	۱۰	۲۵/۸۷ b	۳/۰۲ de	۱۲/۴۷ f	۱۴/۵ a	۱/۳۷ de	۰/۶۷ c	۰/۳۶ e
	۲۰	۲۱/۷۵ ef	۲/۱۸ efg	۱۱/۲ f	۱۴/۸۷ a	۱/۹۸ ef	۰/۴۹ d	۰/۴۵ d
آبی ٪۱۰۰	۰	۲۱ f	۱/۹۴ fg	۹/۹ h	۱۰/۵ d	۰/۶۴ f	۰/۳۹ e	۰/۱۳ h
	۱۰	۲۲/۱۲ ef	۲/۳ ef	۱۰/۲۸ g	۱۲/۲۵ c	۰/۶۷ f	۰/۴۱ de	۰/۱۳ h
	۲۰	۱۸ g	۱/۶ g	۹/۵۴ i	۱۲/۷۵ bc	۰/۷۹ f	۰/۲۴ f	۰/۱۸ g
قرمز ٪۱۰۰	۰	۲۵/۶۲ b	۳/۶۸ c	۱۱/۷۴ e	۱۲/۵ c	۱/۴۸ de	۰/۴۹ d	۰/۲۶ f
	۱۰	۲۷/۵ a	۴/۲۲ c	۱۲/۵۱ d	۱۲/۵ bc	۱/۴۲ de	۰/۶۷ c	۰/۲۸ f
	۲۰	۲۳/۵ d	۲/۶ de	۱۱/۳ f	۱۲/۷۵ c	۱/۶۶ cd	۰/۴۱ de	۰/۳۴ e
شاهد	۰	۲۴ cd	۹/۲ a	۱۷/۷۸ b	۱۲/۵ c	۳/۱۱ b	۲/۰۱ a	۰/۷۲ c
	۱۰	۲۴/۷۵ bc	۹/۴۷ a	۱۸/۷۹ a	۱۳ bc	۴/۰۱ a	۲/۰۳ a	۰/۸۷ b
	۲۰	۲۳ de	۸/۴۹ b	۱۶/۶۶ c	۱۴/۷۵ a	۴/۱۴ a	۱/۷۸ b	۰/۹۳ a

در هر ستون، تیمارهایی که حداقل در یک حرف مشترک‌اند، بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

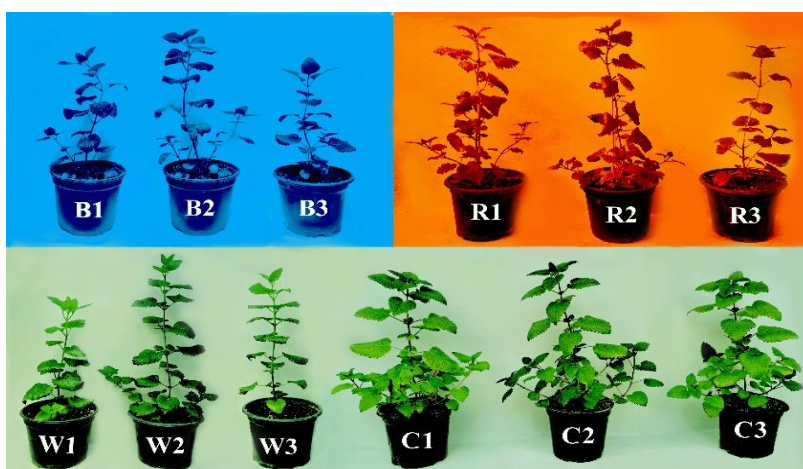
اندام هوایی (۰/۲۴ گرم) مربوط به گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم نانوآهن/کیتوزان تحت نور آبی با کاهش ۸۸ درصدی نسبت به گیاهان شاهد و کمترین میزان وزن خشک ریشه (۰/۱۳ گرم) در گیاهان تیمار شده با صفر و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان در نور آبی با کاهش ۸۱/۹ درصدی نسبت به گیاهان شاهد مشاهده شد (جدول ۲).

از لحاظ مورفولوژیکی محققان بر این باورند که عملکرد فوتونی نور قرمز، آبی و سفید به تنهایی برای رشد گیاهان کافی است، لذا در بسیاری از تحقیقات انجام شده کاربرد ترکیبی و تکمیلی نورهای قرمز و آبی تأثیر بیشتری در رشد و عملکرد گیاه داشته است. همچنین طول موج‌های مختلف نوری اثرات نابرابری بر گونه‌های گیاهی دارند (کیم و همکاران ۲۰۰۴). بر اساس مطالعه

بالاترین میزان وزن تر بوته (۹/۴۷ گرم) و وزن تر ریشه (۴/۱۴ گرم) مربوط به گیاهان شاهد تیمار یافته با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان و کمترین میزان وزن تر بوته (۱/۶ گرم) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان، تحت نور آبی و کمترین میزان وزن تر ریشه (۰/۶۴ گرم) با کاربرد صفر میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان تحت نور آبی مشاهده شد که با سایر غلظت‌های نانوآهن/کیتوزان استفاده شده زیر این نور تفاوت معنی‌داری نداشت. بالاترین مقدار وزن خشک بوته (۲/۰۳ گرم) مربوط به گیاهان شاهد تیمار شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان و بیشترین میزان وزن خشک ریشه (۰/۹۳ گرم) در گیاهان شاهد تیمار یافته با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات آهن/کیتوزان بودند. همچنین کمترین میزان وزن خشک

بیشترین سطح برگ (۱۸/۷۹ سانتی‌متر مربع) مربوط به گیاهان شاهد تیمار شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن/کیتوزان و کمترین سطح برگ (۹/۵۴ سانتی‌متر مربع) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم نانو آهن/کیتوزان، تحت نور آبی مشاهده شد که نسبت به گیاهان شاهد ۴۶ درصد کاهش داشت (جدول ۲). در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، نور آبی با کاهش توسعه سلول‌های گیاهی، منجر به ممانعت از رشد برگ و افزایش طول ساقه در گیاهانی از قبیل خیار، آفتابگردان، لوبیای آزوکی، کدو سبز، نخود فرنگی و ماش شده است (کاسقروه ۱۹۸۱). طبق پژوهش انجام شده در گیاه آفتابگردان مشخص شد که کاربرد نانو ذرات سولفات آهن سبب افزایش سطح برگ نسبت به گیاهان شاهد و گیاهان تیمار شده با فرم غیر نانو سولفات آهن می‌گردد (ترابیان و ناهدی ۲۰۱۲).

انجام شده توسط دمنه و همکاران (۲۰۲۳) کمترین میزان وزن خشک اندام هوایی در گیاه ریحان تحت تیمار نور آبی گزارش شد. همچنین مهرجردی و همکاران (۲۰۲۴) کمترین مقدار وزن تر ریشه را در گیاهان خیار رشد یافته تحت تیمار نوری آبی گزارش کردند. در بررسی انجام شده در آنیسون مشخص شد که محلول‌پاشی با نانوذرات آهن نقش مثبت در افزایش عملکرد گیاه تحت شرایط تنش را داشت (پیرزاد و برین ۲۰۱۸). موحدی و معینی (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای نشان دادند که محلول‌پاشی کلات آهن سبب افزایش وزن خشک ریشه گیاه دارویی کاسنی می‌گردد. یادگاری و علاییان (۲۰۱۲) نیز افزایش وزن خشک ریشه گیاه دارویی همیشه بهار را در حالت محلول‌پاشی توأم آهن و روی گزارش کردند.



شکل ۲- گیاهان فرنجمشک تحت تیمار نور LED و نانو ذرات آهن/کیتوزان

B1, B2, B3: به ترتیب کاربرد صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن زیر نور آبی. R1, R2, R3: به ترتیب کاربرد صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن زیر نور قرمز. W1, W2, W3: به ترتیب کاربرد صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم نانو آهن زیر نور سفید. C1, C2, C3: به ترتیب کاربرد صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم نانو آهن در شرایط گلخانه

دو فاکتور بر تمامی صفات فیزیولوژیکی گیاه فرنجمشک در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۳).

صفات فیزیولوژیکی و رنگی‌های فتوسنتزی بر اساس نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر نور LED و نانوذرات آهن/کیتوزان و اثرات متقابل این

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر نور LED و نانوذرات آهن/کیتوزان بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه فرنجمشک

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		کلروفیل کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل a/b	کارتنویید	قند محلول
نانوآهن/کیتوزان (N)	۲	۲۸۶/۸۷**	۱۵۸/۴۸**	۲۰/۸۸**	۰/۶۹**	۴/۹۵**	۶/۷۸**
نور LED (L)	۳	۱۰۱/۰۲**	۴۵/۸۹**	۱۹/۲۵**	۳/۱۷**	۳۱**	۵/۵۳**
(N) × (L)	۶	۱۵۷/۱۸**	۱۲۲/۸۲**	۳/۶۹**	۲/۱۶**	۵/۵۱**	۲/۹۸**
اشتباه آزمایشی	۳۶	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۱۹
ضریب تغییرات (%)	-	۲/۶	۳	۳/۱۲	۶/۷۶	۲/۳۸	۱/۴۱

**، * به ترتیب وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns عدم وجود اختلاف معنی دار میباشد.

با ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان و کمترین میزان نسبت کلروفیل a/b (۱/۵۶) در گیاهان تیمار یافته با ۱۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان زیر نور آبی ثبت گردید.

بالاترین مقدار کارتنویید (۱۰/۴ میلی گرم در گرم وزن تر) مربوط به گیاهان فاقد تیمار نانو آهن زیر نور سفید بود که نسبت به گیاهان شاهد ۷۶ درصد افزایش داشته و با گیاهان تیمار شده با ۱۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان تحت تیمار نور سفید و گیاهان تیمار شده با ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان تحت تیمار نور قرمز اختلاف معنی داری نداشت. همچنین کمترین مقدار آن (۴/۳۷ میلی گرم در گرم وزن تر) در گیاهان شاهد تیمار شده با ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان ثبت شد (جدول ۴).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل فاکتورها (جدول ۴) نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل کل (۳۴/۲۹ میلی گرم در گرم وزن تر)، کلروفیل a (۲۵/۷۶ میلی گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل b (۸/۵۲ میلی گرم در گرم وزن تر) در گیاهان فرنجمشک تیمار شده با ۱۰ میلی گرم نانوآهن/کیتوزان تحت تیمار نور سفید بود که هر کدام به ترتیب ۶۳/۲۸، ۶۱ و ۷۰/۴ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داشتند. کمترین میزان کلروفیل کل (۱۴/۳۵ میلی گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل a (۸/۷۳ میلی گرم در گرم وزن تر) در گیاهان تیمار شده با ۱۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان زیر نور آبی و کمترین میزان کلروفیل b (۴/۲۸ میلی گرم در گرم وزن تر) در گیاهان شاهد تیمار شده با ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان مشاهده شد. بالاترین میزان نسبت کلروفیل a/b (۴/۲۸) مربوط به گیاهان شاهد تیمار شده

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر نانوذرات آهن/کیتوزان و نور LED بر رنگیهای فتوسنتزی گیاه فرنجمشک

نور LED	نانو ذرات آهن (mg.L ⁻¹)	کلروفیل کل (mg.g ⁻¹ .FW)	کلروفیل a (mg.g ⁻¹ .FW)	کلروفیل b (mg.g ⁻¹ .FW)	کلروفیل a/b (mg.g ⁻¹ .FW)	کارتنویید (mg.g ⁻¹ .FW)
سفید	۰	۲۹/۶۸ b	۲۱/۲۶ bc	۸/۴۱ ab	۲/۵۲ d	۱۰/۴ a
	۱۰	۳۴/۲۹ a	۲۵/۷۶ a	۸/۵۲ a	۳/۰۲ bc	۹/۷۵ ab
	۲۰	۱۴/۸۴ h	۱۰/۱۱ f	۴/۷۲ f	۲/۱۵ e	۹/۰۵ bc
آبی	۰	۲۶/۶۸ c	۲۰/۰۸ d	۶/۶ d	۳/۰۴ bc	۷/۹۶ cd
	۱۰	۱۴/۳۵ h	۸/۷۳ g	۵/۶۱ e	۱/۵۶ g	۷/۷۵ d
	۲۰	۱۹/۷۲ f	۱۴/۲۵ e	۵/۴۶ e	۲/۶۴ d	۶/۷۹ de
قرمز	۰	۲۹/۹ b	۲۲/۰۲ b	۷/۸۷ b	۲/۸۱ cd	۷/۱۳ de
	۱۰	۲۲/۹۵ d	۱۴/۶۶ e	۸/۲۸ ab	۱/۷۷ fg	۹/۳۶ ab
	۲۰	۲۱/۵۶ e	۱۴/۳۵ e	۷/۲۱ c	۱/۹۹ ef	۹/۷ ab
شاهد	۰	۱۹/۰۱ f	۱۲/۶۹ e	۵/۳۲ e	۲/۶ d	۵/۸۹ e
	۱۰	۲۷/۰۶ c	۲۰/۶۳ cd	۶/۴۳ d	۳/۲۲ b	۷/۷۲ d
	۲۰	۱۷/۰۸ g	۱۳/۸۵ e	۳/۲۳ g	۴/۲۸ a	۴/۳۷ f

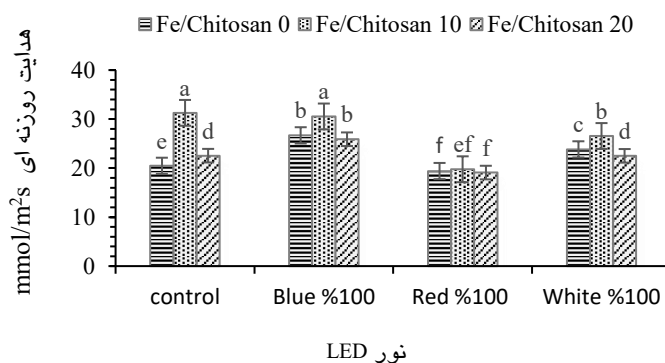
در هر ستون، تیمارهایی که حداقل در یک حرف مشترک اند، بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

افزایش کلروفیل کل، a و b به ترتیب ۳۷، ۴۱ و ۳۸ درصد نسبت به گیاهان شاهد گردید.

هدایت روزنه‌ای

روزنه‌ها مهم‌ترین کانال ارتباطی بین فضای درونی گیاه و محیط اطراف گیاه هستند که مهم‌ترین نقش را در تبادلات گازی و هدایت هیدرولیکی گیاه ایفا می‌کنند. پس از بررسی‌های صورت گرفته، نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار در ارتباط با خصوصیات روزنه‌ای تحت شرایط مختلف نوری توأم با محلول‌پاشی نانوذرات آهن/کیتوزان بود. بر اساس نتایج حاصل از مقایسات میانگین اثرات متقابل دوافکتور (شکل ۴)، بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای (۳۰/۵۴ میلی‌مول بر متر مربع در ثانیه) در گیاهان شاهد تیمار شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن/کیتوزان بود که با گیاهان تحت تیمار نور آبی و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن کیتوزان اختلاف معنی‌داری نداشت. کمترین میزان هدایت روزنه‌ای (۱۹/۰۹ میلی‌مول بر متر مربع در ثانیه) مربوط به گیاهان تحت تیمار نور قرمز و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن/کیتوزان با کاهش ۶/۸ درصدی نسبت به گیاهان شاهد ثبت گردید که با گیاهان تیمار شده با صفر و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانو آهن/کیتوزان زیر نور قرمز، اختلاف معنی‌داری نداشت.

نور سفید با افزایش پیش ماده‌های بیوسنتز کننده کلروفیل، افزایش سنتز آن را سبب می‌شوند (فان و همکاران ۲۰۱۳). نور قرمز طیف مرئی برای نمو دستگاه فتوسنتزی و فتوسنتز نیاز است در حالی که نور آبی برای سنتز کلروفیل، کلروپلاست، باز شدن روزنه‌ها و فتومورفوژنز مورد نیاز می‌باشد (سینخ و همکاران ۲۰۱۴). در تحقیق پودل و همکاران (۲۰۰۸) میزان کلروفیل برگ انگور تحت نور آبی بیشترین و تحت نور قرمز کمترین مقدار بود در حالی که در پژوهش انجام شده توسط احمدی و همکاران (۲۰۱۶) بیشترین مقدار کلروفیل کل، a و b در گیاهان بادرنجبویه تحت تیمار نوری سفید و بیشترین مقدار کارتنوئید در گیاهان تحت تیمار نوری قرمز گزارش گردید. آهن از اجزای مهم بسیاری از آنزیم‌ها بوده و نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی مانند فتوسنتز، سنتز کلروفیل، تنفس و تثبیت نیتروژن در گیاه دارد. آهن به عنوان ناقل الکترون در فرآیند تنفس و فتوسنتز عمل می‌کند. آهن در سلول‌های فتوسنتزی نقش مهمی در بیوسنتز سیتوکروم‌ها و سایر مولکول‌های دارای کلروفیل و سیستم انتقال الکترون دارد و با افزایش فتوسنتز کمک مؤثری به بهبود رشد گیاه می‌کند (ماسچنر ۱۹۹۵). بر اساس نتایج بدست آمده از پژوهش راکوسیو و همکاران (۲۰۲۲) محلول‌پاشی گیاهان ذرت با ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات آهن باعث



شکل ۳- اثر متقابل نور و نانوذرات آهن/کیتوزان بر میزان هدایت روزنه‌ای گیاه فرنجمشک تیمارهایی که حداقل در یک حرف مشترک‌اند، بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

کاهش هدایت روزنه‌ای شود. با توجه به مطالعه انجام شده توسط اوزونیس و همکاران (۲۰۱۶) با افزایش شدت نور آبی و قرمز، میزان هدایت روزنه‌ای در گیاه گوجه فرنگی کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، حیدری و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند میزان هدایت روزنه‌ای در گیاهان کنجد کشت شده در شرایط مزرعه، با کاربرد ۱ گرم در لیتر نانوذرات اکسید آهن به صورت محلولپاشی در گیاهان تحت تنش خشکی و ۰/۵ گرم در لیتر نانو اکسید آهن در شرایط بهینه، بیشترین مقدار را داشتند.

میزان متابولیت‌های ثانویه

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر نور LED و نانوذرات آهن/کیتوزان بر متابولیت‌های ثانویه گیاه فرنجمشک، اثرات ساده نانوذرات آهن بر میزان فنول و فلاونوئید کل، در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود. همچنین اثر نور LED به تنهایی و اثرات متقابل دو فاکتور بر میزان فنول و فلاونوئید کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی، در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بودند (جدول ۵).

باز شدن روزنه‌ها نتیجه افزایش پتانسیل فشاری یاخته‌های محافظ روزنه‌ها نسبت به یاخته‌های اطراف آن است. این آماس به سبب واکنش گیاه نسبت به محرک محیطی، که گاهی موجب ورود یون‌های پتاسیم که بر تنظیم فشار اسمزی اثر می‌گذارند، است. نور، پایین بودن غلظت گازکربنیک، اسید آسبیزیک و آب کافی از جمله عامل‌هایی هستند که ورود یون پتاسیم به درون یاخته‌های روزنه را تحریک می‌کنند. یون‌های فلزی هم چون آهن، روی، مس و منگنز در ساختمان بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و نیز آنزیم‌های درگیر در فرایندهای حیاتی گیاهان مشارکت دارند. کاربرد بهینه آهن چه به صورت معمول و یا نانوذره با افزایش محتوای سبزی‌نگی برگ و بهبود در واکنش‌های حیاتی در گیاه می‌تواند افزایش هدایت روزنه‌ای را در بر داشته باشد (چاترجی و همکاران ۲۰۰۶). طیف‌های مختلف نوری می‌تواند با تغییر در خصوصیات آناتومیکی روزنه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای در میزان هدایت روزنه‌ای تأثیر گذار باشد. همچنین شدت‌های بالای نوری می‌تواند با ایجاد تنش در گیاه بواسطه تغییرات هورمونی سبب بسته شدن روزنه‌ها و

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر نور LED و نانوذرات آهن/کیتوزان بر متابولیت‌های ثانویه گیاه فرنجمشک

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		فنول کل	فلاونوئید کل
نانوآهن/کیتوزان (N)	۲	۹/۶۸**	۶/۷۸**
نور LED (L)	۳	۱/۳۹**	۵/۵۳**
(N) × (L)	۶	۷/۷۶**	۲/۹۸**
اشتباه آزمایشی	۳۶	۱/۷	۱/۹۷
ضریب تغییرات (%)	-	۰/۷	۵/۰۴

**، * به ترتیب وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

خشک) در گیاهان شاهد تیمار شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان بود، همچنین کمترین میزان فلاونوئید کل (۲۱/۸۳ میکروگرم در گرم وزن خشک) در گیاهان تحت تیمار نور سفید با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان ثبت شد که از لحاظ آماری با گیاهان تیمار شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان تحت نور قرمز و شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین فاکتورهای آزمایشی (جدول ۶) نشان داد که بیشترین میزان فنول کل (۷۲/۹ میکروگرم در گرم وزن خشک) و فلاونوئید کل (۲۲/۳ میکروگرم در گرم وزن خشک) در گیاهان فرنجمشک تحت تیمار نور آبی با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان مشاهده شد که به ترتیب به میزان ۹/۴۵ و ۱/۸ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داشتند. کمترین میزان فنول کل (۶۲/۰۴ میکروگرم در گرم وزن

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر نور LED و نانوذرات آهن بر متابولیت‌های ثانویه گیاه فرنجمشک

نور LED	نانو آهن/کیتوزان (mg.L^{-1})	فنول کل ($\mu\text{g.g}^{-1} \text{FW}$)	فلاونوئید کل ($\mu\text{g.g}^{-1} \text{FW}$)	ظرفیت آنتی اکسیدانی کل (%)
سفید ٪۱۰۰	۰	۶۷/۴۴۷ d	۲۱/۹۷۵ d	۶۴/۷۵ cde
	۱۰	۶۴/۸۵۵ e	۲۱/۸۲۳ e	۵۹/۵۳ e
	۲۰	۷۱/۵۱۷ ab	۲۲/۰۷۵ c	۷۸/۳۳ ab
آبی ٪۱۰۰	۰	۷۲/۶۴۲ a	۲۲/۲۴۲ b	۷۸/۵۸ ab
	۱۰	۶۷/۱۴۲ d	۲۱/۹۲۲ d	۶۹/۸۹ c
	۲۰	۷۲/۹۰۲ a	۲۲/۳۰۲ a	۸۲/۸۱ ab
قرمز ٪۱۰۰	۰	۶۷/۰۰۲ d	۲۱/۸۴۸ e	۶۵/۳۴ cd
	۱۰	۶۴/۷۶۱ e	۲۱/۸۴۲ e	۶۱/۲۷ de
	۲۰	۶۸/۱۲۵ cd	۲۲/۰۵۶ c	۸۳/۸۵ a
شاهد	۰	۶۶/۶۵۷ de	۲۱/۹۵۱ d	۷۷/۲۵ ab
	۱۰	۶۲/۰۴۱ f	۲۱/۸۵۷ e	۶۸/۹۵ c
	۲۰	۶۹/۶۰۷ bc	۲۲/۰۶۹ c	۷۹/۷۹ ab

در هر ستون، تیمارهایی که حداقل در یک حرف مشترک‌اند، بر اساس آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

ترکیبات فنولی و انجام اولین مرحله بیوسنتز فلاونوئیدها می‌شود. همچنین نور به عنوان یک عامل تنش‌زا باعث تحریک تولید ترکیبات ثانویه از جمله فنول و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در گیاهان دارویی می‌گردد (وید و همکاران ۲۰۰۱). در گیاه گل انگشتانه استفاده از تیمار نور LED تک رنگ، آبی و قرمز غلظت ترکیبات فنولی، فلاونوئید و آنتوسیانین را افزایش داد (داو و همکاران ۲۰۱۷). ایوای و همکاران (۲۰۱۰) طی پژوهشی بیان کردند که تیمار نور آبی سبب تجمع فنول در گیاه می‌شود. در پژوهش انجام شده توسط وو و همکاران (۲۰۰۷) بیشترین میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان نخود تحت تیمار نور قرمز گزارش شد. همچنین خلیلی و خانقلی (۲۰۲۰) در مطالعه خود بیان داشتند که بیشترین میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل در گیاهان مرزنگوش رشد یافته تحت تیمار نور قرمز مشاهده شد که ۲۵ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داشت.

از نانوذرات فلزی می‌توان به عنوان یک محرک مؤثر برای تولید متابولیت‌های ثانویه در بیوتکنولوژی گیاهی استفاده کرد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۳). کارآیی تحریک برای بهبود تولید متابولیت‌های ثانویه به گونه گیاهی، ترکیبات مورد نظر، نوع و غلظت محرک‌ها و زمان تیمار

بیشترین مقدار ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (۸۳/۸۵ درصد) در گیاهان فرنجمشک تحت تیمار نور قرمز با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان بود که با گیاهان شاهد تیمار شده با صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن کیتوزان و گیاهان تحت تیمار نور آبی با صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان و گیاهان تحت تیمار نور سفید با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان تفاوت معنی‌داری نداشتند. همچنین کمترین مقدار ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (۵۹/۵۳ درصد) در گیاهان تحت تیمار نور سفید با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان مشاهده گردید که با گیاهان تحت تیمار نور سفید با صفر میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان و گیاهان تحت تیمار نور قرمز با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوآهن/کیتوزان از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶).

مطالعات متعددی نشان داده که استفاده از نورهای LED سبب افزایش میزان فلاونوئید، کارتنوئید، آنتوسیانین، کلروفیل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (کیم و همکاران ۲۰۰۴). شدت و کیفیت نور اثر مهمی بر روی بیوسنتز ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی دارد. کریبتوکروم و فیتوکروم‌ها به عنوان گیرنده‌های نوری در گیاه سبب فعال شدن آنزیم‌های درگیر در ساخت

نتیجه‌گیری کلی

کاربرد لامپ‌های LED تک رنگ توأم با نانوذرات آهن با پوشش کیتوزان تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود خصوصیات رشدی و فیزیولوژیکی مورد بررسی در گیاه فرنجمشک داشت، به طوری که از میان غلظت‌های مورد استفاده از نانوذرات آهن/کیتوزان، گیاهان محلول-پاشی شده با ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین افزایش را در عملکرد، ارتفاع، سطح برگ، هدایت روزنه‌ای و رنگیزه‌های فتوسنتزی، نسبت به سایر غلظت‌های کاربردی و گیاهان شاهد داشت. همچنین نانو ذرات آهن/کیتوزان، در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین تأثیر را در توسعه سیستم ریشه دارد. استفاده از لامپ‌های LED غالباً موجب محدودیت در رشد اندام هوایی گیاه فرنجمشک گردید که می‌تواند در اثر بالا بودن شدت نور لامپ‌های استفاده شده و ایجاد تنش در گیاهان تحت تیمار باشد. بیشترین افزایش در میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در نور سفید توأم با نانو آهن/کیتوزان در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. همچنین محلول‌پاشی گیاهان فرنجمشک با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، تحت نور آبی بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات ثانویه داشت. با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از نانوذرات آهن-کیتوزان جهت افزایش رشد بهینه و کاربرد لامپ‌های LED توأم با محلول‌پاشی نانوذرات آهن/کیتوزان جهت بالا بردن میزان ترکیبات مؤثره و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گیاه فرنجمشک توصیه می‌گردد.

سپاسگزاری

با کمال احترام بدین وسیله از مساعدت اساتید محترم و کارشناس آزمایشگاه تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، نهایت قدرانی و سپاسگزاری را دارم.

بستگی دارد. در واقع حضور این نانوذرات در بافت گیاهی می‌تواند با اعمال تنش به سلول، پیام‌های سلولی لازم برای افزایش بیان ژن و تحریک فعالیت آنزیم‌های مورد نیاز در مسیر بیوشیمیایی تولید متابولیت‌های ثانویه را در گیاه سبب شوند (چانگ و همکاران ۲۰۰۲). عنصر آهن نقش بسیار مهمی در سنتز پروتئین و کربوهیدرات‌ها، اعمال متابولیسم سلول، محافظت غشاء در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن و سایر فرآیندهای گیاهی دارد (مارشور، ۱۹۹۵). بررسی تأثیر نانو اکسید آهن برگ‌گیاه نعناع فلفلی نشان داد که با افزایش غلظت نانو اکسید آهن، میزان فنول و فلاونوئید برگ افزایش می‌یابد (محمدی و همکاران ۲۰۱۰). در مطالعه انجام شده توسط یوسف زاده و همکاران (۲۰۱۶) گیاهان بادرشبو تیمار شده با ۱/۵ گرم در لیتر نانو کلات آهن، بیشترین میزان فنول و فلاونوئید را داشتند.

گیاهان با استفاده از آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز یک سیستم کارآمد برای تجزیه انواع اکسیژن فعال گیاهی دارند که منجر به کاهش میزان خسارت توسط آن‌ها می‌گردد (اوزکور و همکاران، ۲۰۰۹). در گیاه پریوش افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در پاسخ به کاربرد برخی نانوذرات از جمله نانوذرات آهن گزارش شده است (عسکری و همکاران، ۲۰۱۷). در برخی دیگر از مطالعات عنوان شده است که کاربرد نانوذرات فلزی مانند نانوذرات آهن و روی منجر به افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی شده و کاربرد این نانوذرات در غلظت‌های بالاتر منجر به کاهش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی می‌گردد (سلیمان و همکاران ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای دیگر مشخص شد که فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی از قبیل کاتالاز و پراکسیداز در شرایط کاربرد نانوذرات فلزی افزایش یافته است (ماتینز سانچز و همکاران، ۲۰۱۵).

منابع مورد استفاده

Adamczyk D, Chrześcijańska E, Zielenkiewicz P and Wolf M. 2023. Antioxidant Activity and Photosynthesis Efficiency in *Melissa officinalis* Subjected to Heavy Metals Stress. *Molecules*, 4(28): 26-42. Doi:10.3390/molecules28062642

- Arnon D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology, 24: 1-15.
- Chatterjee C, Gopal R and Dube B. 2006. Impact of iron stress on biomass yield metabolism and quality of potato *Solanum tuberosum*. Horticultural Science, 108: 1-12.
- Chang C, Yang H, Wen M and Chern C. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. J food drug Anal, 10: 23-34.
- Chrysargyris A, Petropoulos S and Tzortzakis N. 2022. Essential Oil Composition and Bioactive Properties of Lemon Balm Aerial Parts as Affected by Cropping System and Irrigation Regime. Agronomy, 12: 624-649.
- Dahoumane S, Jeffryes C, Mechouet M and Agathos S. 2017. fresh look at the control of shape, size and composition. Biosynthesis of inorganic nanoparticles Bioengineering, 4: 10-14.
- Dou H, Genhua N and Mengmeng G. 2017. Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments. Horticulturae Masabni, 3: 32-36.
- Fan X, Zang J, Xu Z, Guo S, Jiao X, Liu X and Gao Y. 2013. Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). Acta Physiologiae Plantarum, 35: 2721-2726. Doi:10.1007/s11738-013-1304-z
- Giglou M.T, Giglou R.H, Esmaeilpour B, Azarmi R, Padash A, Falakian M, Śliwka J, Gohari G. and Lajayer H.M. 2022. A new method in mitigation of drought stress by chitosan-coated iron oxide nanoparticles and growth stimulant in pepper-mint. Industrial Crops and Products, 187: 115-286. Doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115286.
- Granja F and Covarrubias J. 2018. Evaluation of acidifying nitrogen fertilizers in avocado trees with iron deficiency symptoms. J Soil Sci Plant Nutr, 18: 157-172.
- Huang L and Liu X. 2015. Biosynthesis and regulation of secondary metabolites in medicinal plants in Molecular Pharmacognosy. Science Press, 14: 251–252.
- Iwai M, Mari O and Hiroshi T. 2010. Enhanced accumulation of caffeic acid, rosmarinic acid and luteolin-glucoside in red perilla cultivated under red diode laser and blue LED illumination followed by UV-A irradiation. Journal of functional foods Suzuki, 2: 66-70.
- Javed R, Yucesan B, Zia M and Gurel E. 2022. Nanoelicitation: A Promising and Emerging Technology for Triggering the Sustainable In Vitro Production of Secondary Metabolites in Medicinal Plants. Plant and Nanoparticles, 12: 265–280. Doi:10.1007/978-981-19-2503-0_10
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida S and Yoshihsra T. 2010. Blue light emitting diode irradiation of seedlings improves seedling quality of growth after transplanting in red leaf lettuce. Hort Science, 45: 1809 –1814.
- Jung S, Chung M, Hwang H, Kim H, Yu Y, and Ghimire K. 2021. Application of light-emitting diodes for improving the nutritional quality and bioactive compound levels of some crops and medicinal plants. Molecules, 26:1477. Doi:10.3390/molecules26051477
- Karimi, E., Ghasemnezhad, A., & Ghorbanpour, M. (2022). Alteration of antioxidant enzymes of forest savory under the influence of drought stress, re-watering and selenium foliar application. *Journal of Plant Production Research*, 29 (2), 19-33. DOI: 10.22069/JOPP.2021.18639.2749
- Kim H, Goins D, Wheeler M, and Sager C. 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and bluelight emitting diodes. HortScience, 39:1617–1622.
- Kim S, Hahn J, Heo W and Paek Y. 2004. Effect of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. Science Hort, 101:143 –151.

- Li Y, Kong X, Fu Y, Sussman R, and Wu H. 2020. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiol Biochem*, 148: 80–89. Doi: 10.1016/j.plaphy.2020.01.006
- Loi M, Villani A, Paciolla F, Mule G, and Paciolla C. 2021. Challenges and opportunities of light-emitting diode (LED) as key to modulate antioxidant compounds in plants. *Antioxidants*, 14: 10-42. Doi: 10.3390/antiox10010042
- Lucena J and Hernandez L. 2017. Iron nutrition in plants an overview. *Plant Soil*, 418: 1-4.
- Mai J and Bauer P. 2016. From the proteomic point of view Integration of adaptive changes to iron deficiency in plants. *Current Plant Biol*, 5: 45-56.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrient of higher plants. 2nd Edition. London Academic Press Limited Harcourt Brace and Company Publishers, 14: 12-16.
- Martinez M, Nunez J, Amoros C and Gimenez F. 2010. Effect of titanium leaf spray treatments on ascorbic acid levels of *Capsicum annuum* L. fruits. *Plant Nutrition*, 16(5): 975-981.
- Mirsardoo F, Afsharmanesh G, Aien A, Heidari H and Korehpaz S. 2011. Effect of Organic and Nano fertilizers on Growth Characteristics and Yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) *Scientific Research Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 4(33): 241-261 DOI:10.22034/SAPS.2023.54292.2952 (In Persian)
- Moon K, Park S, Park I, Song J, Lee J and Cho S. 2020. Development of systems for the production of plant-derived biopharmaceuticals. *Plan Theory*, 9: 28-30. Doi:10.3390/plants9010030
- Mohammadi M, Majnoun-Hosseini N, Dashtaki M and Sheikh-Beglou R. 2010. Investigation of nano-iron-oxide and zinc sulfate spraying on the amount of chloroplast pigments of Peppermint (*Mentha piperita* L.) in field conditions. *National Conference on Medicinal Plants*, 14: 24-28. (In Persian)
- Ouzounis T, Heuvelink E, Ji Y, Schouten J, Visser F and Marcelis M. 2016. Blue and red LED lighting effects on plant biomass, stomatal conductance, and metabolite content in nine tomato genotypes. *Acta Hort*, 1134: 251-258. DOI:10.17660/ActaHortic.2016.1134.34
- Ozkur O, F Ozdemir, M Bor and Turkan I. 2009. Physiochemical and antioxidant responses of theperennial xerophyte *Capparis ovata* Desf. *Todrught Environ Botany*, 66: 487–492.
- Palmitessa D, Pantaleo A and Santamaria P. 2021. Applications and development of LEDs as supplementary lighting for tomato at different latitudes. *Agronomy*, 11: 826-835. Doi:10.3390/agronomy11050835
- Racuciu M, Tecucianu A, and Oancea S. 2022. Impact of Magnetite Nanoparticles Coated with Aspartic Acid on the Growth, Antioxidant Enzymes Activity and Chlorophyll Content of Maize. *Antioxidants*, 11: 11-93. Doi:10.3390/antiox11061193
- Rizwan M, Ali S, Ali B, Adrees M, Arshad M, Hussain A, Rehman Z and Waris A. 2019. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, 214: 269-277.
- Shang Y, Hasan K, Ahammed J, Li M, Yin H and Zhou J. 2019. Applications of Nanotechnology in Plant Growth and Crop Protection: A Review. *Molecules*, 24(14), 25-58. Doi:10.3390/molecules24142558
- Singh D, Basu Ch, Meinhardt-Wollweber M and Roth B. 2014. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. *Hannover Centre for Optical Technologies*, 17: 30-167.
- Singh R and Geetanjali S. 2018. Chemotaxonomy of Medicinal Plants. *Natural Products and Drug Discovery*, 12: 119–136. DOI:10.1016/b978-0-08-102081-4.00006
- Soliman S, EL-feky E and Darwish S. 2015. Alleviation of salt stress on Moringa eregrine using foliar application of nanofertilizers. *Hort Forest*, 7: 36-47.
- Tomova T, Petkov V, Slavova I, Stoyanov P and Argirova M. 2020. Naturally present metal ions in plants could interfere with common antioxidant assays. *Molecules*, 7: 100-995.

- Verma N, and Shukla S. 2015. Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites. *Aromat Plants*, 2: 105–113. Doi: 10.1016/j.jarmap.2015.09.002
- Vinterhalter D, Grubišić D, Vinterhalter B and Konjević R. 1990. Light controlled root elongation in in vitro cultures of *Dracaena fragrans* Ker Gawl. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 22: 1–6.
- Wade-Helena K, Tatiana N, William V and Gareth I. 2001. Interactions within a network of phytochrome, cryptochrome and UV- B phototransduction pathways regulate chalcone synthase gene expression in *Arabidopsis* leaf tissue. *The Plant Journal* Jenkins, 25: 75-85.
- Wu C, Chi-Yao H, Chii-Ming J, Yuh-Tai W, Chih-Yu W, Ho-Hsien Ch, and Hung-Min Z. 2007. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chemistry* Chang, 101: 53-58.
- Yang L, Wen S, Ruan X, Zhao Y, Wei F and Wang Q. 2018. Response of Plant Secondary Metabolites to Environmental Factors. *Molecules*, 23(4): 7-62. Doi:10.3390/molecules23040762
- Yousefzadeh S, Naghdi Badi H, Sabaghniya N and Janmohammadi M. 2016. The effect of foliar application of nano iron chelate on physiological and chemical traits of dragonhead (*Dracocephalum moldavica*L.). *Med Plants*, 15 (60): 152-160. (In Persian)
- Zhang B, Zheng LP, Yi-Li W and Wen-Wang J. 2013. Stimulation of artemisinin production in *Artemisia annua* hairy roots by Ag-SiO₂ coreshell nanoparticles. *Current Nanoscience*, 9: 363–370.