

بررسی اثر تعدیل کنندگی نانوذرات سبز روی 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 جلیل نژاد^۱، امیر رحیمی^{۲*}، سینا سیاوش مقدم^۳، لطیفه پورا کبر^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 زیست شناسی، 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 - شناسانه برنمود رقمی: 10.22092/mp.2026.372359.1216

چکیده

جلیل نژاد، س.، رحیمی، ا.، سیاوش مقدم، س.، پورا کبر، ل.، قیاسی، م.،. بررسی اثر تعدیل کنندگی نانوذرات سبز روی 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- پیاپی ۱۳- پائیز و زمستان ۱۴۰۳ صفحه: ۷۰-۵۷

به منظور بررسی اثر تعدیل کننده های تنشی بر خصوصیات گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.)، آزمایشی به صورت 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 میلی گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل b (۲۹/۶۶ میلی گرم در گرم وزن تر) در تیمار کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط عدم تنش ماوراءبنفش و بیشترین میزان قندهای محلول (۹/۹ میلی گرم در گرم وزن خشک)، کاروتنوئید (۳۶/۵ درصد)، پرولین (۸/۰۴ میلی گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس (۱/۸۷ درصد) در تیمار ترکیبی کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی در شرایط تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش به دست آمد که از لحاظ آماری اختلاف معنی داری با شاهد نشان داد. در مورد صفات آنتی اکسیدانی اندازه گیری شده بیشترین میزان فنل، فلاونوئید و آنزیم ها (فنیل آلانین آمونیا لیاز (پال PAL) و کاتالاز) در تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش و کمترین میزان در شاهد بود. بر اساس این نتایج محلول پاشی نانوذرات سبز روی به ویژه غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر توانسته است تا حدودی اثرات زیان بار 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

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 به عنوان آنتی‌اکسیدان، ضد درد، ضد التهاب، ضد میکروبی، ضد سرطان، زه، ضد ویروسی، ضد آلرژی ضد توموری 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 از بین رفتن گیاهان شود؛ اما در گیاهان دارویی، اعمال تنش ماوراءبنفش به صورت کنترل شده می‌تواند باعث فعال شدن 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 علائم 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 نه تنها به عنوان سد فیزیکی عمل می‌کنند؛ بلکه با تولید فلاونوئیدها

رویکرد روز افزون استفاده از گیاهان دارویی و فرآورده‌های حاصله از آن نقش این گیاهان را در چرخه اقتصاد جهانی پررنگ تر کرده است. امروزه ترکیبات زیادی از گیاهان به عنوان نگهدارنده و طعم‌دهنده در صنایع غذایی، محافظت‌کننده و شاداب‌کننده پوست در صنایع آرایشی و بهداشتی و روغن‌های فرار مختلف در آروماتراپی^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند (Alizadeh & Mahmoodi, 2016). برخی از گیاهان دارویی متعلق به خانواده Lamiaceae حاوی ترکیبات فیتوشیمیایی^۲ با ارزشی هستند و براین اساس فعالیت بیولوژیکی قابل توجهی 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، عناصر معدنی 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 بازدارندگی 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

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 ضد میکروبی، فعال‌کننده ولکانیزاسیون^۳ و جذب ماوراءبنفش است (Bandeira et al., 2020). در چند سال گذشته، نانوذرات در زمینه‌های مختلف علم و فناوری، 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 باز کرده است (Thunugunta et al., 2015). امروزه سنتز سبز که از عصاره‌های گیاهی به‌جای عوامل شیمیایی صنعتی برای کاهش یون‌های فلزی استفاده می‌کند، توسعه یافته 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 تأثیر تنش ماوراءبنفش بر تغییر خصوصیات فیتوشیمیایی و عملکردی نعنای فلفلی و همچنین معرفی بهترین دز نانوذرات سبز روی به‌عنوان تعدیل‌کننده‌ی تنش در جهت افزایش بیوماس تولیدی نعنای فلفلی است.

مواد و روش‌ها

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 میلی گرم در لیتر) و اشعه ماوراءبنفش B (صفر، ۳۰، ۴۵) دقیقه (اتاقک UV دانشگاه ارومیه) با مشخصات $UV-B=2(15w)(LF-215m.)$ (312nm) 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 نعنای فلفلی از گلخانه گیاهان دارویی جهاد دانشگاهی ارومیه تهیه و در گلخانه دانشگاه ارومیه ریشه دار شدند. سپس قلمه‌های 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 نعنای 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 فرایندها 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 برگگی 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 برگگی شدند، هر روز در ساعت مشخص به مدت بیست روز در اتاقک UV به مدت ۳۰ و ۴۵ دقیقه تحت تنش ماوراءبنفش قرار گرفتند. هم‌چنین نانوذرات روی سنتز شده به روش سبز به صورت مساوی بر روی گیاهان محلول‌پاشی شد. در انتهای فاز رویشی نسبت به برداشت نمونه‌های برگگی 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 نعنای 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 به مدت 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 به مدت 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 هیتز 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 به مدت 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 به مدت 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 اندازه گیری شد. میزان جذب به دست آمده متناسب با رنگ محلول بود و این رنگ نیز با غلظت قندهای محلول ارتباط مستقیم داشت. به منظور تعیین غلظت قندهای محلول، منحنی استاندارد با استفاده از غلظت‌های مختلف گلوکز تهیه شد (Dubois *et al.*, 1956). به منظور اندازه گیری پرولین، استانداردهایی از آل پرولین با غلظت‌های مختلف از صفر تا ۰/۱ میکرومول بر میلی لیتر تهیه شد و پس از گذشت ۳۰ دقیقه، جذب محلول‌ها و نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری 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 میلی لیتر آب مقطر به درون بالن دستگاه کلونجر ۱۰۰۰ میلی لیتر ریخته و عمل اسانس گیری با حرارت دادن بالن شروع گردید. این عمل به مدت سه ساعت ادامه یافت و بعد دستگاه خاموش شد. جهت جمع آوری 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).

$$\text{وزن نمونه خشک (گرم)} \times 100 = \frac{\text{وزن اسانس استخراج شده (میلی لیتر)}}{\text{درصد اسانس}}$$

برای اندازه گیری محتوای فنل کل، از

معرف فولین-سیوکالتیو^۴ استفاده شد. نمونه‌ها به مدت 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 اندازه گیری شد (Ainsworth and Gillespie, 2007).

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

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

برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، کاهش جذب نوری محلول در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت شد. میزان کاهش جذب در این بازه زمانی به عنوان 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

۴ Folin-Ciocaltio

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

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

ns، * و ** به ترتیب 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 میلی گرم 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 میلی گرم 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 میلی گرم 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) میلی گرم در گرم وزن تر و بیشترین مقدار کلروفیل b (۶۶/۲۹) میلی گرم در گرم وزن تر در کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی و عدم وجود تنش ماوراء بنفش مشاهده شد. کمترین مقدار کلروفیل a (۹۶/۴) میلی گرم در گرم وزن تر) کمترین

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش ماوراء بنفش و نانوسبز روی بر میزان صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی نعنای 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 نانوسبز روی	۰/۵۶ ^{bc}	۱/۵۲ ^{bc}	۱۹/۶۱ ^{ef}	۱۳/۸۴ ^f	۰/۱۶ ^d	۲/۷۸ ^g	۲/۳۸ ^c	۰/۶۸ ^g
بدون تنش ×	۰/۵۸ ^{bc}	۱/۵۸ ^b	۳۹/۹۸ ^b	۲۵/۹۱ ^b	۰/۲۴ ^d	۴/۰۵ ^f	۵/۲۱ ^d	۱/۰۶ ^f
۵۰ 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
۱۰۰ میلی گرم در لیتر	۰/۳۸ ^{de}	۱/۳۱ ^{cde}	۶/۹۷ ^g	۵/۶۹ ^g	۱/۰۸ ^c	۷/۳۴ ^d	۶/۲۵ ^c	۱/۲۹ ^e
تنش ۳۰ دقیقه ×	۰/۴۹ ^{cd}	۱/۴۲ ^{bcd}	۲۴/۳۱ ^d	۲۰/۸۶ ^d	۱/۰۹ ^c	۸/۵۷ ^c	۶/۴۳ ^{bc}	۱/۴۵ ^d
۵۰ 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}
۱۰۰ میلی گرم در لیتر	۰/۳۳ ^c	۱/۱۱ ^e	۴/۹۶ ^g	۴/۲ ^g	۱/۲۶ ^b	۹/۵۵ ^{ab}	۷/۰۸ ^{bc}	۱/۵۶ ^c
تنش ۴۵ دقیقه ×	۰/۴۱ ^{de}	۱/۲۵ ^{de}	۱۸/۵۲ ^f	۱۵/۷۶ ^{ef}	۱/۳۱ ^b	۹/۶۸ ^{ab}	۷/۲۷ ^{ab}	۱/۶۹ ^b
۵۰ 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
۱۰۰ میلی گرم در لیتر								

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

(۱/۸۷ درصد) در کاربرد ۱۰۰ میلی گرم 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 میلی گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس (۰/۶۸ درصد) 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 میلی گرم 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 (جدول ۲).

مقدار کلروفیل (2/4) b میلی گرم در گرم وزن تر) در شرایط تنش ۴۵ دقیقه ماوراءبنفش و عدم مصرف نانوذرات سبز روی مشاهده شد. کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم 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 میلی گرم 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 میلی گرم در گرم وزن خشک)، پرولین (۸/۰۴ میلی گرم در گرم وزن تر) و درصد اسانس

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

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

در تحقیقی که توسط Pourakbar و Abedzadeh (2013) انجام گرفت نتایج نشان داد که تنش ماوراءبنفش منجر به کاهش قابل توجه رشد گیاه، از جمله کاهش طول اندام هوایی و ریشه، کاهش وزن تر و خشک گیاه شد. رشد ریشه نیز به طور غیرمستقیم تحت تأثیر 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 تره تیزک (*Lepidium sativum* L.) تحت تنش ماوراءبنفش پرداختند. نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات سنتز شده به روش سبز در شرایط تنش محیطی توانست برخی شاخص های رشدی از جمله تعداد برگ و طول ساقه را بهبود بخشد و با حفظ رنگیزه های فتوسنتزی، از کاهش شدید عملکرد گیاه جلوگیری نماید. در تحقیقی، از نانوذرات روی سنتز شده به روش سبز به صورت

محلول پاشی 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 برگ های گیاه گردید. این افزایش بیانگر آن است که نانوذرات روی توانسته اند مسیرهای متابولیکی مرتبط با تنظیم اسمزی و مقابله با استرس اکسیداتیو را در گیاه فعال سازند. پرولین و قندهای محلول به عنوان اسمولیت های کلیدی در حفاظت غشاهای، تثبیت پروتئین ها و تعدیل تنش های ناشی از شوری عمل می کنند. بنابراین، نانوذرات سبز روی نه تنها باعث بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه شدند، بلکه مکانیسم های 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 میلی گرم گالیک اسید در گرم وزن تر)، فلاونوئید (۹/۱۲ میلی گرم 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 نعنای فلفلی

تیمار	فصل (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	۴/۰۶ ^c
	تنش ۳۰ دقیقه	۲۲/۴۵ ^b	۸/۰۵ ^b	۷/۱۸ ^b
	تنش ۴۵ دقیقه	۲۴/۰۳ ^a	۹/۸۲ ^a	۹/۱۲ ^a
نانوسبز روی	بدون نانوسبز روی	۲۰/۴۶ ^b	۶/۷۷ ^b	۵/۸۴ ^c
	۵۰ میلیگرم در لیتر	۲۱/۹۵ ^a	۷/۸۷ ^a	۶/۸ ^b
	۱۰۰ میلیگرم در لیتر	۲۲/۴۱ ^a	۸/۳۹ ^a	۷/۷۲ ^a

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

درصدی آنزیم پال و ۲۰/۸ و ۳۹ درصدی آنزیم کاتالاز نسبت به عدم کاربرد آن شد. کمترین مقدار فصل (۱۸/۳۵) میلی گرم گالیک اسید در گرم وزن تر، فلاونوئید (۵/۸۴) میلی گرم 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).

مطالعه ای که بر روی گیاه دارویی نعنای فلفلی به منظور بررسی اثر تنش خشکی و نقش عوامل محرک زیستی و نانوذرات بر پاسخ های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی آن انجام شد، مشخص گردید که تنش خشکی موجب تحریک سامانه های دفاعی و افزایش قابل توجه فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی می شود. این افزایش بیانگر واکنش سازگاری گیاه در برابر تجمع گونه های فعال اکسیژن است که در شرایط کم آبی تولید می شوند. همچنین، محتوای ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی نیز در اثر خشکی افزایش یافت؛ به گونه ای 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 مطالعه دیگر، نانوذرات اکسید روی به

(۹/۱) میکروگرم در گرم وزن تر) در تنش ۴۵ دقیقه ماوراء بنفش مشاهده شد. تنش ۳۰ و ۴۵ دقیقه ماوراء بنفش از لحاظ آماری اختلاف معنی داری با شاهد نشان داد و به ترتیب سبب افزایش ۲۲/۳ و ۳۱ درصدی فصل، ۷۶/۸ و 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 ماوراء بنفش شد. کمترین مقدار فصل (۱۸/۳۵) میلی گرم گالیک اسید در گرم وزن تر، فلاونوئید (۴/۰۶) میلی گرم 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 ماوراء بنفش مشاهده شد. در رابطه با اثر اصلی نانوذرات سبز روی بیشترین مقدار فصل (۲۲/۴۱) میلی گرم گالیک اسید در گرم وزن تر، فلاونوئید (۷/۷۲) میلی گرم 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 میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی مشاهده شد. کاربرد ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سبز روی به ترتیب سبب افزایش ۹/۵ و ۷/۲ درصدی فصل، ۱۶/۴ و ۳۲ درصدی فلاونوئید، ۱۶ و ۲۴

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 قابل توجهی 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).

نتیجه‌گیری 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 قابل توجهی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه نشان دهد. افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها در گیاهان تیمار شده 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 نه تنها 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(1), 350-354.

- 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](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 Jalilnejad¹, Amir Rahimi^{2*}, Sina Siavash-Moghadam³, Latifah Pourakbar⁴, Mehdi Qiyazi⁵

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: February 2026 Accepted: May 2026 - DOI: 10.22092/mpt.2026.372359.1216

Abstract

Jalilnejad, S., Rahimi, A. Siavash Moghadam, 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