Research Article

Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research

DOI: 10.22092/ijmapr.2026.369663.3551

Vol. 42, No. 2, Page 347-370 (2026)

The effectiveness of mycorrhizal biofertilizer and carbon quantum dot nanoparticles on some morphophysiological indices of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under cadmium stress

Haniyeh Shabkhiz[1], Abdollah Javanmard[2*], Sara Mola Ali Abasiyan[3]and Mohammad Reza Morshedloo[4]

1. Ph.D. student of Agrotechnology- Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
2*-Corresponding author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran, E-mail: a.javanmard@maragheh.ac.ir
3-Soil and Water Research Dept., West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran
4-Department of Horticulture Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: 31/05/2025 Revised: 01/07/2026 Accepted: 02/07/20

Abstract

Background and objectives: The cultivation of medicinal and aromatic plants has long held an important place in traditional Iranian agricultural systems, which have contributed to agricultural diversity and sustainability. In recent years, agricultural soils contaminated with heavy metals have received considerable attention because of their adverse effects on agroecosystems. Cadmium (Cd) contamination can alter various morphological, physiological, biochemical, and molecular processes in plants. This study aimed to investigate the morphophysiological responses of grapefruit mint plants to carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under Cd stress conditions.

Methodology: To investigate the effects of carbon quantum dots and mycorrhizal fungi on the morphophysiological characteristics of grapefruit mint under Cd stress, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design (CRD) with three replications in the greenhouse of the Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Maragheh University. The first factor consisted of four Cd concentrations (0, 10, 20, and 40 mg Cd kg^{-1} dry soil), the second factor consisted of four CQD-NP concentrations (0, 5, 10, and 20 mg L^{-1}), and the third factor consisted of AMF inoculation and non-inoculation. Grapefruit mint rhizomes were initially cultivated in small pots and transferred to larger pots after three months. To contaminate the soil, cadmium nitrate was applied between layers of sieved soil before planting the grapefruit mint seedlings. In the biofertilizer treatments, 100 g of Mycorot biofertilizer was added at planting. Three weeks after the plants were fully established in the pots, CQD-NPs were foliar-applied at four growth stages, corresponding to plant heights of 10, 20, 30, and 40 cm. Finally, the data were analyzed using SAS statistical software, and treatment means were compared using the least significant difference (LSD) test at the 5% significance level.

Results: The results showed that increasing Cd stress significantly reduced plant height, leaf dry weight, leaf length, leaf number, chlorophyll index (SPAD), and root colonization percentage. The highest values for these traits were observed under non-stress conditions with the application

Copyright: © 2026 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

of 20 mg L^{-1} CQD-NPs and AMF. In contrast, essential oil (EO) content and antioxidant enzyme activities increased with increasing Cd stress. The highest EO content was observed under moderate Cd stress with the combined application of 20 mg L^{-1} CQD-NPs and AMF, whereas the lowest value was recorded under severe Cd stress without CQD-NP or AMF application. In addition, the application of CQD-NPs and AMF increased EO content by 87% compared with the control. Notably, the chlorophyll index (SPAD) decreased by 52% with increasing Cd stress intensity, even with the combined application of CQD-NPs and AMF. The highest activities of ascorbate peroxidase (APX) and guaiacol peroxidase (GPX) were observed under severe Cd stress (40 mg kg^{-1} soil). The application of CQD-NPs and AMF increased APX and GPX activities by 76.91% and 88.72%, respectively, compared with the control.

Conclusion: The combined application of CQD-NPs and AMF mitigated some adverse effects of Cd stress by improving the growth of grapefruit mint plants and modifying the essential oil content of this medicinal species.

Keywords: Biofertilizer, carbon quantum dot, essential oil, medicinal plants, phytoremediation

اثربخشی کود زیستی مایکوریزا و نانو کربن کوانتوم دات بر برخی از شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی نعناع گریپ‌فروت (*Mentha suaveolens × piperita*) تحت تنش کادمیوم

حانیه شب‌خیز[۱]، عبدالله جوانمرد[۲*]، سارا ملاعلی عباسیان[۳] و محمدرضا مرشدلو[۴]

۱- دانشجوی دکترای اگروتکنولوژی- اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، پست‌الکترونیک: a.javanmard@maragheh.ac.ir

۳- دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات آب و خاک، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان‌غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه

۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

چکیده

سابقه و هدف: کشت گیاهان دارویی و معطر از دیرباز در نظام‌های سنتی کشاورزی ایران جایگاه ویژه‌ای داشته و این نظام‌ها نقش مهمی در ایجاد تنوع و پایداری ایفا نموده‌اند. به‌تازگی زمین‌های کشاورزی آلوده به فلزات سنگین به دلیل تأثیر مخرب آنها بر اکوسیستم‌های کشاورزی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تنش کادمیوم باعث ایجاد تغییرات در فرایندهای مختلف مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی پاسخ مورفوفیزیولوژیک گیاه نعناع گریپ‌فروت به کاربرد نانو ذرات کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا تحت شرایط تنش کادمیوم اجرا شد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی اثر کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی گیاه نعناع گریپ فروت تحت تنش کادمیوم، آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه اجرا گردید. فاکتور اول شامل چهار غلظت کادمیوم (۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، فاکتور دوم سطوح نانوذره کربن کوانتوم دات (۰، ۵، ۱۰، ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و فاکتور سوم شامل تلقیح و عدم تلقیح با کود زیستی مایکوریزا بود. به منظور اجرای آزمایش، ریزوم‌های نعناع گریپ فروت در گلدانهای کوچک کشت شد و بعد از گذشت سه ماه از زمان کشت به گلدانهای بزرگ انتقال داده شدند. همچنین به منظور آلوده‌سازی خاک، نمک نیترات کادمیوم بین لایه‌های خاک الک شده اسپری و بعد اقدام به کشت نشاهای نعناع گریپ فروت گردید. علاوه بر این، در تیمارهای دارای کود زیستی، در زمان کشت نشاها، مقدار ۱۰۰ گرم از کود زیستی مایکوروت اضافه شد. در ادامه آزمایش، بعد از استقرار کامل گیاهان در گلدانها و پس از گذشت سه هفته از رشد نشاها، نانوذره کربن کوانتوم دات در چهار مرحله رشدی (ارتفاع بوته ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) روی گیاهان اسپری شد. در نهایت تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج: نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش کادمیوم، ارتفاع بوته، وزن خشک برگ، طول برگ، تعداد برگ، شاخص کلروفیل (اسپد) و درصد کلونیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. بیشترین میزان این صفات نیز در تیمار بدون تنش با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا حاصل شد. ولی میزان درصد اسانس و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه با افزایش تنش روند افزایشی را نشان دادند. بیشترین درصد اسانس در سطح تنش متوسط کادمیوم، با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا مشاهده شد. کمترین میزان این صفت به تیمار تنش شدید کادمیوم و بدون کاربرد کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا تعلق داشت. افزون بر این، نتایج این پژوهش حکایت از آن داشت که کاربرد نانو کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا میزان درصد اسانس نعناع گریپ فروت را ۸۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. شایان ذکر است که شاخص کلروفیل (اسپد) با افزایش شدت تنش کادمیوم، حتی با کاربرد تلفیقی کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا به میزان ۵۲ درصد کاهش را نشان داد. علاوه بر این، بالاترین میزان فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در سطح تنش شدید کادمیوم (۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بدست

آمد. به‌طوری‌که، کاربرد نانو ذرات کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز را به ترتیب ۷۶/۹۱ و ۸۸/۷۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد.
نتیجه‌گیری: نانو ذرات کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا با بهبود رشد گیاه نعناع گریپ فروت توانستند برخی اثرهای تنش فلز سنگین کادمیوم را تعدیل نمایند.

واژه‌های کلیدی: اسانس، کربن کوانتوم دات، کود زیستی، گیاه پالایی، گیاهان دارویی.

مقدمه

امروزه خاک‌های کشاورزی آلوده به فلزات سنگین به دلیل توسعه صنعتی به یک چالش زیست‌محیطی تبدیل شده است که می‌تواند بهره‌وری گیاهان را کاهش و امنیت غذایی جهانی را به خطر بیندازد. ازاین‌رو، برای دستیابی به تولید پایدار محصولات کشاورزی، نیاز به بازبینی جدی تولید محصولات کشاورزی در این خاک‌های آلوده است (Sana *et al*., 2024; Nizar *et al*., 2024). برخی از فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم و جیوه عناصر غیرضروری در تغذیه گیاهان هستند. کادمیوم از عناصر بسیار سمی است و در بین ۲۰ عنصر سمی برتر در رتبه هفتم قرار دارد و به دلیل تحرک زیاد و جذب سریع در سیستم‌های گیاهی خاک، محیط‌زیست را به‌طور مؤثری آلوده می‌کند (Muhammad *et al*., 2023). شایان ذکر است که کادمیوم مستقیماً منجر به تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود. این گونه‌های فعال اکسیژن به شکل پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، رادیکال هیدروکسیل (OH)، سوپراکسید (O^{2-}) و اکسیژن منفرد ($^1O_2$) در گیاه مشاهده می‌شوند (Khan *et al*., 2023; Khan *et al*., 2022). این ROSها باعث ایجاد اثرهای نامطلوب بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی، آنزیمی، آناتومیکی و مولکولی مختلف در گیاهان می‌شوند (Huihui *et al*., 2020). از نشانه‌های سمیت کادمیوم، می‌توان به توقف رشد، زرد شدن برگ‌ها، پژمرده شدن و در نهایت مرگ سلولی اشاره کرد (Nizar *et al*., 2024). فلزات سنگین می‌توانند بر توسعه، کمیت و ترکیب متابولیت ثانویه مانند اسانس گیاهان دارویی تأثیر منفی بگذارند (Chand *et al*., 2015). اثر فلزات سنگین بر بازده اسانس بسیاری از گیاهان دارویی ازجمله گونه‌های ریحان (*Ocimum* spp.) (Fattahi *et al*., 2019)، گونه‌های نعناع (*Mentha* spp.) (Prasad *et al*., 2010) و بادرنجبویه (*Melissa officinalis*) (Kilic & Kilic, 2017) مورد مطالعه قرار گرفته است. کاهش زیست‌توده خشک اندام هوایی و ریشه بابونه (*Matricaria recutita*) هنگام رشد در خاک آلوده به کادمیوم و سرب مشاهده شد (Stancheva *et al*., 2014). در مطالعه‌ای دیگر، تحت شرایط تنش کادمیوم کاهش محتوای کلروفیل و عملکرد اسانس نعناع اروپایی (*Mentha crispa* L.) گزارش گردید (Khanchi *et al*., 2024). علاوه بر این، نتایج پژوهشی نشان داد که کادمیوم و سرب به ترتیب ۱۵ و ۱۰ درصد زیست‌توده خشک ریشه و اندام هوایی را در گیاه دارویی مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) کاهش دادند (Stancheva *et al*., 2009). Zaid و همکاران (۲۰۲۲) مشاهده کردند با افزایش تنش کادمیوم میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز) گیاه دارویی نعناع وحشی (*Mentha avensis* L.) افزایش یافت.

نعناع گریپ‌فروت (*Mentha suaveolens* × *piperita*) متعلق به جنس *Mentha* (تیره Lamiaceae)، یک گیاه چندساله با برگ‌های بیضی شکل بزرگ و معطر است که به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود (Wang *et al*., 2016). نعناع گریپ فروت گیاهی با رشد سریع و محتوای فلاونوئید زیاد است و گلدهی آن در بهار و تابستان می‌باشد. گزارش شده که عصاره نعناع گریپ‌فروت دارای فعالیت ضد ویروس نقص ایمنی انسانی (HIV-1) است. ترکیبات اصلی اسانس نعناع گریپ‌فروت شامل لینالول و لینالول استات است، علاوه بر این ترکیبات دیگر اسانس این

گیاه شامل نرول، کاروون، ۸،۱-سینئول، نریل استات، تیمول، کاریوفیلن، لیمونن، دکان، بتا-پینن، اکتن-۳-ال و ویریدیفلورول هستند (Jahanafrooz *et al*., 2024؛ Yamasaki *et al*., 1998). نعناع گریپ‌فروت نوعی هلیوفیل است و شباهت ژنتیکی بالایی به نعناع سیبی (*Mentha suaveolens*) و نعناع آناناسی (*Mentha suaveolens cv. variegata*) دارد. علاوه بر این، پژوهش‌ها نشان داده که نعناع گریپ‌فروت دارای عملکرد اسانس بالایی در تابستان و زمستان است (Wang *et al*., 2016). نعناع گریپ‌فروت به‌طور گسترده‌ای به عنوان طعم‌دهنده و ادویه در تولید مواد غذایی و نوشیدنی‌ها استفاده می‌شود. اسانس این گیاه دارای خواص ضد التهابی، آنتی‌اکسیدانی، ضد نفخ و ضد اسپاسم است (Ahmadi *et al*., 2022؛ Zaki *et al*., 2024).

قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار (AMF) در اکوسیستم‌های طبیعی موجود هستند و می‌توانند ساختارهای میکوریزی را با بیش از ۸۰ درصد گیاهان خشکی‌زی تشکیل دهند. قارچ‌های مایکوریزا معمولاً به عنوان کود زیستی شناخته شده و تأثیر مثبتی بر رشد بسیاری از گیاهان میزبان دارند (Li *et al*., 2023). قارچ مایکوریزا با ترشح گلیکوپروتئین (گلومالین)، گلوبولین و اسیدهای آلی به عنوان کلات‌کننده فلزات سنگین در ریزوسفر برای کاهش اثر تنش ناشی از این فلزات عمل می‌کنند. بنابراین با کاهش فراهمی زیستی فلزات سنگین در خاک و کاهش جذب آنها توسط گیاهان میزبان نقش مهمی را ایفا می‌نمایند (Yang *et al*., 2017). همچنین کود زیستی مایکوریزا با تغییر مورفولوژی ریشه یا محیط ریزوسفری می‌تواند فلزات سنگین را در ریشه‌ها تثبیت نماید، بنابراین، انتقال فلزات سنگین به اندام‌های هوایی را کاهش و سمیت ناشی از این فلزات را به حداقل می‌رساند (Riaz *et al*., 2021). علاوه بر این، قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند تحمل به فلزات سنگین مانند کادمیوم را با تنظیم فرآیند متیلاسیون DNA بهبود ببخشند و در سلول‌های میزبان، بیان ژن‌های مرتبط با تحمل فلز و سم‌زدایی را افزایش دهند (Varga & Soulsbury, 2019؛ Li *et al*., 2022). افزون بر این، قارچ مایکوریزا چرخه مواد مغذی ضروری، به ویژه فسفر، نیتروژن و ریزمغذی‌ها را افزایش می‌دهد. آنها دسترسی زیستی این مواد مغذی را برای گیاهان افزایش داده که منجر به بهبود رشد و انعطاف‌پذیری گیاه در شرایط تنش می‌شود (Zhao *et al*., 2024). گزارش شده که بیش از ۹۰ درصد گونه‌های گیاهی دارویی با قارچ‌های مایکوریزا ارتباط همزیستی برقرار می‌کنند (Zhang *et al*., 2022). مطالعات اخیر انجام شده نشان داد که قارچ مایکوریزا می‌تواند جوانه‌زنی بذر، رشد، فعالیت متابولیک ثانویه، ترپن‌ها، فنل‌ها و فلاونوئید گیاهان دارویی را تقویت کند (Yuan *et al*., 2023). Gao و همکاران (۲۰۲۳) در گیاه یونجه (*Medicago sativa* L.) نشان دادند که گونه‌ای از قارچ مایکوریزای *Glomus mosseae* سبب افزایش میزان فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه گردید. همچنین گزارش شده که همزیستی با قارچ مایکوریزا منجر به افزایش سنتز متابولیت‌های ثانویه در گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis*) و ریحان (*Ocimum basilicum*) شده است (Putwattana *et al*., 2010).

به منظور بهبود رشد و ثبات عملکرد محصولات و رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار و توسعه پایدار امنیت غذایی، نیاز مبرمی به فناوری‌های جدید سبز و سازگار با محیط‌زیست وجود دارد. نانومواد نقش مهمی در رسیدگی به این چالش‌های پیش‌روی کشاورزی دارند (He *et al*., 2019). نانوذرات می‌توانند گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش فلزات سنگین را از بین ببرند (Rubio *et al*., 2019). در مقایسه با سایر نانومواد، کربن کوانتوم دات‌ها دارای پایداری نوری بهتر، بازده کوانتومی بالاتر، سطح سمیت پایین‌تر، کم هزینه بودن و زیست سازگاری عالی هستند که به کربن دات‌ها این امکان را داده که کاربردهای امیدوارکننده‌ای در آینده داشته باشند. اخیراً بسیاری از محققان کاربردهای بالقوه کربن دات‌ها را در زمینه‌های مختلف ازجمله کشاورزی بررسی کرده‌اند (Hoang *et al*., 2019). کربن دات‌ها این توانایی را دارند که غلظت یون‌های فلزات سنگین را در محصولات کاهش دهند (Du˘ci´c *et al*., 2021). افزون بر این، کربن دات‌ها دارای اثر فعال‌سازی بر اوره‌آز، دهیدروژناز

و کاتالاز خاک، تغییر pH خاک، افزایش فراوانی و تنوع جامعه میکروبی خاک، افزایش تثبیت یون کادمیوم، کاهش تحرک کادمیوم و کاهش آسیب ناشی از کادمیوم بر محیط‌زیست هستند (Chen, 2022). شایان ذکر است نانو کودها به عنوان منبع اصلی مواد مغذی در تولیدات کشاورزی، مستقیماً در متابولیسم و چرخه مواد غذایی شرکت می‌کنند و ارتباط نزدیکی با عملکرد و کیفیت محصول دارند. افزودن کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان تقویت‌کننده به انواع مختلف کودها می‌تواند واکنش‌های شیمیایی را تسریع، تجزیه مواد مغذی را تسریع، ویژگی‌های انتشار کود را بهبود و کارایی مصرف کود را افزایش دهد (Zhao *et al*., 2019). نانوکربن دات‌ها موجب تشکیل پنجه‌زنی بیشتر برنج، افزایش محتوای کلروفیل، تجمع ماده خشک و افزایش تعداد خوشه‌ها و دانه‌های مؤثر در خوشه آن گردید که به افزایش عملکرد دانه برنج منجر شد. بنابراین کربن دات‌ها ظرفیت بالایی در بهبود عملکرد و کیفیت محصول دارند (Wang *et al*., 2021). Li و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی کاربرد کربن کوانتوم دات در کاهش سمیت به فلز سنگین کادمیوم در گیاه دارابی (*Citrus maxima*)، نشان دادند که کربن کوانتوم دات‌ها می‌توانند به عنوان عامل تعدیل‌کننده کاهش سمیت کادمیوم در گیاه استفاده شوند. نتایج مطالعه Tan و همکاران (۲۰۲۱) بر روی برنج و ذرت نشان داد گیاهانی که در معرض کربن کوانتوم دات بودند میزان فتوسنتز در آنها افزایش یافت.

در نهایت به منظور رسیدن به اهداف کشاورزی پایدار، این پژوهش با هدف بررسی پاسخ مورفوفیزیولوژیک گیاه نعناع گریپ‌فروت به کاربرد نانو ذرات کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا تحت شرایط تنش کادمیوم اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۹۶ گلدان و سه تکرار در گلخانه گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه اجرا شد. فاکتور اول شامل چهار غلظت کادمیوم: صفر (شاهد)، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، فاکتور دوم سطوح نانوذره کربن کوانتوم دات (صفر (شاهد)، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و فاکتور سوم شامل تلقیح و عدم تلقیح با کود زیستی مایکوروت بود. به منظور اجرای آزمایش، ریزوم‌های نعناع گریپ فروت در گلدآنهای کوچک نایلونی برای تولید نشاء کشت و بعد از گذشت سه ماه از زمان کشت در مرحله ۱۵برگی نشاهای آماده به گلدآنهای بزرگ انتقال داده شدند. قبل از اجرای آزمایش به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌ای از خاک مزرعه در آزمایشگاه گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه مراغه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت (جدول ۱). همچنین به منظور آلوده‌سازی خاک، نمک نیترات کادمیوم با ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط و بعد محلول حاصل بین لایه‌های خاک الک شده اسپری شد و برای اطمینان از آلوده شدن حداکثری خاک، به مدت سه ماه رطوبت آن در حد ۸۰ درصد نگه داشته شد، بعد اقدام به کشت نشاهای نعناع گریپ فروت گردید (Azimychetabi *et al*., 2021). بعد از سه ماه، نشاءهای نعناع گریپ فروت در هر گلدان به شکل یکنواخت که حاوی ۴ کیلوگرم خاک آلوده بود کشت شدند. همچنین در تیمارهای دارای کود زیستی، در زمان کشت نشاها، مقدار ۱۰۰ گرم از کود زیستی مایکوروت اضافه گردید. این کود زیستی ترکیبی از سه گونه *Funneliformis mosseae*، *Rhizophagus intraradices* و *Claroideoglomus etunicatum* می‌باشد. در ادامه آزمایش، بعد از استقرار کامل گیاهان در گلدآنها و پس از گذشت سه هفته از رشد نشاها، نانوذره کربن کوانتوم دات در چهار مرحله رشدی روی گیاهان اسپری شد. زمانی که ارتفاع بوته نعناع گریپ‌فروت در تیمار شاهد به ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر رسید، محلول‌پاشی نانوذره کربن کوانتوم دات انجام شد. در پایان اعمال تیمارها (بعد از گلدهی کامل) صفات ارتفاع بوته، طول برگ، وزن خشک برگ، تعداد برگ، آنزیم آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز، درصد اسانس، دمای کانوپی (توسط دستگاه Testo 830-T_2) و اسپد (شاخص کلروفیل) اندازه‌گیری گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physicochemical characteristics of the experimental soil

Soil texture	Silt (%)	Sand (%)	Clay (%)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH	N (%)	P ($mg\ kg^{-1}$)	K ($mg\ kg^{-1}$)	Organic carbon (%)	Mn ($mg\ kg^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)	Cd ($mg\ kg^{-1}$)
Silty clay	50	10	40	0.81	8.11	0.08	7.56	342	0.94	7.76	7.46	1.20	0.001

درصد اسانس

برای استخراج اسانس از دستگاه کلونجر (مدل فارماکوپه بریتانیا) استفاده گردید. اسانس‌گیری به‌مدت سه ساعت از سرشاخه‌های گلدار نعناع گریپ فروت انجام شد. سپس اسانس‌های استخراج شده با سولفات سدیم خشک آبگیری و داخل ویال شیشه‌ای در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری شد (Morshedloo *et al*., 2017)، بعد از اسانس‌گیری، درصد و عملکرد اسانس طبق رابطه زیر محاسبه شد (Safaei *et al*., 2017).

رابطه ۱ درصد اسانس = (وزن خشک نمونه (گرم)/ وزن اسانس) × ۱۰۰

رابطه ۲ عملکرد اسانس = درصد اسانس × ماده خشک کل (گرم)

اسپد

شاخص کلروفیل (SPAD) از برگ‌های جوان توسط کلروفیل‌متر قابل حمل ثبت شد (Instruments SPAD-502, Osaka, Japan)

آسکوربات پراکسیداز

به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه نعناع گریپ فروت، ۰/۵ میلی‌مولار آسکوربات، ۱۰۰ میلی‌مولار بافر فسفات (۷/۷= پی‌اچ)، هیدروژن پروکساید (H_2O_2) دو میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از عصاره گیاهی استخراج شده با هم مخلوط شد، در نهایت تغییرات جذب نمونه‌ها در طول موج ۲۹۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتری در مدت ۶۰ ثانیه ثبت گردید (Nakano & Asada, 1981).

گایاکول پراکسیداز

برای سنجش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز، ۷۵۰ میکرولیتر گایاکول (۱۰ میلی‌مولار)، ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات و هیدروژن پروکساید سه درصد با هم مخلوط شد و بعد در مرحله آخر ۵۰ میکرولیتر عصاره گیاهی به آن اضافه گردید. تمامی مراحل انجام شده در اتاق تاریک و داخل ظروف فویل پیچی شده انجام شد. در نهایت تغییرات جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتری در مدت ۶۰ ثانیه ثبت شد (Yoshimura *et al*., 2000).

شناسایی ترکیبات اسانس

برای شناسایی ترکیبات اسانس گیاه نعناع گریپ فروت، از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل شده به طیف‌سنج جرمی (GC-MS) مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا، با ستون HP-5 MS (۵ درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر) استفاده گردید. در برنامه‌ریزی دمایی آون، ابتدا دما در عرض ۵ دقیقه به ۶۰

درجه سانتی‌گراد رسیده، سپس به تدریج دما با سرعت ۳ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد برسد. بعد از آن، به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه‌داری شد. هلیوم به عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. ولتاژ یونیزاسیون ۷۰ الکترون ولت، روش یونیزاسیون EI و دمای یونیزاسیون ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم ۱:۳۰) تنظیم شده بود و محدوده جذب جرمی از ۴۰ تا ۴۰۰ *m/z* بود. به منظور محاسبه شاخص بازداری ترکیبات، مخلوطی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک (C8-C40) تحت شرایط برنامه دمایی آنالیز نمونه اسانس به داخل سیستم GC تزریق شد. نرم‌افزار مورد استفاده Chemstation بود. محاسبه و شناسایی ترکیبات اسانس به کمک شاخص‌های بازداری خطی آنها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب مرجع (Adams, 2007) با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کامپیوتری انجام شد. برای جداسازی ترکیبات از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (FID) و ستون VF-5MS استفاده شد. دمای تزریق و آشکارساز به‌ترتیب روی ۲۳۰ و ۲۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شده بود. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم ۱:۲۴ بود. نمونه‌های اسانس به نسبت ۱:۱۰۰ در هگزان رقیق‌سازی و به میزان ۱ میکرولیتر تزریق شدند. کمی کردن ترکیبات اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح پیک و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام شد (Morshedloo *et al.*, 2018).

اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه

به منظور تعیین درصد همزیستی، ریشه‌های گیاه نعناع گریپ فروت به آزمایشگاه منتقل گردیدند، ریشه‌ها را به اندازه ۱ سانتی‌متر برش داده و بعد در داخل محلول KOH ۱۰ درصد به مدت ۱۰–۵ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شدند. سپس در ادامه آزمایش ریشه‌ها با آب مقطر شستشو داده شده و داخل محلول HCL ۲ درصد به مدت ۲۰–۱۵ دقیقه اسیدی شدند. آنگاه برای رنگ‌آمیزی ریشه‌ها در داخل تریپان بلو ۰/۰۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شد. بعد از رنگ‌آمیزی ریشه‌ها، دوباره با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس ریشه‌ها در محلولی که حاوی اسید لاکتیک، گلیسرول و آب بود به نسبت ۱:۱:۱ (V:V:V) تا زمان سنجش نگهداری شدند (Phillips & Hayman, 1970; Koske & Gemm, 1989). نمونه‌های رنگ‌آمیزی شده توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس مدل BH-2 مورد شناسایی و مطالعه قرار گرفتند. اندام‌ها و ریسه‌های قارچی که به رنگ آبی ظاهر شده بودند عکس‌برداری شدند. درصد کلونیزاسیون با روش خطوط متقاطع محاسبه گردیدند، به این صورت که برای هر تیمار آزمایشی، ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شدند و به‌صورت تصادفی داخل پلیت شیشه‌ای قرار گرفتند. سپس یک صفحه شطرنجی که به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر قبلاً تهیه و آماده شده بود زیر پلیت قرار گرفت. برای مشاهده و شمارش ریشه‌های آلوده به قارچ مایکوریزا و غیر آلوده، از یک استیرو میکروسکوپ (بینوکولار) با بزرگنمایی ×۴۰ استفاده شد. ریشه‌های آلوده و غیر آلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطعی را ایجاد کرده بودند، هریک به صورت مجزا و جداگانه شمارش شدند و درصد کلونیزاسیون از طریق رابطه زیر بدست آمد (Giovannetti & Mosse, 1980).

رابطه ۳

$$\text{درصد کلونیزاسیون} = \left[\frac{\text{مجموع ریشه‌های آلوده}}{\text{مجموع کل ریشه‌های آلوده و غیر آلوده}}\right] \times 100$$

در نهایت، بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk، تجزیه واریانس داده‌ها به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج

ارتفاع بوته، وزن خشک برگ و طول برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ارتفاع بوته و وزن خشک برگ نعناع گریپ فروت تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب‌های تیماری تنش کادمیوم× کربن کوانتوم دات و تنش کادمیوم × تلقیح با قارچ مایکوریزا قرار گرفتند. همچنین طول برگ نیز تحت تأثیر معنی‌دار کربن کوانتوم دات × تنش کادمیوم در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت (جدول ۲). بالاترین ارتفاع بوته (۵۲/۷۵ سانتی‌متر) و وزن خشک برگ (۳۲/۹۴ گرم در گلدان) در تیمار بدون تنش کادمیوم و با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات بدست آمد. همچنین بیشترین مقادیر این صفات در تیمار بدون کادمیوم و همزیستی با قارچ مایکوریزا مشاهده شدند. علاوه بر این، طول برگ این گیاه تحت تأثیر ترکیب تیماری کادمیوم× کربن کوانتوم دات قرار گرفت. بیشترین طول برگ در تیمار شاهد با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات مشاهده شد. کمترین میزان صفات مذکور به تیمار تنش شدید کادمیوم (۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و بدون کاربرد این محرک‌های رشد تعلق داشت (جدول ۴ و ۵).

تعداد برگ

نتایج نشان داد که تعداد برگ گیاه نعناع گریپ فروت تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب تیماری تنش کادمیوم × کربن کوانتوم دات× تلقیح با قارچ مایکوریزا در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). بالا رفتن سطوح تنش کادمیوم بر تعداد برگ گیاه تأثیر منفی گذاشت، به‌طوری‌که بیشترین تعداد برگ‌های حاصل (۸۹۳ عدد) متعلق به تیمار شاهد (بدون تنش کادمیوم) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا بود. کمترین تعداد برگ‌های نعناع گریپ فروت در تیمار تنش شدید و بدون کاربرد نانو ذره و قارچ مایکوریزا (۲۶۱ عدد) مشاهده شد (جدول ۳).

دمای کانوپی

دمای کانوپی تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل دوگانه کاربرد کربن کوانتوم دات × تنش کادمیوم قرار گرفت (۵ درصد) (جدول ۲). بالاترین دمای کانوپی در سطح تنش شدید کادمیوم و بدون کاربرد کربن کوانتوم دات (۲۹/۴۱ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. افزون بر این، کمترین (۱۵/۷۵ درجه سانتی‌گراد) میزان دمای کانوپی نیز به تیمار شاهد (بدون تنش کادمیوم) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات تعلق داشت (جدول ۵).

اسپد

نتایج بدست آمده از تجزیه واریانس بیانگر این بود که شاخص کلروفیل تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب تیماری تنش کادمیوم × کربن کوانتوم دات× تلقیح با قارچ مایکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش سمیت کادمیوم شاخص کلروفیل برگ نعناع گریپ فروت کاهش یافت ولی کاربرد کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا سبب تعدیل شرایط نامطلوب در گیاه شد. به‌طوری‌که بیشترین شاخص کلروفیل برگ (۴۵/۲۳) در تیمار بدون تنش کادمیوم (شاهد) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و مصرف قارچ مایکوریزا حاصل گردید (جدول ۳).

درصد و عملکرد اسانس

نتایج حاصل از تجزیه واریانس حکایت از آن داشت که درصد اسانس تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب تیماری تنش کادمیوم × کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا قرار گرفت و عملکرد اسانس تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل تنش کادمیوم × کربن کوانتوم دات واقع شد (۵ درصد) (جدول ۲). بیشترین درصد اسانس (۱/۹۰۶ درصد) نعناع گریپ فروت در تنش متوسط کادمیوم (۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با

کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا بدست آمد. همچنین بیشترین عملکرد اسانس (۰/۵۲۱ گرم در گلدان) نیز به تیمار تنش متوسط کادمیوم با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات تعلق داشت. کمترین درصد اسانس نیز در سطح تنش شدید، بدون کاربرد کربن کوانتوم دات و بدون تلقیح با قارچ مایکوریزا مشاهده شد (جدول ۳ و ۵).

ترکیبات اسانس

تجزیه‌وتحلیل طیف‌های GC-MS منجر به شناسایی ۱۳ ترکیب در اسانس نعناع گریپ فروت شد. ترکیبات اصلی اسانس لینالول و لینالیل استات است. بیشترین میزان ترکیب لینالول (۴۸/۵۰ درصد) در سطح تنش شدید (۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان لینالیل استات (۴۴/۷۲ درصد) نیز در سطح تنش متوسط (۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا بدست آمد (جدول ۶).

آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب تیماری تنش کادمیوم× کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا در سطح احتمال ۵ درصد قرار گرفتند (جدول ۲). نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش کادمیوم میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین میزان آنزیم‌های‌آسکوربات پراکسیداز (۲/۱۶۶ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) و گایاکول پراکسیداز (۰/۰۹۰۶ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در غلظت ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (تنش شدید) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا حاصل شد. افزون بر این، کمترین میزان این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز در شرایط بدون تنش کادمیوم و بدون کاربرد محرک‌های رشد به‌دست آمد (جدول ۳).

درصد کلونیزاسیون

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که درصد کلونیزاسیون ریشه تحت تأثیر معنی‌دار ترکیب تیماری تنش کادمیوم× کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش سطوح تنش کادمیوم، درصد کلونیزاسیون ریشه کاهش پیدا کرد. بیشترین درصد کلونیزاسیون در شرایط بدون تنش کادمیوم (شاهد) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات مشاهده شد. به‌طوری‌که تنش متوسط و شدید کادمیوم به ترتیب باعث کاهش ۲۱/۶۱ و ۳۱/۸۲ درصد کلونیزاسیون ریشه شد. شایان ذکر است کاربرد کربن کوانتوم دات درصد کلونیزاسیون ریشه را به میزان ۶۱/۶۱ درصد افزایش داد (شکل ۱).

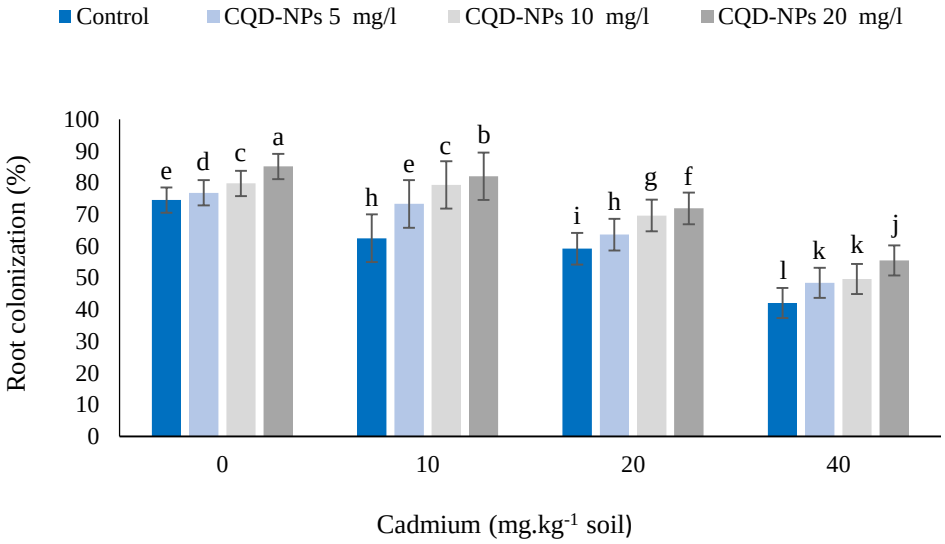
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نانو ذرات کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا بر صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه نعناع گریپ فروت (***Mentha suaveolens* × *piperita***)

تحت تنش کادمیوم

Table 2. ANOVA of carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs) and mycorrhizal fungus (AMF) effects on morphophysiological traits of *Mentha suaveolens* × *piperita* under cadmium (Cd) stress

S.O.V.	d.f.	Plant height	Leaf dry weight	Leaf length	Number of leaves	Canopy temperature	SPAD index	Essential oil content	Essential oil yield	Ascorbate peroxidase	Guaiacol peroxidase	Root colonization
Cd	3	2612.461**	543.633**	55.238**	1015067.594**	550.863**	762.9359**	3.5152**	0.320**	5.12010**	0.01203**	1051.983**
CQD-NPs	3	172.670**	50.330**	5.960**	52103.455**	44.266**	91.7428**	0.4851**	0.024**	0.36086**	0.00098**	215.999**
AMF	1	86.260**	10.434**	2.835**	17577.094**	13.127**	93.8126**	0.1611**	0.007**	0.04532**	0.00097**	108059.182**
Cd × CQD-NPs	9	1.658*	4.350**	0.333*	1586.705**	0.9215*	4.4284**	0.0682**	0.001*	0.09086**	0.00072**	7.795**
Cd × AMF	3	3.072*	0.780*	0.120$^{n.s}$	543.455**	0.4956$^{n.s}$	2.9981*	0.0128*	0.00005$^{n.s}$	0.00991**	0.00078**	1051.983**
CQD-NPs × AMF	3	1.836$^{n.s}$	0.203$^{n.s}$	0.092$^{n.s}$	380.538**	0.0373$^{n.s}$	1.762$^{n.s}$	0.0040$^{n.s}$	0.00002$^{n.s}$	0.00295*	0.00005*	215.999**
Cd × CQD-NPs × AMF	9	1.214$^{n.s}$	0.405$^{n.s}$	0.136$^{n.s}$	279.936**	0.1276$^{n.s}$	1.9454*	0.0112*	0.0002$^{n.s}$	0.00214*	0.00004*	7.795**
Experimental error	64	0.718	0.233	0.117	19.885	0.3229	0.7025	0.0049	0.0002	0.00059	0.00001	1.426
C.V. (%)		2.205	2.038	6.755	0.796	2.5811	2.4539	7.8607	5.478	2.19550	16.36692	3.560

$^{n.s.}$, *, and **: non-significant, significant at 5, and 1% probability levels, respectively.



شکل ۱- تأثیر تنش کادمیوم و نانوذرات کربن کوانتوم دات بر کلونیزاسیون ریشه نعناع گریپ فروت (*Mentha suaveolens* × *piperita*)

Figure 1. Influence of cadmium stress and carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs) on root colonization in *Mentha suaveolens* × *piperita*
Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).
The error bars on the columns are based on the … .

جدول ۳- مقایسه میانگین تعداد برگ، اسپد، درصد اسانس و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نعناع گریپ‌فروت (***Mentha suaveolens* × *piperita***) تحت تأثیر اثرمتقابل کادمیوم× نانو ذرات کربن کوانتوم دات× قارچ مایکوریزا

Table 3. Mean comparison of leaf number, SPAD, essential oil percentage, and antioxidant enzyme activities in *Mentha suaveolens* × *piperita* under cadmium (Cd) × carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs) × mycorrhizal fungi (AMF) interaction

Cd (mg.kg^{-1} soil)	CQD-NPs (mg.L^{-1})	AMF	Number of leaves	SPAD index	Essential Oil content (%)	Ascorbate peroxidase (µmol.min^{-1}.mg^{-1} protein)	Guaiacol peroxidase (µmol.min^{-1}.mg^{-1} protein)
0	0	AMF_1	742^{g}	36.63^{g-i}	0.634^{kl}	0.705^{x}	0.00119^{j}
	5		757^{f}	38.80^{ef}	0.694^{jk}	0.734^{v-x}	0.00129^{j}
	10		830.6^{d}	40.40^{cd}	0.699^{jk}	0.754^{u-w}	0.00152^{j}
	20		883^{b}	41.76^{bc}	0.820^{hi}	0.791^{tu}	0.00193^{j}
	0	AMF_2	755^{f}	37.56^{f-h}	0.674^{jk}	0.721^{wx}	0.00134^{j}
	5		771.3^{e}	39.46^{de}	0.772^{ij}	0.745^{v-x}	0.00160^{j}
	10		852.3^{c}	42.73^{b}	0.821^{hi}	0.764^{uv}	0.00184^{j}
	20		893^{a}	45.23^{a}	0.840^{hi}	0.808^{st}	0.00347^{j}
10	0	AMF_1	555.3^{n}	34.43^{l}	0.849^{hi}	0.815^{r-t}	0.0136^{i}
	5		591.3^{l}	34.73^{kl}	0.925^{gh}	0.852^{p-r}	0.0139^{i}
	10		619.3^{j}	36.58^{g-i}	1.051^{ef}	0.873^{pq}	0.0142^{i}

Cd (mg.kg^{-1} soil)	CQD-NPs (mg.L^{-1})	AMF	Number of leaves	SPAD index	Essential Oil content (%)	Ascorbate peroxidase (µmol.min^{-1}.mg^{-1} protein)	Guaiacol peroxidase (µmol.min^{-1}.mg^{-1} protein)
	20		622^{j}	37.26^{g-i}	1.068^{ef}	0.922^{no}	0.0150^{i}
	0		593.3^{l}	34.93^{kl}	0.929^{gh}	0.835^{q-s}	0.0140^{i}
	5	AMF$_2$	611.6^{k}	35.9^{i-k}	1.017^{fg}	0.863^{pq}	0.0145^{i}
	10		644^{i}	37.8^{fg}	1.035^{fg}	0.882^{op}	0.0158^{hi}
	20		674^{h}	38^{fg}	1.158^{de}	0.935^{mn}	0.0162^{hi}
	0		411^{u}	30.4^{pq}	1.019^{fg}	0.945^{mn}	0.0167^{hi}
	5	AMF$_1$	453^{t}	31.4^{op}	1.237^{cd}	0.965^{lm}	0.0171^{hi}
	10		501.6^{q}	32.5^{no}	1.278^{c}	0.990^{kl}	0.0185^{hi}
20	20		536.3^{o}	32.6^{m-o}	1.591^{b}	1.170^{j}	0.0191^{hi}
	0		427^{s}	32.9^{mn}	1.055^{ef}	0.955^{mn}	0.0174^{hi}
	5	AMF$_2$	483.6^{r}	33.9^{lm}	1.268^{cd}	0.975^{lm}	0.0181^{hi}
	10		513.3^{p}	35.1^{j-l}	1.499^{b}	1.016^{k}	0.0195^{hi}
	20		574.3^{m}	36.4^{h-j}	1.906^{a}	1.316^{i}	0.0212^{gh}
	0		261^{z}	21.7^{u}	0.282^{q}	1.403^{h}	0.0265^{fg}
	5	AMF$_1$	304.3^{yz}	26.06st	0.398^{op}	1.583^{f}	0.0281^{f}
	10		308.6^{yz}	27.2^{s}	0.503^{m-o}	1.896^{d}	0.0531^{d}
40	20		364.3^{w}	28.6^{r}	0.543^{l-n}	2.046^{b}	0.0615^{c}
	0		295^{z}	25.7^{t}	0.357^{pq}	1.493^{g}	0.0353^{e}
	5	AMF$_2$	312^{y}	27.03st	0.467^{n-p}	1.726^{e}	0.0493^{d}
	10		344^{x}	28.7^{r}	0.518^{mn}	1.940^{c}	0.0826^{b}
	20		385^{v}	29.9^{qr}	0.587^{k-m}	2.166^{a}	0.0960^{a}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).
AMF$_1$: Non-inoculation with AMF and AMF$_2$: Inoculation with AMF.

جدول ۴- مقایسه میانگین ارتفاع بوته و وزن خشک برگ نعناع گریپ فروت (***Mentha suaveolens* × *piperita***) تحت تأثیر اثر متقابل کادمیوم× قارچ مایکوریزا

Table 4. Mean comparison of plant height and leaf dry weight in *Mentha suaveolens* × *piperita* under cadmium (Cd) × mycorrhizal fungi (AMF) interaction

AMF	Cd (mg.kg^{-1} soil)	Plant height (cm)	Leaf dry weight (g.Pot^{-1})
AMF$_1$	0	48.79^{b}	29.41^{b}
	10	42.20^{d}	24.39^{c}
	20	35.37^{f}	21.46^{d}
	40	23.62^{h}	18.26^{f}
AMF$_2$	0	50.08^{a}	30.38^{a}
	10	44.04^{c}	24.74^{c}
	20	36.91^{e}	21.80^{d}
	40	26.54^{g}	19.24^{f}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).
AMF$_1$: Non-inoculation with AMF and AMF$_2$: Inoculation with AMF.

جدول ۵- مقایسه میانگین ارتفاع بوته، وزن خشک برگ، طول برگ، دمای کانوپی و عملکرد اسانس نعناع گریپ فروت (***Mentha suaveolens* × *piperita***) تحت تأثیر اثرمتقابل کادمیوم× نانو ذرات کربن کوانتوم دات

Table 5. Mean comparison of plant height, leaf dry weight, leaf length, canopy temperature, and essential oil yield in *Mentha suaveolens* × *piperita* under cadmium (Cd) × carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs) interaction

Cd (mg.kg^{-1} Soil)	CQD-NPs (mg.L^{-1})	Plant height (cm)	Leaf dry weight (g.Pot^{-1})	Leaf length (cm)	Canopy temperature (°C)	Essential oil yield (g.pot^{-1})
0	0	46.08^{d}	27.62^{d}	6.25^{c}	17.66^{j}	0.226^{j}
	5	48.41^{c}	28.58^{c}	6.50^{c}	17^{k}	0.248^{i}
	10	50.50^{b}	30.45^{b}	7.25^{b}	16.16^{l}	0.270^{h}
	20	52.75^{a}	32.94^{a}	7.66^{a}	15.75^{l}	0.293^{g}
10	0	40.66^{g}	23.27^{h}	5^{e}	21.25^{h}	0.311^{fg}
	5	42^{f}	23.99^{g}	5.25^{de}	20.83^{h}	0.330^{ef}
	10	44.25^{e}	25.04^{f}	5.58^{d}	18.91^{i}	0.339^{e}
	20	45.58^{d}	25.96^{e}	6.16^{c}	18.25^{j}	0.367^{d}
20	0	32.41^{j}	20.94^{k}	4.33^{f}	25.58^{d}	0.415^{c}
	5	35^{i}	21.43^{jk}	4.41^{f}	24.66^{e}	0.429^{c}
	10	37.33^{h}	21.91^{ij}	4.41^{f}	23.41^{f}	0.452^{b}
	20	39.38^{g}	22.24^{i}	5^{e}	22.33^{g}	0.521^{a}
40	0	21.66^{n}	16.21^{o}	2.58^{i}	29.41^{a}	0.155^{l}
	5	24.83^{m}	18.68^{n}	3.33^{h}	28.66^{b}	0.158^{l}
	10	26.16^{l}	19.74^{m}	3.41^{h}	26.58^{c}	0.206^{k}
	20	27.66^{k}	20.37^{l}	3.91^{g}	25.75^{d}	0.215^{jk}

Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

جدول ۶- ترکیبات اسانس نعناع گریپ فروت (***Mentha suaveolens* × *piperita***) تحت تأثیر تیمارهای مختلف کادمیوم، نانوذرات کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا

Table 6. Essential oil composition of *Mentha suaveolens* × *piperita* under different treatments of cadmium (Cd), carbon quantum dot nanoparticles (CQD-NPs), and mycorrhizal fungi (AMF)

Row	Essential oil compound	RI	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}
1	Thymol	1289	2.11	2.23	2.65	2.19	3.23	2.52	2.35	2.36	3.55	3.22	2.36	2.60	3.42	2.50	2.19	2.75
2	Neryle acetate	1361	1.08	1.05	1.38	1.20	1.39	1.70	1.59	1.65	1.66	1.79	1.46	1.67	1.79	1.55	1.60	1.84
3	Trans-Caryophyllene	1417	2.15	2.08	2.75	2.38	2.77	3.35	3.15	3.27	3.36	3.62	2.95	3.38	3.59	3.10	3.21	3.68
4	1,8-Cineole	1026	0.61	0.57	0.86	0.74	0.79	1.11	1.07	1.02	0.88	0.96	0.99	1.15	0.99	0.94	1.04	1.17
5	Linalool	1096	41.69	43.32	43.65	43.12	45.07	44.07	44.87	44.30	44.50	43.73	42.63	43.56	44.79	43.63	40.79	44.56
6	Nerol	1227	3.39	3.73	4.74	3.64	5.60	3.69	3.52	3.18	6.02	5.33	3.82	4.19	5.88	4.14	3.45	4.56
7	Carvone	1239	0.70	0.74	0.90	0.74	1.07	0.88	0.83	0.83	1.15	1.09	0.81	0.89	1.05	1.16	0.86	0.77
8	Linalyl acetate	1254	43.15	41.17	37.63	40.35	34.72	36.26	36.07	36.75	32.77	33.80	38.47	35.74	31.62	36.88	40.34	33.59
9	Limonene	1025	0.79	0.74	1.04	0.92	0.86	1.26	1.24	1.20	0.98	1.12	1.16	1.28	1.16	1.17	1.19	1.36
10	*n*-Decane	1000	0.82	0.72	1.20	0.96	0.94	1.51	1.43	1.41	1.05	1.34	1.23	1.42	1.27	1.38	1.33	1.63
11	*β*-Pinene	974	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.06
12	1-Octen-3-ol	977	0.08	0.09	1.10	0.08	0.08	0.11	0.12	0.11	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.11	0.10	0.11
13	Viridiflorol	1592	0.80	0.77	0.45	0.80	0.61	0.72	0.84	0.63	0.82	0.78	0.75	0.91	0.87	0.82	0.75	0.88
	Total indentified (%)		97.40	97.25	98.39	97.16	97.16	97.23	97.13	96.76	96.85	96.90	96.76	96.93	96.55	97.43	96.89	96.96

ادامه جدول ۶-

Continued Table 6. Essential oil composition of *Mentha suaveolens* × *piperita* under different treatments of …

Row	Essential oil compound	RI	T_{17}	T_{18}	T_{19}	T_{20}	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}	T_{25}	T_{26}	T_{27}	T_{28}	T_{29}	T_{30}	T_{31}	T_{32}
1	Thymol	1289	3.14	2.13	1.77	2.70	2.03	2.23	1.85	1.53	2.32	3.48	2.73	3.41	2.31	3.64	2.37	2.01
2	Neryle acetate	1361	1.44	1.79	1.36	1.66	1.89	1.64	1.60	1.02	2.07	1.56	1.89	2.09	1.91	1.62	1.70	1.90
3	Trans-Caryophyllene	1417	2.90	3.64	2.75	3.39	3.70	3.30	3.26	2.01	4.17	3.16	3.82	4.23	3.86	3.29	3.48	3.64
4	1,8-Cineole	1026	0.88	0.93	0.78	0.92	0.87	0.98	1.16	0.79	1.103	0.95	1.20	1.22	1.26	0.94	0.96	1.07
5	Linalool	1096	45.23	40.26	39.54	43.13	39.03	42.09	40.08	42.74	36.13	45.84	41.88	44.03	39.68	42.98	43.90	48.50
6	Nerol	1227	5.85	3.39	4.42	5	2.99	3.58	3	2.61	3.34	6.97	4.58	5.66	3.32	7.03	4.04	2.74
7	Carvone	1239	0.97	0.75	0.62	0.93	0.72	0.78	0.65	0.84	0.81	1.15	0.94	1.15	0.80	1.20	0.83	0.99
8	Linalyl acetate	1254	33.67	40.73	37.93	36.21	40.78	38.60	41.91	44.72	43.19	31.05	36.06	31.14	38.75	27.44	36.03	35.09
9	Limonene	1025	1	1.10	0.98	1.06	1.35	1.27	1.12	1.06	1.23	1.02	1.30	1.26	1.41	1.05	1.17	1.15
10	*n*-Decane	1000	1.15	1.24	1.08	1.91	1.47	1.53	1.19	0.97	1.51	1.20	1.55	1.50	1.44	1.14	1.35	1.30
11	*β*-Pinene	974	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
12	1-Octen-3-ol	977	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11
13	Viridiflorol	1592	0.75	0.63	0.86	0.77	0.72	1.77	0.79	0.89	0.91	0.88	0.58	0.77	0.86	1.34	0.69	0.91
	Total indentified (%)		97.11	96.72	92.23	97.83	95.70	97.92	96.76	99.32	96.90	97.37	96.67	96.59	95.73	91.80	96.67	99.45

T_1 (Cd_0 + CQD-NPs_0 + Non-inoculation with AMF), T_2 (Cd_0 + CQD-NPs_5 + Non-inoculation with AMF), T_3 (Cd_0 + CQD-NPs_{10} + Non-inoculation with AMF), T_4 (Cd_0 + CQD-NPs_{20} + Non-inoculation with AMF), T_5 (Cd_0 + CQD-NPs_0 +Inoculation with AMF), T_6 (Cd_0 + CQD-NPs_5 + Inoculation with AMF), T_7 (Cd_0 + CQD-NPs_{10} + Inoculation with AMF), T_8 (Cd_0 + CQD-NPs_{20} + Inoculation with AMF), T_9 (Cd_{10} + CQD-NPs_0 + Non-inoculation with AMF), T_{10} (Cd_{10} + CQD-NPs_5 + Non-inoculation with AMF), T_{11} (Cd_{10} + CQD-NPs_{10} + Non-inoculation with AMF), T_{12} (Cd_{10} + CQD-NPs_{20} + Non-inoculation with AMF), T_{13} (Cd_{10} + CQD-NPs_0 +Inoculation with AMF), T_{14} (Cd_{10} + CQD-NPs_5 + Inoculation with AMF), T_{15} (Cd_{10} + CQD-NPs_{10}+ Inoculation with AMF), and T_{16} (Cd_{10} + CQD-NPs_{20} + Inoculation with AMF), T_{17} (Cd_{20} + CQD-NPs_0 + Non-inoculation with AMF), T_{18} (Cd_{20}+ CQD-NPs_5 + Non-inoculation with AMF), T_{19} (Cd_{20} + CQD-NPs_{10} + Non-inoculation with AMF), T_{20} (Cd_{20} + CQD-NPs_{20} + Non-inoculation with AMF), T_{21} (Cd_{20} + CQD-NPs_0 +Inoculation with AMF), T_{22} (Cd_{20} + CQD-NPs_5 + Inoculation with AMF), T_{23} (Cd_{20} + CQD-NPs_{10} + Inoculation with AMF), T_{24} (Cd_{20} + CQD-NPs_{20} + Inoculation with AMF), T_{25} (Cd_{40} + CQD-NPs_0 + Non-inoculation with AMF), T_{26} (Cd_{40} + CQD-NPs_5 + Non-inoculation with AMF), T_{27} (Cd_{40} + CQD-NPs_{10} + Non-inoculation with AMF), T_{28} (Cd_{40} + CQD-NPs_{20} + Non-inoculation with AMF), T_{29} (Cd_{40} + CQD-NPs_0 +Inoculation with AMF), T_{30} (Cd_{40} + CQD-NPs_5 + Inoculation with AMF), T_{31} (Cd_{40} + CQD-NPs_{10}+ Inoculation with AMF), and T_{32} (Cd_{40} + CQD-NPs_{20} + Inoculation with AMF).

بحث

یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین، کادمیوم بوده که امنیت غذایی و بهره‌وری محصول را تهدید می‌کند (Sana *et al*., 2024). طبق نتایج بدست آمده از این پژوهش، کادمیوم سبب کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک برگ، طول برگ و تعداد برگ گیاه نعناع گریپ‌فروت گردید. از اثرهای نامطلوب تجمع کادمیوم می‌توان به اختلال در جذب آب و انتقال مواد مغذی، افزایش آسیب اکسیداتیو، اختلال در متابولیسم، توقف رشد، کاهش فتوسنتز و کاهش جوانه‌زنی گیاهان اشاره نمود (Hu *et al*., 2021). به‌طورکلی، سمیت فلزات سنگین، وزن تر و خشک گیاهان را کاهش می‌دهد. اما کاربرد نانوذرات با بهبود شرایط رشد، وزن خشک گیاه را افزایش و میزان تحمل گیاهان به شرایط نامطلوب تنش را بالا می‌برد (Bakhtiari *et al*., 2023). همچنین گیاهان از همزیستی با قارچ مایکوریزا برای کاهش اثرهای نامناسب فلزات سنگین سود می‌برند (Mazumder *et al*., 2025). قارچ مایکوریزا عمدتاً جذب مواد مغذی توسط گیاهان را تقویت می‌کند و می‌تواند در یک همزیستی متقابل با گیاه میزبان زندگی کند. وزیکول‌ها، هاگ‌ها، ریسه‌های خارجی و داخلی قارچ‌های مایکوریزا نقش حیاتی در کلات کردن آلاینده‌ها و تجمع فلزات دارند (Li *et al*., 2023). شایان ذکر است هیف‌های به سرعت در حال رشد قارچ مایکوریزا باعث همزیستی با گیاهان میزبان شده و این هیف‌ها می‌توانند تحت شرایط محیطی نامطلوب ناشی از سمیت فلز رشد کنند. در طول همزیستی، قارچ مایکوریزا می‌تواند تغییراتی را در گیاهان میزبان در پاسخ به این محیط سمی ایجاد کند. همچنین قارچ مایکوریزا با کاهش تنش اکسیداتیو ایجاد شده توسط فلزات سنگین با تغییر مورفولوژی ریشه، تحمل را در گیاهان میزبان ایجاد می‌کند و باعث افزایش زیست‌توده از طریق بهبود جذب آب و مواد معدنی می‌شود (Riaz *et al*., 2021). در مطالعه‌ای، Amirmoradi و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که کادمیوم در غلظت‌های مختلف سبب کاهش وزن خشک، سطح برگ، ارتفاع گیاه و درصد اسانس گیاه نعناع فلفلی (*Metha piperita* L.) گردید. Gong و Dong (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که کربن کوانتوم‌دات‌ها می‌توانند باعث بهبود رشد و نمو گندم شوند. طبق نتایج این تحقیق در مقایسه با شاهد، کربن‌دات تعداد ریشه، طول ریشه و ارتفاع بوته را افزایش داد.

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش شدت تنش کادمیوم، شاخص کلروفیل نعناع گریپ‌فروت کاهش معنی‌داری پیدا کرد. زیرا سطوح بالاتر کادمیوم می‌تواند بیوسنتز کلروفیل را مهار و فعالیت آنزیم‌های دخیل در تثبیت CO_2 را کاهش دهد و باعث اختلال در ساختار کلروپلاست گردد (Çıkılı & Samet, 2023). بررسی‌ها نشان داده که مراحل اولیه بیوسنتز کلروفیل (سنتز ۵ آمینو لوونیک اسید (ALA) و فعالیت آنزیم ۵ آمینو لوونیک اسید دهیدراتاز (ALAD) که تبدیل ALA به پرفوبیلینوژن را انجام می‌دهد)، از حساس‌ترین مراحل بیوسنتز کلروفیل نسبت به فلزات سنگین محسوب می‌شود. فلزات سنگین به شدت سبب مهار فعالیت ALAD و کاهش تجمع کلروفیل می‌شوند. ایجاد اختلال در مراحل مختلف سنتز کلروفیل بوسیله فلزات سنگین از دلایل اصلی کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان تحت تیمار عناصر سنگین است (Manio *et al*., 2003؛ Prasad & Freitas, 2003). در این پژوهش کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات بهمراه کود زیستی مایکوروت سبب تقویت رشد و شاخص کلروفیل گیاه گردید. زیرا کربن کوانتوم دات به‌طور قابل توجهی بیان ژن کلروفیل سنتاز را در برنج افزایش می‌دهد که به بهبود سنتز کلروفیل و جذب دی اکسیدکربن کمک می‌کند (Li *et al*., 2021). از سوی دیگر، قارچ‌های مایکوریزایی می‌توانند بیان ژن‌های دخیل در فتوسنتز را افزایش و اثربخشی آنزیم‌های مورد نیاز برای تثبیت کربن را در گیاهان تحت تنش کادمیوم افزایش دهند (Wahab *et al*., 2023).

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که بالاترین درصد اسانس در تنش متوسط کادمیوم (۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با کاربرد تلفیقی قارچ مایکوریزا و کربن کوانتوم دات بدست آمد. فلز سنگین کادمیوم بر توسعه، کمیت و ترکیب متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس گیاهان دارویی تأثیر می‌گذارد (Bakhtiari *et al*., 2023). گیاهان دارویی تیره نعناعیان (Lamiaceae) با فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا شناخته می‌شوند (Aebisher *et al*., 2021). خاصیت آنتی‌اکسیدانی عمدتاً به دلیل

وجود متابولیت‌های ثانویه گیاهی مانند ترپنوئیدها، فلاونوئیدها، فنول‌ها، آلکالوئیدها، گلیکوزیدها و تانن‌ها هستند. در گیاهان دارویی متابولیت‌های ثانویه در طول مسیرهای بیوسنتزی متابولیت‌های اولیه تولید می‌شوند. این ترکیبات را می‌توان به عنوان محصولات مسیرهای جانبی بیوشیمیایی در سلول‌های گیاهی در نظر گرفت. متابولیت‌های ثانویه نقش بسیار مهمی در محافظت از گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مانند فلزات سنگین، خشکی و شوری دارند و با قرار گرفتن گیاهان در شرایط تنش میزان آنها در گیاه افزایش یافته و از آسیب ROSها به بافت‌های گیاهی جلوگیری می‌کنند (Chaturvedi & Gupta, 2021). با توجه به اینکه اسانس‌ها ترکیبات ترپنوئیدی هستند، گلوکز و کربن دی اکسید به عنوان پیش‌ماده مهم و مناسب در سنتز اسانس مطرح می‌باشند. همچنین فتوسنتز و تولید فراورده‌های فتوسنتزی ارتباط مستقیمی با تولید اسانس دارند. بنابراین AMF از طریق کمک به جذب فسفر و نیتروژن و نقشی که این عناصر در تولید کلروفیل و تأمین آنزیم‌های مورد نیاز گیاه ایفا می‌نمایند، سبب افزایش میزان بافت‌های فتوسنتزی و در نهایت افزایش درصد اسانس گیاهان دارویی می‌شوند (Sangwan *et al*., 2001). علاوه بر این، یافته‌های این پژوهش نشان داد که کربن کوانتوم دات نقش بسیار مؤثری در افزایش درصد اسانس گیاه نعناع گریپ‌فروت داشت. افزایش تولید اسانس به دنبال تیمار کادمیوم و سرب در گیاه دارویی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) و مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) مشاهده شد (Raveau *et al*., 2021؛ Fattahi *et al*., 2019). Leggat و همکاران (۲۰۲۳) در گونه‌ای از مریم‌گلی (*Salvia rosmarinus*) مشاهده کردند به دلیل اثرگذاری قارچ مایکوریزا بر بیان ژن ترپن‌سنتاز، تولید اسانس مریم‌گلی افزایش پیدا کرد. علاوه بر بهبود درصد اسانس گیاه نعناع گریپ‌فروت با کاربرد تلفیقی نانوکربن‌دات و کود زیستی مایکوروت با وجود تنش کادمیوم، نتایج این پژوهش حکایت از آن داشت که بیشترین میزان لینالول در سطح تنش شدید کادمیوم، با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا بدست آمد. همچنین بالاترین میزان ترکیب لینالیل استات در سطح تنش متوسط (۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات و تلقیح با قارچ مایکوریزا حاصل شد. به‌طوری‌که کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا توانستند میزان ترکیبات لینالول و لینالیل استات را به‌ترتیب ۳۴/۲۳ و ۳۲/۸۱ درصد افزایش دهند. افزایش غلظت اسانس در محیط‌های استرس‌زا را می‌توان به کاهش سطح برگ و افزایش تعداد و تراکم غدد ترشح‌کننده اسانس نسبت داد. تنش‌های غیرزیستی مانند کادمیوم ممکن است بر مسیرهای ترکیبات مربوط به تولید اسانس تأثیر بگذارد (Mirzaie *et al*., 2020). همبستگی مثبتی بین افزایش غلظت ترپنوئیدها و تراکم کرک‌های غده‌ای در تعدادی از گیاهان مانند نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)، اسطوخودوس (*Lavendula angustifolia*) و پونه کوهی (*Origanum vulgare* L.) مشاهده شده است. افزایش غلظت ترپنوئیدها پس از تلقیح گیاهان دارویی با مایکوریزا اغلب به افزایش تراکم غده‌ها نسبت داده شده است (Kapoor *et al*., 2007; Morone-Fortunato *et al*., 2008). قارچ مایکوریزا می‌تواند محتوای ترکیبات فعال در گیاهان دارویی را ارتقاء دهد. چنین مزایایی ممکن است مربوط به تغییرات در بیان ژن‌های دخیل در بیوسنتز این ترکیبات باشد (Tavarini *et al*., 2018). علاوه بر این، قارچ مایکوریزا باعث ایجاد تغییراتی در غلظت فیتوهومون‌های گیاهی از قبیل اسید ژیبرلیک، اسید جاسمونیک و سیتوکینن می‌شود که این فیتوهورمون‌ها، تشکیل غده‌های ترشح‌کننده اسانس را افزایش داده و در نهایت منجربه تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه می‌شود (Kapoor *et al*., 2017). Lazzara و همکاران (۲۰۱۷) افزایش متابولیت‌های ثانویه هایپریسین (*Hypericin*) و پسودوهیپریسین (*Pseudohypericin*) در گل راعی (*Hypericum perforatum*) تلقیح شده با قارچ مایکوریزا را نسبت به گیاهان تلقیح نشده گزارش کردند. این افزایش را به دخالت متیل جاسمونات یا اسید سالیسیلیک در همزیستی میکوریز نسبت دادند که می‌تواند بر محتوای هایپریسین (*Hypericin*) تأثیر مثبت بگذارد.

دمای کانوپی گیاه تا حدی توسط تبخیر و تعرق از سطح کانوپی تنظیم می‌شود و می‌توان از آن برای استنباط تغییرات در تنظیم روزنه‌ها استفاده کرد (Javadian *et al*., 2022). دمای کانوپی به شدت بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد و

ارتباط نزدیکی با صفات فیزیولوژیک گیاه دارد (Jiang *et al.*, 2024). نتایج ما حکایت از آن داشت که با افزایش تنش کادمیوم دمای کانوپی افزایش یافت. ولی کاربرد نانو ذرات کربن کوانتوم دات تا حدودی دمای کانوپی را کاهش داد و سبب تعدیل شرایط نامطلوب تنش گردید. Tripathi و همکاران (۲۰۲۳) نیز بر روی گیاه برنج نتایج مشابهی را گزارش کردند.

طبق نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بالاترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز) گیاه نعناع گریپ‌فروت در تیمار تنش شدید کادمیوم (۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا حاصل شد. گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در مقادیر قابل توجهی توسط گیاهان تحت تنش کادمیوم تجمع می‌یابند که باعث افزایش نفوذپذیری غشا شده و سیستم غشای پلاسمایی را مختل می‌کند (Fan *et al.*, 2023). برای کاهش اثرهای نامطلوب تنش‌های غیرزنده، برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همانند آسکوربات پراکسیداز (APX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، گایاکول پراکسیداز (GPX) و گلوتاتیون ردوکتاز (GR) و چندین مولکول مانند گلوتاتیون، آسکوربات و کاروتنوئیدها به عنوان محافظت‌کننده و آنتی‌اکسیدآنهای غیر آنزیمی بوده، که گیاهان برای از بین بردن ROSها از آنها استفاده می‌کنند (Sana *et al.*, 2024؛ Muhammad *et al.*, 2023). البته سطوح بیش از حد هیدروژن پروکساید (H_2O_2) از طریق فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز به حداقل می‌رسد (Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2020). آنزیم آسکوربات پراکسیداز از آسکوربات به عنوان پیش‌ماده احیاءکننده استفاده نموده و H_2O_2 را در چرخه آسکوربات–گلوتاتیون (AsA-GSH) تجزیه می‌کند. چرخه آسکوربات–گلوتاتیون به عنوان سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی عمده در گیاهان در نظر گرفته می‌شود و نقش مهمی در کاتالیز پراکسید هیدروژن دارد (Singh *et al.*, 2024). گلوتاتیون (GSH)، یک آنتی‌اکسیدان قوی، جزء ضروری مسیر آسکوربات–گلوتاتیون (AsA-GSH) سلول‌های گیاهی است که ROS را جمع‌آوری کرده و از گیاه در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کند. اعمال تنش کادمیوم (Cd) به گیاهان می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیوسنتز GSH آنها را مهار کند و منجر به افزایش قابل توجه هیدروژن سطح پراکسید (H_2O_2) و آنیون سوپراکسید شود. چرخه گلوتاتیون–آسکوربات (AsA-GSH) در جمع‌آوری ROSها نقش دارد. چرخه AsA-GSH شامل چند واکنش است. آنزیم آسکوربات پراکسیداز ابتدا H_2O_2 درون سلولی را به آب تبدیل می‌کند، جایی که مونودهیدروآسکوربات (MDHA) تولید شده از AsA به عنوان دهنده الکترون عمل می‌کند. MDHA از طریق عمل مونودهیدروآسکوربات ردوکتاز (MDHAR) آسکوربات را بازسازی می‌کند، که خود به خود به دهیدروآسکوربات (DHA) تبدیل می‌شود. GSH متعاقباً DHA را به آسکوربات احیاء می‌کند که توسط دهیدروآسکوربات ردوکتاز (DHAR) به گلوتاتیون دی سولفید (GSSG) اکسید می‌شود. سپس گلوتاتیون ردوکتاز (GR) GSSG را به GSH احیاء می‌کند. گیاهانی با سطوح کافی GSH و AsA و آنزیم‌های APX، GR، MDHAR و DHAR که در مسیر AsA- GSH دخیل هستند، می‌توانند استرس اکسیداتیو را تحمل کنند (Tahir *et al.*, 2024؛ Zhou *et al.*, 2023). قارچ مایکوریزا و نانو ذرات کربن کوانتوم دات میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را تحت شرایط تنش کادمیوم افزایش دادند. آنها می‌توانند فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز را افزایش و تجمع ROSها را در گیاهان کاهش دهند و سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاهان را تقویت کنند (Su *et al.*, 2018؛ Zhao *et al.*, 2024). نتایج تحقیقی بر روی برنج حکایت از آن داشت که کربن کوانتوم‌دات‌ها توانستند میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز را به میزان ۱۲۵/۸۱ درصد افزایش دهند (Li *et al.*, 2020). Abdelhameed و همکاران (۲۰۲۴) بر روی گیاه چای ترش (*Hibiscus sabdariffa*) نشان دادند که کربن کوانتوم دات دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت ۱۵ پی‌پی‌ام میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز را به ترتیب ۲۹/۵ و ۳۸/۳ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند.

نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش سطوح تنش کادمیوم

درصد کلونیزاسیون ریشه کاهش یافت که بیانگر اثر بازدارنده تنش کادمیوم بر توسعه فعالیت قارچ مایکوریزا است. بیشترین درصد کلونیزاسیون در شرایط بدون تنش کادمیوم (شاهد) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر کربن کوانتوم دات بدست آمد. کاربرد کربن کوانتوم دات درصد کلونیزاسیون ریشه را به میزان ۶۱/۶۱ درصد افزایش داد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که غلظت بالای کادمیوم در خاک از تشکیل هیف‌های خارجی و رشد سایر ساختارهای قارچ مایکوریزا جلوگیری کرده و در نهایت سبب کاهش درصد کلونیزاسیون می‌شود (Jiang *et al.*, 2016).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اهمیت راهبردی گیاهان دارویی و اثر تنش‌های غیرزیستی بر رشد و بهره‌وری این گیاهان، شناسایی رویکردهای اکولوژیک برای افزایش تحمل و سازگاری گیاهان دارویی به تنش‌های غیرزیستی الزامیست. به‌طورکلی با توجه به بهبود رشد و خصوصیات مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی نعناع گریپ فروت با کاربرد نانوذرات کربن کوانتوم دات و قارچ مایکوریزا تحت شرایط تنش کادمیوم، به نظر می‌رسد استفاده از این محرک‌های رشد می‌تواند از لحاظ بهبود عملکرد، شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه مفید واقع شود و کاربرد این ترکیب‌ها به جای استفاده از کودهای شیمیایی به لحاظ حفاظت از محیط‌زیست، تقویت کشاورزی پایدار و توسعه پایدار امنیت غذایی، سودمند باشد. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش شدت تنش کادمیوم، اگرچه صفات کمی نعناع گریپ‌فروت به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ولی کاربرد تلفیقی نانو کربن کوانتوم دات و کود زیستی مایکوریزا، توانست نقش تعدیل‌کننده تنش را ایفا کند. به‌طوری‌که درصد اسانس و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نعناع گریپ‌فروت روند افزایشی را نشان دادند. بنابراین استفاده از کود زیستی مایکوریزا بهمراه نانو کربن کوانتوم دات می‌تواند با بهبود صفات مورفوفیزیولوژیک به سازگاری و رشد بهتر گیاهان دارویی در شرایط تنش کادمیوم منجر گردد.

References

- Abdelhameed, R., Abdalla, H. and Ibrahim, A., 2024. Unique properties of titanium dioxide quantum dots assisted regulation of growth and biochemical parameters of *Hibiscus sabdarifa* plants. BMC Plant Biology, 24(112): 1-14. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04794-2
- Adams, R.P., 2007. Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Allured Publishing Corporation, Carol Stream, 809p. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1995590
- Aebisher, D., Cichonski, J., Szpyrka, E., Masjonis, S., and Chrzanowski, G., 2021. Essential oils of seven Lamiaceae plants and their antioxidant capacity. Molecules, 26(13): 3793. https://doi.org/10.3390/molecules26133793
- Ahmadi, H., Morshedloo, M.R., Emrahi, R., Javanmard, A., Rasouli, F., Maggi, F., Kumar, M. and Lorenzo, J.M., 2022. Introducing three new fruit-scented mints to farmlands: Insights on drug yield, essential-oil quality, and antioxidant properties. Antioxidants, 11: 866. https://doi.org/10.3390/antiox11050866
- Amirmoradi, S., Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Danesh, S. and Fotovat, A., 2017. Effect of cadmium and lead on quantitative and essential oil traits of peppermint (*Mentha piperita* L.). Journal of Agroecology, 9(1): 142-157. https://doi.org/10.22067/jag.v9i1.51330
- Azimychetabi, Z., Sabokdast Nodehi, M., Karami Moghadam, T. and Motesharezadeh, B., 2021. Cadmium stress alters the essential oil composition and the expression of genes involved in their synthesis in peppermint (*Mentha piperita* L.). Industrial Crops & Products, 168: 1-7. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113602
- Bakhtiari, M., Raeisi Sadati, F. and Raeis Sadati, S.Y., 2023. Foliar application of silicon, selenium, and zinc nanoparticles can modulate lead and cadmium toxicity in sage (*Salvia officinalis* L.) plants by optimizing growth and biochemical status. Environmental Science and Pollution Research, 30(18): 54223-54233. https://doi.org/10.1007/s11356-023-25959-w
- Chand, S., Kumari, R. and Patra, D.D., 2015. Effect of nickel and vermicompost on growth, yield, accumulation of heavy metals and essential oil quality of tagetes minuta. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 18: 767-774.

https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1029992
- Chaturvedi, S. and Gupta, P., 2021. Plant secondary metabolites for preferential targeting among various stressors of metabolic syndrome. Studies in Natural Products Chemistry, 71: 221-261. https://doi.org/10.1016/B978 - 0 -323 -91095-8.00012-X
- Chen, Y., 2022. Effect of carbon quantum dots on dissimilatory iron reduction and cadmium transformation in soil and its microbial mechanism. Master's Thesis, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China.
- Çikili, Y. and Samet, H., 2023. Assessment of growth, metallic ion accumulation, and translocation of lavandin (*Lavandula* × *intermedia*) plant in cadmium stress. Journal of Agricultural Sciences, 29(2): 655-664. https://doi.org/10.15832/ankutbd.1075749
- Duˇci´c, T., Milenkovic, I., Mutavdzic, D., Nikolic, M., de Yuso, M.V.M., Vucinic, Z., Algarra, M. and Radotic, K., 2021. Estimation of carbon dots amelioration of copper toxicity in maize studied by synchrotron radiation-FTIR. Colloids Surfaces B Biointerfaces, 204: 111828. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111828
- Fan, P., Wu, L., Wang, Q., Wang, Y., Luo, H. and Song, J., 2023. Physiological and molecular mechanisms of medicinal plants in response to cadmium stress: Current status and future perspective. Journal Hazardous Materials, 450: 131008. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131008
- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M.K. and Barzegar, M., 2019. Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Industrial Crops Products, 138: 111584. http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111584
- Gao, Y.f., Jia, X., Zhao, Y.h., Ding, X.y., Zhang, C.y. and Feng, X.j., 2023. *Glomus mosseae* improved the adaptability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to the coexistence of cadmium-polluted soils and elevated air temperature. Frontiers in Plant Science, 14: 1-16. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1064732
- Giovannetti, M. and Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytologist, 84(3): 489-500. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x
- Gong, Y. and Dong, Z., 2021. Transfer, transportation, and accumulation of cerium-doped carbon quantum dots: Promoting growth and development in wheat. Ecotoxicology and Environmental Safety, 226: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112852
- Gutiérrez-Martínez, P.B., Torres-Morán, M.I., Romero-Puertas, M., Casas-Solís, J., Zarazúa-Villaseñor, P., Sandoval-Pinto, E. and Ramírez-Hernández, B.C., 2020. Assessment of antioxidant enzymes in leaves and roots of *Phaseolus vulgaris* plants under cadmium stress. Biotecnia, 2: 110-118. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i2.1252
- He, X., Deng, H. and Hwang, H.M., 2019. The current application of nanotechnology in food and agriculture. Journal of Food and Drug Analysis, 27: 1-21. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002
- Hoang, V.C., Dave, K. and Gomes, V.G., 2019. Carbon quantum dot-based composites for energy storage and electrocatalysis: Mechanism, applications and future prospects. Nano Energy, 66: 104093. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104093
- Hu, T., Wang, T., Wang, G., Bi, A., Wassie, M. and Xie, Y., 2021. Overexpression of FaHSP17.8-CII improves cadmium accumulation and tolerance in tall fescue shoots by promoting chloroplast stability and photosynthetic electron transfer of PSII. Journal Hazardous Materials, 417: 125932. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125932
- Jahanafrooz, Z., Mousavi, M.H., Akbarzadeh, S., Hemmatzadeh, M., Maggi, F. and Morshedloo, M.R., 2024. Anti-breast cancer activity of the essential oil from grapefruit mint (*Mentha suaveolens x piperita*). Fitoterapia, 174: 1-14. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105875
- Javadian, M., Smith, W.K., Lee, K., Knowles, J.F., Scott, R.L., Fisher, J.B., Moore, D.P., Van Leeuwen, W.J.D., Barron-Gafford, G. and Behrangi, A., 2022. Canopy temperature is regulated by ecosystem structural traits and captures the ecohydrologic dynamics of a semiarid mixed conifer forest site. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 127: 1-15. http://dx.doi.org/10.1029/2021JG006617
- Jiang, M., Chen, Z., Li, Y., Huang, X., Huang, L. and Huo, Z., 2024. Rice canopy temperature is affected by nitrogen fertilizer. Science Direct, 23(3): 824-835. https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.05.005
- Jiang, Q.Y., Tan, Sh.Y., Zhuo, F., Yang, D.J. and Ye, Zh.H., 2016. Effect of *Funneliformis mosseae* on the growth, cadmium accumulation and antioxidant activities of *Solanum nigrum.* Applied Soil Ecology, 98: 112-120. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.003
- Kapoor, R., Chaudhary, V. and Bhatnagar, A.K., 2007. Effects of arbuscular mycorrhiza and phosphorus application on artemisinin concentration in *Artemisia annua* L. Mycorrhiza, 17: 581-587. https://doi.org/10.1007/s00572-007-0135-4
- Kapoor, R., Anand, G., Gupta, P. and Mandal, S., 2017. Insight into the mechanisms of enhanced production of valuable terpenoids by arbuscular mycorrhiza. Phytochemistry Reviews, 16(4): 677-692. https://doi.org/10.1007/s11101-016-9486-9
- Khan, A., Ali, S., Khan, M., Hamayun, M. and Moon, Y.S., 2022. *Parthenium hysterophorus*'s endophytes: The second layer of defense against biotic and abiotic

stresses. Microorganisms, 10: 2217. https://doi.org/10.3390/microorganisms10112217
- Khan, M., Ali, S., Al Azzawi, T.N.I., Saqib, S., Ullah, F., Ayaz, A. and Zaman, W., 2023. The key roles of ROS and RNS as a signaling molecule in plant-microbe interactions. Antioxidants, 12: 268. https://doi.org/10.3390/antiox12020268
- Khanchi, S., Hashemi Khabir, S.H., Hashemi Khabir, S.H., Golmoghani Asl, R. and Rahimzadeh, S., 2024. The role of magnesium oxide foliar sprays in enhancing mint (*Mentha crispa* L.) tolerance to cadmium stress. Scientifc Reports, 14: 1-14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-65853-0
- Kilic, S. and Kilic, M., 2017. Effects of cadmium-induced stress on essential oil production, morphology and physiology of lemon balm (*Melissa officinalis* L., Lamiaceae). Applied Ecology Environmental Research, 15(3): 1653-1669. http://doi.org/10.15666/aeer/1503_16531669
- Koske, R. and Gemma, J., 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. Mycological Research, 92(4): 486-488. https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9
- Lazzara, S., Militello, M., Carrubba, A., Napoli, E. and Saia, S., 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi altered the hypericin, pseudohypericin, and hyperforin content in flowers of *Hypericum perforatum* grown under contrasting P availability in a highly organic substrate. Mycorrhiza, 27: 345-354. https://doi.org/10.1007/s00572-016-0756-6
- Leggatt, E., Griffiths, A., Budge, S., Stead, A.D., Gange, A.C. and Devlin, P.F., 2023. Addition of arbuscular mycorrhizal fungi enhances terpene synthase expression in *Salvia rosmarinus* cultivars. Life, 13(315): 1-17. https://doi.org/10.3390/life13020315
- Li, H., Xu, L., Li, Z., Zhao, S., Guo, D., Rui, L. and Zhou, N., 2021. Mycorrhizas affect polyphyllin accumulation of *Paris polyphylla* var. yunnanensis through promoting PpSE expression. Phyton, 90: 1535-1547. https://doi.org/10.32604/phyton.2021.015697
- Li, Y., Gao, J., Xu, X., Wu, Y., Zhuang, J., Zhang, X., Zhang, H., Lei, B., Zheng, M., Liu, Y. and Hu, C., 2020. Carbon dots as a protective agent alleviating abiotic stress on rice (*Oryza sativa* L.) through promoting nutrition assimilation and the defense system. ACS Applied Materials Interfaces, 12: 33575-33585. https://doi.org/10.1021/acsami.0c11724
- Li, J., Xiao, L., Cheng, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Xilong Wang, X. and Ding, L., 2019. Applications of carbon quantum dots to alleviate Cd2þ phytotoxicity in *Citrus maxima* seedlings. Chemosphere, 236: 1-11. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124385
- Li, H., Wang, H., Zhao, J., Zhang, L., Li, Y., Wang, H., Teng, H., Yuan, Z. and Yuan, Z., 2022. Physio-biochemical and transcriptomic features of arbuscular mycorrhizal fungi relieving cadmium stress in wheat. Antioxidants, 11(12): 2390. https://doi.org/10.3390/antiox11122390
- Li, H., Zhang, L., Wu, B., Li, Y., Wang, H., Teng, H., Wei, D., Yuan, Z. and Yuan, Z., 2023. Physiological and proteomic analyses reveal the important role of arbuscular mycorrhizal fungi on enhancing photosynthesis in wheat under cadmium stress. Ecotoxicology and Environmental Safety, 261: 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115105
- Mazumder, S., Bhattacharya, D., Lahiri, D. and Nag, M., 2025. Rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) community in growth management and mitigating stress in millets: A plant-soil microbe symbiotic relationship. Current Microbiology, 82: 1-23. https://doi.org/10.1007/s00284-025-04230-0
- Manio, T., Stentiford, E.I. and Millner, P.A., 2003. The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of *Typha latifolia* plants, growing in substrate containing sewage sludge compost and watered with metaliferus water. Ecological Engineering, 20: 65-74. https://doi.org/10.1016/s0045-6535(03)00537-x
- Mirzaie, M., Ladanmoghadam, A.R., Hakimi, L. and Danaee, E., 2020. Water stress modifies essential oil yield and composition, glandular trichomes and stomatal features of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. Journal Agricultural Science and Technology, 12: 27-36. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16807073.2020.22.6.15.1
- Morshedloo, M.R., Craker, L.E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H. and Maggi, F., 2017. Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. Plant Physiology and Biochemistry, 111: 119-128. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023
- Morone-Fortunato, I. and Avato, P., 2008. Plant development and synthesis of essential oils in micropropagated and mycorrhiza inoculated plants of *Origanum vulgare* L. ssp. hirtum (Link) Ietswaart. Plant Cell Tissue Organ Culture, 93: 139-149. https://doi.org/10.1007/s11240-008-9353-5
- Morshedloo, M.R., Maggi, F., Neko, H.T. and Aghdam, M.S., 2018. Sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit: essential oil variability in Iranian populations. Industrial Crops and Products, 111: 1-7. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.002
- Muhammad, L., Salahuddin, Khan, A., Zhou, Y., He, M., Alrefaei, A.F., Khan, M. and Ali, S., 2023. Physiological and ultrastructural changes in

Dendranthema morifolium cultivars exposed to different cadmium stress conditions. Agriculture, 13(317): 1-16. https://doi.org/10.3390/agriculture13020317
- Nakano, Y. and Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiology, 22: 867-880. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232
- Nizar A.M., Warhel N.A., Zeinab M.Y., Pashtiwan J.M. and Mohammed J.Q., 2024. Response of two mint cultivars peppermint (*Mentha piperita* L.) and curly mint (*Mentha spicata* var. crispa) to different levels of cadmium contamination. Pakistan Journal of Life and Social Sciences, 22(2): 99-116. https://doi.org/10.57239/PJLSS-2024-22.2.009
- Phillips, J.M. and Hayman, D., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 55(1): 158-161. https://doi.org/10.1016/S0007-1536 (70)80110-3
- Prasad, A., Singh, A.K., Chand, S., Chanotiya, C.S. and Patra, D.D., 2010. Effect of chromium and lead on yield, chemical composition of essential oil, and accumulation of heavy metals of mint species. Communications Soil Science and Plant Analysis, 41: 2170-2186. https://doi.org/10.1080/00103624.2010.504798
- Prasad, M.N.V. and Freitas, H., 2003. Metal hyper accumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. Electronic Journal Biotetechnology, 6: 275-321. https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-6
- Putwattana, N., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Chaiyarat, R., 2010. Immobilization of cadmium in soil by cow manure and silicate fertilizer, and reduced accumulation of cadmium in sweet basil (*Ocimum basilicum*). ScienceAsia, 36: 349-354. https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2010.36.349
- Raveau, R., Fontaine, J. and Lounès – Hadj Sahraoui, A., 2020. Essential oils as potential alternative biocontrol products against plant pathogens and weeds: A review. Foods, 9: 365. https://doi.org/10.3390/foods9030365
- Raveau, R., Fontaine, J., Bert, V., Perlein, A., Tisserant, B., Ferrant, P. and Lounès - Hadj Sahraoui, A., 2021. In situ cultivation of aromatic plant species for the phytomanagement of an aged-trace element polluted soil: Plant biomass improvement options and techno-economic assessment of the essential oil production channel. Science Total Environmental, 789: 147944. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147944
- Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., Deng, L., Wang, Y., Zhou, Y. and Anastopoulos, I., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. Journal Hazardous Materials, 402: 123919. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919
- Rubio, L., Pyrgiotakis, G., Beltran-Huarac, J., Zhang, Y., Gaurav, J., Deloid, G., Spyrogianni, A., Sarosiek, K.A., Bello, D. and Demokritou, P., 2019. Safer-by-design flame-sprayed silicon dioxide nanoparticles: The role of silanol content on ROS generation, surface activity and cytotoxicity. Particle and Fibre Toxicology, 16: 1-15. https://doi.org/10.1186/s12989-019-0325-1
- Safaei, L., Sharifi Ashorabadi, E. and Afyouni, D., 2017. The effects NPK, chemical and manure fertilizers investigation on the phenolic yield and essential oil components in *Thymus daenensis* L. Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 17(1): 1-15. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.354844.3004
- Sana, S., Ramzan, M., Ejaz, S., Danish, S., Salmen, S. and Ansari, M.J., 2024. Differential responses of chili varieties grown under cadmium stress. BMC Plant Biology, 24(7): 1-18. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04678-x
- Sangwan, N.S., Farooqi, A.H.A., Shabih, F. and Sangwan, R.S., 2001. Regulation of essential oil production in plants. Plant Growth Regulation, 34: 3-21. https://doi.org/10.1023/A:1013386921596
- Singh, K., Gupta, R., Shokat, S., Iqbal, N., Kocsy, G., Pérez-Pérez, J.M. and Riyazuddin, R., 2024. Ascorbate, plant hormones and their interactions during plant responses to biotic stress. Physiologia Plantarum, 176: 1-16. https://doi.org/10.1111/ppl.14388
- Stancheva, I., Geneva, M., Boychinova, M., Mitova, I. and Markovska, Y., 2014. Physiological response of foliar fertilized *Matricaria recutita* L. grown on industrially polluted soil. Journal Plant Nutrients, 37: 1952-1964. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.911891
- Stancheva, I., Geneva, M., Hristozkova, M., Boychinova, M. and Markovska, Y., 2009. Essential oil variation of *Salvia officinalis* (L.), grown on heavy metals polluted soil. Biotechnology Equipment, 23: 373-376. https://doi.org/10.1080/13102818.2009.10818442
- Su, L.X., Ma, X.L., Zhao, K.K., Shen, C.L., Lou, Q., Yin, D.M. and Shan, C.X., 2018. Carbon nanodots for enhancing the stress resistance of peanut plants. ACS Omega, 3(12): 17770-17777. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02604
- Tahir, H., Sajjad, M., Qian, M., Zeeshan Ul Haq, M., Tahir, A., Chen, T., Shaopu, S., Farooq, M.A., Ling, W. and Zhou, K., 2024. Transcriptomic analysis reveals dynamic changes in glutathione and ascorbic

acid content in mango pulp across growth and development stages. Horticulturae, 10: 694. https://doi.org/10.3390/horticulturae10070694
- Tan, T.L., Zulkifli, N.A., Zaman, A.S., Jusoh, M.B., Yaapar, M.N. and Rashid, S.A., 2021. Impact of photoluminescent carbon quantum dots on photosynthesis efficiency of rice and corn crops. Plant Physiology and Biochemistry, 162: 737-751. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.031
- Tavarini, S., Passera, B., Martini, A., Avio, L., Sbrana, C., Giovannetti, M. and Angelini, L.G., 2018. Plant growth, steviol glycosides and nutrient uptake as affected by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorous fertilization in *Stevia rebaudiana* Bert. Industrial Crops & Production, 111: 899-907. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.055
- Tripathi, S.R., Yadav, R.B., Yadav, B., Niraula, B. and Sunuwar, S., 2023. Efect of canopy temperature at flowering stage on drought tolerance and grain yield of rice genotypes. Nepalese Journal of Agricultural Sciences, 24: 91-102. http://esjindex.org/search.php?id=6279
- Varga, S. and Soulsbury, C.D., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi change host plant DNA methylation systemically. Plant Biology, 21(2): 278-283. https://doi.org/10.1111/plb.12917
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G.h., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, Ch. and Priya Pappula Reddy, S., 2023. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. Plants, 12: 1-40. https://doi.org/10.3390/plants12173102
- Wang, L., Zhang, H., Jin, P., Guo, X., Li, Y., Fan, C., Wang, J. and Zheng, Y., 2016. Enhancement of storage quality and antioxidant capacity of harvested sweet cherry fruit by immersion with β-aminobutyric acid. Postharvest Biology and Technology, 118: 71-78. http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.03.023
- Wang, C., Yang, H., Chen, F., Yue, L., Wang, Z. and Xing, B., 2021. Nitrogen-doped carbon dots increased light conversion and electron supply to improve the corn photosystem and yield. Environmental Science and Technology, 55: 12317-12325. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01876
- Yamasaki, K., Nakano, M., Kawahata, T., Mori, H., Otake, T., Ueda, N., Oishi, I., Inami, R., Yamane, M. and Nakamura, M., 1998. Anti-HIV-1 activity of herbs in Labiatae. Biological and Pharmaceytical Bulletin, 21: 829-833. https://www.jstage.jst.go.jp/browse/bpb/21/9/_contents/-char/en
- Yang, Y., He, C., Huang, L., Ban, Y. and Tang, M., 2017. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin-related soil protein distribution, aggregate stability and their relationships with soil properties at different soil depths in lead-zinc contaminated area. PLOS One, 12(8): e0182264. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182264
- Yoshimura, K., Yabuta, Y., Ishikawa, T. and Shigeoka, S., 2000. Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. Plant Physiology, 123: 223-234. https://doi.org/10.1104/pp.123.1.223
- Yuan, M.L., Zhang, M.H., Shi, Z., Yang, Sh., Zhang, M.G., Wang, Z., Wu, Sh.W. and Gao, J-K., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance active ingredients of medicinal plants: A quantitative analysis. Frontiers in Plant Science, 14: 1-12. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276918
- Zaid, A., Mohammad, F. and Siddique, K.H.M., 2022. Salicylic acid priming regulates stomatal conductance, trichome density and improves cadmium stress tolerance in *Mentha arvensis* L. Fronters in Plant Science, 13: 895427. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.895427
- Zaki, F.S., Khalid, K.A. and Ahmed, A.M., 2024. Mint species (*Mentha longifolia* and *Mentha spicata*) growth, essential oil generation and chemical components are impacted by turmeric curcumin applications. Discover Applied Sciences, 6(160): 1-17. https://doi.org/10.1007/s42452-024-05810-8
- Zhang, M., Shi, Z., Zhang, S. and Gao, J., 2022. A database on mycorrhizal traits of Chinese medicinal plants. Frontiers in Plant Science, 13: 840343. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.840343
- Zhao, Sh., Yan, L., Kamran, M., Liu, Sh. and Riaz, M., 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation: A promising strategy for cadmium-contaminated soils. Plants, 13: 1-23. https://doi.org/10.3390/plants13233289
- Zhao, Y., Zhao, P., Luo, J., Tian, L., Tian, Z. and Ndayambaje, J., 2019. Effects of different types of nano-carbon biological fertilizers on the growth and quality of crops. Nanoscience and Nanotechnology Letters, 11: 1644-1650. https://dx.doi.org/10.11674/zwyf.2025287
- Zhou, Y., Liu, J., Zhuo, Q., Zhang, K., Yan, J., Tang, B., Wei, X., Lin, L. and Liu, K., 2023. Exogenous glutathione maintains the postharvest quality of mango fruit by modulating the ascorbate-glutathione cycle. Peer Journal. 11: e15902. https://doi.org/10.7717/peerj.15902