نشریه علمی فناوری گیاهان دارویی ایران
دوره۷- شماره ۲- پیاپند ۱۳-پائیز و زمستان ۱۴۰۳

بررسی اثر تعدیل‌کنندگی نانوذرات سبز روی بر برخی خصوصیات کمی و کیفی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش ماوراءبنفش در شرایط هیدروپونیک

Effect of green Zn nanoparticles modulation on some quantitative and qualitative properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) under ultra-violet stress in hydroponic conditions

سهیلا جلیل‌نژاد[۱]، امیر رحیمی[۲*]، سینا سیاوش‌مقدم[۳]، لطیفه پوراکبر[۴]، مهدی قیاسی[۵]

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، (نگارنده مسئول)
۳. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان رشت-ایران.
۴. استاد، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه.
۵. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ - شناسانهٔ برنمود رقمی: 10.22092/mpt.2026.372359.1216

چکیده

جلیل نژاد, س.، رحیمی، ا.، سیاوش مقدم، س.، پوراکبر، ل.، قیاسی، م.، . بررسی اثر تعدیل‌کنندگی نانوذرات سبز روی بر برخی خصوصیات کمی و کیفی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش ماوراءبنفش در شرایط هیدروپونیک .
نشریه علمی فناوری گیاهان دارویی ایران، دوره ۷- شماره ۲- پیاپند ۱۳-پائیز و زمستان ۱۴۰۳ صفحه: ۷۰-۵۷

به منظور بررسی اثر تعدیل‌کننده‌های تنشی بر خصوصیات گیاه نعناع فلفلی (Mentha piperita L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی در شرایط تنش اشعه ماوراءبنفش در سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در دانشگاه ارومیه با سه تکرار و در ۲۷ گلدان به طور تصادفی انجام گرفت. فاکتورهای مورد بررسی شامل نانوذرات سبز روی در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و تنش اشعه ماوراءبنفش (UV-B=2(15w)(LF-215m. 312mn)) در سه سطح (صفر، ۳۰ و ۴۵ دقیقه) بودند. در مورد صفات مورفولوژیکی نعناع فلفلی نتایج نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی (۲/۰۴ گرم) و بیشترین وزن خشک ریشه (۰/۸۲ گرم) در تیمار ترکیبی کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط تنش ۳۰ دقیقه ماوراءبنفش حاصل شد. در مورد صفات فیزیولوژیکی نعناع فلفلی نتایج نشان داد که بیشترین میزان کلرفیل a (۴۷/۸۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل b (۲۹/۶۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمار کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط عدم تنش ماوراءبنفش و بیشترین میزان قندهای محلول (۹/۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک)، کاروتنوئید (۳۶/۵ درصد)، پرولین (۸/۰۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس (۱/۸۷ درصد) در تیمار ترکیبی کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش به‌دست آمد که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با شاهد نشان داد. در مورد صفات آنتی اکسیدانی اندازه‌گیری شده بیشترین میزان فنل، فلانوئید و آنزیم ها (فنیل آلانین آمونیالیاز (پال PAL) و کاتالاز) در تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش و کمترین میزان در شاهد بود. بر اساس این نتایج محلول‌پاشی نانوذرات سبز روی به‌ویژه غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر توانسته است تا حدودی اثرات زیان‌بار ناشی از تنش ماوراءبنفش را کاهش دهد.

واژه های کلیدی: آنتی اکسیدان، آنزیم کاتالاز، اسانس، فلاونوئید، نعناع

آدرس پست الکترونیکی نگارنده مسئول: e.rahimi@urmia.ac.ir

مقدمه

رویکرد روز افزون استفاده از گیاهان دارویی و فرآورده های حاصله از آن نقش این گیاهان را در چرخه اقتصاد جهانی پررنگ تر کرده است. امروزه ترکیبات زیادی از گیاهان به‌عنوان نگهدارنده و طعم‌دهنده در صنایع غذایی، محافظت‌کننده و شاداب‌کننده پوست در صنایع آرایشی و بهداشتی و روغن‌های فرار مختلف در آروماتراپی[1] مورد استفاده قرار می‌گیرند (Alizadeh & Mahmoodi, 2016). برخی از گیاهان دارویی متعلق به خانواده Lamiaceae حاوی ترکیبات فیتوشیمیایی[2] با ارزشی هستند و براین‌اساس فعالیت بیولوژیکی قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهند (Gezici *et al*., 2024). نعناع فلفلی با نام علمی (*Mentha piperita* L.) گیاهی چندساله از خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است. این گونه گیاهی متعلق به مناطق بومی مدیترانه است که امروزه در تمام نقاط دنیا برای مصارف غذایی، دارویی، عطرسازی و پزشکی کشت می‌شود. اندام هوایی نعناع فلفلی دارای اسانس، ترکیبات فنلی، فلاونوئیدها، اسیدهای چرب، ویتامین‌ها، عناصرمعدنی و اسید سالیسیلیک است. منتول مهم‌ترین ترکیب اسانس است که درون کرک‌های غده‌های ترشحی در سطح اپیدرم برگ بیوسنتز و تجمع می‌یابد. منتول به دلیل بازداری از کانال TRPM8 در نورون‌های عصبی، حس خنکی در دهان ایجاد می‌کند (Seif Sahandi *et al*., 2019).

در بین گیاهان دارویی و معطر، نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) یکی از گیاهانی است که بیشترین استفاده را در سرتاسر جهان دارد و دارای سابقه طولانی بدون عوارض جانبی است. اثرات بیولوژیکی مفیدی نشان می‌دهد که این گیاه ممکن است نقش مهمی به‌عنوان آنتی‌اکسیدان، ضددرد، ضدالتهاب، ضدمیکروبی، ضدسرطان زا، ضدویروسی، ضدآلرژی ضدتوموری ایفا کند که نشان‌دهنده کاربرد آن در پیشگیری یا درمان بیماری‌های مختلفی است (Trevisan *et al*., 2017).

تنش ماوراءبنفش یکی از تنش‌های محیطی مهم است که در حالت شدید می‌تواند باعث ازبین‌رفتن گیاهان شود؛ اما در گیاهان دارویی، اعمال تنش ماوراءبنفش به‌صورت کنترل شده می‌تواند باعث فعال‌شدن سیستم‌های تولید متابولیت‌های ثانویه شده و افزایش ارزش گیاهان دارویی شود. گیاهان حساسیت متفاوتی به نور ماوراءبنفش دارند. زمانی که گیاهان در مقابل نور ماوراءبنفش قرار می‌گیرند، مکانیسم‌های دفاعی متعددی را نشان می‌دهند. کاهش در رشد رویشی یکی از مهم‌ترین علایم ظاهری تنش ماوراءبنفش است (Sarikhani, 2014).

اشعه ماوراءبنفش می‌تواند به DNA ، پروتئین‌ها و غشاهای سلولی آسیب برساند (Piri *et al*., 2011). گیاهان در برابر این تنش‌ها با تولید مواد شیمیایی محافظ مانند فلاونوئیدها و کاروتنوئیدها پاسخ می‌دهند که این ترکیبات می‌توانند رادیکال‌های آزاد تولید شده توسط ماوراءبنفش را خنثی کنند. ساختارهای حفاظتی مانند لایه اپیدرمی در گیاهان نه‌تنها به‌عنوان سد فیزیکی عمل می‌کنند؛ بلکه با تولید فلاونوئیدها

۱. Aromatherapy

۲. Phytochemicals

و سایر ترکیبات، از سلول‌ها در برابر آسیب‌های نوری و اکسیداتیو محافظت می‌کنند. این مکانیسم‌های دفاعی به گیاهان امکان می‌دهند که در شرایط محیطی دشوار تحت تابش اشعه ماوراءبنفش ، بقا و رشد کنند (Piri *et al.*, 2011).

تعدیل‌کننده‌های گیاهی، مواد فعال بیولوژیکی هستند که برای تقویت رشد گیاهان، بهبود دسترسی به مواد مغذی، و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی به کار می‌روند. این مواد با تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف در گیاهان، به آن‌ها کمک می‌کنند تا با شرایط نامطلوب محیطی مانند خشکی، شوری و دماهای پایین بهتر سازگار شوند (Sîngeorzan *et al.*, 2022). روی به‌عنوان عنصر کم‌مصرف ضروری برای رشد و نمو گیاهان بوده و در بسیاری از فرایندهای متابولیکی گیاهان نقش دارند (Asgari Lajayer *et al.*, 2014). در میان بسیاری از ویژگی‌های روی، ویژگی‌های اصلی آن نیمه‌رسانایی، فعالیت ضدمیکروبی، فعال‌کننده ولکانیزاسیون[۳] و جذب ماوراءبنفش است (Bandeira *et al.*, 2020). در چند سال گذشته، نانوذرات در زمینه‌های مختلف علم‌وفناوری، از علم مواد گرفته تا بیوتکنولوژی، کاربرد داشته‌اند؛ بنابراین سنتز نانوذرات را می‌توان به‌عنوان یک حوزه پویا در تحقیقات و کاربرد نانوذرات در نظر گرفت. روش‌های مختلف سنتز نانوذرات شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشد. از میان این روش‌ها، سنتز بیولوژیکی به دلیل مزایای کم‌هزینه‌بودن، غیرسمی بودن و سازگاری با محیط‌زیست نسبتاً به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربردهای زیستی نانوذرات راه را برای سنتز سبز نانوذرات بازکرده است (Thunugunta *et al.*, 2015). امروزه سنتز سبز که از عصاره‌های گیاهی به‌جای عوامل شیمیایی صنعتی برای کاهش یون‌های فلزی استفاده می‌کند، توسعه‌یافته است. سنتز سبز نسبت به سنتز شیمیایی سنتزی سودمندتر است، زیرا هزینه کمتری دارد. آلودگی و ایمنی محیط‌زیست و سلامت انسان را بهبود می‌بخشد (Ying *et al.*, 2022). نانوذرات روی به‌عنوان حامل‌های مؤثری برای مواد مغذی و عناصر کمیاب عمل می‌کنند که می‌توانند به طور مستقیم بر فرایندهای متابولیکی گیاهان تأثیر بگذارند. علاوه بر افزایش محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، استفاده از نانوذرات روی می‌تواند به بهبود تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فنل‌ها و فلاونوئیدها کمک کند. این متابولیت‌های ثانویه نقش مهمی در دفاع گیاه در برابر بیماری‌ها و آفات دارند و همچنین ممکن است خواص دارویی گیاه را تقویت کند (Alrubaie and Kadhim, 2019).

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر تنش ماوراءبنفش بر تغییر خصوصیات فیتوشیمیایی و عملکردی نعناع فلفلی و همچنین معرفی بهترین دز نانوذرات سبز روی به‌عنوان تعدیل‌کننده‌ی تنش در جهت افزایش بیوماس تولیدی نعناع فلفلی است.

مواد و روش ها

پژوهش حاصل به‌صورت فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور شامل نانوذرات

۳ Vulcanization

روی سنتز شده به روش سبز (صفر، ۵۰، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اشعه ماوراءبنفش B (صفر، ۳۰، ۴۵) دقیقه (اتاقک UV دانشگاه ارومیه) با مشخصات UV-B=2(15w)(LF-215m.) 312mn) در سه تکرار و در ۲۷ گلدان به طور تصادفی انجام گرفت. در هر گلدان بستر کشت هیدروپونیک نسبت (دو ماسه ، یک پرلیت) ریخته شد تا بستر کشت آماده شود. قلمه‌های نعناع فلفلی از گلخانه گیاهان دارویی جهاد دانشگاهی ارومیه تهیه و در گلخانه دانشگاه ارومیه ریشه دار شدند. سپس قلمه های ریشه دار شده به گلدانهای پلاستیکی ۲ لیتری انتقال داده شد. در اجرای این آزمایش برای هر گلدان زیر گلدان مجزایی در نظر گرفته شد. قبل از آماده سازی بستر کشت برای جلوگیری از هرگونه آلودگی یا حضور ذرات اضافی، تمامی ماسه‌ها پیش از استفاده با الک غربال شدند. سپس این ترکیب قبل از استفاده در گلدان‌ها با اتوکلاو استریل گردید تا از آلودگی‌های میکروبی و قارچی جلوگیری شود. در هر گلدان، چهار نشا هم‌اندازه نعناع فلفلی کاشت گردید. برای از بین بردن اثرات منفی شیمیایی گلدان‌های پلاستیکی، ابتدا گلدان‌ها با محلول آب و جوش شیرین شسته شدند. پس از انتقال نشاها به گلدان‌ها، اولین آبیاری با آب مقطر انجام شد و پس از آن، آبیاری به‌طور یک در میان با آب مقطر و محلول غذایی هوگلند ادامه یافت؛ به این صورت که در ابتدا به مدت سه روز از هوگلند با غلظت یک‌چهارم، سپس به مدت یک هفته از هوگلند با غلظت یک‌دوم و در نهایت به مدت بیست روز از هوگلند با غلظت کامل (تمام قدرت) استفاده شد. شرایط نگهداری گیاهان در سیستم کشت هیدروپونیک به‌طور دقیق تحت نظارت قرار گرفت تا رشد بهینه گیاهان و توسعه مناسب سیستم ریشه‌ای حاصل شود. تمامی فرآیندها شامل تنظیم دقیق پارامترهای محیطی نظیر دما (دمای اتاق ۲۵ درجه سانتیگراد) و نور (۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی)، به همراه تأمین مستمر مواد مغذی از طریق محلول‌های کشت، به‌طور مداوم بررسی و تنظیم گردید.

اعمال تنش ماوراءبنفش B (صفر، ۳۰، ۴۵) دقیقه (اتاقک UV دانشگاه ارومیه) و تعدیل‌کننده نانوذرات سبز روی همزمان با هشت برگی شدن گیاهان انجام شد. محلول‌پاشی تعدیل‌کننده نانوذرات سبز روی سه بار با فاصله ۱۰ روز یک بار صورت گرفت. برای اعمال تیمار اشعه ماوراءبنفش زمانی که نشاها هشت برگی شدند، هر روز در ساعت مشخص به مدت بیست روز در اتاقک UV به مدت ۳۰ و ۴۵ دقیقه تحت تنش ماوراءبنفش قرار گرفتند. هم چنین نانوذرات روی سنتز شده به روش سبز به صورت مساوی بر روی گیاهان محلول‌پاشی شد.

در انتهای فاز رویشی نسبت به برداشت نمونه‌های برگی اقدام شد؛ طوری که اندام هوایی آنها از محل یقه، که نقطه اتصال ریشه به بخش‌های فوقانی گیاه است، از سطح خاک برداشت شد و صفات مورفولوژیکی نعناع فلفلی نظیر وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمونه‌ها جهت انجام آزمایشات فیزیولوژیکی و آنتی‌اکسیدانی در بسته‌های فویلی آلومینیومی به فریزر ۲۰- درجه سانتیگراد آزمایشگاه منتقل شدند. برای

اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی نمونه‌ها به‌مدت ۷ روز سایه خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به‌طور کامل تبخیر گردد. پس از این مدت، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری وزن خشک، با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه پس از جدا کردن ریشه از محل طوقه، نمونه‌ها به‌مدت ۷ روز سایه خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به‌طور کامل تبخیر گردد. پس از این مدت، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری وزن خشک، با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند.

سنتز نانوذرات روی به روش سبز از عصاره آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.)

باتوجه به تحقیقات قبلی که در گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه ارومیه در خصوص تولید سنتز نانوذرات سبز انجام گرفته‌بود، در این پژوهش برای سنتز نانوذرات سبز از گیاه آویشن باغی استفاده شد.

ابتدا ۱۰ گرم از پودر برگ گیاه خشک‌شده آویشن باغی در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد. این مخلوط بر روی هیتر با دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده شد. پس از پایان زمان حرارت‌دهی، مخلوط به‌منظور جداسازی بخش جامد از مایع، از صافی عبور داده شد و عصاره آبی گیاه به‌عنوان محصول نهایی استخراج گردید. در مرحله بعد، مقدار چهار میلی‌لیتر از عصاره به‌دست‌آمده در بالن منتقل شده و ۲۵ میلی‌لیتر از محلول نیترات نقره با غلظت ۰/۰۵ مولار به آن افزوده شد. این ترکیب به‌مدت دو ساعت تحت شرایط هم‌زدن مداوم توسط دستگاه شیکر قرار گرفت. پس از گذشت این مدت، محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۰۲ مولار به‌صورت قطره‌قطره به مخلوط اضافه گردید تا pH محلول به ۱۲ برسد. با افزایش pH و رسیدن به این مقدار، رنگ محلول به رنگ زرد تغییر یافت که نشان‌دهنده تشکیل نانوذرات بود. پس از آن، بعد از تشکیل رسوب و تثبیت pH در مقدار مورد نظر مخلوط حاوی نانوذرات به مدت یک ساعت دیگر بر روی شیکر نگه‌داری شد. در نهایت، محلول حاصل به حجم مورد نظر برای محلول‌پاشی رسانده شد (Demir, 2025).

برای اندازه‌گیری صفات موفولوژیکی نمونه‌ها به‌مدت ۷ روز سایه خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به‌طور کامل تبخیر گردد. پس از این مدت، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری و یادداشت برداری شدند.

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر و طبق رابطه‌های ۱ تا ۳ اندازه‌گیری گردید (Lichtenthaler and Buschmann, 2001).

$$Ch.a = 12\cdot 7(OD663) - 2\cdot 69(OD645) \times \frac{V}{1000} \times W$$

$$Ch.b = 12\cdot 9(OD645) - 4\cdot 68(OD663) \times \frac{V}{1000} \times W$$

$$Carotenoids = OD470 + (0\cdot 114 \times OD663) - (0\cdot 638 \times OD645)$$

در این روابط V حجم استون و W وزن نمونه گیاهی استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری قندهای محلول، از روش فنل–سولفوریک اسید استفاده شد. در این روش

شدت رنگ حاصل در طول موج ۴۸۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. میزان جذب به‌دست‌آمده متناسب با رنگ محلول بود و این رنگ نیز با غلظت قندهای محلول ارتباط مستقیم داشت. به‌منظور تعیین غلظت قندهای محلول، منحنی استانداردی با استفاده از غلظت‌های مختلف گلوکز تهیه شد (Dubois *et al*., 1956).

به‌منظور اندازه‌گیری پرولین، استانداردهایی از آل‌پرولین با غلظت‌های مختلف از صفر تا ۰/۱ میکرومول بر میلی‌لیتر تهیه شد و پس از گذشت ۳۰ دقیقه، جذب محلول‌ها و نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید (Paquin & Lechasseur, 1979).

استخراج اسانس طبق روش تقطیر با آب و با استفاده از دستگاه کلونجر انجام شد. ۳۰ گرم ماده خشک گیاهی همراه با ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به درون بالن دستگاه کلونجر ۱۰۰۰ میلی‌لیتر ریخته و عمل اسانس‌گیری با حرارت دادن بالن شروع گردید. این عمل به مدت سه ساعت ادامه یافت و بعد دستگاه خاموش شد. جهت جمع‌آوری اسانس، بعد از باز کردن شیر کلونجر و خروج آب، اسانس‌ها داخل میکروتیوپ‌هایی که از قبل با ترازوی دیجیتال توزین شده بودند جمع آوری شد. سپس این میکروتیوپ توزین شده و وزن اسانس در ۱۰۰ گرم برگ خشک محاسبه شد (Letchamo *et al*.,1995).

$$\text{درصد اسانس} = \frac{\text{وزن نمونه خشک (گرم)}}{\text{وزن اسانس استخراج‌شده (میلی‌لیتر)}} \times 100$$

برای اندازه‌گیری محتوای فنل کل، از معرف فولین-سیوکالتیو[۴] استفاده شد. نمونه‌ها به‌مدت ۶۰ دقیقه در دمای اتاق در شرایط انکوبه قرار گرفتند و در پایان، جذب نوری محلول‌ها در طول موج ۷۵۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Ainsworth and Gillespie, 2007).

برای اندازه‌گیری میزان فلاونوئید کل در برگ گیاه نعناع فلفلی، از روش رنگ‌سنجی مبتنی بر واکنش با آلومینیوم کلراید استفاده شد. محلول نهایی به‌مدت ۴۵ دقیقه در دمای اتاق تحت شرایط انکوبه قرار گرفت. در پایان، جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۴۱۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. برای برآورد کمی فلاونوئید کل، از منحنی استاندارد تهیه‌شده با غلظت‌های مشخصی از ترکیب کاتچین به‌عنوان مرجع استفاده شد (Chang *et al*., 2002).

فعالیت آنزیم پال (PAL) بر اساس مقدار تولید اسید سینامیک، در طول موج مربوطه اندازه‌گیری و بر حسب میکرومول محصول تولیدشده بر میلی‌گرم پروتئین در ساعت گزارش شد (Amrhein *et al*., 1976).

برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، کاهش جذب نوری محلول در طول موج ۲۴۰ نانومتر به‌مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت شد. میزان کاهش جذب در این بازه زمانی به‌عنوان شاخصی برای تعیین فعالیت آنزیم کاتالاز مورد استفاده قرار گرفت. حداقل و حداکثر اعداد در طول موج ۲۴۰ نانومتر در یک دقیقه یادداشت برداری شد

٤ Folin-Ciocaltio

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی نعناع فلفلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		SDW	RDW	Chl a	Chl b	Ca	SS	Pr	EO
تابش UV	۲	۰/۳۰۴**	۰/۰۶**	۲۷۷/۰۴**	۲۷۷/۰۴**	۳/۴۴**	۷۴/۲۴**	۲۳/۶۵**	۱/۱۷**
نانوگرین	۲	۰/۶۳**	۰/۲۲**	۶۰۰/۶۳**	۶۰۰/۶۳**	۰/۰۷۵**	۵/۵۰۲**	۴/۷۰۶**	۰/۳۱**
UV× نانوگرین	۴	۰/۰۳*	۰/۰۱**	۶/۶۱*	۶/۶۱*	۰/۰۶۵**	۱/۳۳**	۲/۱۳**	۰/۰۲**
خطای آزمایشی	۱۸	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۱/۴۵	۱/۴۵	۰/۰۰۷	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات (CV٪)		۹/۳۵	۱۱/۷۱	۶/۹۹	۶/۹۹	۹/۱۸	۶/۹۴	۷/۷۴	۴/۴۹

ns، * و ** بهترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می باشد.

SDW: وزن خشک اندام هوایی، RDW: وزن خشک ریشه، Cha: کلروفیل a، Chb: کلروفیل b، Ca: کاروتنوئید، SS: قندهای محلول، Pr: پرولین، EO: درصد اسانس

(Weydert and Cullen, 2010).

برای تجزیه داده‌ها از نرم افزار SAS 9.1 استفاده شد و میانگین‌ها با آزمون Duncan در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش ماوراءبنفش و تیمار نانوذرات سبز روی بر صفاتی مانند وزن خشک ریشه، کاروتنوئید، قندهای محلول، پرولین و درصد اسانس ($P < 0.05$)، وزن خشک اندام هوایی، کلروفیل a و کلروفیل b ($P < 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۱).

بیشترین وزن خشک اندام هوایی (۲/۰۴ گرم) و بیشترین وزن خشک ریشه (۰/۸۲ گرم) مربوط به تیمار ترکیبی کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در تنش ۳۰ دقیقه ماوراءبنفش بود و کمترین مقدار وزن خشک اندام هوایی (۱/۱۱ گرم) و کمترین مقدار وزن خشک ریشه (۰/۳۳ گرم) در تیمار عدم مصرف نانوذرات سبز روی در شرایط تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش مشاهده شد که سبب کاهش ۲۷/۳ درصدی وزن خشک اندام هوایی و ۴۱ درصدی وزن خشک ریشه نسبت به شاهد شد. کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط عدم تنش و تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش به ترتیب سبب افزایش ۲۱/۷ و ۵۵/۷ و ۴۰/۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به عدم کاربرد نانوذرات سبز روی شد و همچنین کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی تحت تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش به ترتیب موجب افزایش ۱۱۵/۷ و ۸۷/۸ درصدی وزن خشک ریشه نسبت به عدم کاربرد نانوذرات سبز روی شد که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با عدم کاربرد آن داشتند. درمورد رنگیزه های فتوسنتزی بیشترین مقدار کلروفیل a (۸۴/۴۷)میلی‌گرم در گرم وزن تر و بیشترین مقدار کلروفیل b (۶۶/۲۹)میلی‌گرم در گرم وزن تردر کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی و عدم وجود تنش ماوراء بنفش مشاهده شد. کمترین مقدار کلروفیل a (۹۶/۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) کمترین

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش ماوراء بنفش و نانوسبز روی بر میزان صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی نعناع فلفلی

تیمار		وزن خشک ریشه (گرم)	وزن خشک اندام هوایی (گرم)	کلروفیل a (میلیگرم در گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم در گرم وزن تر)	کاروتنوئید (میلی گرم در گرم وزن تر)	قندهای محلول (میلی گرم در گرم وزن خشک)	پرولین (میلی گرم در گرم وزن تر)	درصد اسانس
بدون تنش ×	بدون نانوسبز روی	۰/۵۶ bc	۱/۵۲ bc	۱۹/۶۱ ef	۱۳/۸۴ f	۰/۱۶ d	۲/۷۸ g	۲/۳۸ e	۰/۶۸ g
	۵۰ میلی گرم در لیتر	۰/۵۸ bc	۱/۵۸ b	۳۹/۹۸ b	۲۵/۹۱ b	۰/۲۴ d	۴/۰۵ f	۵/۲۱ d	۱/۰۶ f
	۱۰۰ میلی گرم در لیتر	۰/۷۳ a	۱/۸۵ a	۴۷/۸۴ a	۲۹/۶۶ a	۰/۲۸ d	۵/۶۶ e	۵/۲۶ d	۱/۲۴ e
تنش ۳۰ دقیقه ×	بدون نانوسبز روی	۰/۳۸ de	۱/۳۱ cde	۶/۹۷ g	۵/۶۹ g	۱/۰۸ c	۷/۳۴ d	۶/۲۵ c	۱/۲۹ e
	۵۰ میلی گرم در لیتر	۰/۴۹ cd	۱/۴۲ bcd	۲۴/۳۱ d	۲۰/۸۶ d	۱/۰۹ c	۸/۵۷ c	۶/۴۳ bc	۱/۴۵ d
	۱۰۰ میلی گرم در لیتر	۰/۸۲ a	۲/۰۴ a	۳۱/۸۶ c	۲۳/۰۱ c	۱/۰۸ c	۸/۷۹ bc	۶/۵۶ bc	۱/۵۴ cd
تنش ۴۵ دقیقه ×	بدون نانوسبز روی	۰/۳۳ e	۱/۱۱ e	۴/۹۶ g	۴/۲ g	۱/۲۶ b	۹/۵۵ ab	۷/۰۸ bc	۱/۵۶ c
	۵۰ میلی گرم در لیتر	۰/۴۱ de	۱/۲۵ de	۱۸/۵۲ f	۱۵/۷۶ ef	۱/۳۱ b	۹/۶۸ ab	۷/۲۷ ab	۱/۶۹ b
	۱۰۰ میلی گرم در لیتر	۰/۶۲ b	۱/۵۶ bc	۲۲/۱ de	۱۶/۳۹ e	۱/۷۲ a	۹/۹ a	۸/۰۴ a	۱/۸۷ a

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

مقدار کلروفیل b (2/4) میلی‌گرم در گرم وزن تر) در شرایط تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش و عدم مصرف نانوذرات سبز روی مشاهده شد. کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط عدم وجود تنش ماوراءبنفش و تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش به ترتیب ۸۷، ۱۱۴، ۲۶۶/۶، ۳۰۴/۴، ۲۷۶/۲ و ۲۹۰/۲ درصد موجب افزایش کلروفیل b نسبت به عدم کاربرد آن شد. اعمال تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش در شرایط عدم کاربرد نانوذرات سبز روی سبب افزایش ۵۷۵ و ۶۸۷/۵ درصدی کاروتنوئید نسب به شاهد شد. کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی تحت تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش موجب افزایش ۳۶/۵ درصدی کاروتنوئید نسبت به عدم کاربرد نانوذرات سبز روی شد. بیشترین مقدار قندهای محلول (۹/۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک)، پرولین (۸/۰۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس (۱/۸۷ درصد) در کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی تحت تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش مشاهده شد و کمترین مقدار قندهای محلول (۲/۷۸ میلی گرم در گرم وزن خشک)، پرولین (۲/۳۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس (۰/۶۸درصد) در شرایط عدم مصرف نانوذرات سبز روی و عدم وجود تنش ماوراءبنفش مشاهده شد. اعمال تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش در شرایط عدم کاربرد نانوذرات سبز روی به ترتیب سبب افزایش ۱۶۴ و ۲۴۳/۵ درصدی قندهای محلول، ۱۶۲/۶ و ۱۹۷/۴ درصدی پرولین و ۸۹/۷ و ۱۲۹/۴ درصد اسانس نسبت به شاهد شد. کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط عدم وجود تنش ماوراءبنفش و تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش سبب افزایش میزان قندهای محلول، پرولین و درصد اسانس نسبت به عدم کاربرد آن شد (جدول۲).

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه بر خصوصیات آنتی اکسیدانی نعناع فلفلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		Phe	Fla	CAT	PAL
تابش UV	۲	۷۷/۴۱**	۵۸/۵۹**	۷۷/۱۳**	۴۹/۶۸**
نانوگرین	۲	۹/۳۹**	۷/۹۲**	۹/۰۴**	۶/۱۶**
UV × نانوگرین	۴	۱/۵۴^{ns}	۱/۰۰۶^{ns}	۰/۰۵^{ns}	۱/۱۷^{ns}
خطای آزمایشی	۱۸	۰/۹۷	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۵۹
ضریب تغییرات (CV٪)		۴/۵۶	۹/۵۴	۶/۴۸	۱۰/۰۲

در تحقیقی که توسط Pourakbar و Abedzadeh (2013) انجام گرفت نتایج نشان داد که تنش ماوراءبنفش منجر به کاهش قابل‌توجه رشد گیاه، از جمله کاهش طول اندام هوایی و ریشه، کاهش وزن تر و خشک گیاه شد. رشد ریشه نیز به‌طور غیرمستقیم تحت‌تأثیر قرار گرفت؛ کاهش فتوسنتز و محدود شدن انتقال ترکیبات پرانرژی و آلی از اندام هوایی به ریشه، باعث کاهش طول، حجم و وزن تر و خشک ریشه شد. این امر نسبت ریشه به اندام هوایی را تغییر داد و توان گیاه در جذب آب و مواد معدنی را کاهش داد.

در مطالعه ای که توسط Yeganehfar و Hosseini Serqin (2020) صورت گرفت به بررسی اثر نانوذرات سیلیکا بر روی گیاه تره‌تیزک (*Lepidium sativum L.*) تحت تنش ماوراءبنفش پرداختند. نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات سنتز شده به روش سبز در شرایط تنش محیطی توانست برخی شاخص‌های رشدی از جمله تعداد برگ و طول ساقه را بهبود بخشد و با حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی، از کاهش شدید عملکرد گیاه جلوگیری نماید. در تحقیقی، از نانوذرات روی سنتز شده به روش سبز به‌صورت محلول‌پاشی بر روی گیاه لوبیا تحت تنش شوری استفاده شد. نتایج نشان داد که کاربرد این نانوذرات موجب افزایش معنادار قندهای محلول کل و پرولین در برگ‌های گیاه گردید. این افزایش بیانگر آن است که نانوذرات روی توانسته‌اند مسیرهای متابولیکی مرتبط با تنظیم اسمزی و مقابله با استرس اکسیداتیو را در گیاه فعال سازند. پرولین و قندهای محلول به‌عنوان اسمولیت‌های کلیدی در حفاظت غشاها، تثبیت پروتئین‌ها و تعدیل تنش‌های ناشی از شوری عمل می‌کنند. بنابراین، نانوذرات سبز روی نه‌تنها باعث بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه شدند، بلکه مکانیسم‌های دفاعی طبیعی آن را نیز تقویت کردند (Mogazy & Hanafy, 2022)

اثر اصلی تنش ماوراءبنفش و اثر اصلی نانوذرات سبز روی بر محتوای فنل، فلاونوئید، آنزیم پال و آنزیم کاتالاز ($P < 0.05$) معنی دار بود. (جدول ۳).

در رابطه با اثر اصلی تنش ماوراءبنفش بیشترین مقدار فنل (۲۴/۰۳ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)، فلاونوئید (۹/۱۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر)، آنزیم پال (۹/۸۲ میکروگرم در گرم وزن تر) و آنزیم کاتالاز

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر اصلی تنش ماوراء بنفش و نانوذرات سبز روی بر میزان صفات آنتی اکسیدانی نعناع فلفلی

تیمار		فنل (میلی گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)	فلاونوئید (میلی گرم در گرم وزن تر)	آنزیم PAL (میکروگرم در گرم وزن تر)	کاتالاز (میکروگرم در گرم وزن تر)
ماوراء بنفش	بدون تنش	۱۸/۳۵ ^{c}	۵/۱۷ ^{c}	۳/۲۵ ^{c}	۴/۰۶ ^{c}
	تنش ۳۰ دقیقه	۲۲/۴۵ ^{b}	۸/۰۵ ^{b}	۶/۱ ^{b}	۷/۱۸ ^{b}
	تنش ۴۵ دقیقه	۲۴/۰۳ ^{a}	۹/۸۲ ^{a}	۹/۱ ^{a}	۹/۱۲ ^{a}
نانوسبز روی	بدون نانوسبز روی	۲۰/۴۶ ^{b}	۶/۷۷ ^{b}	۵/۱۳ ^{c}	۵/۸۴ ^{c}
	۵۰ میلیگرم در لیتر	۲۱/۹۵ ^{a}	۷/۸۷ ^{a}	۶/۲ ^{b}	۶/۸ ^{b}
	۱۰۰ میلیگرم در لیتر	۲۲/۴۱ ^{a}	۸/۳۹ ^{a}	۷/۱۳ ^{a}	۷/۷۲ ^{a}

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند

(۹/۱ میکروگرم در گرم وزن تر) در تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش مشاهده شد. تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با شاهد نشان داد و به ترتیب سبب افزایش ۲۲/۳ و ۳۱ درصدی فنل، ۷۶/۸و ۱۲۴/۶ درصدی فلاونوئید، ۵۵/۷ و ۹۰ درصد آنزیم پال و افزایش ۸۷/۷ و ۱۸۰ درصدی آنزیم کاتالاز نسبت به شرایط عدم وجود تنش ماوراءبنفش شد. کمترین مقدار فنل (۱۸/۳۵ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)، فلاونوئید (۴/۰۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر)، آنزیم پال (۵/۱۷ میکروگرم در گرم وزن تر) و آنزیم کاتالاز (۳/۲۵ میکروگرم در گرم وزن تر) در شرایط عدم وجود تنش ماوراءبنفش مشاهده شد. در رابطه با اثر اصلی نانوذرات سبزروی بیشترین مقدار فنل (۲۲/۴۱ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)، فلاونوئید (۷/۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر)، آنزیم پال (۸/۳۹ میکروگرم در گرم وزن تر) و آنزیم کاتالاز (۷/۱۳ میکروگرم در گرم وزن تر) در شرایط کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی مشاهده شد. کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی به‌ترتیب سبب افزایش ۹/۵ و ۷/۲ درصدی فنل، ۱۶/۴ و ۳۲ درصدی فلاونوئید، ۱۶ و ۲۴ درصدی آنزیم پال و ۲۰/۸ و ۳۹ درصدی آنزیم کاتالاز نسبت به عدم کاربرد آن شد. کمترین مقدار فنل (۱۸/۳۵ میلی‌گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)، فلاونوئید (۵/۸۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر)، آنزیم پال (۶/۷۷ میکروگرم در گرم وزن تر) و آنزیم کاتالاز (۵/۱۳ میکروگرم در گرم وزن تر)در شرایط عدم کاربرد نانوذرات سبز روی مشاهده شد (جدول ۴).

مطالعه‌ای که بر روی گیاه دارویی نعناع فلفلی به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی و نقش عوامل محرک زیستی و نانوذرات بر پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی آن انجام شد، مشخص گردید که تنش خشکی موجب تحریک سامانه‌های دفاعی و افزایش قابل توجه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. این افزایش بیانگر واکنش سازگاری گیاه در برابر تجمع گونه‌های فعال اکسیژن است که در شرایط کم‌آبی تولید می‌شوند. همچنین، محتوای ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی نیز در اثر خشکی افزایش یافت؛ به‌گونه‌ای که در خشکی ملایم، سطح این ترکیبات رشد بیشتری داشته و نسبت به شرایط بدون تنش افزایش معناداری نشان داد (Ostadi *et al*., 2022). در یک مطالعه‌ی دیگر، نانوذرات اکسید روی به

روش سبز و با استفاده از عصاره‌ی آبی نعناع فلفلی سنتز شدند و ویژگی‌های زیستی آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این نانوذرات علاوه بر داشتن ویژگی‌های ساختاری پایدار، دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی قابل‌توجهی نیز هستند. این یافته‌ها اهمیت سنتز سبز نانوذرات را در افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و کارایی زیستی آنها برجسته می‌سازد. از این رو، نانوذرات اکسید روی سنتز شده با عصاره‌ی نعناع فلفلی می‌توانند به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر و زیست‌سازگار برای تقویت سیستم دفاعی گیاهان و حتی در صنایع دارویی و غذایی مطرح شوند (Dos Reis *et al*., 2025). همچنین در مطالعه‌ای دیگر تأثیر هورمون زیستی اسید سالیسیلیک بر نعناع فلفلی بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که کاربرد این محرک‌ها موجب افزایش معنادار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و آنزیم پال گردید و در عین حال پراکسیداسیون لیپیدی (MDA) کاهش یافت (Jariani *et al*., 2024).

نتیجه گیری کلی

در این پژوهش، کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سبز روی به‌عنوان تعدیل‌کننده‌ی تنش در گیاه نعناع فلفلی تحت تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه اشعه ماوراءبنفش توانست اثرات مثبت قابل‌توجهی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه نشان دهد. افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها در گیاهان تیمارشده بیانگر بهبود ظرفیت فتوسنتزی بود. علاوه بر این، تیمار نانوذرات سبز روی موجب ارتقای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گردید، به‌طوری‌که کاربرد نانوذرات سبز روی به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش موجب تقویت فعالیت آنزیم‌های پال و کاتالاز شد. هم‌زمان، غلظت ترکیبات آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی همچون فنل‌ها و فلاونوئیدها افزایش یافت که به بهبود توانایی گیاه در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو کمک کرد. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات سبز روی توانست با بهبود عملکرد گیاه تحت تنش ماوراءبنفش، موجب ارتقای صفات مورفولوژیک و رشد اندام‌های هوایی و ریشه گردد و بدین ترتیب نقش مؤثری در افزایش تحمل گیاه در برابر شرایط تنش ایفا نماید. نکته حائز اهمیت در این مطالعه آن است که نانوذرات سبز روی به روش سبز و سازگار با محیط زیست تولید شدند. این رویکرد نه‌تنها باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی و حذف مواد شیمیایی خطرناک در فرایند تولید نانوذرات می‌شود، بلکه هم‌راستا با اصول کشاورزی پایدار و ایمن نیز قرار دارد. به همین دلیل، نانوذرات سبز روی علاوه بر کارایی بالا در بهبود رشد و تحمل گیاه در برابر تنش ماوراءبنفش، به‌عنوان گزینه‌ای دوستدار محیط زیست در مدیریت تنش‌های محیطی قابل استفاده هستند.

References

Abedzadeh, M, and Pourakbar L. 2013. Investigating the interaction between UV-B and UV-C rays and salicylic acid on some physiological and biochemical parameters of lemon balm (*Melissa Officinalis* L.). Journal of Sciences, Kharazmi University, 15(2): 1–2. (In Persian)

Ainsworth, E. A., and Gillespie, K. M. 2007. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. Nature protocols, 2(4), 875-877. https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102

Alizadeh, M., and Mahmoudi, E. 2016. The economic importance of medicinal plants in the world and Iran: Challenges and the necessity of attention to cultivation of medicinal plants. Proceedings of the National Conference on Medicinal, Aromatic and Spice Plants. SID. https://sid.ir/paper/884094/fa.(In Persian)

Alrubaie, E. A. A. A., and Kadhim, R. E. 2019. Effect of ZnO NPs Synthesized by Olive Leaves Extract in Chlorophyll Content and Some Antioxidant Enzymes of Mentha piperita L. Leaves. Plant Archives, 19(2), 740-744.

Amrhein, N., Gödeke, K. H., and Gerhardt, J. 1976. The estimation of phenylalanine ammonia-lyase (PAL)-activity in intact cells of higher plant tissue: I. Parameters of the assay. Planta, 131(1), 33-40.

Asgari Lajayer, H., Motasharizadeh, B., Sawaqbi Firoozabadi, Gh. R., and Hadian, J. 2014.Effect of copper and zinc on concentration and uptake of micronutrient (Cu, Zn, Fe and Mn) and macronutrient (phosphorus) in savory (*Satureja hortensis L.*) under greenhouse conditions. (Journal of Soil and Plant Interactions – greenhouse agriculture), **5**(3), 95–112.(In Persian).

Bandeira, M., Giovanela, M., Roesch-Ely, M., Devine, D. M., and da Silva Crespo, J. 2020. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. Sustainable chemistry and pharmacy. 15, 100223. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100223.

Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., and Chern, J. C. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two different assay procedures. Journal of Food and Drug Analysis, 10(2), 115–121. https://doi.org/10.38212/2312-6970.1745.

Demir, A. 2025. Green-synthesized silver nanoparticles from *Camellia sinensis*: mechanistic insights into phenolic-mediated multifunctional biological activities. BMC Plant Biology, 25(1), 1734. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07881-0

Dos Reis, R. A., da Silva, L. L., Pieretti, J. C., Creusot, B., Lahouari, S., Francius, G., and Seabra, A. B. 2025. Eco-friendly synthesis and biomedical potential of zinc oxide nanoparticles using (*Mentha piperita* L.) aqueous extract: Comparative analysis with chemically synthesized and commercial nanoparticles. Bioprocess and Biosystems Engineering, 48(8), 1323-1338. https://doi.org/10.1007/s00449-025-03178-6.

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry,

28(3), 350–356. https://doi.org/ 10.1021/ac60111a017.

Gezici, S., Turkmen, M., and Karahan, F. 2024. Exploring the anti-cancer properties of essential oils from some Lamiaceae species against human cancer cells with multivariate analysis. South African Journal of Botany, 166, 287-296. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.10.057

Hosseini Sarghain, S., and Yeganeh Far, Sh. 2020. Effect of silica nanoparticles on some anatomical and physiological traits of (*Lepidium sativum* L.) under ultraviolet stress. Plant Process and Function, 9(39), 231–244. https://sid.ir/paper/. 20.1001.1.23222727.1399.9.39.20.9.(In Persian).

Jariani, P., Sabokdast, M., Moghadam, T. K., Nabati, F., and Dedicova, B. 2024. Modulation of phytochemical pathways and antioxidant activity in peppermint by Salicylic acid and GR24: A molecular approach. Cells, 13(16), 1360. https://doi.org/10.3390/cells13161360.

Letchamo, W., Xu, H. L., and Gosselin, A. 1995. Variations in photosynthesis and essential oil in thyme. Journal of plant physiology, 147(1), 29-37. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81408-2

Lichtenthaler, H. K., and Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. In R. E. Anderson (Ed.), Current Protocols in Food Analytical Chemistry (pp. F4.3.1–F4.3.8). John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01.

Mogazy, A. M., and Hanafy, R. S. 2022. Foliar spray of biosynthesized zinc oxide nanoparticles alleviate salinity stress effect on Vicia faba plants. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 22(2), 2647-2662. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00833-9

Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., and Kakaei, K. 2022. Optimizing antioxidant activity and phytochemical properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) by integrative application of biofertilizer and stress-modulating nanoparticles under drought stress conditions. Plants, 12(1), 151. https://doi.org/10.3390/plants12010151.

Paquin, R., and Lechasseur, S. 1979. Observations sur une méthode de dosage de la proline libre dans les extraits de plantes. Canadian Journal of Botany, 57(18), 1851-1854. https://doi.org/10.1139/b79-237.

Piri, E., Babaeian, M., Tavassoli, A., and Esmaeilian, Y. 2011. Effects of UV irradiation on plants. African journal of microbiology research, 5(14), 1710-1716. https://doi.org/10.5897/AJMR11.263.

Sarikhani, H. (2014). Effect of UV-A Radiation on Growth and Some Physiological Properties of Peppermint (*Mentha piperita*). Plant Prod. Technol, 5(2), 35-44.

Seif Sahandi, M., Mehrafarin, A., Khalighi-Sigaroodi, F., Sharifi, M., and Naghdi Badi, H. 2019. Review on anatomical, phytochemical and pharmacological properties of peppermint (*Mentha piperita* L.). Journal of Medicinal Plants, 18(69), 16–33. SID.

https://sid.ir/paper/15669/fa.(In Persian)

Sîngeorzan, S. M., Păcurar, I., Morar, I. M., Truta, A. M., Albert, C. N., Criveanu, H., and Holonec, L. 2022. The influence of substrate types and bio-phytomodulators on spruce seed germination and seedling development (*Picea abies* [L.] Karst.). https://doi.org/ 10.15835/buasvmcn-hort:2022.0007

Thunugunta, T., Reddy, A. C., and Reddy D.C., L. 2015. Green synthesis of nanoparticles: current prospectus. In Nanotechnology Reviews (Vol. 4, Issue 4). Walter de Gruyter GmbH. https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0023

Trevisan, S. C. C., Menezes, A. P. P., Barbalho, S. M., and Guiguer, É. L. 2017. Properties of *Mentha piperita*: a brief review. World J Pharm Med Res, 3(1), 309-13.

Weydert, C. J., and Cullen, J. J. 2010. Measurement of superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase in cultured cells and tissue. Nature protocols, 5(1), 51-66.

Ying, S., Guan, Z., Ofoegbu, P. C., Clubb, P., Rico, C., He, F., and Hong, J. 2022. Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. In Environmental Technology & Innovation, 26, (102336):2-20. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102336

Effect of green Zn nanoparticles modulation on some quantitative and qualitative properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) under ultra-violet stress in hydroponic conditions

Soheila Jalilnejad[1], Amir Rahimi[2*], Sina Siavash-Moghaddam[3], Latifah Pourakbar[4], Mehdi Qiyazi[5]

1. Master's degree in Agroecology, Department of Plant Genetics and Production Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University.
2. Associate Professor,Department of Plant Genetics and Production Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University (Corresponding author)
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
4. Professor, Department of Biology, Faculty of Basic Sciences, Urmia University.
5. Associate Professor, Department of Plant Genetics and Production Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

Received: 23 February 2026 - Accepted: 6 May 2026 Available online 12 July 2026 -
DOI: 10.22092/mpt.2026.372359.1216

Abstract

Jalilnejad, S., Rahimi, A. Siavash Moghaddam, S., Pourakbar M., Qiyazi, M., Effect of green Zn nanoparticles modulation on some quantitative and qualitative properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) under ultraviolet stress in hydroponic conditions

Iranian Medicinal Plants Technology, Vol 7, No. 2, 2025 9-10: 57-70(in Persian)

Abstract

In order to investigate the effects of stress modulators on the properties of peppermint (*Mentha piperita* L.), an experiment was conducted in a factorial design based on a completely randomized design under ultraviolet (UV) stress conditions during the academic year 2023-2024 at Urmia University with three replications. The factors under study included green zinc nanoparticles at three levels (0, 50, and 100 mg per liter) and UV stress at three levels (0, 30, and 45 minutes). Regarding the morphological traits of peppermint, the results showed that the highest dry weight of aerial parts and root dry weight were obtained in the combined treatment of 100 mg per liter green zinc nanoparticles under 30 minutes of UV stress. Regarding the physiological traits of peppermint, the results indicated that the highest levels of chlorophyll a and chlorophyll b were found in the treatment of 100 mg per liter green zinc nanoparticles under no UV stress, while the highest levels of soluble sugars, carotenoids, proline, and essential oil

Email address of the corresponding author: e.rahimi@urmia.ac.ir

percentage were achieved in the combined treatment of 100 mg per liter green zinc nanoparticles under 45 minutes of UV stress. Concerning the measured antioxidant traits, the highest levels of phenol, flavonoids, and enzymes (peroxidase and catalase) were observed under 45 minutes of UV stress, and the lowest levels were found in the control. Based on these results, the foliar application of green zinc nanoparticles, particularly at a concentration of 100 mg per liter, has been able to somewhat reduce the harmful effects of UV stress.

Keywords: Antioxidant, Catalase enzyme, Essential oil, Flavonoids, Mint