

Original article

Effect of simultaneous application of carbon quantum dots and mycorrhizal fungi on the yield and essential oil quality of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under drought stress conditions

Mohammad Haghaninia¹, Abdollah Javanmard^{2*}

1. Ph.D. Graduate in Agrotechnology, Crop Ecology, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azerbaijan, Iran
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azerbaijan, Iran

Received 22 October 2024; Revised 25 November 2024; Accepted 1 December 2024

Extended abstract

Introduction

Rising global temperatures, irregular rainfall, and the depletion of freshwater resources have increased the need to develop sustainable strategies that can reduce the harmful effects of water scarcity on plant systems. Grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *M. piperita*), an aromatic and medicinally valuable plant, has attracted attention due to its wide uses in the pharmaceutical, cosmetic, and food industries. Despite its significance, little research has studied its physiological, biochemical, and secondary metabolite responses to drought stress, especially under the effects of emerging nanomaterials and beneficial microorganisms. Combining carbon quantum dots (CQDs) with AMF as a biotechnological approach may offer an innovative and eco-friendly way to enhance plant performance during drought. Therefore, this study aimed to examine the effects of CQDs and AMF on the physiological, biochemical, and essential oil characteristics of grapefruit mint under different drought conditions.

Materials and Methods

The experiment was carried out in 2023 under controlled greenhouse conditions using a factorial arrangement within a completely randomized design (CRD) with four replications. The study included two factors: irrigation level and treatment type. Irrigation was applied at three levels, representing full irrigation (90% of field capacity), mild drought stress (70%), and severe drought stress (50%). The treatment factor comprised six groups: control, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), carbon quantum dots at 5 ppm (CQD₅), carbon quantum dots at 10 ppm (CQD₁₀), AMF + CQD₁₀, and AMF + CQD₅. CQDs were applied as foliar sprays at designated concentrations, and AMF inoculum was added to the rhizosphere at planting following standard cultivation practices. The physiological and biochemical traits measured included root colonization percentage, nutrient content (N, P, K), photosynthetic pigments and carotenoids, total phenolics and flavonoids, dry matter, essential oil content and yield, and essential oil composition. All data were statistically analyzed using ANOVA appropriate for the factorial CRD design, and mean comparisons were performed using LSD at a 5% significance level.

Results and discussion

Drought stress, carbon quantum dots (CQDs), and AMF significantly influenced the physiological and biochemical traits of Grapefruit mint. Notably, root colonization reached its maximum under AMF

* Corresponding author: Abdollah Javanmard; E-Mail: a.javanmard@maragheh.ac.ir



inoculation without drought stress, confirming effective symbiotic establishment. In addition, nutrient concentrations (N, P, K) were highest under non-stress conditions with the combined AMF + CQD treatment, which contributed to enhanced nutrient assimilation and overall plant vigor. Similarly, chlorophyll *a* and *b* content peaked under optimal irrigation with the combined treatment, while dry matter accumulation was also greatest under non-stress conditions, reflecting improved photosynthetic efficiency and biomass production. Conversely, under mild drought stress, carotenoids, total phenolics, and flavonoids were significantly elevated with the combined AMF + CQD treatment, indicating the activation of antioxidant defenses and osmotic adjustment mechanisms. These findings suggest that moderate drought can stimulate secondary metabolism, thereby enhancing plant resilience to water deficit. Furthermore, essential oil content and yield were maximized under mild drought stress with AMF + CQD₁₀, highlighting a synergistic effect between moderate water deficit and the treatment on secondary metabolite production. The essential oil profile was dominated by linalyl acetate, linalool, thymol, and geranyl acetate. Interestingly, CQD₅ without drought stress produced the highest linalyl acetate content, whereas mild drought stress combined with CQD₁₀ resulted in maximum linalool accumulation, demonstrating that both drought severity and CQD concentration regulate essential oil biosynthesis and composition.

Conclusion

In summary, the integration of carbon quantum dots with arbuscular mycorrhizal inoculation appears to be an effective, eco-friendly, and sustainable strategy to improve drought tolerance in grapefruit mint. This combined approach not only mitigates the negative impacts of water deficit but also enhances physiological performance, biochemical resilience, and essential oil quantity and quality. The results highlight the potential of bio-nano synergistic technologies as innovative tools for sustainable medicinal plant production, especially under increasingly variable climatic conditions. These findings may contribute to the development of advanced agricultural practices aimed at reducing chemical fertilizer dependency while improving crop productivity and phytochemical richness.

Keywords: Biofertilizer, Nanoparticles, Photosynthetic pigments, Secondary metabolites, Sustainable agriculture

تأثیر کاربرد هم‌زمان کربن کوانتوم دات و قارچ میکوریزا بر بهره‌وری و کیفیت اسانس نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*) در شرایط تنش خشکی

محمد حقانی نیا^۱، عبدالله جوانمرد^{۲*}

۱. دانش‌آموخته دکتری اگروتکنولوژی- اکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران
۲. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: رنگیزه‌های فتوسنتزی کشاورزی پایدار کود زیستی متابولیت‌های ثانویه نانوذرات	نعناع گریپ‌فروتی (<i>Mentha suaveolens</i> × <i>Piperita</i>)، به دلیل کاربردهای گسترده در صنایع دارویی، غذایی و آرایشی، گیاهی ارزشمند است. با این حال، تحقیقات محدودی در مورد پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این گیاه به تنش‌های محیطی صورت گرفته است. در این پژوهش، با هدف ارائه رویکردی نوآورانه، از کربن کوانتوم دات (CQD) در کنار قارچ میکوریزا آربوسکولار (AMF) برای بهبود مقاومت این گیاه به خشکی استفاده شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتور اول آبیاری شامل سه سطح بدون تنش (شاهد)، تنش خفیف و تنش شدید (به ترتیب آبیاری در ۷۰، ۹۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم شامل قارچ میکوریزا آربوسکولار (AMF)، کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام (CQD5 ppm)، کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام (CQD10 ppm)، تیمار AMF+CQD10 و تیمار AMF+CQD5 و شاهد (عدم مصرف) بود. نتایج نشان داد بالاترین درصد کلونیزاسیون ریشه (۷۵/۴۸ درصد) در شرایط ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش) و با کاربرد AMF به دست آمد. همچنین، در شرایط بدون تنش، تیمار AMF+CQD10 منجر به افزایش عناصر غذایی (نیترژن، فسفر و پتاسیم)، رنگیزه‌های فتوسنتزی و وزن خشک اندام هوایی گردید. با این حال، بالاترین مقادیر فنل، فلاونوئید، محتوا و عملکرد اسانس در شرایط تنش خفیف با کاربرد تیمار AMF+CQD10 ثبت شد. علاوه بر این، تجزیه ترکیبات اسانس نشان داد که لینالیل استات، لینالول، تیمول و ژرانیل استات ترکیبات غالب بودند. کاربرد کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام در شرایط بدون تنش بیشترین میزان لینالیل استات را تولید کرد، در حالی که تنش خفیف همراه با AMF+CQD5 به بالاترین مقدار لینالول منجر شد. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که کاربرد کربن کوانتوم دات با میکوریزا می‌تواند روشی کارآمد و پایدار برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی باشد و به توسعه راهبردهای نوین در کشاورزی پایدار کمک می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱	
تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵ ۲۰۳-۱۸۱ (۱): ۱۹	

مقدمه

مختلف به کار می‌رود. این گیاه دارای رایحه‌ی قوی گریپ-فروت است که در چای، آبمیوه، دسر و سالاد مورد استفاده قرار می‌گیرد (Jahanafrooz et al., 2024). اسانس نعناع گریپ‌فروتی دارای مقادیر بالایی از ترکیبات مؤثره همچون لینالول، لینالول استات، آلفا ترپینئول و ژرانیل استات است که همگی دارای بوی خاصی بوده و می‌توان از آن‌ها در صنایع عطرسازی استفاده نمود (Bozovic et al., 2015). در خانواده‌ی نعناعیان فقط نعناع گریپ‌فروتی هست که در آن

با توجه به تغییرات سریع در سبک زندگی و افزایش مشکلات بهداشتی و بیماری‌های مزمن، نیاز به شناسایی و بهره‌برداری از گیاهان دارویی با کیفیت و خواص درمانی بهینه، بیش‌ازپیش احساس می‌شود (Giménez-Santamarina et al., 2022). یکی از این گیاهان دارویی باارزش، نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*) است که به دلیل تولید اسانس با کیفیت بالا و ترکیبات معطر در صنایع

ویژگی‌های منحصربه‌فرد، مانند تحریک فرایندهای فیزیولوژیک، افزایش جذب نور و کارایی فتوسنتز به‌عنوان راهکاری نوین در بهبود پاسخ گیاهان به تنش‌ها معرفی شده‌اند (Farhangi-Abriz et al., 2024). کربن کوانتوم دات‌ها دارای خواص آنتی‌اکسیدانی بوده و با کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن موجب پایداری غشاها و بهبود مقاومت گیاه به تنش می‌شوند (Farhangi-Abriz et al., 2024). همچنین، این نانوذرات با افزایش کارایی مصرف آب و بهبود جذب عناصر غذایی، نقش مؤثری در افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس‌ها ایفا می‌کنند (Gohari et al., 2021; Li et al., 2018). تحقیقات نشان داده‌اند که کربن کوانتوم دات با تأثیر بر افزایش فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز، آسیب‌های ناشی از تنش را کاهش می‌دهند (Zhong et al., 2024; Gohari et al., 2021). در این زمینه، پژوهشگران با بررسی اثر نانوذرات کربنی بر فلفل چیلی (*Capsicum annuum* L. cv. Kaskada) تحت تنش خشکی گزارش کردند ارتفاع بوته، وزن تر و وزن خشک در شرایط تنش خشکی کاهش یافت، اما کاربرد نانوذرات کربنی باعث افزایش محتوای نسبی آب، شاخص پایداری کلروفیل، فلورسانس کلروفیل (Fv/Fm) و عملکرد ماده خشک شد (Alluqmani and Alabdallah, 2023). در مطالعه دیگری، محققان با بررسی کاربرد هم‌زمان کربن کوانتوم دات و پوترسین بر انگور (*Vitis vinifera* cv. Sultana) تحت تنش کادمیوم بیان کردند استفاده از این نانوذرات نه تنها منجر به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپر اکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز شد بلکه محتوای آنتوسیانین و فنل‌ها را افزایش داد و در نهایت وزن تر و خشک برگ را به ترتیب به میزان ۲۱/۳۱ درصد و ۴۲/۳۴ درصد بهبود بخشید (Panahirad et al., 2023). علاوه بر این، در پژوهشی که به‌منظور ارزیابی اثر محلول‌پاشی کربن کوانتوم دات روی گیاه سویا (*Glycine max*) در شرایط تنش خشکی انجام شد محققان دریافتند در شرایط تنش خشکی، کاربرد کربن کوانتوم دات پارامترهای مختلف از جمله سطح برگ (۲۱ درصد)، محتوای کلروفیل (۱۸ درصد)، حداکثر بازده فتوسیستم II (۱۹ درصد) و محتوای نسبی آب برگ (۲۳ درصد) را افزایش داد و به‌تبع آن، منجر به افزایش ۲۵ درصدی در میزان عملکرد شد (Farhangi-Abriz et al., 2024).

لینالول به‌عنوان ترکیب غالب اسانس شناخته می‌شود و برگ‌های نعناع گریپ‌فروتی منبع بالقوه‌ای برای استخراج این ماده است (Fazal et al., 2023). همچنین، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیبات موجود در نعناع گریپ‌فروتی دارای خواص ضد باکتری، ضد قارچ، ضد التهاب و آنتی‌اکسیدانی هستند که این گیاه را به یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی در جهان تبدیل کرده است (Jahanafrooz et al., 2024). با این حال، تنش‌های غیرزیستی نظیر تنش خشکی تأثیر قابل توجهی بر رشد و تولید این گیاهان دارد.

تنش خشکی با کاهش دسترسی به آب، منجر به کاهش بازشدگی روزنه‌ها، افت تبادلات گازی و محدودیت جذب دی‌اکسید کربن می‌شود. این شرایط موجب کاهش نرخ فتوسنتز و تولید انرژی می‌گردد (Alsherif et al., 2023). کاهش فتوسنتز و تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی تولید ماده خشک را محدود و به‌تبع آن کاهش عملکرد گیاه اتفاق می‌افتد (Hamedani et al., 2022). افزون بر این، تنش خشکی با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، موجب تخریب غشاها، پروتئین‌ها و آنزیم‌ها در سلول‌های گیاهی می‌شود. گیاهان برای مقابله با این آسیب‌ها، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند و تولید متابولیت‌های ثانویه را تحریک می‌کنند (Javan-Gholiloo et al., 2019; Ahanger et al., 2021). در گیاهان دارویی، تنش خشکی می‌تواند اثرات دوگانه‌ای بر ترکیبات مؤثره داشته باشد، به‌طوری‌که در برخی موارد کیفیت و کمیت اسانس افزایش و در برخی دیگر کاهش می‌یابد (Aslani et al., 2023; Haghaninia et al., 2024). این شرایط، نیاز به توسعه استراتژی‌های مدیریتی و تکنولوژیک نوین برای مقابله با این چالش‌ها و بهبود مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی را بیش‌ازپیش برجسته می‌کند (Abrar et al., 2024).

نانوذرات می‌توانند به‌طور مؤثری بر ویژگی‌های رشدی گیاهان تحت تنش‌های محیطی تأثیر بگذارند و به‌عنوان کاتالیزورهایی برای بهبود عملکرد و افزایش مقاومت گیاهان به کار روند (Su et al., 2018). در این میان، کربن کوانتوم دات که به‌عنوان نانو مواد کربنی نیز شناخته می‌شوند، نانوذرات کربنی هستند که اندازه آن‌ها کمتر از ۱۰ نانومتر است و به دلیل زیست‌سازگاری خوب و عملکرد کوانتومی بالا در زمینه‌های مختلف کاربردهای فراوانی دارد (Zhong et al., 2016; Kakaei et al., 2024). این نانوذرات به دلیل

به‌عنوان یک رویکرد چندبعدی در کشاورزی پایدار مطرح گردد. با توجه به کمبود تحقیقات در این حوزه، نتایج این مطالعه می‌تواند بینش‌های تازه‌ای در زمینه بهبود عملکرد گیاهان دارویی تحت تنش‌های غیرزیستی فراهم کند و به پیشرفت‌های علمی و عملی در کشاورزی پایدار منجر شود.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

این پژوهش به‌صورت گلدانی در بهار و تابستان ۱۴۰۲ در گلخانه و آزمایشگاه گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه اجرا شد. شرایط رشدی بهینه گلخانه شامل دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۶۰ تا ۷۰ درصد و ۱۲ تا ۱۴ ساعت نور طبیعی با شدت مناسب فراهم شد و در صورت نیاز از تورهای سایه‌انداز ۳۰ تا ۵۰ درصدی برای کنترل شدت نور استفاده شد. همچنین، سیستم تهویه گلخانه به‌وسیله فن‌ها و سامانه‌های تهویه مکانیزه کنترل می‌شد تا از تجمع رطوبت و گرمای اضافی جلوگیری شود و گردش هوای مناسب برای رشد گیاهان تأمین گردد. علاوه بر این، برای جلوگیری از ورود آفات به گلخانه، از توری‌های ضد حشره در ورودی‌ها و دریچه‌های تهویه استفاده شد.

آماده‌سازی بستر کاشت

خاک مورد استفاده در این تحقیق از لایه فوقانی خاک زراعی تهیه و به‌طور تصادفی نمونه‌برداری انجام شد. بر اساس نتایج تجزیه خاک، بافت خاک به‌صورت لوم رسی شنی با رسانایی الکتریکی ۱/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر، pH ۸/۳، مواد آلی ۱/۰۳ درصد، غلظت کل نیتروژن ۰/۰۶۲ درصد، فسفر قابل دسترس ۸/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پتاسیم ۴۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. قبل از کاشت گیاهان، برای حذف میکروارگانیسم‌های بومی و فراهم‌سازی شرایط کنترل‌شده جهت تلقیح قارچ میکوریزا، خاک پس از عبور از الک و حذف ذرات درشت در کیسه‌های مقاوم به حرارت قرار داده و به‌طور کامل استریل گردید. فرآیند استریل‌سازی با استفاده از اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱۵ پوند بر اینچ مربع (psi) به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. به‌منظور اطمینان از حذف کامل اسپورهای مقاوم، این فرآیند در دو مرحله با فاصله زمانی ۲۴ ساعت تکرار شد. بین هر مرحله، خاک در شرایط استریل نگهداری شد تا از هرگونه آلودگی مجدد جلوگیری شود. این

یکی دیگر از راهکارهای تعدیل اثرات خشکی و کاهش آثار منفی کودهای شیمیایی، استفاده از قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار است (Azizi et al., 2021). این قارچ‌ها همزیست اجباری بوده که به راسته *Glomeromycota* تعلق دارند و نام آن‌ها به خاطر ساختارهایی به نام آربوسکول است که در داخل سلول‌های ریشه ایجاد می‌کند (Lenoir et al., 2008). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار از عوامل بیولوژیک خاک‌های زراعی هستند که با افزایش سطح مؤثر ریشه، جذب آب و مواد غذایی را افزایش و رشد گیاه را بهبود می‌بخشند (Amiri et al., 2017; Hamedani et al., 2022). این قارچ‌ها علاوه بر نقش تغذیه‌ای، به کاهش اثرات منفی تنش خشکی از طریق بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش تولید آنتی‌اکسیدان‌ها کمک می‌کنند (Alam et al., 2023). تحقیقات نشان داده‌اند قارچ‌های میکوریزا می‌تواند بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس‌ها را نیز تحت شرایط تنش تحریک کند. به‌این ترتیب، قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار نه‌تنها عملکرد کمی، بلکه کیفیت ترکیبات مؤثره گیاه را نیز بهبود می‌بخشند (Haghaninia et al., 2024). این ویژگی‌ها، میکوریزا را به یکی از گزینه‌های مؤثر برای افزایش تاب‌آوری گیاهان دارویی در برابر تنش‌های محیطی تبدیل کرده است (Abrar et al., 2024). در این راستا، محققان با ارزیابی کاربرد قارچ میکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس نعناع فلفلی (*Mentha × piperita*) تحت تنش خشکی اظهار داشتند تلقیح با قارچ میکوریزا در مقایسه با تیمار شاهد، عملکرد ماده خشک و عملکرد اسانس را به ترتیب ۵/۳ و ۱۰/۷ درصدی افزایش داد (Mousavi-Jangali et al., 2024). در تحقیق دیگری، پژوهشگران با بررسی کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار و نانوذرات تیتانیوم روی گیاه نعناع فلفلی گزارش کردند استفاده از تیمار هم‌زمان قارچ میکوریزا و نانوذرات تیتانیوم وزن تازه، وزن خشک اندام هوایی، شاخص پایداری غشاء و محتوای آب نسبی برگ را به ترتیب ۶۹، ۱۵۸، ۷۰ و ۳۹ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد (Zare et al., 2023).

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات جداگانه و هم‌افزایی کربن کوانتوم دات و قارچ‌های میکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس نعناع گریپ‌فروتی، در پی ارائه راهکارهای نوین برای بهبود کیفیت و کمیت این گیاه در شرایط خشکی است. نوآوری این مطالعه در به‌کارگیری کربن کوانتوم دات و تلفیق آن با قارچ میکوریزا آربوسکولار نهفته است که می‌تواند

روش استریل‌سازی، محیطی عاری از میکروارگانیسم‌های بومی ایجاد می‌کند و امکان بررسی دقیق اثرات قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش خشکی را فراهم می‌سازد. در نهایت، برای کاشت در اوایل اردیبهشت‌ماه، در گلدان‌های پنج لیتری پلاستیکی چهار عدد ریزوم با طول پنج سانتی‌متر (به‌منظور یکسان بودن شرایط اولیه گیاه) قرار داده شد. برداشت نهایی نیز در پایان دوره رشد ۱۲ هفته‌ای صورت پذیرفت.

طراحی آزمایش و تیمارها

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار در بهار و تابستان سال ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتور اول آبیاری شامل سه سطح بدون تنش (شاهد)، تنش خفیف و تنش شدید (به ترتیب آبیاری در ۹۰، ۷۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم شامل تیمار قارچ میکوریزا آربوسکولار (AMF)، تیمار کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام (CQD₅ ppm)، تیمار کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام (CQD₁₀ ppm)، تیمار AMF+CQD₁₀، تیمار AMF+CQD₅ و تیمار شاهد (عدم مصرف) بود.

نحوه اعمال تیمارها

قارچ میکوریزا آربوسکولار (AMF)

قارچ میکوریزا (مایکوروت) که ترکیبی از سه گونه *Rhizophagus Funneliformis* *mosseae* و *Claroideoglossum etunicatum* بود از شرکت زیست‌فناور سبز ایران تهیه شد. در مجموع ۲۰ گرم در هر گلدان AMF (۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک) به تیمارها حاوی قارچ اضافه شد. لازم به ذکر است مقدار AMF مصرفی در این پژوهش بر اساس مطالعات قبلی انتخاب شد (Haghaninia et al., 2024).

کربن کوانتوم دات

کربن کوانتوم دات به روش الکتروشیمیایی به‌صورت زیر سنتز شده است. یک منبع تغذیه جریان مستقیم (Direct Current) با مدل ADAK با سیستم دو الکترودی برای سنتز CQDs استفاده شد (Xu et al., 2004). دو میله گرافیتی با ضخامت ۶/۵ میلی‌متر در آب فوق خالص تحت ولتاژ 30-40 V قرار گرفت. سیستم بر روی همزن برای چند روز هم زده شد تا این‌که یک مخلوط قهوه‌ای تیره حاصل شد. این مخلوط فیلتر شده و سپس تحت سانتریفیوژ دور بالا

اعمال رژیم‌های آبیاری

اعمال تنش خشکی به روش وزنی انجام شد. برای تعیین ظرفیت زراعی، نمونه‌ای از خاک داخل گلدان زهکش‌دار ریخته و سپس آبیاری گردید و با پلاستیک پوشانده شد. پس از قطع آبیاری، گلدان در فواصل مختلف زمانی وزن شد. زمانی که در دو فاصله زمانی میزان رطوبت با هم برابر بود از عمق موردنظر خاک، نمونه‌گیری انجام و پس از تعیین وزن آن، به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا خشک شود. با توزین میزان رطوبت پس از خشک شدن خاک، درصد جرمی رطوبت از طریق فرمول زیر مشخص شد که در این فرمول W₁ وزن نمونه مرطوب و W₂ وزن نمونه خشک شده است. نسبت جرمی و درصد جرمی رطوبت (Θ_m) عبارت بود از (Haghaninia et al., 2024):

$$[1] \quad \text{نسبت جرمی رطوبت} = \frac{w_1 - w_2}{w_2}$$

$$[2] \quad \text{درصد جرمی رطوبت} = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100 = \% \Theta_m$$

با توجه به میزان رطوبت ظرفیت زراعی خاک، آبیاری گلدان‌ها انجام شد و برای انجام آبیاری‌های بعدی به‌صورت پی‌درپی گلدان‌ها وزن شدند. با رسیدن رطوبت خاک گلدان به سطوح ۹۰٪، ۷۰٪ و ۵۰٪ ظرفیت زراعی، آبیاری انجام شد. با ضرب میزان خاک گلدان در درصد رطوبت ظرفیت زراعی خاک، مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی گلدان موردنظر مشخص شد و با کاهش ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ این وزن از وزن گلدان، آبیاری صورت گرفت.

تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه

به‌منظور ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه از روش زیر استفاده شد (Javanmard and Ostadi, 2024). ابتدا ریشه‌های گیاه نعنای گریپ‌فروتی با آب شسته شدند و سپس در محلول هیدروکسید پتاسیم ۱۰ درصد به مدت ۵ تا ۱۰

محتوای فنل کل به روش Folin-Ciocalteu اندازه‌گیری شد (Singleton and Rossi, 1965). بدین منظور، ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه با ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد استخراج و پس از سانتریفیوژ، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره با ۲/۵ میلی‌لیتر معرف Folin-Ciocalteu و ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتند و جذب نوری در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، محتوای فنل کل با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه شد. محتوای فلاونوئید کل به روش آلومینیوم کلرید اندازه‌گیری شد (Chang et al., 2002). در ابتدا، ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره متانولی با ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۱۵ میلی‌لیتر محلول آلومینیوم کلرید ۵ درصد مخلوط گردید. پس از ۵ دقیقه، ۱ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۱ مولار اضافه و حجم نهایی به ۵ میلی‌لیتر رسانده شد. جذب نوری در ۴۱۵ نانومتر خوانده و محتوای فلاونوئید کل با منحنی استاندارد کوئرستین تعیین شد.

استخراج اسانس

جهت استخراج اسانس از دستگاه کلونجر طرح آپاراتوس (مدل فارماکوپه بریتانیا) استفاده شد، اسانس‌گیری به مدت سه ساعت انجام شد. سپس اسانس‌های استخراج‌شده با سولفات سدیم خشک‌آبگیری و داخل ویال شیشه‌ای در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری گردید و پس از اتمام اسانس‌گیری نیز عملکرد اسانس بر اساس وزن نمونه محاسبه شد (Haghaninia et al., 2024).

شناسایی ترکیبات اسانس

برای شناسایی ترکیب‌های اسانس از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل شده به طیف‌سنجی 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 شد. همچنین، محاسبه و شناسایی ترکیب‌های اسانس به کمک شاخص‌های بازدارنده خطی آن‌ها و مقایسه‌ی آن با شاخص‌های موجود در کتب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیب‌های استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه‌ی کامپیوتری صورت گرفت. علاوه بر این، برای جداسازی ترکیب‌های از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور

دقیقه حرارت داده و مجدداً با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس، ریشه‌ها به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه در محلول اسید هیدروکلریک ۲ درصد قرار گرفتند. برای رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها در محلول تریپان بلو ۰/۰۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده و سپس با آب مقطر شستشو و در محلولی شامل اسیدلاکتیک، گلیسرول و آب تا زمان سنجش نگهداری شدند (Phillips and Hayman, 1970). نمونه‌های رنگ‌آمیزی شده توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند و از اندام‌ها و ریشه‌های قارچی رنگ‌آمیزی شده عکس‌برداری شد. در نهایت، درصد کلونیزاسیون با استفاده از روش خطوط متقاطع محاسبه شد. ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شدند و به صورت تصادفی در پلیت شیشه‌ای قرار گرفتند. سپس، یک صفحه شطرنجی که هر خانه آن ابعادی برابر با ۱×۱ سانتی‌متر داشت، زیر پلیت قرار داده شده و برای شمارش ریشه‌های آلوده و غیرآلوده، از استریومیکروسکوپ (بینوکلار) استفاده شد. ریشه‌های آلوده و غیرآلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطع داشتند، به‌طور جداگانه شمارش شدند. در نهایت، درصد کلونیزاسیون از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید (Giovannetti and Mosse, 1980):

درصد کلونیزاسیون ریشه = (تعداد کل تقاطع‌های بین ریشه و شبکه / تعداد تقاطع ریشه‌های حاوی میکوریزا) × ۱۰۰ [۳]

اندازه‌گیری عناصر غذایی

غلظت نیتروژن با روش کجلدال، غلظت فسفر با روش زرد و با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر و غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری کلروفیل آ (a)، کلروفیل ب (b) و کارتنوئید (CAR)

برای اندازه‌گیری رنگی‌های فتوسنتزی از روش آرنون (Arnon, 1949) استفاده گردید و مقادیر جذب با دستگاه اسپکتوفتومتر (UV-1800 Shimadzu, Japan) قرائت شد. در نهایت، مقادیر کلروفیل a و b و کارتنوئیدها برحسب میلی-گرم بر گرم وزن تر نمونه گیاهی محاسبه شدند.

اندازه‌گیری فنل کل و فلاونوئید کل

بهبود درصد کلونیزاسیون در مقایسه با کاربرد جداگانه قارچ میکوریزا شد. نانوذرات می‌توانند از طریق تعامل با ساختارهای هیفی قارچ‌های میکوریزا، پایداری آن‌ها را در شرایط تنش افزایش و موجب شده تا هیف‌ها مقاومت بیشتری در برابر تنش‌های فیزیکی و محیطی پیدا کنند که این امر به حفظ و گسترش آن‌ها در خاک کمک می‌کند (Alsherif et al., 2023). این بهبود در رشد هیف‌ها باعث افزایش درصد کلونیزاسیون قارچ می‌شود. همسو با این نتایج، پژوهشگران نشان دادند که نانوذرات با تولید آنزیم‌های بیشتر و افزایش تجزیه مواد مغذی در خاک در نهایت منجر به افزایش همزیستی و درصد کلونیزاسیون می‌گردند (Haghaninia et al., 2024).

محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم نعنای گریپ‌فروتی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف تنش خشکی، تیمارهای نانو و زیستی و اثرات متقابل سطوح تنش خشکی × تیمارهای نانو و زیستی قرار گرفت (جدول ۱). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم نعنای در شرایط بدون تنش با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام ثبت شد و کمترین میزان عناصر مذکور نیز به تیمار تنش خشکی شدید بدون مصرف محرک‌های رشدی تعلق داشت (شکل ۲). علاوه بر این، در تنش خفیف محتوای نیتروژن ۱۷/۴ درصد، فسفر ۳۲/۷ درصد و پتاسیم ۱۸/۳ درصد کاهش یافتند و در تنش شدید نیز عناصر مذکور به ترتیب ۴۰/۸، ۴۷/۸ و ۳۷/۶ درصد با کاهش مواجه شدند. در مقابل، کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام در مقایسه با تیمار شاهد محتوای نیتروژن را ۶۹/۸ درصد، فسفر ۵۴/۳ درصد و پتاسیم ۲۱/۱ درصد افزایش یافتند (شکل ۲). همچنین، کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام در شرایط بدون تنش محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در مقایسه با عدم مصرف کود تحت تنش شدید به ترتیب ۱۷۲/۳، ۱۸۸/۴ و ۱۰۳/۱ درصد افزایش داد (شکل ۲). خشکی باعث کاهش پتانسیل آبی خاک و ریشه‌ها می‌شود که به‌نوبه خود جذب آب و مواد

آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (FID) و ستون VF-5MS استفاده شد. دمای تزریق و آشکارساز به ترتیب روی ۲۳۰ و ۲۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شده بودند. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم ۱:۲۴ استفاده شده بود. در نهایت، نمونه‌های اسانس به نسبت ۱:۱۰۰ در هگزان رقیق‌سازی و به میزان ۱ میکرولیتر تزریق شدند و کمی کردن ترکیب‌های اسانس نیز با استفاده از نرمال‌سازی سطح پیک و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام شد (Morshedloo et al., 2018).

بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS V9 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD انجام شد.

نتایج و بحث

کلونیزاسیون ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کلونیزاسیون ریشه نعنای گریپ‌فروتی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف تنش خشکی، تیمارهای نانو و زیستی و اثر متقابل سطوح مختلف تنش خشکی × تیمارهای نانو و زیستی قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین میزان کلونیزاسیون ریشه در شرایط بدون تنش با کاربرد قارچ میکوریزا به دست آمد. همچنین، میزان کلونیزاسیون ریشه در شرایط تنش خفیف و شدید به ترتیب ۱۴/۴ و ۴۵/۳ درصد در مقایسه با شرایط بدون تنش کاهش یافتند (شکل ۱). در مقابل، کاربرد هم‌زمان AMF+CQD₅ در مقایسه با تیمار AMF به میزان ۱۰/۱۵ درصد کلونیزاسیون ریشه را افزایش داد (شکل ۱). تنش خشکی منجر به بسته شدن روزنه‌های گیاهی و کاهش فتوسنتز شده و تولید کربوهیدرات‌ها در گیاه کاهش می‌یابد (AbdelSalam et al., 2018). از آنجاکه قارچ‌های میکوریزا برای تکثیر و بقای خود به کربوهیدرات‌های تولیدشده توسط گیاه به دلیل رابطه همزیستی که دارند وابسته هستند، کاهش این منابع غذایی باعث می‌شود که رشد و تکثیر قارچ‌ها و در نهایت درصد کلونیزاسیون کاهش یابد (Haghaninia et al., 2024). به‌طور مشابه، پژوهشگران اظهار داشتند تحت تنش خشکی توانایی قارچ برای کلونیزاسیون ریشه کاهش می‌یابد (Amiri et al., 2017). کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات تحت خشکی شدید موجب

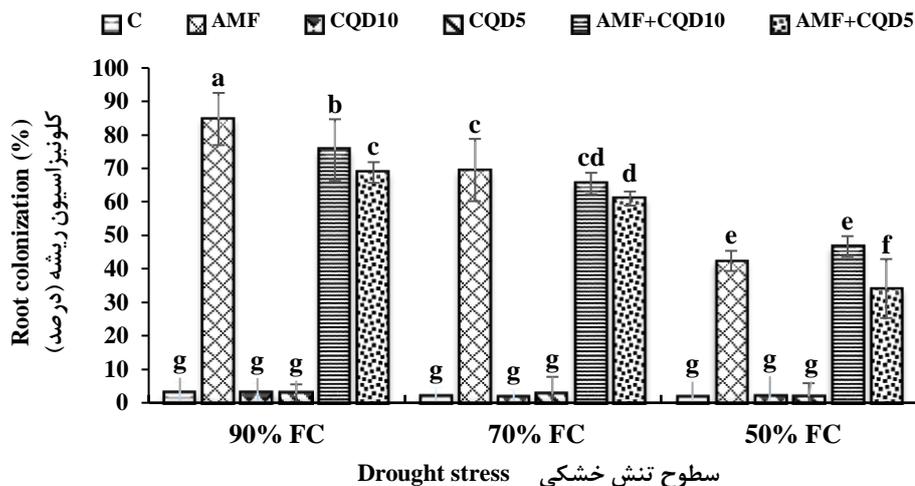
جدول ۱. تجزیه واریانس درصد کلونیزاسیون، کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، فسفر و پتاسیم نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha* تحت تنش خشکی با کاربرد تیمارهای نانو و زیستی

Table 1. Analysis of variance (ANOVA) for root colonization percentage, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, nitrogen, phosphorus, and potassium of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under drought stress levels with application of nano and biological treatments.

Sources of Variation	منابع تغییرات	درجه آزادی	ضریب تغییرات						
			کلونیزاسیون	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلروفیل آ	کلروفیل ب	کارتنوئید
		df	Root colonization	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoids
تنش خشکی	Drought stress (DS)	2	1966.85**	91.58**	46.84**	121.29**	258.64**	100.19**	3.65**
تیمارهای نانو و زیستی	Nano and biological treatments (T)	5	12638.46**	131.05**	2.81**	11.54**	8.58**	4.17**	11.13**
DS×T		10	389.44**	94.34**	0.98**	2.06**	0.214 ^{ns}	0.66 ^{ns}	1.91 ^{ns}
اشتباه آزمایشی	Error	54	4.65	0.505	0.03	0.47	0.183	0.108	0.96
ضریب تغییرات	CV (%)		10.03	4.08	4.49	6.72	5.42	5.89	4.31

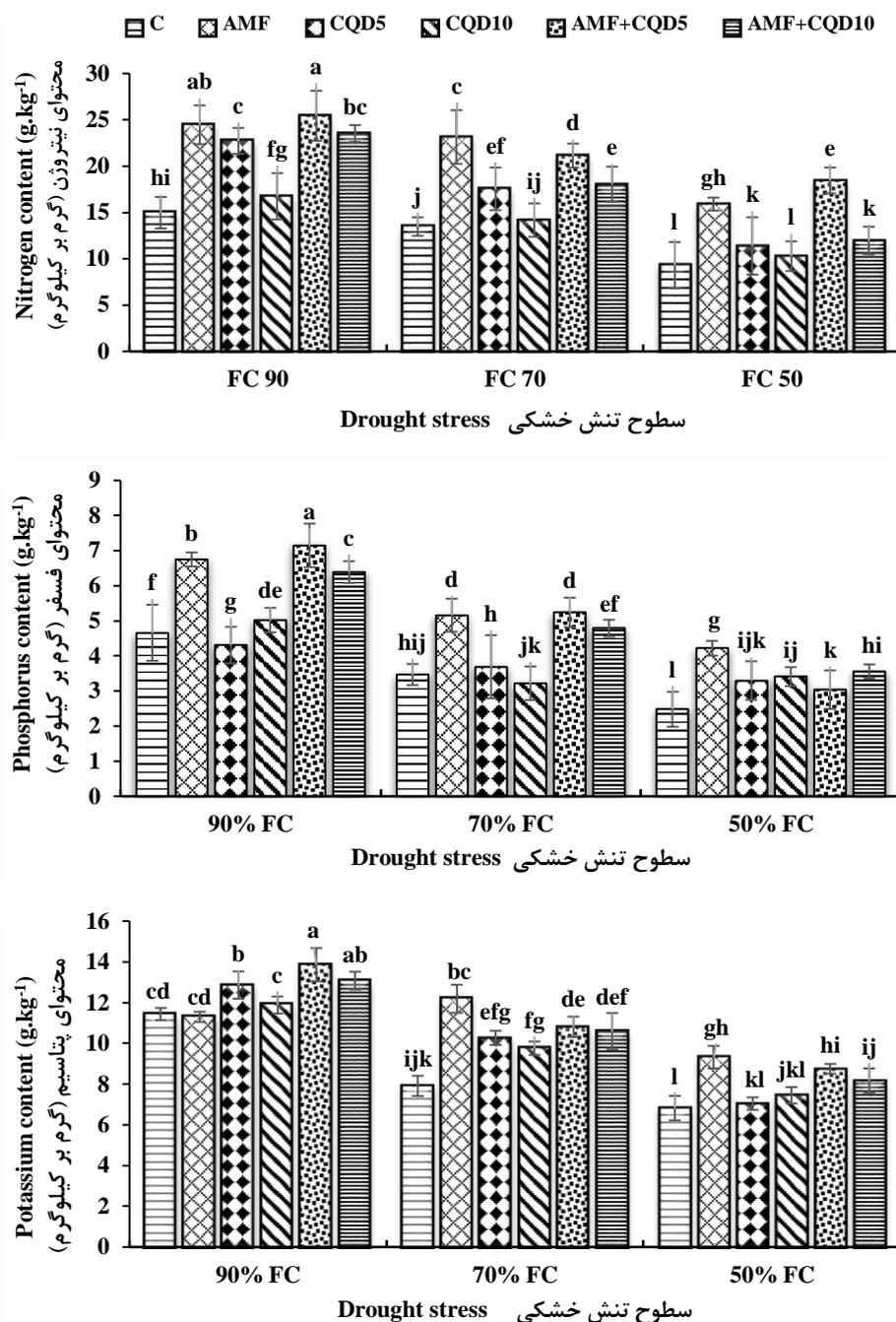
^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار، * بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ** بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

^{ns} no significant difference, * indicates a significant difference at the 5% probability level, and ** indicates a significant difference at the 1% probability level.



شکل ۱. اثر متقابل تیمارهای نانو و زیستی و سطوح تنش خشکی بر درصد کلونیزاسیون نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، ۹۰٪FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۷۰٪FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، ۵۰٪FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 1. Interaction effects of nano and biological treatments and drought stress levels on the root colonization percentage of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: Control, AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + 10 ppm carbon quantum dots, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + 5 ppm carbon quantum dots. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.



شکل ۲. اثر متقابل تیمارهای نانو و زیستی و سطوح تنش خشکی بر محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم نعنای گریپ فروتنی (*Mentha suaveolens × piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی پی ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی پی ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی پی ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی پی ام. ۹۰٪ FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۷۰٪ FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، ۵۰٪ FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 2. Interaction effect of nano and biological treatments and drought stress levels on the nitrogen, phosphorus, and potassium content of grapefruit mint (*Mentha suaveolens × piperita*). C: Control (no fertilizer applied), AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level according to the LSD test.

درصد بیشتر بود (شکل ۳). کاهش کلروفیل a و b تحت شرایط خشکی عمدتاً به دلیل کاهش سنتز کلروفیل و افزایش تجزیه آن ناشی از استرس اکسیداتیو است (Khodadadi et al., 2022). در شرایط خشکی شدید، فعالیت آنزیم‌های کلیدی در مسیر بیوسنتز کلروفیل کاهش می‌یابد در نتیجه تولید ATP و NADPH که برای سنتز کلروفیل ضروری است، کاهش می‌یابد (Ali et al., 2020). در مقابل، استفاده از ترکیب قارچ میکوریزا و کربن کوانتوم دات تأثیرات قابل‌توجهی بر افزایش محتوای کلروفیل در بوته نعناع گریپ‌فروتی داشت. قارچ‌های میکوریزا به دلیل توانایی خود در ایجاد شبکه‌های هیفی گسترده در خاک، به‌طور مؤثر به بهبود جذب آب و مواد مغذی، از جمله نیتروژن و فسفر که پیش‌سازهای کلیدی در سنتز کلروفیل هستند، کمک می‌کنند (Gholinezhad and Darvishzadeh, 2021). علاوه بر این، استرس اکسیداتیو ناشی از تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌تواند به تخریب کلروفیل و کاهش کارایی فتوسنتزی منجر شود، اما کربن کوانتوم دات با کاهش استرس اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به حفظ و بهبود محتوای کلروفیل کمک می‌کنند (Panahirad et al., 2023). به‌طور مشابه، پژوهشگران مشاهده کردند که نانوذرات کربن کوانتوم دات موجب محافظت از کلروپلاست‌ها، حفظ و بهبود محتوای کلروفیل و کارتنوئیدها در گیاه ماش (*Vigna radiata*) شد (Wang et al., 2018).

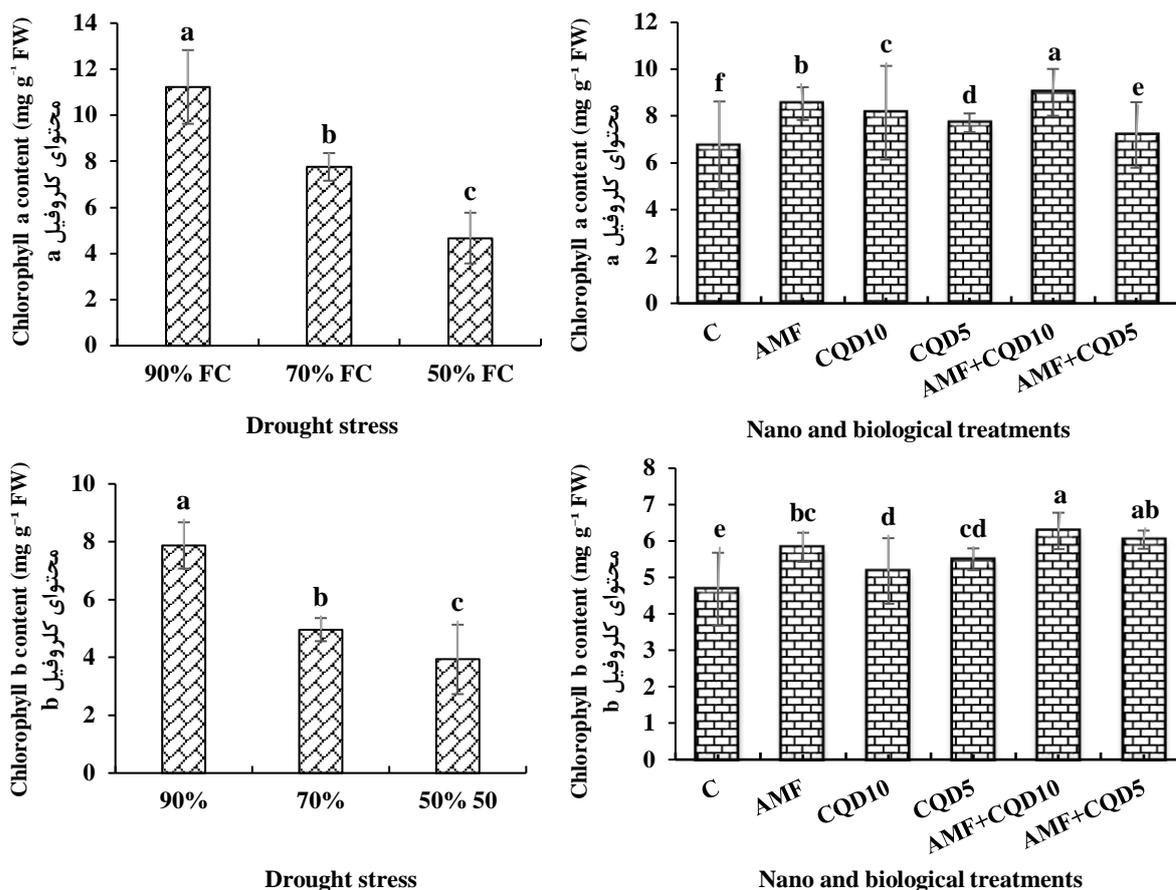
محتوای کارتنوئید

محتوای کارتنوئید نعناع گریپ‌فروتی تحت تأثیر جداگانه سطوح مختلف خشکی و تیمارهای نانو و زیستی قرار گرفت (جدول ۱). در بین تیمارهای نانو و زیستی حداکثر محتوای کارتنوئید با کاربرد غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم دات مشاهده شد و کمترین محتوای کارتنوئید نیز به عدم مصرف کود تعلق داشت (شکل ۴). کاربرد غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم دات محتوای کارتنوئید را در مقایسه با شاهد ۷۱/۱ درصد افزایش داد. علاوه بر این، در میان رژیم‌های مختلف آبیاری بیشترین محتوای کارتنوئید در تنش خفیف مشاهده شد که در مقایسه با بدون تنش ۵۷/۶ درصد و در مقایسه با تنش شدید ۲۱/۳ درصد افزایش یافت (شکل ۴). دلیل افزایش محتوای کارتنوئید در مراحل ابتدایی تنش، واکنش دفاعی گیاه به شرایط تنش‌زا است، اما در تنش شدید، به دلیل

مغذی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌وسیله ریشه از محلول خاک جذب می‌شوند و کاهش میزان آب در خاک منجر به کاهش جذب این عناصر می‌شود (Hosseinzadeh et al., 2021). در این راستا، محققان گزارش کردند با کاهش رطوبت خاک، تحرک عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و سایر عناصر غذایی کمتر شده و در نتیجه دسترسی گیاه به منابع غذایی کاهش خواهد یافت (Javan-Gholiloo et al., 2019). با این حال، کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات منجر به بهبود محتوای مواد مغذی در نعناع گریپ‌فروتی شد. دلیل افزایش جذب عناصر غذایی با کاربرد قارچ میکوریزا را می‌توان به افزایش سطح جذب و دسترسی ریشه به عناصر غذایی بر اثر ایجاد شبکه‌های گسترده از هیف‌های قارچی نسبت داد (Iraji Mareshk and Moghaddam, 2020; Alam et al., 2023). همچنین، CQDs به دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی خود، به کاهش استرس اکسیداتیو و محافظت از کلروپلاست‌ها کمک می‌کنند، که به‌نوبه خود به گیاهان این امکان را می‌دهد تا منابع بیشتری را برای جذب و استفاده از مواد مغذی ذخیره کنند (Yin et al., 2024). در تطابق با یافته‌های ما، پژوهشگران گزارش کردند کاربرد هم‌زمان نانوذرات و قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با افزایش سطح تماس ریشه با خاک به‌طور غیرمستقیم فعالیت آنزیمی (آنزیم‌های فسفاتاز، فیتاز و آلکالین فسفاتاز) و ترشحات ریشه‌ای را افزایش داده و باعث افزایش دسترسی ریشه گیاه به عناصر غذایی شد (Hamedani et al., 2022).

محتوای کلروفیل a و b

نتایج تجزیه واریانس نشان داد محتوای کلروفیل a و b نعناع گریپ‌فروتی تحت اثرات اصلی سطوح مختلف تنش خشکی و تیمارهای نانو و زیستی قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین محتوای کلروفیل a و b با کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد، در حالی که کمترین محتوای آن‌ها در تیمار شاهد ثبت شد (شکل ۳). علاوه بر این، با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام محتوای کلروفیل a در مقایسه با شاهد ۵۹/۷ درصد و کلروفیل b ۳۴/۱ درصد افزایش یافتند. همچنین، محتوای کلروفیل a و b در شرایط بدون تنش نسبت به تنش خفیف به ترتیب ۴۴/۶ و ۵۸/۳ درصد و در مقایسه با تنش شدید ۱۴۰/۵ و ۱۰۰/۲



شکل ۳. مقایسه میانگین اثرات اصلی تیماری‌های نانو و زیستی و سطوح مختلف تنش خشکی بر محتوای کلروفیل a و b نعنای گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام. 90%FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، 70%FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، 50%FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

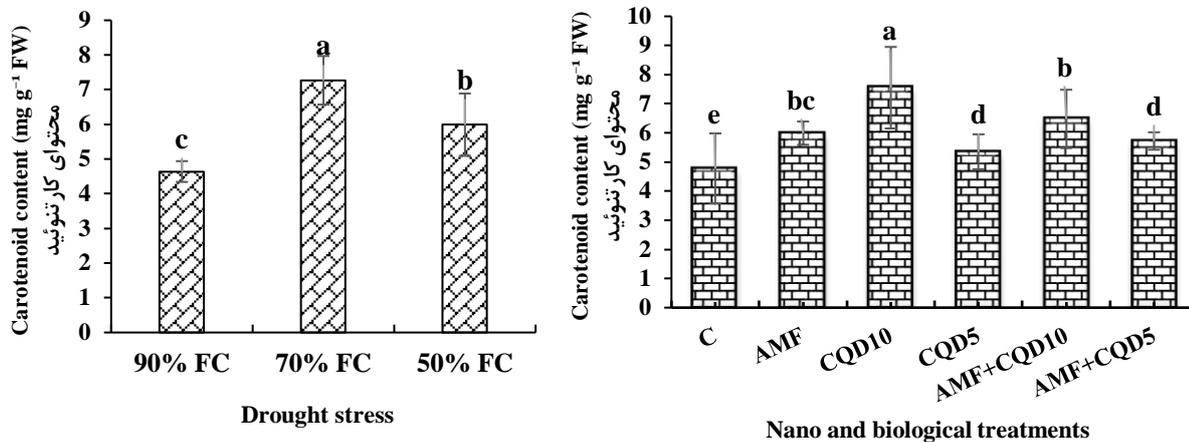
Fig. 3. Comparison of the mean effects of nano and biological treatments and different levels of drought stress on chlorophyll a and b content in grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: Control (no fertilizer applied), AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level according to the LSD test.

تغذیه‌ای گیاه به‌ویژه بهبود فسفر و آب در شرایط خشکی، موجب بهبود رشد و افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه همچون کارتنوئیدها می‌شود (Arpanahi et al., 2020; Alam et al., 2023). علاوه بر این، کربن کوانتوم دات نیز به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و توانایی بهبود بهره‌وری نوری گیاه، نقش مهمی در افزایش تولید کارتنوئیدها در شرایط تنش ایفا تخریب ساختارهای کلروپلاستی و کاهش ظرفیت

تخریب ساختارهای کلروپلاستی و کاهش ظرفیت سنتز، محتوای کارتنوئید کاهش می‌یابد (Azizi et al., 2024). در تطابق با یافته‌های ما، پژوهشگران گزارش کردند محتوای کارتنوئید در تنش خفیف افزایش یافته که به‌عنوان یک مکانیسم حفاظتی برای کاهش آسیب اکسیداتیو و تثبیت غشای سلولی عمل می‌کند (Haghaninia et al., 2024). با این حال، قارچ میکوریزا آربوسکولار از طریق بهبود وضعیت

CQDs می‌تواند با تحریک بیان ژن‌های مرتبط با مسیر بیوسنتزی کارتنوئیدها، تولید کارتنوئیدها را در گیاه افزایش دهد (Farhangi-Abriz et al., 2024; Dong et al., 2024).

سنتز، محتوای کارتنوئید می‌کند (Panahirad et al., 2023). همچنین، CQDs موجب تقویت سیستم فتوسنتزی شده و در نتیجه پایداری بیشتر رنگیزه‌های فتوسنتزی، از جمله کارتنوئیدها، را به همراه دارد. پژوهشگران نشان دادند کاربرد



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر جداگانه تیماری‌های نانو و زیستی و سطوح مختلف تنش خشکی بر محتوای کارتنوئید نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام. ۹۰%FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۷۰%FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، ۵۰%FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 4. Comparison of the mean effects of nano and biological treatments and different levels of drought stress on carotenoid content in grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: control (no fertilizer applied), AMF: arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, AMF+CQD₅: arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm. 90%FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70%FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50%FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level according to the LSD test.

پی‌پی‌ام کربن کوانتوم دات منجر به بهبود ۷۳/۲ درصدی محتوای فنل و ۵۴/۸ درصدی محتوای فلاونوئید نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۵). فنل‌ها با کاهش تولید ROS به‌عنوان مولکول‌های دفاعی عمل کرده و از ساختارهای سلولی در برابر تنش محافظت می‌کنند. همچنین، فلاونوئیدها که به‌عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شناخته می‌شوند، در شرایط نامساعد افزایش می‌یابند؛ بنابراین، افزایش این ترکیبات در گیاه تحت تنش به‌عنوان بخشی از پاسخ‌های دفاعی غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدانی محسوب می‌شود (Haghaninia et al., 2023). کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار + ۵ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم دات با بهبود دسترسی

محتوای فنل و فلاونوئید

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای نانو و زیستی، تنش خشکی و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال یک درصد بر محتوای فنل کل و فلاونوئید کل معنی‌دار شد (جدول ۲). بالاترین و پایین‌ترین مقادیر فنل و فلاونوئید به ترتیب در شرایط تنش خشکی خفیف با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار + ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم دات و در شرایط آبیاری معمولی بدون استفاده از محرک‌های رشد مشاهده شد (شکل ۵). در مقایسه با آبیاری معمولی، محتوای فنل و فلاونوئید به ترتیب ۳۹/۵ و ۳۲/۳ درصد در تنش خفیف افزایش یافت. همچنین، قارچ میکوریزا آربوسکولار + ۱۰

حفاظت گیاه در برابر آسیب‌های ناشی از استرس ایفا می‌کند (Farhangi-Abri et al., 2024). یافته‌های ما با نتایج سایر پژوهش‌هایی که گزارش دادند نانوذرات با افزایش محتوای این ترکیبات، بهبود جذب مواد مغذی، تقویت فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، مقاومت گیاه در برابر تنش را ارتقا می‌دهند، همخوانی دارد (Haghaninia et al., 2023; Nasseri et al., 2020).

به مواد مغذی و افزایش فعالیت آنزیم‌ها در بیوسنتز این ترکیبات، به افزایش محتوای فنل و فلاونوئید کمک می‌کند (Azizi et al., 2021). به‌طور مشابه، پژوهش بیگم و همکاران (Begum et al., 2021) نشان دادند که تلقیح با AMF باعث بهبود این ترکیبات در گیاه توتون (*Nicotiana tabacum* L.) گردید. علاوه بر این، کاربرد کربن کوانتوم دات به‌عنوان یک راهکار مؤثر در افزایش محتوای فنل و فلاونوئیدها تحت شرایط تنش عمل کرده و نقش مهمی در

جدول ۲. تجزیه واریانس فنل، فلاونوئید، ماده خشک، درصد اسانس و عملکرد اسانس نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*) تحت تنش خشکی با کاربرد تیمارهای نانو و زیستی

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) for phenolic, flavonoid, dry matter yield, Essential oil content, and Essential oil yield of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under drought stress levels with application of nano and biological treatments.

Sources of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS				
		فنل Phenolic	فلاونوئید Flavonoid	ماده خشک Dry matter	محتوای اسانس Essential oil content	عملکرد اسانس Essential oil yield
تنش خشکی Drought stress (DS)	2	17324.88**	61994.38**	922.45**	1.48**	0.312**
تیمارهای کودی Fertilizer treatments (F)	5	4392.73**	2435/37**	596.53**	0.88**	0.422**
DS×F	10	223.31**	101.86**	16.91**	0.052**	0.017**
اشتباه آزمایشی Error	54	100.28	84.25	3.86	0.006	0.001
ضریب تغییرات CV (%)		5.03	2.53	2.54	6.52	6.66

^{ns} عدم اختلاف معنی‌دار، * بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ** بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.
^{ns} no significant difference, * indicates a significant difference at the 5% probability level, and ** indicates a significant difference at the 1% probability level.

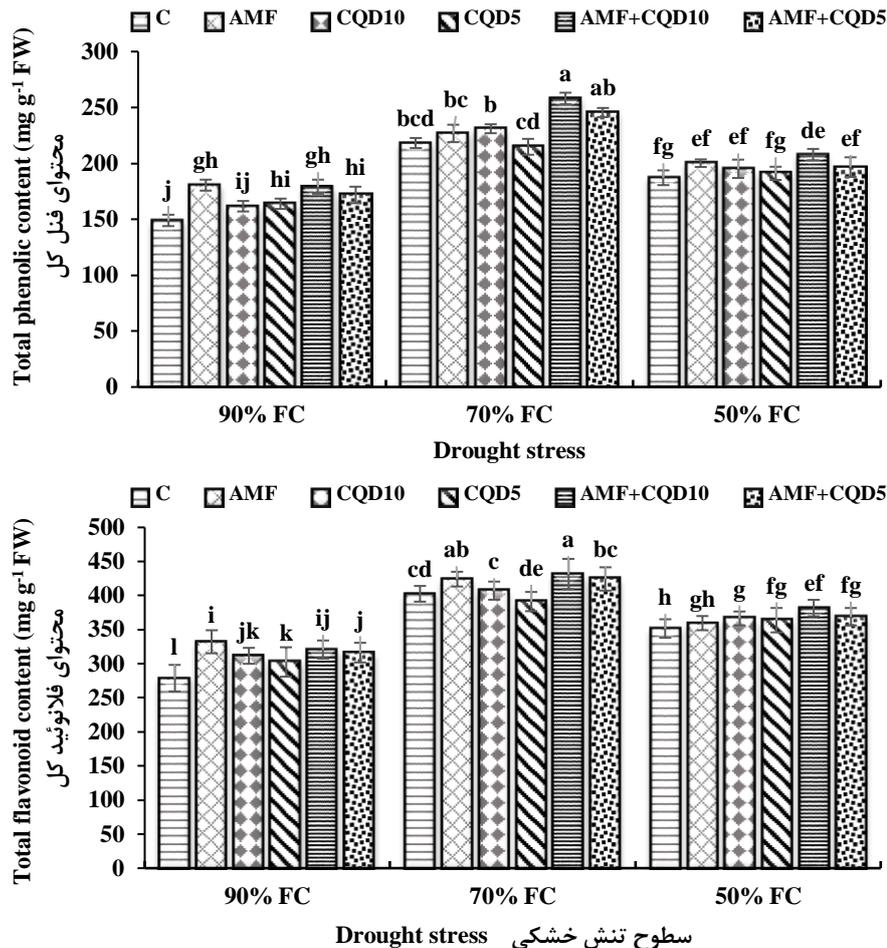
مقایسه با عدم مصرف منجر به افزایش ۷۴/۱۸ درصدی وزن خشک گردید (شکل ۶). گیاهان تحت تنش خشکی به‌شدت ترکیبات حفاظتی را افزایش می‌دهند تا بتوانند با آسیب‌های اکسیداتیو و استرس ناشی از خشکی مقابله کنند. این باز تخصیص منابع به سمت حفظ بقا به‌جای رشد، باعث کاهش تولید مواد آلی و در نتیجه کاهش وزن خشک گیاه می‌شود (Arpanahi et al., 2021). محققان گزارش کردند تنش خشکی باعث افت فشار تورژسانس سلولی (فشار داخلی سلول) می‌شود که برای حفظ حجم سلولی و ساختار گیاه ضروری است. این وضعیت نه‌تنها باعث کاهش وزن تر و خشک بوته می‌شود، بلکه با کاهش فعالیت متابولیکی گیاه نیز بر عملکرد تأثیر می‌گذارد (Igiehon and Babalola, 2021). در مقابل، ترکیب قارچ‌های میکوریزا و کربن کوانتوم

وزن ماده خشک اندام هوایی

تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد وزن ماده خشک اندام هوایی تحت تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی، تیمارهای نانو و زیستی و اثر متقابل سطوح مختلف تنش و تیمارهای نانو و زیستی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت. بالاترین ماده خشک تولیدی در شرایط بدون تنش و با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد. کمترین وزن ماده خشک نیز به تیمار تنش شدید خشکی بدون کاربرد محرک‌های رشد تعلق داشت (شکل ۶). علاوه بر این، در شرایط خفیف و شدید تنش خشکی، وزن ماده خشک به ترتیب ۱۵/۵ و ۲۶/۳ درصد در مقایسه با بدون تنش کاهش یافت (شکل ۶). به‌طور میانگین، تیمار قارچ میکوریزا آربوسکولار + کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام در

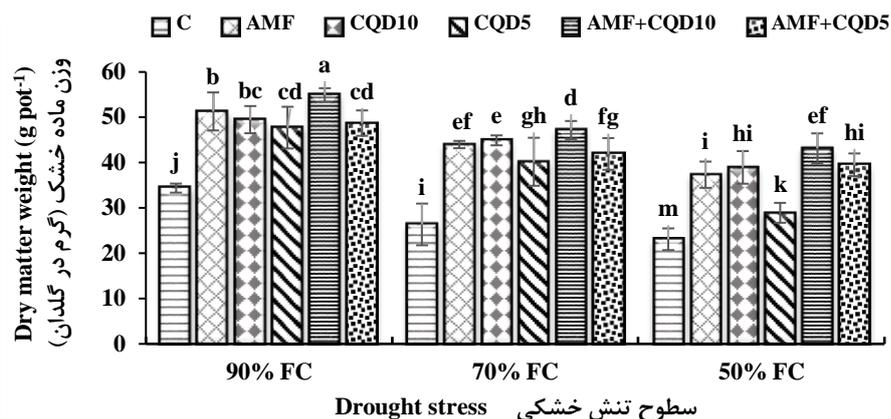
که مستقیماً به افزایش وزن تر و خشک منجر می‌شود (Su et al., 2018). همسو با نتایج ما، پژوهشگران نشان دادند کاربرد کربن کوانتوم دات طول ریشه، طول گیاهچه و عملکرد را در گیاه برنج (*Oryza sativa*) افزایش داد و این امر را به بهبود جذب مواد مغذی و ظرفیت دفاعی آنتی‌اکسیدانی CQD نسبت دادند (Li et al., 2018).

دات توانستند به‌طور هم‌افزایی به افزایش وزن تر و خشک نعناع گریپ‌فروتی منجر شوند. قارچ‌های میکوریزا با افزایش جذب مواد مغذی مانند فسفر و پتاسیم به بهبود فعالیت فتوسنتزی گیاه کمک می‌کنند (Hamedani et al., 2022; Abrar et al., 2024). ذرات کربن کوانتوم دات نیز با افزایش کارایی جذب نور و محافظت از کلروپلاست‌ها در برابر تنش‌های اکسیداتیو، موجب بهبود فرآیند فتوسنتزی می‌شود



شکل ۵. اثر متقابل تیمارهای نانو و زیستی و سطوح مختلف تنش خشکی بر محتوای فنل و فلاونوئید کل نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام. 90%FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، 70%FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، 50%FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 5. Interaction effect of nano and biological treatments and different levels of drought stress on the total phenolic and flavonoid content of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: Control (no fertilizer applied), AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level according to the LSD test.



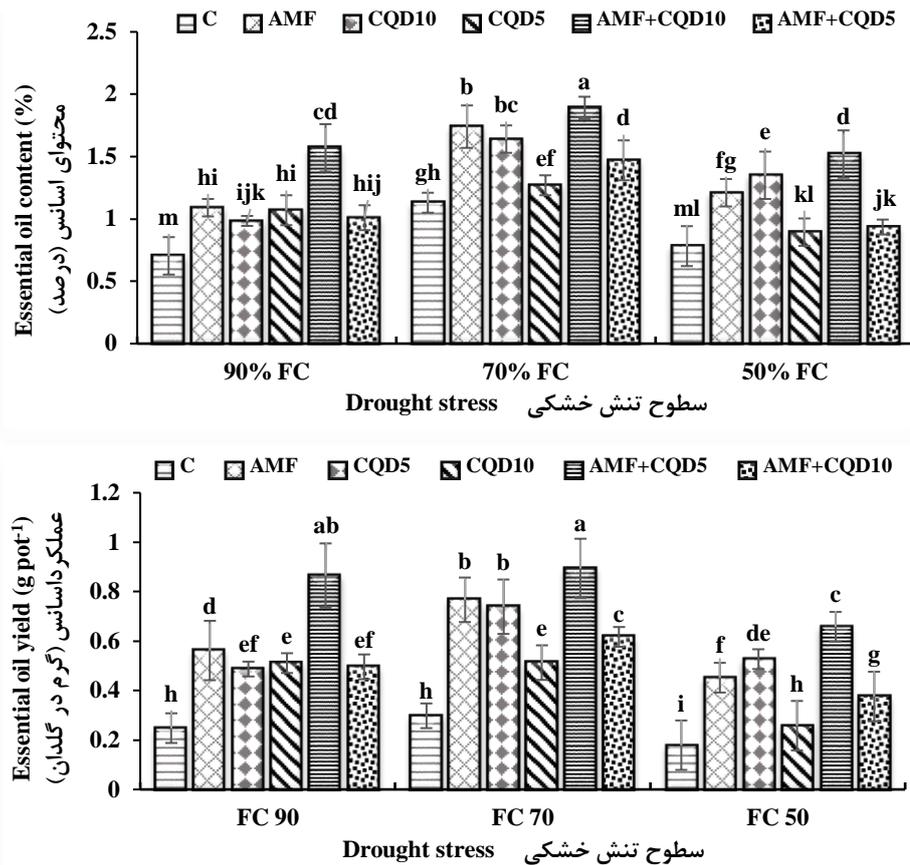
شکل ۶. اثر متقابل تیمارهای نانو و زیستی و سطوح مختلف تنش خشکی بر وزن ماده خشک نعنای گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام. ۹۰٪FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، ۷۰٪FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، ۵۰٪FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 6. Interaction effects of nano and biological treatments and different drought stress levels on the dry matter weight of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: Control, AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + 10 ppm carbon quantum dots, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + 5 ppm carbon quantum dots. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

اسانس را ۱۶۸/۳ درصد بهبود بخشید (شکل ۷). علاوه بر این، عملکرد اسانس در شرایط تنش خفیف در مقایسه با تنش شدید خشکی و عدم تنش به ترتیب ۶۰/۳ و ۲۲/۵۲ درصد افزایش یافت. همچنین، تیمارهای نانو و زیستی اثر مثبتی بر عملکرد اسانس داشتند و بهترین نتیجه نیز با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام حاصل شد، به طوری که تیمار مذکور در مقایسه با عدم کاربرد کود، به طور میانگین ۱۰۵/۳ درصد عملکرد اسانس را افزایش داد (شکل ۷). همچنین، در شرایط تنش خفیف و با استفاده از قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام عملکرد اسانس ۳۹۹/۲ درصد در مقایسه با شرایط تنش شدید بدون کود افزایش پیدا کرد (شکل ۷). افزایش اسانس در تنش خشکی خفیف معمولاً به دلیل فعال شدن مسیرهای متابولیک دفاعی در گیاه است که به صورت طبیعی برای مقابله با استرس محیطی رخ می‌دهد (Azizi et al., 2024). علاوه بر این، یکی دیگر از دلایل افزایش تولید اسانس در شرایط تنش خشکی خفیف به تجمع مواد پیش‌ساز اولیه (مانند ایزوپرنوئیدها) و کاهش مصرف آن‌ها در مسیرهای رشد

محتوا و عملکرد اسانس

تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد اثر سطوح مختلف تنش، تیمارهای نانو و زیستی و اثر متقابل سطوح مختلف تنش و تیمارهای نانو و زیستی در سطح احتمال یک درصد بر محتوای اسانس و عملکرد اسانس معنی‌دار بود. یافته‌ها نشان داد بیشترین محتوای اسانس و عملکرد اسانس در شرایط تنش خفیف و با مصرف هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام حاصل شد کمترین درصد اسانس در شرایط بدون تنش و بدون کاربرد محرک‌های رشد مشاهده شد؛ اما کمترین عملکرد اسانس در تنش شدید خشکی بدون محرک‌های رشد حاصل شد (شکل ۷). با این حال، استفاده از قارچ میکوریزا و نانوذرات بهبود محتوای اسانس و عملکرد اسانس را به همراه داشت. کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام تحت تنش خفیف در مقایسه با تیمار تنش شدید خشکی بدون مصرف میکوریزا و کربن کوانتوم دات، محتوای اسانس را ۱۴۱/۷ درصد افزایش داد. همچنین، در شرایط تنش خفیف کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام در مقایسه با تیمار شاهد محتوای



شکل ۷. اثر متقابل تیمارهای نانو و زیستی و سطوح مختلف تنش خشکی بر محتوا و عملکرد اسانس نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: شاهد (عدم مصرف کود)، AMF: قارچ میکوریزا آربوسکولار، CQD₁₀: کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، CQD₅: کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₁₀: قارچ میکوریزا آربوسکولار+ کربن کوانتوم دات با غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام، AMF+CQD₅: قارچ میکوریزا آربوسکولار+ کربن کوانتوم دات با غلظت ۵ پی‌پی‌ام، 90%FC: ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش)، 70%FC: ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی خفیف)، 50%FC: ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش خشکی شدید). حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 7. Interaction effect of nano and biological treatments and different levels of drought stress on the essential oil content and essential oil yield of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). C: Control (no fertilizer applied), AMF: Arbuscular mycorrhizal fungi, CQD₁₀: Carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, CQD₅: Carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm, AMF+CQD₁₀: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 10 ppm, AMF+CQD₅: Arbuscular mycorrhizal fungi + carbon quantum dots at a concentration of 5 ppm. 90% FC: 90% field capacity (normal irrigation), 70% FC: 70% field capacity (mild drought stress), 50% FC: 50% field capacity (severe drought stress). Different letters indicate significant differences at the 5% probability level according to the LSD test.

دلیل توانایی خود در ایجاد همزیستی با ریشه گیاهان منجر به بهبود تغذیه گیاه و افزایش متابولیسم عمومی آن می‌شود. در نتیجه، مواد اولیه بیشتری برای سنتز ترکیبات ثانویه از جمله اسانس‌ها در اختیار گیاه قرار می‌گیرد (Begum et al., 2021). به‌طور مشابه، پژوهشگران گزارش کردند قارچ‌های میکوریزا با ترشح هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و سیتوکینین رشد گیاه را تحریک و میزان تولید متابولیت‌های ثانویه در گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) را افزایش داد (Amiri et al., 2017). از سوی دیگر، نانوذرات

و تولید بیوماس بازمی‌گردد (Azizi et al., 2021; Shadkam et al., 2024). همسو با نتایج ما، محققان مشاهده کردند تنش شدید با آسیب به ساختارهای سلولی و آنزیمی گیاه و کاهش کارایی آنزیم‌های دخیل در مسیرهای تولید اسانس، کاهش محتوای اسانس را به همراه دارد (Aslani et al., 2023). با این وجود، یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از قارچ‌های میکوریزا به همراه کربن کوانتوم دات نتایج مثبتی در زمینه افزایش محتوای اسانس گیاه نعناع گریپ‌فروتی داشت. قارچ‌های میکوریزا به

ترکیب نسبی اسانس نیز در پاسخ به تنش خشکی شدید مشاهده می‌شود و این امر را به دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های خاصی که در مسیرهای دفاعی دخیل هستند و همچنین کاهش مواد پیش‌ساز این ترکیبات به دلیل افت فتوسنتز و افزایش استرس اکسیداتیو نسبت دادند (Azizi et al., 2024; Haghania et al., 2021). با این وجود، کاربرد هم‌زمان قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و کربن کوانتوم‌دات، ترکیبات اسانس نعنای گریپ‌فروتی را بهبود بخشید. اسانس‌ها ترکیب‌های ترپنوئیدی بوده و واحدهای سازنده آن‌ها (ایزوپرنوئیدها) مانند ایزوپنتنیل پیروفسفات و دی‌متیل‌آلیل-پیروفسفات، نیاز به ترکیباتی از قبیل استیل‌کوا، ATP و NADPH دارند (Aslani et al., 2023). با توجه به این موضوع که حضور عناصری نظیر نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیبات اخیر ضروری است (Begum et al., 2021). از این رو، کاربرد قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و کربن کوانتوم‌دات از طریق جذب کارآمد فسفر و تا حدودی نیتروژن توسط ریشه، موجب بهبود ترکیبات اسانس خواهد شد (Gholinezhad and Darvishzadeh, 2021). از سوی دیگر، نانوذرات به‌عنوان عوامل جذب‌کننده نور و تسهیل‌کننده انتقال انرژی در کلروپلاست‌ها عمل می‌کنند که به تبع با افزایش فعالیت فتوسنتزی، گیاه قادر است پیش‌سازهای کربنی بیشتری برای تولید ترکیبات ترپنوئیدی و اسانس‌ها فراهم کند (Gohari et al., 2021). در تائید نتایج ما، پژوهشگران دریافتند کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریزا آربوسکولار و بیوجار با فراهم کردن مواد مغذی که نقش مهمی در پیش‌ساز و ترکیبات واسطه اسانس‌ها دارند، به‌طور قابل توجهی ترکیبات اسانس گیاه اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) را تحت شرایط تنش خشکی بهبود بخشیدند (Haghania et al., 2024).

نتیجه‌گیری نهایی

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات جداگانه و هم‌افزایی کربن کوانتوم‌دات و قارچ‌های میکوریزا بر کمیت و کیفیت اسانس نعنای گریپ‌فروتی در شرایط تنش خشکی انجام شد. نتایج حاکی از آن است که این ترکیب باعث افزایش کلونیزاسیون ریشه، بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه فنل و فلاونوئیدها شد. به‌ویژه، تیمار AMF+CQD₁₀ در شرایط تنش خفیف، نه‌تنها محتوای اسانس، بلکه عملکرد

با افزایش کارایی فتوسنتز از طریق بهینه‌سازی جذب نور و تبدیل بهتر آن به انرژی شیمیایی، باعث افزایش تولید ترکیبات فتوسنتزی و در نتیجه افزایش بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه از جمله اسانس‌ها می‌شوند (Memari-Tabrizi et al., 2021; Shadkam et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات و قارچ میکوریزا آربوسکولار می‌توانند با کاهش استرس اکسیداتیو ناشی از تنش‌ها، منابع بیشتری را برای عملکرد ماده خشک و تولید اسانس به‌کارگیرند که به تبع آن افزایش عملکرد اسانس را در پی خواهد داشت (Gholinezhad and Darvishzadeh, 2021).

ترکیبات اسانس

با تجزیه اسانس نعنای گریپ‌فروتی، ۲۲ ترکیب شناسایی شد که ۹۷/۰۳ تا ۹۹/۹ درصد از کل ترکیب‌ها را شامل می‌شود (جدول ۳). در بین ترکیب‌های اسانس، لینالیل استات (۴۳/۰۵ تا ۶۵/۰۶ درصد)، لینالول (۱۷/۹ تا ۳۹/۲۷ درصد)، تریفنول (۲/۹۴ تا ۸/۰۲ درصد)، ژرانیل استات (۱/۸۸ تا ۶/۱۹ درصد)، تیمول (۰/۶۱ تا ۶/۲ درصد)، نریل استات (۰/۹۶ تا ۳/۱۱ درصد) و نرول (۰/۱ تا ۱/۵۹ درصد) ترکیب‌های غالب اسانس بودند (جدول ۳). بیشترین میزان لینالیل استات (۶۵/۶۵ درصد) با استفاده از غلظت ۵ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم‌دات در شرایط بدون تنش حاصل شد. همچنین، بیشترین لینالول (۳۹/۲۷ درصد) در شرایط تنش خفیف و با کاربرد غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم‌دات به دست آمد، در حالی که بیشترین تریفنول (۸/۴۸ درصد) و نرول (۱/۶۸ درصد) به کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار در شرایط تنش خفیف تعلق داشت (جدول ۳). علاوه بر این، حداکثر میزان تیمول (۶/۲ درصد) با کاربرد قارچ میکوریزا آربوسکولار+ غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم‌دات در شرایط تنش خفیف ثبت شد. همچنین، بالاترین میزان نریل استات (۲/۱۸ درصد) با استفاده از قارچ میکوریزا+ غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام کربن کوانتوم‌دات در شرایط تنش شدید مشاهده شد (جدول ۳). تنش خشکی شدید می‌تواند منجر به کاهش فعالیت و تعداد کلروپلاست‌ها در سلول‌های برگ شود. کلروپلاست‌ها نقشی اساسی در تولید ترکیبات پیش‌ساز ترپنوئیدها دارند که بخش اصلی ترکیبات اسانس را تشکیل می‌دهند (Babaei et al., 2021; Arpanahi et al., 2020). مطابق با نتایج ما، پژوهشگران گزارش کردند افزون بر کاهش تولید، تغییر در

نوآورانه و پایدار برای تعدیل اثرات منفی خشکی در گیاه نعناب گریپ‌فروتی باشد؛ بنابراین، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه راهبردهای نوین در کشاورزی پایدار و بهینه‌سازی تولید محصولات گیاهی در شرایط تغییرات اقلیمی و کمبود آب مورد استفاده قرار گیرد. باین‌حال، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده در شرایط مزرعه‌ای و با تنوع بیشتری از گیاهان دارویی اجرا گردد تا به درک بهتری از پتانسیل‌های این فناوری‌ها در کشاورزی منجر گردد.

اسانس را نیز افزایش داد. همچنین، تجزیه و تحلیل ترکیبات اسانس نشان داد که کاربرد CQD₅ در شرایط عدم تنش بالاترین میزان لینالیل استات را تولید کرد، در حالی که تنش خفیف همراه با CQD₁₀ به افزایش لینالول منجر شد. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیرات تیمارهای نانو-زیستی بر تغییرات ترکیب اسانس گیاه و بهبود کیفیت اسانس تحت شرایط تنش است. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که تلفیق فناوری نانو با قارچ میکوریزا می‌تواند یک رویکرد

منابع

- Abdel-Salam, E., Alatar, A., El-Sheikh, M.A., 2018. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask rose. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 25, 1772-1780. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.10.015>
- Abrar, M., Zhu, Y., Rehman, M.M.U., Batool, A., Duan, H.X., Ashraf, U., Aqeel, M., Gong, X.F., Peng, Y.N., Khan, W., Wang, Z.Y., 2024. Functionality of arbuscular mycorrhizal fungi varies across different growth stages of maize under drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 213, 108839. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108839>
- Adams, R.P., 2007. Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. 4th Edition. Allured Publishing Corporation. Carol Stream, IL.
- Ahanger, M.A., Qi, M., Huang, Z., Xu, X., Begum, N., Qin, C., Zhang, C., Ahmad, N., Mustafa, N.S., Ashraf, M., Zhang, L., 2021. Improving growth and photosynthetic performance of drought stressed tomato by application of nano-organic fertilizer involves up-regulation of nitrogen, antioxidant and osmolyte metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 216, 112195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112195>
- Alam, M.Z., Choudhury, T.R., Mridha, M.A.U., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance biomass growth, mineral content, and antioxidant activity in tomato plants under drought stress. *Journal of Food Quality*. (1), 2581608. <https://doi.org/10.1155/2023/2581608>
- Ali, Q., Tariq Javed, M., Haider, M.Z., Habib, N., Rizwan, M., Perveen, R., Ali, S., Nasser Alyemeni, M., El-Serehy, H.A., Al-Misned, F.A., 2020. α -Tocopherol foliar spray and translocation mediates growth, photosynthetic pigments, nutrient uptake, and oxidative defense in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Agronomy*. 10, 1235. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091235>
- Alsharif, E.A., Almaghribi, O., Elazzazy, A.M., Abdel-Mawgoud, M., Beemster, G.T., AbdElgawad, H.N., 2023. Carbon nanoparticles improve the effect of compost and arbuscular mycorrhizal fungi in drought-stressed corn cultivation. *Plant Physiology and Biochemistry*. 194, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.11.005>
- Alluqmani, S.M., Alabdallah, N.M., 2023. Exogenous application of carbon nanoparticles alleviates drought stress by regulating water status, chlorophyll fluorescence, osmoprotectants, and antioxidant enzyme activity in *Capsicum annum* L. *Environmental Science and Pollution Research*. 30, 57423-57433. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26606-0>
- Amiri, R., Nikbakht, A., Etemadi, N., Sabzalian, M.R., 2017. Nutritional status, essential oil changes and water-use efficiency of rose geranium in response to arbuscular mycorrhizal fungi and water deficiency stress. *Symbiosis*. 73, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0466-z>
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24, 1-16. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Arpanahi, A.A., Feizian, M., Mehdipourian, G., Khojasteh, D.N., 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation improve essential oil and physiological parameters and nutritional values of *Thymus daenensis* Celak and *Thymus vulgaris* L. under normal and drought stress conditions. *European Journal of Soil Biology*. 100, 103217. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103217>
- Aslani, Z., Hassani, A., Mandoulakani, B.A., Barin, M., Maleki, R., 2023. Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*. 309, 111610. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111610>

- Azizi, A., Bagnazari, M., Mohammadi, M., 2024. Seaweed and phosphate-solubilizing bacteria biofertilizers ameliorate physiochemical traits and essential oil content of *Calendula officinalis* L. under drought stress. *Scientia Horticulturae*. 328, 112653. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112653>
- Azizi, S., Kouchaksaraei, M.T., Hadian, J., Abad, A.R.F.N., Sanavi, S.A.M.M., Ammer, C., Bader, M.K.F., 2021. Dual inoculations of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria boost drought resistance and essential oil yield of common myrtle. *Forest Ecology and Management*. 497, 119478. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119478>
- Babaei, K., Moghaddam, M., Farhadi, N., Pirbalouti, A.G., 2021. Morphological, physiological and phytochemical responses of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) to drought stress. *Scientia Horticulturae*. 284, 110116. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110116>
- Begum, N., Akhtar, K., Ahanger, M.A., Iqbal, M., Wang, P., Mustafa, N.S., Zhang, L., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, essential oil, secondary metabolism, and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under drought stress conditions. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, 45276-45295. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13755-3>
- Božović, M., Pirolli, A., Ragno, R., 2015. *Mentha suaveolens* Ehrh. (Lamiaceae) essential oil and its main constituent piperitenone oxide: Biological activities and chemistry. *Molecules*. 20, 8605-8633. <https://doi.org/10.3390/molecules20058605>
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., Chern, J. C., 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*. 10, 178-182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- Dong, Z., Qi, J., Yue, L., Zhou, H., Chen, L., Gu, J., He, Y., Wu, H., 2024. Biomass-based carbon quantum dots and their agricultural applications. *Plant Stress*. 11, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100411>
- Farhangi-Abriz, S., Ghassemi-Golezani, K., Torabian, S., Rahimzadeh, S., Osati, F., Safarpour, H., 2024. Response of soybean plants to the foliar application of carbon quantum dots under drought stress: a field study. *Journal of Plant Growth Regulation*. 44, 621-631. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11464-y>
- Fazal, H., Akram, M., Ahmad, N., Qaisar, M., Kanwal, F., Rehman, G., Ullah, I., 2023. Nutritionally rich biochemical profile in essential oil of various *Mentha* species and their antimicrobial activities. *Protoplasma*. 260, 557-570. <https://doi.org/10.1007/s00709-022-01799-2>
- Gholinezhad, E., Darvishzadeh, R., 2021. Influence of arbuscular mycorrhiza fungi and drought stress on fatty acids profile of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Field Crops Research*. 262, 108035. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108035>
- Giménez-Santamarina, S., Llorens-Molina, J.A., Sempere-Ferre, F., Santamarina, C., Roselló, J., Santamarina, M.P., 2022. Chemical composition of essential oils of three *Mentha* species and their antifungal activity against selected phytopathogenic and post-harvest fungi. *All Life*. 15, 64-73. <https://doi.org/10.1080/26895293.2021.2022007>
- Giovannetti, M., Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*. 84, 489-500. <https://www.jstor.org/stable/2432123>
- Gohari, G., Panahirad, S., Sepehri, N., Akbari, A., Zahedi, S.M., Jafari, H., Dadpour, M.R., Fotopoulos, V., 2021. Enhanced tolerance to salinity stress in grapevine plants through application of carbon quantum dots functionalized by proline. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, 42877-42890. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13794-w>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Mahdavinia, G.R., Shah, A.A., Farooq, M., 2023. Co-application of biofertilizer and stress-modulating nanoparticles modulates the physiological, biochemical, and yield responses of camelina (*Camelina sativa* L.) under limited water supply. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 23, 6681-6695. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01521-y>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Radicetti, E., Rasouli, F., Ruiz-Lozano, J.M., Sabbatini, P., 2024. Adoption of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar for alleviating the agro-physiological response of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) subjected to drought stress. *Plant Stress*. 12, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100461>
- Hamedani, N.G., Gholamhoseini, M., Bazrafshan, F., Habibzadeh, F., Amiri, B., 2022. Yield, irrigation water productivity and nutrient uptake of arbuscular mycorrhiza inoculated sesame under drought stress conditions. *Agricultural Water Management*. 266, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107569>
- Hosseinzadeh, M.H., Ghalavand, A., Boojar, M.M.A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mokhtassi-Bidgoli, A., 2021. Application of manure and biofertilizer to improve soil properties and increase grain yield, essential oil and ω 3 of purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress. *Soil and Tillage Research*. 205, 104633. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104633>
- Igiehon, O.N., Babalola, O.O. 2021. Rhizobium and mycorrhizal fungal species improved soybean yield under drought stress conditions. *Current Microbiology*. 78, 1615-1627. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02432-w>

- Iraji Mareshk, M., Moghaddam, M., 2020. Effect of mycorrhizal fungi on growth and absorption of nutrients of Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.) under salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 13, 969-982. [In Persian with English Summary]. [https://doi: 10.22077/escs.2020.2243.1570](https://doi.org/10.22077/escs.2020.2243.1570)
- Jahanafrooz, Z., Mousavi, M. M. H., Akbarzadeh, S., Hemmatzadeh, M., Maggi, F., Morshedloo, M. R., 2024. Anti-breast cancer activity of the essential oil from grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*). *Fitoterapia*. 174, 105875. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105875>
- Javan-Gholiloo, M., Yarnia, M., Ghorttapeh, A.H., Farahvash, F., Daneshian, A.M., 2019. Evaluating effects of drought stress and bio-fertilizer on quantitative and qualitative traits of valerian (*Valeriana officinalis* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 42, 1417-1429. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1628972>
- Javanmard, A., Ostadi, A. 2024. Agronomical, ecological and economical evaluation of sage - peppermint intercropping at different irrigation levels with application of drought stress modulating. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 34, 1-27. [In Persian with English Summary]. [https://doi: 10.22034/saps.2023.54993.2974](https://doi.org/10.22034/saps.2023.54993.2974)
- Kakaei, K., Javan, H., Khamforoush, M., Zarei, S. A., 2016. Fabrication of new gas diffusion electrode based on carbon quantum dot and its application for oxygen reduction reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41, 14684-14691. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.093>
- Khodadadi, F., Ahmadi, F.S., Talebi, M., Moshtaghi, N., Matkowski, A., Szumny, A., Rahimmalek, M., 2022. Essential oil composition, physiological and morphological variation in *Salvia abrotanoides* and *S. yangii* under drought stress and chitosan treatments. *Industrial Crops and Products*. 187, 115429. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115429>
- Lenoir, I., Fontaine, J., Sahraoui, A. L. H., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: a review. *Phytochemistry*. 123, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002>
- Li, H., Huang, J., Lu, F., Liu, Y., Song, Y., Sun, Y., Lifshitz, Y., 2018. Impacts of carbon dots on rice plants: boosting the growth and improving the disease resistance. *ACS Applied Bio Materials*. 1, 663-672. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00345>
- Memari-Tabrizi, E.F., Yousefpour-Dokhanieh, A., Babashpour-Asl, M., 2021. Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physio-chemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*. 165, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.040>
- Morshedloo, M. R., Maggi, F., Neko, H. T., 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>
- Mousavi-Jangali, S.A., Tohidi Moghadam, H.R., Kasraie, P., Borzou, A., 2024. Fertilization strategies for Peppermint (*Mentha* × *piperita*) under irrigation patterns in varamin, Iran: The role of mycorrhizae depends on chemical phosphorus availability. *Agricultural Research*. 14, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00773-z>
- Nasseri, M.A., Keshtkar, H., Kazemnejadi, M., Allahresani, A., 2020. Phytochemical properties and antioxidant activity of *Echinops persicus* plant extract: Green synthesis of carbon quantum dots from the plant extract. *SN Applied Sciences*. 2, 670. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2466-0>
- Panahirad, S., Dadpour, M., Gohari, G., Akbari, A., Mahdavinia, G., Jafari, H., Kulak, M., Alcázar, R., Fotopoulos, V., 2023. Putrescine-functionalized carbon quantum dot (put-CQD) nanoparticle: a promising stress-protecting agent against cadmium stress in grapevine (*Vitis vinifera* cv. Sultana). *Plant Physiology and Biochemistry*. 197, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107653>
- Phillips, J. M., 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, 158-161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Shadkam, S., Sharafi, S., Yazdan Seta, S., Mir Mahmoodi, T., Habibi, F., 2024. The effect of foliar application of different nano fertilizers on the quantitative and qualitative characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under water stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 17, 355-370. [In Persian with English Summary]. [https://doi: 10.22077/escs.2023.5805.2177](https://doi.org/10.22077/escs.2023.5805.2177)
- Singleton, V. L., Rossi, J. A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*. 16, 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Su, L.-X., Ma, X.-L., Zhao, K.-K., C.-L. Shen, Q. Lou, D.-M. Yin, C.-X., 2018. Shan Carbon nanodots for enhancing the stress resistance of peanut plants. *ACS Omega*. 3, 17770-17777. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02604>
- Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., Liu, Y., Kang, Z., 2018. Carbon dots promote the growth and photosynthesis of mung bean sprouts. *Carbon*. 136, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>

- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., Scrivens, W. A., 2004. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*. 126, 12736-12737. <https://doi.org/10.1021/ja040082h>
- Yin, K., Bao, Q., Li, J., Wang, M., Wang, F., Sun, B., Gong, Y., Lian, F., 2024. Molecular mechanisms of growth promotion and selenium enrichment in tomato plants by novel selenium-doped carbon quantum dots. *Chemosphere*. 364, 143175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143175>
- Zare, A. S., Ganjeali, A., Kakhki, M. R. V., Mashreghi, M., Cheniany, M., 2023. Additive effects of arbuscular mycorrhizae and TiO₂ nanoparticles on growth and essential oils enhancement of peppermint. *Rhizosphere*. 25, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100659>
- Zhong, M., Yu, H., Jiang, Y., Liao, J., Li, G., Chai, S., Yang, R., Jiang, H., Wang, L., Deng, X., Zhang, L., 2024. Physiological and molecular mechanisms of carbon quantum dots alleviating Cu²⁺ toxicity in *Salvia miltiorrhiza* bunge. *Environmental Pollution*. 358, 124521. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124521>