



## Impact of carbon quantum dots (CQD) on the growth, essential oil content, and composition of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under water deficit stress conditions

Mohammad Haghaninia<sup>1</sup>, Abdollah Javanmard<sup>2\*</sup>, Zahra Ghorbani<sup>1</sup>, Mohammad Reza Morshedloo<sup>3</sup> and Karim Kakaei<sup>4</sup>

1- 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](mailto:a.javanmard@maragheh.ac.ir)

3- Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

4- Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: August 2024

Revised: June 2025

Accepted: July 2025

### Abstract

**Background and Objective:** In contemporary times, the importance of medicinal plants and their identification in advancing national, regional, and global objectives, such as achieving health, pharmaceutical self-sufficiency, fostering employment, and promoting economic development, is indisputable. *Mentha suaveolens* × *Mentha piperita*, commonly referred to as grapefruit mint, is recognized as a valuable medicinal plant within the Lamiaceae family. Drought stands out as a major limiting factor for global plant growth, constituting the most prevalent environmental stressor that disrupts the balance between reactive oxygen species and antioxidant defense mechanisms, thereby inducing oxidative stress. Nanotechnology emerges as a modern approach with notable potential to enhance plant resilience against drought stress. Among various nanomaterials, carbon quantum dots, discovered in 2004, possess distinctive characteristics, including dimensions below 10 nanometers, reduced toxicity, and superior biocompatibility compared to metal-based alternatives, owing to their carbonaceous structure. Due to these unique attributes, carbon quantum dots have attracted significant research interest in recent years. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of carbon quantum dots on the growth, yield, and essential oil composition of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under drought stress conditions.

**Methodology:** This research was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with four replications in pots during the spring and summer of 2023 at the research greenhouse of Maragheh University, East Azerbaijan, Iran. The first factor was irrigation at 90% of field capacity (FC) as control (normal irrigation), irrigation at 70% FC (moderate stress), and irrigation at 50% FC (severe stress). The second factor consisted of different levels of carbon quantum dots (0, 5, 10, 15, and 20 parts per million). Data collected from sampling were analyzed using SAS statistical software, and means were compared using the least significant difference (LSD) test at the 5% level.

**Results:** Analysis of variance indicated that the effects of different irrigation regimes, fertilizer treatments, and their interaction on all measured traits were significant. The findings revealed



that the application of 15 ppm carbon quantum dots under normal irrigation increased fresh weight, dry weight, chlorophyll a, and chlorophyll b contents by 110%, 86%, 184%, and 163%, respectively, compared to no CQD application under severe drought stress. Under moderate stress, the use of 15 ppm carbon quantum dots increased essential oil content by 135% and essential oil yield by 298% compared to severe stress without CQD. Furthermore, the highest linalyl acetate content was obtained with 15 ppm carbon quantum dots under 50% FC, showing a 50.1% increase compared to the control treatment. Similarly, the highest linalool content was recorded under normal irrigation with 10 ppm carbon quantum dots, representing a 67.4% increase compared to no CQD application under 50% FC. Moreover, under normal irrigation, 15 ppm carbon quantum dots reduced malondialdehyde and hydrogen peroxide contents by 51% and 58%, respectively, compared to no CQD application under severe stress. Additionally, under mild stress, 15 ppm carbon quantum dots enhanced the activity of superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, and ascorbate peroxidase enzymes by 123%, 111%, and 72%, respectively, compared to no fertilizer application under normal conditions.

**Conclusion:** The results indicate that applying 15 ppm carbon quantum dots can promote growth by modulating secondary metabolites and strengthening defense mechanisms through the activation of antioxidant enzymes and increasing the accumulation of osmolytes such as proline and total soluble sugars, thereby reducing malondialdehyde and hydrogen peroxide levels. This enhancement in grapefruit mint plants contributes to improved drought resilience, ultimately enhancing both the quantity and quality of the essential oil.

**Keywords:** antioxidant enzymes, drought stress, secondary metabolite, essential oil yield, nanoparticles, sustainable agriculture.

## اثر نقاط کوانتومی کربن بر رشد، میزان و ترکیبات اسانس *Mentha suaveolens* × *piperita* تحت شرایط تنش کم آبی

محمد حقانی نیا<sup>۱</sup>، عبدالله جوانمرد<sup>۲\*</sup>، زهرا قربانی<sup>۳</sup>، محمدرضا مرشدلو<sup>۴</sup> و کریم کاکایی<sup>۵</sup>

۱- دانش آموخته دکتری آگروتکنولوژی - آکولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲\* - نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، پست الکترونیک: [a.javanmard@maragheh.ac.ir](mailto:a.javanmard@maragheh.ac.ir)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

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

۵- استاد، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح نهایی: خرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: تیر ۱۴۰۴

### چکیده

سابقه و هدف: نعناع گریپ فروتی، با نام علمی *Mentha suaveolens* × *piperita*، یکی از گیاهان دارویی با ارزش است که به خانواده نعنایان (Lamiaceae) تعلق دارد. علاوه بر این، خشکی یکی از مهمترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در سراسر جهان و شایع ترین تنش محیطی است که از طریق ایجاد اختلال در تعادل بین گونه های فعال اکسیژن و فعالیت های دفاعی آنتی اکسیدانی، موجب تنش اکسیداتیو می گردد. نانو تکنولوژی راهبرد مدرنی است که نشان داده می تواند مقاومت گیاهان را در برابر تنش خشکی افزایش دهد. نقاط کوانتومی کربن یکی از این نانو مواد می باشد که در سال ۲۰۰۴ کشف شد که به عنوان یک نانو مواد جدید با اندازه کوچک تر از ۱۰ نانومتر هستند و در مقایسه با سایر نانو مواد مبتنی بر فلز، نانو موادی مبتنی بر کربن بوده که سمیت کمتر و زیست سازگاری بالاتری به دلیل ساختار کربنی از خود نشان می دهند و به دلیل این ویژگی های منحصر به فرد در سال های اخیر کانون توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی اثر نقاط کوانتومی کربن بر رشد، میزان و ترکیبات اسانس نعناع گریپ فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*) در شرایط تنش کم آبی اجرا شد.

مواد و روش ها: این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار به صورت گلدانی در بهار و تابستان ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه مراغه - آذربایجان شرقی انجام شد. فاکتور اول آبیاری در ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به عنوان شاهد (آبیاری نرمال)، آبیاری در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) و فاکتور دوم شامل سطوح مختلف نقاط کوانتومی کربن (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ پی پی ام) بود. در نهایت، داده های حاصل از نمونه برداری ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و مقایسه میانگین های صفات به روش آزمون حداقل تفاوت معنی دار در سطح پنج درصد انجام شد. نتایج: تجزیه واریانس صفات نشان داد که اثر رژیم های مختلف آبیاری، تیمارهای کودی و اثر متقابل آنها بر روی کلیه صفات اندازه گیری شده معنی دار بود. نتایج نشان داد استفاده از ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط آبیاری نرمال وزن تر، وزن خشک، محتوای کلروفیل a و کلروفیل b نسبت به عدم مصرف در شرایط تنش خشکی شدید به ترتیب ۱۱۰، ۸۶، ۱۸۴ و ۱۶۳ درصد افزایش داد. علاوه بر این، محتوای و عملکرد اسانس در تنش متوسط با کاربرد ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن به ترتیب ۱۳۵ و ۲۹۸ درصد نسبت به تنش شدید بدون کاربرد نقاط کوانتومی کربن افزایش یافتند. همچنین، بیشترین لینالیل استات با کاربرد تیمار ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در

آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که در مقایسه با تیمار شاهد ۵۰/۱ درصد افزایش را نشان داد. علاوه بر این، بیشترین لینالول در آبیاری نرمال و با کاربرد ۱۰ پی‌پی‌ام نقاط کواتومی کربن ثبت شد که نسبت به تیمار عدم کاربرد نقاط کواتومی کربن در شرایط آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ۶۷/۴ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، کاربرد ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کواتومی کربن در شرایط آبیاری نرمال در مقایسه با عدم مصرف آن در شرایط تنش خشکی شدید، محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن را به ترتیب ۵۱ و ۵۸ درصد کاهش داد. همچنین، در شرایط تنش ملایم استفاده از غلظت ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کواتومی کربن فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، گایکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز را در مقایسه با عدم مصرف در شرایط نرمال به ترتیب ۱۲۳، ۱۱۱ و ۷۲ درصد افزایش داد. نتیجه‌گیری: نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که کاربرد نقاط کواتومی کربن با غلظت ۱۵ پی‌پی‌ام می‌تواند با تأثیر بر متابولیت‌های ثانویه و بالا بردن پارامترهای دفاعی مانند فعال کردن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانسی و افزایش مقدار اسمولیت‌های سازگاری مانند پرولین و کربوهیدرات‌های محلول در آب موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن شده و به گیاه نفع گریپ‌فروتی کمک کند تا سازگاری بیشتری در برابر خشکی داشته و در نهایت بهبود کمیت و کیفیت اسانس را به همراه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، عملکرد اسانس، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، کشاورزی پایدار، متابولیت ثانویه، نانوذرات.

## مقدمه

استفاده از گیاهان دارویی و مشتقات آنها، علاوه بر کشورهای در حال توسعه، در کشورهای پیشرفته نیز رواج دارد و به دلیل قابلیت‌های بی‌نظیرشان در طب سنتی و مدرن، کشت و تولید این گیاهان در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته است (Kulak et al., 2023; Kumaret et al., 2024). با توجه به تنوع جغرافیایی و شرایط آب و هوایی متنوع در ایران، رشد بیشتر گونه‌های گیاهان دارویی در کشور امکان‌پذیر است (Samadiyan-Sarbangholi et al., 2024). از این رو، کشت گیاهان دارویی و تولید محصولات مرتبط می‌تواند به عنوان یک ضرورت ملی در چارچوب برنامه‌های مشخص، به‌ویژه ایجاد خودکفایی دارویی، ایجاد اشتغال و توسعه بخش کشاورزی مؤثر باشد (Haghaninia et al., 2024a).

نعناع گریپ‌فروتی با نام علمی *Mentha suaveolens* × *piperita*، یکی از گیاهان دارویی با ارزش است که به خانواده نعناعیان (Lamiaceae) تعلق دارد (Akbarzadeh et al., 2023). این گیاه دارای رایحه ممتاز گریپ‌فروتی است که در تهیه چای، آبمیوه، دسر و سالاد استفاده می‌شود و اسانس آن نیز در محصولات آرایشی، بهداشتی، صنایع بستنی و

شکلات‌سازی کاربرد دارد (Wang et al., 2016). اسانس نعناع گریپ‌فروتی شامل ترکیبات مؤثری مانند لینالول، لینالول استات، آلفا ترپینئول و ژرانیل استات است که همگی دارای رایحه ممتازی هستند و می‌توان از آنها در صنایع عطرسازی استفاده کرد (Akbarzadeh et al., 2022; Salehi et al., 2018). همچنین، اسانس این گیاه از پرکاربردترین اسانس‌ها برای خوشبو کردن مواد غذایی و دارویی، دارو برای مراقبت از دهان و دندان، شربت‌های سرماخوردگی، آدامس‌های جویدنی، صنعت شیرینی‌سازی و در نوشیدنی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Salehi et al., 2018; Ahmadi et al., 2022). برگ‌ها و اسانس این گیاه دارای خواص دارویی مانند داروهای ضد نفخ و محرک معده می‌باشد و خواص ضد باکتریایی، ضد ویروسی، ضد انگلی و ضد قارچی این اسانس نیز گزارش شده است (Wang et al., 2024; Jahanafrooz et al., 2016; de Sousa Barros et al., 2015).

تنش خشکی به عنوان یک چالش مهم برای کشاورزی در جهان شناخته شده و شدت آن به صورت روزافزون در حال افزایش است (Ahmad et al., 2024; Haghaninia et al., 2023). حساسیت گیاهان به تنش خشکی فرایند پیچیده‌ای است که به عواملی مانند مرحله رشد گیاه، مدت و شدت تنش

برای کودهای شیمیایی که سبب حفظ محیط‌زیست، منابع طبیعی، سلامت انسان و ارتقای کیفیت محصولات می‌گردد مورد توجه تولیدکنندگان بخش کشاورزی قرار گرفته است (Ahmad *et al.*, 2024). نانوذره‌ها، موادی با اندازه‌های ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشند که به راحتی جذب گیاه می‌شوند. این ذرات دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی مانند سطح ویژه بالا، حداکثر جذب، واکنش‌پذیری بالا، پایداری و آلودگی کمتر هستند (Aqeel *et al.*, 2023؛ Nekoukhou *et al.*, 2023). نقاط کوانتومی کربن (CQD) ذراتی نیمه‌رسانا در ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر هستند و یکی از اعضای خانواده شناخته شده نانومواد مبتنی بر کربن می‌باشند که نسل جدیدی از فناوری‌ها را به وجود آورده‌اند (Bai *et al.*, 2019). نقاط کوانتومی کربن در مقایسه با سایر نانو مواد مبتنی بر فلز، نانو مواد مبتنی بر کربن سمیت کمتر و زیست‌سازگاری بالاتری به دلیل ساختار کربنی از خود نشان می‌دهند و به دلیل بازده کوانتوم بالا، پایداری فیزیکی و شیمیایی بالا و عمر بالای تابش فلئورسنت از اهمیت بالایی برخوردارند (Lim *et al.*, 2015). همچنین، این نانوذرات از طریق اثربخشی آنها در سم‌زدایی ROS، تأثیر زیادی بر رشد و نمو گیاه و بر تحمل گیاه به تنش‌های غیرزیستی دارند که کاربرد آن را به یک راهبرد امیدوارکننده برای صنایع کشاورزی تبدیل کرده است (Li *et al.*, 2018؛ Chakravarty *et al.*, 2015). در این راستا، نتایج Gohari و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که کاربرد نقاط کوانتومی کربن اثرهای مخرب تنش شوری بر انگور (*Vitis vinifera*) را با بهبود وزن تر و خشک برگ، محتوای  $K^+$ ، رنگدانه‌های فتوسنتزی، فلورسانس کلروفیل، SPAD و بهبود فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاهش داد. همچنین، Su و همکاران (۲۰۱۸) اثرهای CQD بر رشد بادام زمینی (*Arachis hypogaea*) را در شرایط خشکسالی مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند کاربرد نقاط کوانتومی کربن اثرهای خشکی را با افزایش

و ظرفیت ژنتیکی گیاه بستگی دارد (D'Agostino *et al.*, 2024؛ Kumaret *et al.*, 2024). اگرچه تنش می‌تواند منجر به افزایش متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی شود، اما اگر بیش از حد تحمل گیاه باشد، ممکن است به خسارت و کاهش متابولیت‌های ثانویه در این گیاهان منجر گردد (Asghari *et al.*, 2023؛ Araniti *et al.*, 2024). از سوی دیگر، تنش خشکی با ایجاد اختلال در تعرق، کاهش فعالیت فتوسنتزی و آنزیمی گیاهان، باعث می‌شود فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاهان مختل و بهره‌وری محصول کاهش یابد (Mohammadi *et al.*, 2024؛ Haghaninia *et al.*, 2024a). در این راستا، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنش خشکی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و تولید اسانس گیاه نعناع گریپ‌فروتی داشته باشد. به‌عنوان مثال، Akbarzadeh و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تنش خشکی موجب افزایش پراکسیداسیون لیپیدی غشا و آسیب سلولی شده و عملکرد ماده خشک را در گیاه نعناع گریپ‌فروتی کاهش داد. با این حال، در شرایط تنش خشکی خفیف، محتوای اسانس به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و نسبت به شرایط شاهد، حدود ۱۴۰ درصد بیشتر شد. همچنین، در این تحقیق، لینالول و لینالول استات به‌عنوان فراوان‌ترین ترکیبات اسانس شناسایی شدند.

در تولید گیاهان دارویی، عواملی مانند شرایط خاک و عناصر غذایی حائز اهمیت بسیاری هستند (Mohammadi *et al.*, 2024). یکی از روش‌های اصلی افزایش عناصر غذایی خاک و به تبع آن عملکرد گیاهان، استفاده از کودهای شیمیایی است. با این حال، باید توجه داشت که مصرف زیاد این کودها می‌تواند منجر به مشکلات متعددی از قبیل آلودگی محیط‌زیست و آب‌های زیرزمینی، فرسایش خاک، ایجاد بیماری‌های گوناگون در انسان و کاهش کیفیت مواد غذایی گردد (Haghaninia *et al.*, 2023). از این رو، استفاده از فناوری‌های نوین از جمله نانوکودها به عنوان جایگزین مناسب

گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه اجرا شد. شرایط رشد بهینه دمای ۱۸-۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت ۶۰-۷۰ درصد، ۸-۱۶ ساعت دوره نوری، شدت نور ۱۸۰ میکرومول در مترمربع در ثانیه برای گیاهان نعناع گریپ‌فروتی فراهم کرد.

#### طراحی آزمایش و تیمارها

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۴ تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل آبیاری در ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به عنوان شاهد (آبیاری نرمال)، آبیاری در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش متوسط) و آبیاری در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) و فاکتور دوم شامل سطوح مختلف نقاط کواتومی کربن (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ پی‌پی‌ام) بود.

#### آماده‌سازی بستر کشت

در این پژوهش نشاهای ۱۰ سانتی‌متری نعناع گریپ‌فروتی در مخلوطی از کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۱:۲ ریشه‌دار شدند. سپس به گلدان‌های نیم‌لیتری منتقل و پس از رسیدن گیاهچه‌ها به اندازه مطلوب، به گلدان‌های پلاستیکی ۵ لیتری که حاوی ترکیبی از ۵۰ درصد خاک مزرعه، ۲۵ درصد ماسه، ۱۵ درصد کود دامی پوسیده و ۱۰ درصد پرلیت بود منتقل گردید. علاوه بر این، برخی از خصوصیات خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید تعدیل نمود.

نعناع گریپ‌فروتی، با وجود کاربردهای فراوان آن در صنایع داروسازی، آرایشی-بهداشتی و غذایی، هنوز در بسیاری از مناطق ایران کشت نمی‌شود و تحقیقات در مورد این گیاه محدود است. از این‌رو، تحقیق در این زمینه می‌تواند نقشی کلیدی در معرفی و گسترش کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ایفا کند و علاوه بر تأثیر مثبت بر اقتصاد کشاورزی، به رشد صنایع دارویی، آرایشی و غذایی کمک کند. از سویی، پرکردن شکاف‌های تحقیقاتی در زمینه تأثیر نقاط کواتومی کربن بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان دارویی مانند نعناع گریپ‌فروتی در شرایط نامساعد محیطی می‌تواند چشم‌اندازهای مهمی برای کشاورزی پایدار در ایران به‌مراه داشته باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی اثر نقاط کواتومی کربن بر عملکرد کمی و کیفی اسانس و برخی پاسخ‌های بیوشیمیایی نعناع گریپ‌فروتی (*Mentha suaveolens* × *piperita*) در شرایط تنش کم‌آبی اجرا گردید که می‌تواند به راه‌حلی برای مدیریت تنش‌های محیطی و دستیابی به کشاورزی پایدار در مناطق کم‌آب و خشک ایران منجر شود.

#### مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش و شرایط رشد

این تحقیق به صورت گلدانی در بهار و تابستان ۱۴۰۲ در

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت نعناع گریپ‌فروتی

Table 1. Physicochemical properties of soil before *Mentha suaveolens* × *piperita* planting

Soil texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil organic matter (g.kg <sup>-1</sup> )	EC (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	Field capacity (%)	Permanent wilting point (%)	Exchangeable potassium (mg.kg <sup>-1</sup> )	Cation exchange capacity (cmolc.kg <sup>-1</sup> )	Available phosphorus (mg.kg <sup>-1</sup> )	Total nitrogen (%)
Sandy clay loam	56	15.3	29.4	8.3	1.13	8.17	27.1	13.7	553.91	24.1	8.8	0.082

## رژیم‌های آبیاری و اعمال تیمارها

آبیاری گلدان‌ها تا دو هفته پس از انتقال نشاها به صورت مرتب و براساس نیاز گیاه و در حد ظرفیت زراعی خاک (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) انجام شد. بعد از اینکه گیاهان کاملاً در گلدان استقرار پیدا کردند، تنش رطوبتی با وزن کردن روزانه گلدان‌ها در طول دوره کشت اعمال شد. برای بدست آوردن ظرفیت زراعی، یکی از گلدان‌ها را تا حد اشباع آبیاری کرده و روی گلدان را به مدت ۲۴ ساعت توسط پلاستیک کشیده تا رطوبت بستر کشت (آب اضافی) از سوراخ‌های انتهایی گلدان خارج گردد. پس از آن، اقدام به توزین خاک گلدان کرده و بعد در دستگاه آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. بدین ترتیب ظرفیت زراعی خاک گلدان‌ها مشخص گردید. در این راستا، برای محاسبه میزان آب لازم برای رسیدن به ظرفیت زراعی از رابطه زیر استفاده شد (Haghaninia et al., 2024a).

$$FC = \frac{\text{وزن خاک خشک شده در آون}}{\text{وزن خاک خشک شده در آون - وزن خاک در ظرفیت مزرعه}} \times 100\%$$

## سنتر نقاط کوانتومی کربن

نقاط کوانتومی کربن به روش الکتروشیمیایی به صورت زیر سنتر شده است. یک منبع تغذیه DC با مدل ADAK با سیستم دو الکترودی برای سنتر CQDs استفاده شد (Xu et al., 2004). دو میله گرافیتی با ضخامت ۶/۵ میلی متر در آب فوق خالص تحت ولتاژ 30-40 V قرار گرفت. سیستم بر روی همزن برای چند روز همزده شد تا اینکه یک مخلوط قهوه‌ای تیره حاصل شد. این مخلوط فیلتر شده و بعد تحت سانتریفوژ دور بالا قرار گرفته و بدین ترتیب محلولی از نانوذرات نقاط کوانتومی کربن بدست آمد (Kakaei et al., 2016). در نهایت، به منظور اعمال نقاط کوانتومی کربن، سه روز قبل از شروع تنش برای فعال کردن سازوکارهای دفاعی و آنتی‌اکسیدانی یک مرحله محلول‌پاشی

نقاط کوانتومی کربن انجام شد. همچنین، پس از شروع تنش، ۳ مرحله محلول‌پاشی به فواصل ۱۰ روز انجام گردید.

## صفات و روش‌های اندازه‌گیری

## اندازه‌گیری وزن تر و خشک گیاه

در پایان رشد گیاه، گیاهان هر گلدان از فاصله ۵ سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد و وزن تر آنها با استفاده از ترازوی حساس (با دقت ۰/۰۱) اندازه‌گیری گردید. علاوه بر این، به منظور اندازه‌گیری وزن خشک گیاهان، نمونه‌ها در پاکت‌های مقوایی قرار داده شدند و در محیطی با شرایط سایه و تهویه مناسب نگهداری گردیدند. این محیط به گونه‌ای انتخاب شد که از نور مستقیم خورشید و دماهای بالا جلوگیری شود و رطوبت به صورت یکنواخت از گیاهان خارج شود.

## اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های نعناع گریپ فروتی با روش Lichtenthaler و همکاران (۱۹۸۷) مشخص گردید. بدین منظور ۱۰۰ میلی‌گرم وزن تر برگ در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد خوب ساییده شد. سپس لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شدند. حجم محلول فوقانی توسط استون ۸۰ درصد به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکترومتر با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳ و ۶۴۶ تعیین گردید.

## اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول و پروتئین

به منظور اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول، ابتدا به ۱/۰ گرم از بافت تازه گیاه ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد اضافه شد و به مدت یک هفته در یخچال نگهداری گردید. سپس یک میلی‌لیتر از محلول نمونه‌ها برداشته شد و حجم آن با آب مقطر

### اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن

مقدار هیدروژن پراکسید براساس روش اسپکتروفتومتری و از طریق روش Alexieva و همکاران (۲۰۰۱) اندازه‌گیری شد. به طور خلاصه، ۵۰ میلی‌گرم از برگ‌های جوان فریز شده به وسیله ۵ میلی‌لیتر از ماده تری‌کلرو استیک اسید ۱/۰٪ هضم شد. پس از سانتریفوژ، ۵۰۰ میکرولیتر از مایع رویی حاصل با ۵۰۰ میکرولیتر بافر K-phosphate (۱۰۰ میلی‌مولار) و ۲ میلی‌لیتر محلول یدید پتاسیم مخلوط شد. میزان جذب نیز در ۳۹۰ نانومتر قرائت شد. غلظت ایده‌آل پراکسید هیدروژن در نهایت از طریق یک منحنی استاندارد براساس غلظت تعیین شده  $H_2O_2$  برآورد شد.

### استخراج اسانس

برای استخراج اسانس نعناع گریپ‌فروتی از دستگاه کلونجر (مدل فارماکوپه بریتانیا) استفاده شد. اسانس‌گیری به مدت سه ساعت از اندام‌های هوایی نعناع گریپ‌فروتی انجام شد. سپس اسانس‌های استخراج شده با سولفات سدیم خشک آبگیری و داخل ویال شیشه‌ای در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری گردید. بعد از اسانس‌گیری، درصد و عملکرد اسانس محاسبه گردید.

### شناسایی ترکیب‌های اسانس

برای شناسایی ترکیب‌های اسانس 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 شد. علاوه بر این، محاسبه و شناسایی ترکیب‌های اسانس به کمک شاخص‌های بازدارداری خطی آنها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب‌های مرجع و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیب‌های استاندارد و استفاده از

به دو میلی‌لیتر رسانده شد. پس از اضافه کردن یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد و پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ میزان جذب به وسیله اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر خوانده شد و هر نمونه با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز برحسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک محاسبه شد (Hedge & Hofreiter, 1962). علاوه بر این، به منظور سنجش میزان پرولین از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) استفاده شد و در نهایت با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800 Shimadzu, Japan) در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد و با قرارگیری آن در معادله خط، مقدار پرولین نمونه‌ها به دست آمد.

### آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز براساس روش توصیه شده Beauchamp و Fridovich (۱۹۷۱) اندازه‌گیری شد و میزان جذب نمونه‌ها در ۵۶۰ نانومتر قرائت و برحسب واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین بیان گردید. همچنین، سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) مشخص شد و سنجش فعالیت آنزیم در مدت ۱۸۰ ثانیه و در طول موج ۲۹۰ نانومتر ثبت شد و برحسب واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین بیان گردید. علاوه بر این، اندازه‌گیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز نیز براساس روش Upadhyaya و همکاران (۱۹۸۵) انجام و برحسب واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین بیان گردید.

### اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدهید

برای تعیین غلظت مالون‌دی‌آلدهید از روش Heath و Packer (۱۹۶۸) استفاده شد و بعد شدت جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری و غلظت مالون‌دی‌آلدهید برحسب نانومول بر گرم وزن تر گیاه گزارش گردید.



نتایج تحلیل واریانس نشان داد که ارتفاع بوته نعنای گریپ فروتی تحت تأثیر تنش خشکی، تیمار محرک رشد نقاط کوانتومی کربن و تأثیر متقابل این دو فاکتور قرار گرفت (جدول ۲). بالاترین ارتفاع بوته با کاربرد ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط آبیاری نرمال مشاهده شد، در حالی که کمترین ارتفاع آن در شرایط تنش خشکی بدون استفاده از نقاط کوانتومی کربن تعلق داشت. همچنین، استفاده از غلظت ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط آبیاری نرمال موجب افزایش ۱۳۰ درصدی ارتفاع بوته نسبت به عدم استفاده از آن در شرایط تنش خشکی شدید گردید (شکل ۱).

اطلاعات موجود در کتابخانه رایانه‌ای انجام شد (Morshedloo et al., 2018).

### تجزیه آماری

داده‌های حاصل از سنجش پارامترهای مختلف، با استفاده از نرم‌افزارهای SAS (V9) و آزمون LSD تجزیه و تحلیل شدند. تجزیه واریانس داده‌ها با ضریب اطمینان ۹۵٪ انجام و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 رسم شدند.

### نتایج

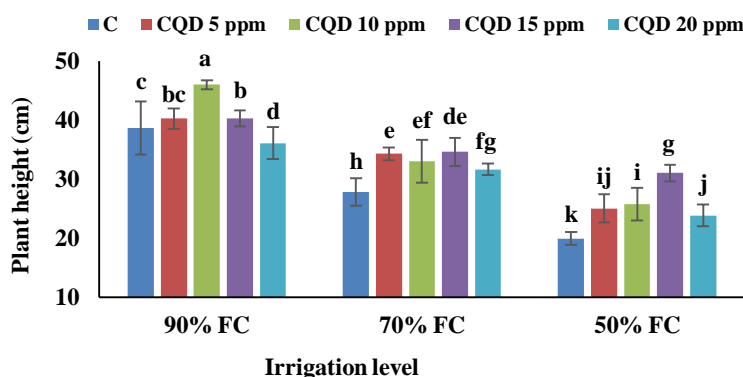
#### ارتفاع بوته

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نقاط کوانتومی کربن و خشکی بر ارتفاع بوته، وزن تر و خشک و درصد و عملکرد اسانس نعنای گریپ فروتی

**Table 2. ANOVA of carbon quantum dots and drought stress effects on plant height, fresh and dry weight, and content and essential oil yield of *Mentha suaveolens* × *piperita***

S.O.V.	d.f.	Plant height	Fresh weight	Dry weight	Essential oil content	Essential oil yield
Field capacity (FC)	2	756.27**	3900.28**	735.48**	2.18**	0.29**
Carbon quantum dots (CQD)	4	312.88**	484.46**	83.95**	0.511**	0.16**
FC × CQD	8	202.33**	752.91**	132.68**	0.05**	0.09**
Experimental error		2.34	16.13	1.90	0.008	0.002
C.V. (%)		4.69	6.22	4.51	7.72	12.57

\*\* : significant at 1% probability level.



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر نقاط کوانتومی کربن × آبیاری بر ارتفاع بوته نعنای گریپ فروتی

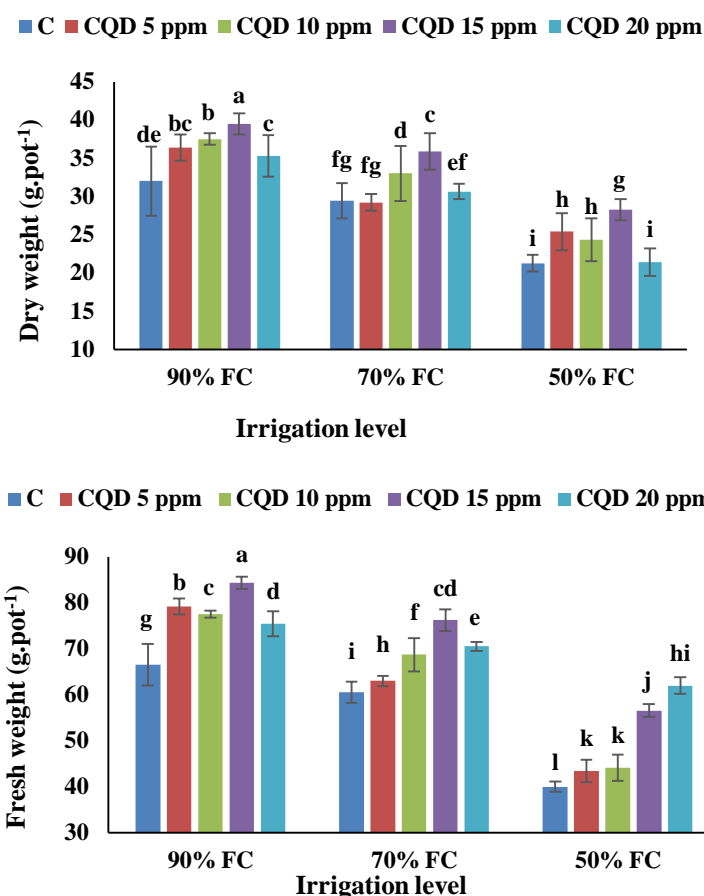
**Figure 1. Means comparison of carbon quantum dots × irrigation effects on *Mentha suaveolens* × *piperita* plant height**

90% FC, 70% FC, and 50% FC: normal irrigation, mild, and severe drought stresses, respectively. Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

که کمترین عملکرد در شرایط تنش خشکی شدید بدون نقاط کوانتومی کربن مشاهده شد. همچنین، استفاده از ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط آبیاری نرمال باعث افزایش ۱۱۰ درصدی وزن تر و ۸۶ درصدی وزن خشک نسبت به عدم کاربرد آن در شرایط تنش خشکی شدید شد (شکل ۲).

وزن تر و خشک

نتایج جدول ۲ نشان داد که اثر تنش خشکی، تیمار محرک رشد نقاط کوانتومی کربن و تأثیر متقابل تنش خشکی و نقاط کوانتومی کربن بر وزن تر و خشک نفع‌گریپ‌فروتی معنی‌دار بود. بالاترین وزن تر و خشک در شرایط آبیاری نرمال با غلظت ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن بدست آمد، در حالی



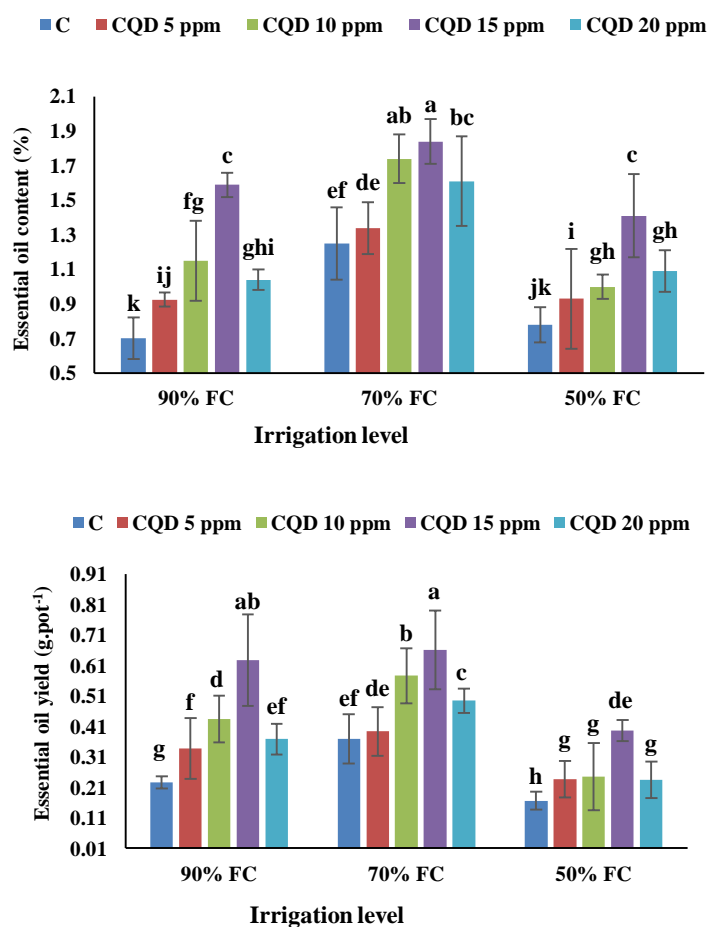
شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر نقاط کوانتومی کربن × آبیاری بر وزن تر و خشک نفع‌گریپ‌فروتی

Figure 2. Means comparison of carbon quantum dots × irrigation effects on *Mentha suaveolens* × *piperita* fresh and dry weight

90% FC, 70% FC, and 50% FC: normal irrigation, mild, and severe drought stresses, respectively. Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

با تنش شدید ۹۵ درصد بیشتر بود. کاربرد غلظت ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط تنش متوسط در مقایسه با شاهد عملکرد اسانس را ۱۹۳ درصد و درصد اسانس را ۱۶۲ درصد افزایش داد (شکل ۳). همچنین، استفاده از ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن در تنش متوسط، محتوا و عملکرد اسانس نعنای گریپ فروتی را به ترتیب ۱۳۵ و ۲۹۸ درصد نسبت به تنش شدید و بدون کاربرد CQD افزایش داد.

درصد و عملکرد اسانس  
درصد و عملکرد اسانس به طور معنی داری تحت تأثیر تنش خشکی، نقاط کوانتومی کربن و تأثیر متقابل تنش خشکی و نقاط کوانتومی کربن قرار گرفت (جدول ۲). بالاترین درصد عملکرد اسانس به تنش متوسط تیمار شده با ۱۵ پی پی ام نقاط کوانتومی کربن مربوط بود. میزان اسانس تولیدی در تنش متوسط نسبت به شرایط نرمال آبیاری ۲۶ درصد و در مقایسه



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر نقاط کوانتومی کربن × آبیاری بر درصد و عملکرد اسانس نعنای گریپ فروتی

Figure 3. Means comparison of carbon quantum dots × irrigation effects on content and yield of *Mentha suaveolens* × *piperita* essential oil

90% FC, 70% FC, and 50% FC: normal irrigation, mild, and severe drought stresses, respectively. Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

جدول ۳- تأثیر نقاط کوانتومی کربن و تنش خشکی بر ترکیبات اسانس نعناع گریپ فروتی

Table 3. Effects of carbon quantum dots and drought stress on essential oil constituents of *Mentha suaveolens* × *piperita*

No	Compound	RI <sup>a</sup>	LIT.RI <sup>b</sup>	Treatment															
				90%F C CQD0	90%F C CQD5	90%F C CQD10	90%F C CQD15	90%FC CQD20	70%FC CQD0	70%FC CQD5	70%F C CQD10	70%F C CQD15	70%F C CQD20	50%FC CQD0	50%FC CQD5	50%FC CQD10	50%F C CQD15	50%F C CQD20	
1	n-nonane	898	900	tr	0.1	-	tr	tr	tr	tr	0.1	-	0.2	-	0.3	-	-	tr	-
2	β-pinene	972	974	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	tr	-	-	-	-	tr	0.1	0.1
3	1-octen-3-ol	975	977	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
4	myrcene	988	988	0.3	tr	0.2	-	tr	0.1	tr	0.5	tr	tr	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	
5	n-decane	998	1000	1.3	1.5	1.8	1.6	1.2	1.5	1.5	1.5	1.4	2.1	0.8	0.9	1.1	0.9	1.1	
6	p-cymene	1021	1024	0.1	tr	tr	tr	0.1	tr	tr	tr	tr	tr	tr	-	tr	tr	tr	
7	liminene	1025	1025	1.1	1.2	1.4	0.6	1.1	1.2	1.4	1.3	1.1	1.9	0.7	0.8	0.5	0.8	1.4	
8	1,8-cineole	1027	1026	1	1.1	1.3	0.3	0.1	1.8	1.2	1.3	0.2	0.8	0.6	0.6	0.7	0.6	2.5	
9	γ-terpinene	1035	1032	-	-	-	tr	tr	-	tr.	tr.	-	tr	tr.	tr.	tr.	tr	tr	
10	terpinolene	1045	1044	0.1	0	0.2	0.1	0.1	tr	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	-	0.3	0.1	
11	linalool	1055	1054	39.5	39.8	45.9	41.9	38.4	26.5	29.6	22.2	28.3	26.2	27.4	25.1	25.4	23.5	22.8	
12	α-terpineol	1084	1086	-	-	-	-	-	tr	-	-	0.2	-	0.5	-	-	-	-	
13	n-dodecane	1102	1096	0.4	tr	-	-	tr.	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	-	
14	nerol	1168	1172	4.8	4.5	6.7	4.1	4.8	5.1	1.7	2.4	1.2	2.7	4.2	4.5	1.6	4.2	3.4	
15	carvone	1187	1186	0	tr	0	1.1	0.1	tr	tr	-	-	tr	-	tr	0.1	-	tr	
16	linalyl acetate	1198	1200	40.3	41.2	28.3	38.9	37.9	52.1	55.3	57.4	60.5	53.3	54.7	54.6	63.2	57.2	53.1	
17	thymol	1225	1227	2.9	2.7	3.9	2.1	2.9	3.1	1.5	2.3	1.3	1.8	2.3	2.4	1.2	2.5	2.3	
18	carvacrol	1239	1239	-	0.1	tr	0.9	-	tr	-	tr.	tr.	-	-	tr	tr	tr.	0	
19	neryl acetate	1257	1254	1.1	1.5	1.8	1.7	1.4	2.4	1.5	2.2	1.4	2.1	1.1	1.3	1.1	1.2	1.3	
20	geranyl acetate	1290	1289	2.7	2.8	3.6	3.3	2.8	2.8	3.1	4.5	2.3	2.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.1	
21	E-caryophyllene	1299	1298	tr.	-	tr.	0.1	-	-	tr.	-	tr.	-	-	tr.	tr	0.1	tr	
22	E-β-farnesene	1363	1361	-	-	0.1	0.8	tr	0.2	0.4	-	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	tr	tr	
23	bicyclogermacrene	1413	1417	-	tr	tr	0.1	-	0	-	-	tr	-	-	tr	-	tr	-	
24	viridiflorol	1454	1454	0.5	0.5	0.5	0.2	0.7	0.5	0.5	0.6	0.9	0.6	0.8	0.6	0.7	0.5	1.9	
Total				96.3	97.2	95.9	98.9	91.8	97.5	98.2	96.6	99.5	94.2	96.4	93.7	97.1	94.5	92.4	

<sup>a</sup> Linear retention indices on DB-5 MS column, experimentally determined using homologue series of n-alkanes; <sup>b</sup> Relative retention indices taken from Adams.

90% FC, 70% FC, and 50% FC: normal irrigation, mild, and severe drought stresses, respectively. tr = less than 0.05%.

## ترکیب‌های اسانس

نسبت به تنش خشکی شدید و بدون مصرف نقاط کوانتومی کربن افزایش داد (جدول ۴). همچنین، محتوای کارتنوئید در شرایط تنش متوسط و با کاربرد تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن در مقایسه با عدم مصرف آن در تنش خشکی شدید ۱۱۲ درصد افزایش یافت (جدول ۴).

## پرولین و قندهای محلول

محتوای پرولین و قندهای محلول تحت تأثیر تنش خشکی، نقاط کوانتومی کربن و ترکیب تیماری تنش خشکی و نقاط کوانتومی کربن قرار گرفت. حداکثر محتوای پرولین و قندهای محلول با کاربرد ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن در شرایط تنش خشکی شدید ثبت شد. تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن در تنش شدید خشکی نسبت به عدم مصرف آن در شرایط آبیاری نرمال، محتوای پرولین و قندهای محلول را به ترتیب ۱۶۹ و ۲۷۲ درصد افزایش داد (جدول ۴).

## آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر معنی‌دار تنش خشکی، تیمار محرک رشد نقاط کوانتومی کربن و اثر متقابل تنش خشکی × محرک رشد قرار گرفت (جدول ۴). حداکثر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول‌پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در تنش متوسط با کاربرد تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن به ثبت رسید. استفاده از غلظت ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن در تنش متوسط، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول‌پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز را نسبت به عدم مصرف آن در شرایط نرمال به ترتیب ۱۲۳، ۱۱۱ و ۷۲ درصد افزایش داد (جدول ۴).

با تجزیه اسانس نعناع گریپ‌فروتی، ۲۴ ترکیب شناسایی شد که ۹۲/۸ تا ۹۹/۵ درصد از کل ترکیب‌ها را شامل می‌شود (جدول ۳). در بین ترکیب‌های اسانس لینالیل استات (۲۸/۳ تا ۶۳/۲ درصد)، لینالول (۲۲/۸ تا ۴۵/۹ درصد)، نرول (۱/۲ تا ۵/۱ درصد)، ژرانیل استات (۲/۱ تا ۴/۵ درصد)، تیمول (۱/۲ تا ۳/۹ درصد)، ۸،۱-سینئول (۰/۲ تا ۲/۵ درصد)، نرمال دکان (۰/۸ تا ۲/۰ درصد)، لیمونن (۰/۶ تا ۱/۴ درصد) و نریل استات (۱/۱ تا ۱/۳ درصد) ترکیب‌های غالب اسانس بودند (جدول ۳). بیشترین لینالیل استات با کاربرد تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که در مقایسه با تیمار شاهد ۵۰/۱ درصد افزایش نشان داد. همچنین، بیشترین لینالول در آبیاری نرمال و با کاربرد ۱۰ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن ثبت شد که نسبت به تیمار عدم کاربرد نقاط کوانتومی کربن در شرایط آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی ۶۷/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۳).

## رنگیزه‌های فتوسنتزی

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای تنش خشکی، تیمار نقاط کوانتومی کربن و اثر متقابل تنش خشکی و نقاط کوانتومی کربن بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی معنی‌دار است (جدول ۴). بالاترین کلروفیل a و b در شرایط آبیاری نرمال و با کاربرد غلظت ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن مشاهده شد. همچنین، بیشترین محتوای کارتنوئید در شرایط تنش متوسط و با کاربرد تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن بود. در شرایط آبیاری نرمال، کاربرد ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن محتوای کلروفیل a و کلروفیل b را به ترتیب ۱۸۴ و ۱۶۳ درصد

جدول ۴- تأثیر نقاط کوانتومی کربن و تنش خشکی بر برخی صفات فیزیولوژیک نعنای گریپ فروتی

Table 4. Carbon quantum dots and drought stress effects on some physiological traits of *Mentha suaveolens* × *piperita*

Field capacity	Carbon quantum dots (CQD) foliar treatment	Chlorophyll <i>a</i> (mg.g <sup>-1</sup> FW)	Chlorophyll <i>b</i> (mg.g <sup>-1</sup> FW)	Carotenoids (mg.g <sup>-1</sup> FW)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (nmol.g <sup>-1</sup> FW)	Malondialdehyde (nmol.g <sup>-1</sup> FW)	Superoxide dismutase (μmol.min <sup>-1</sup> .mg <sup>-1</sup> protein)	Guaiacol peroxidase (μmol.min <sup>-1</sup> .mg <sup>-1</sup> protein)	Ascorbate peroxidase (μmol.min <sup>-1</sup> .mg <sup>-1</sup> protein)	Total soluble carbohydrates (mg.g <sup>-1</sup> FW)	Proline (mg.g <sup>-1</sup> FW)
90% FC	Control	8.12 <sup>de</sup>	5.19 <sup>de</sup>	7.97 <sup>c-f</sup>	3.59 <sup>h</sup>	2.68 <sup>i</sup>	3.55 <sup>l</sup>	0.193 <sup>h</sup>	1.72 <sup>h</sup>	0.63 <sup>k</sup>	1.76 <sup>k</sup>
	CQD 5 ppm	11.26 <sup>ab</sup>	7.41 <sup>c</sup>	8.01 <sup>c-f</sup>	3.25 <sup>j</sup>	3.46 <sup>f-h</sup>	4.99 <sup>hi</sup>	0.177 <sup>hi</sup>	1.61 <sup>hi</sup>	1.19 <sup>b</sup>	2.46 <sup>gh</sup>
	CQD 10 ppm	10.98 <sup>b</sup>	8.12 <sup>ab</sup>	7.92 <sup>d-f</sup>	3.04 <sup>k</sup>	3.33 <sup>gh</sup>	4.41 <sup>i</sup>	0.159 <sup>ij</sup>	1.49 <sup>i</sup>	0.91 <sup>ij</sup>	3.07 <sup>f</sup>
	CQD 15 ppm	12.04 <sup>a</sup>	8.41 <sup>a</sup>	7.76 <sup>e-g</sup>	3.47 <sup>i</sup>	3.29 <sup>h</sup>	4.75 <sup>i</sup>	0.134 <sup>j</sup>	1.26 <sup>j</sup>	0.84 <sup>j</sup>	2.29 <sup>hi</sup>
	CQD 20 ppm	10.54 <sup>b</sup>	7.81 <sup>bc</sup>	7.35 <sup>e-h</sup>	3.39 <sup>i</sup>	3.88 <sup>fg</sup>	3.89 <sup>k</sup>	0.104 <sup>k</sup>	1.04 <sup>k</sup>	0.93 <sup>i</sup>	2.02 <sup>j</sup>
70% FC	Control	7.72 <sup>ef</sup>	4.54 <sup>fg</sup>	8.45 <sup>c-e</sup>	5.21 <sup>d</sup>	5.08 <sup>de</sup>	6.76 <sup>c</sup>	0.331 <sup>cd</sup>	2.43 <sup>c</sup>	1.22 <sup>h</sup>	2.65 <sup>g</sup>
	CQD 5ppm	8.82 <sup>cd</sup>	5.12 <sup>de</sup>	9.74 <sup>ab</sup>	4.76 <sup>f</sup>	5.06 <sup>de</sup>	7.55 <sup>b</sup>	0.378 <sup>b</sup>	2.73 <sup>b</sup>	1.44 <sup>f</sup>	3.36 <sup>e</sup>
	CQD 10ppm	9.55 <sup>c</sup>	5.41 <sup>d</sup>	9.13 <sup>b-d</sup>	4.68 <sup>f</sup>	4.69 <sup>e</sup>	6.93 <sup>c</sup>	0.351 <sup>c</sup>	2.86 <sup>ab</sup>	1.58 <sup>e</sup>	2.21 <sup>ij</sup>
	CQD 15ppm	9.53 <sup>c</sup>	4.55 <sup>fg</sup>	10.71 <sup>a</sup>	4.29 <sup>g</sup>	4.61 <sup>e</sup>	7.88 <sup>a</sup>	0.411 <sup>a</sup>	2.96 <sup>a</sup>	1.33 <sup>g</sup>	4.11 <sup>d</sup>
	CQD 20ppm	8.86 <sup>cd</sup>	4.51 <sup>fg</sup>	9.19 <sup>bc</sup>	4.21 <sup>g</sup>	3.92 <sup>f</sup>	6.22 <sup>d</sup>	0.312 <sup>d</sup>	2.36 <sup>cd</sup>	1.25 <sup>fg</sup>	3.17 <sup>ef</sup>
50% FC	Control	4.24 <sup>h</sup>	3.18 <sup>j</sup>	5.01 <sup>l</sup>	7.15 <sup>a</sup>	6.81 <sup>a</sup>	5.11 <sup>gh</sup>	0.201 <sup>gh</sup>	1.86 <sup>g</sup>	1.67 <sup>d</sup>	3.38 <sup>e</sup>
	CQD 5ppm	5.41 <sup>g</sup>	4.21 <sup>gh</sup>	6.34 <sup>hi</sup>	6.39 <sup>c</sup>	6.28 <sup>ab</sup>	5.87 <sup>e</sup>	0.243 <sup>ef</sup>	2.11 <sup>e</sup>	2.27 <sup>ab</sup>	4.57 <sup>ab</sup>
	CQD 10ppm	5.28 <sup>g</sup>	3.92 <sup>hi</sup>	6.65 <sup>g-i</sup>	5.12 <sup>de</sup>	5.59 <sup>cd</sup>	5.39 <sup>f</sup>	0.234 <sup>ef</sup>	2.27 <sup>d</sup>	2.34 <sup>a</sup>	4.74 <sup>a</sup>
	CQD 15ppm	6.89 <sup>f</sup>	4.85 <sup>ef</sup>	7.01 <sup>f-i</sup>	5.07 <sup>e</sup>	5.87 <sup>bc</sup>	5.34 <sup>fg</sup>	0.251 <sup>e</sup>	2.03 <sup>ef</sup>	2.25 <sup>b</sup>	4.43 <sup>bc</sup>
	CQD 20ppm	4.91 <sup>gh</sup>	3.55 <sup>ij</sup>	5.86 <sup>ij</sup>	6.75 <sup>b</sup>	6.03 <sup>bc</sup>	5.69 <sup>e</sup>	0.224 <sup>fg</sup>	1.94 <sup>fg</sup>	1.96 <sup>c</sup>	4.27 <sup>cd</sup>
LSD		0.888	0.436	1.21	0.101	0.555	0.260	0.251	0.143	0.079	0.220
S.O.V.	df	Significance Levels									
Field capacity (FC)	2	77.73 <sup>**</sup>	57.08 <sup>**</sup>	50.13 <sup>**</sup>	34.58 <sup>**</sup>	36.02 <sup>**</sup>	19.44 <sup>**</sup>	6.22 <sup>**</sup>	26.97 <sup>**</sup>	9.84 <sup>**</sup>	5.41 <sup>**</sup>
Carbon quantum dots (CQD)	4	38.06 <sup>**</sup>	10.13 <sup>**</sup>	4.34 <sup>**</sup>	3.24 <sup>**</sup>	3.19 <sup>**</sup>	1.63 <sup>**</sup>	1.25 <sup>**</sup>	7.09 <sup>**</sup>	1.61 <sup>**</sup>	1.28 <sup>**</sup>
FC × CQD	8	24.69 <sup>**</sup>	11.69 <sup>**</sup>	9.21 <sup>**</sup>	6.26 <sup>**</sup>	6.65 <sup>**</sup>	0.81 <sup>**</sup>	1.28 <sup>**</sup>	6.44 <sup>**</sup>	0.088 <sup>**</sup>	1.19 <sup>**</sup>
Experimental error		1.04	0.24	0.83	0.23	0.16	0.028	0.019	0.17	0.018	9.83
C.V. (%)		7.53	5.69	10.95	10.25	8.6	3.32	6.83	7.48	4.45	9.83

\*\* : significant at 1% probability level.

## مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن

تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن تحت تأثیر تنش خشکی، تیمار نقاط کوانتومی کربن و اثر متقابل رژیم‌های آبیاری با نقاط کوانتومی کربن قرار گرفت. بیشترین محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن در شرایط تنش خشکی شدید بدون تیمار نقاط کوانتومی کربن حاصل شد. علاوه بر این، در شرایط تنش خشکی شدید بدون کاربرد نقاط کوانتومی کربن، محتوای مالون‌دی‌آلدهید ۱۵۴ درصد و پراکسید هیدروژن ۹۹ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافتند. در حالی که در شرایط عدم تنش، محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن با کاربرد ۱۵ پی‌پی‌ام نقاط کوانتومی کربن به ترتیب ۵۱ و ۵۸ درصد نسبت به تنش شدید بدون نقاط کوانتومی کربن کاهش پیدا کردند (جدول ۴).

## بحث

در زمان تنش خشکی نه تنها جریان آب در اطراف سلول‌ها متوقف می‌گردد بلکه ترشح هورمون سیٹوکینین از ریشه‌ها نیز کاهش می‌یابد؛ در نتیجه با کاهش تقسیم سلول‌ها از افزایش ارتفاع بوته‌ها ممانعت به عمل خواهد آمد (Mustafa et al., 2021; Sepehri et al., 2023). با این حال، استفاده از نقاط کوانتومی کربن منجر به افزایش ارتفاع بوته گردید که می‌توان آن را به بیشتر شدن فعالیت فتوسنتزی و بیوسنتز کلروفیل نسبت داد (Khan et al., 2020; Li et al., 2018). استفاده از نانوذرات به دلیل اندازه نانو و ویژگی‌های سطحی خاص خود، قادرند وارد سلول‌های گیاهی شده و جذب یون‌ها و مواد مغذی را تسهیل کنند و افزایش پارامترهای رشدی و عملکردی از قبیل ارتفاع را در پی داشته باشند (Giglou et al., 2022; Mukarram et al., 2023).

تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ، بسته شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز از یکسو و متأثر کردن فعالیت‌های آنزیمی و فرایندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت

عملکرد می‌شود (Sepehri et al., 2023). محققان اظهار داشتند کاهش دسترسی به عناصر غذایی می‌تواند باعث کاهش جذب آنها توسط گیاه شود که این موضوع از طریق تأثیر بر سازوکارهایی مانند کاهش غلظت کلروفیل، کارایی و سرعت فتوسنتز، در نهایت به کاهش رشد و عملکرد گیاه منجر می‌شود (Azizi et al., 2024; Kulak et al., 2023). در این شرایط، استفاده از نقاط کوانتومی کربن می‌تواند به دلیل عملکرد محافظتی اسمزی، کاهش تعرق و کاهش تجمع رادیکال‌های اکسیژن با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی عملکرد گیاه را در شرایط تنش خشکی بهبود ببخشد (Su et al., 2018; Gohari et al., 2021). همسو با نتایج ما، Li و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که کاربرد CQD در گیاه برنج تحت تنش شوری موجب افزایش وزن تر و خشک گیاه شد و این موضوع را به بهبود جذب مواد مغذی و ظرفیت دفاعی آنتی‌اکسیدانی CQD نسبت دادند.

تولید متابولیت‌های ثانویه برای سازگاری گیاهان نسبت به عوامل نامساعد و تنش‌های محیطی اتفاق می‌افتد و به عنوان یک راهکار دفاعی مؤثر در برابر تنش‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود (Kumaret et al., 2024). از این رو، در شرایط تنش خشکی، تشکیل و تجمع اسانس در گیاهان دارویی افزایش می‌یابد (Ahmad et al., 2024). با این حال، در تنش‌های شدیدتر، گیاه برای بقای حیات بیشتر مواد فتوسنتزی تولید شده را به تولید ترکیب‌های تنظیم‌کننده اسمزی از جمله پرولین، قندهای محلول مانند ساکارز و فروکتور تخصیص می‌دهد (Araniti et al., 2024). در مقابل، کاربرد نقاط کوانتومی کربن با افزایش فعالیت آنزیمی موجب کاهش اثرهای زیان‌بار تنش شده و با بهبود فعالیت فتوسنتزی می‌تواند منجر به توسعه غده‌های ترشح‌کننده اسانس و افزایش درصد اسانس گردد (Gohari et al., 2021). همچنین، افزایش عملکرد اسانس با استفاده از نقاط کوانتومی کربن می‌تواند به افزایش عملکرد ماده خشک و درصد اسانس مرتبط باشد. همسو با نتایج ما، پژوهشگران با ارزیابی کاربرد نانوذرات در شرایط تنش خشکی، مشاهده

یافته‌های ما، Bahreininejad و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که میزان تیمول در اسانس آویشن دناپی در تنش خشکی نسبت به آبیاری نرمال افزایش پیدا کرد.

کاروتنوئیدها نقش مهمی در حفاظت از سیستم فتوسنتزی در برابر خسارت اکسیداسیون نوری بر عهده دارند. از این رو، افزایش محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش متوسط نسبت به آبیاری نرمال نشان‌دهنده نقش مهم این رنگدانه‌ها در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی است (Ayyaz et al., 2022؛ Akbarzadeh et al., 2023). همچنین، استفاده از نقاط کواتومی کربن توانست فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و باعث کاهش تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی گردد (Gohari et al., 2021). علاوه بر این، با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عناصر غذایی و رنگیزه‌های فتوسنتزی (Haghaninia et al., 2023؛ Nekoukhou et al., 2023)، ممکن است استفاده از نقاط کواتومی کربن از طریق بهبود مواد غذایی منجر به افزایش میزان فتوسنتز شده و به تبع آن محتوای کلروفیل و کاروتنوئید را افزایش داده باشد (Panahirad et al., 2023).

در شرایط تنش خشکی غلظت پرولین و قندهای محلول افزایش می‌یابد که به عنوان یک راهکار دفاعی برای گیاه در برابر تنش خشکی عمل می‌کنند (Haghaninia et al., 2023). علاوه بر این، نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از نقاط کواتومی کربن با افزایش پرولین در شرایط تنش می‌تواند وضعیت آب گیاه را در شرایط خشکی حفظ کند. مطابق با یافته‌های ما پژوهشگران نتیجه گرفتند که کاربرد نانوذرات با افزایش پرولین و قندهای محلول نقش کلیدی در تنظیم اسمزی در شرایط نامساعد محیطی داشته و از این طریق می‌تواند در کاهش اثرهای تخریبی تنش خشکی ایفای نقش کند (Mukarram et al., 2023؛ Aqeel et al., 2023).

میزان تجمع مالون‌دی‌آلدهید شاخصی از میزان خسارت تنش اکسیداتیو است (Shojaei Baghini & Naghizadeh, 2024). همچنین، اگرچه تجمع پراکسید هیدروژن پاسخ‌های

کردند که استفاده از نانوذرات منجر به بهبود درصد و عملکرد اسانس و ترکیبات اسانس نعناع شد (Giglou et al., 2022).

نتایج بدست آمده نشان داد که بیشتر ترکیب‌های غالب اسانس با استفاده از کاربرد نقاط کواتومی کربن حاصل شد. شایان ذکر است، لینالیل استات و لینالول در صنعت داروسازی به دلیل خواص ضدالتهابی و آرام‌بخش و در صنعت عطرسازی به‌عنوان مواد معطر استفاده می‌شوند. همچنین، تیمول به عنوان یک آنتی‌باکتریال طبیعی، کاربردهای پزشکی زیادی دارد (Ahmadi et al., 2022). بنابراین، این ترکیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و تولید بهینه آنها می‌تواند به‌عنوان یک مزیت اقتصادی و صنعتی برای تولید اسانس‌های باکیفیت و با ارزش افزوده بیشتر در صنعت‌های مختلف محسوب شود (Wang et al., 2016؛ Akbarzadeh et al., 2022). در این راستا، نانوکربن‌ها می‌توانند فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جذب مواد معدنی را تحریک کنند که این موضوع به تجزیه و آزادسازی مواد مغذی در خاک کمک کرده و در نهایت جذب آنها توسط ریشه را افزایش می‌دهد. نانوکربن‌ها همچنین می‌توانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود دهند و موجب افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی شوند (Farhangi-Abriz et al., 2024). از آنجایی که مصرف نقاط کواتومی کربن جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهد، از این رو، بهبود ترکیب‌های غالب اسانس را می‌توان به افزایش جذب و دسترسی عناصر غذایی به منظور تشکیل بیومولکول‌های مورد نیاز برای سنتز ترکیب‌های اسانس نسبت داد (Haghaninia et al., 2024a؛ Giglou et al., 2022). علاوه بر این، دلیل افزایش ترکیب‌های اسانس در تنش‌های ملایم، تخصیص بیشتر کربن‌های تثبیت شده طی فرایند فتوسنتز به تولید متابولیت‌های ثانویه می‌باشد (Haghaninia et al., 2024b) که طی این فرایند میزان مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از طریق کاهش خسارت رادیکال‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (Kumar et al., 2024؛ Araniti et al., 2024). همسو با



مولکول‌های دیگر را اکسید و منجر به پراکسیداسیون لیپیدها شود (Shojaei Baghini & Naghizadeh, 2023). از این رو، تنش خشکی منجر به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که رادیکال‌های آزاد سوپراکسید و پراکسید هیدروژن از مهمترین آنها هستند (Ahmad *et al.*, 2024). بنابراین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به کاهش اثرهای منفی تنش بر پراکسیداسیون لیپیدی غشا و نابودی سلول‌های گیاهی با رادیکال‌های فعال اکسیژن واکنش نشان می‌دهد و در نهایت از گیاه در شرایط تنش محافظت می‌کند (Asghari *et al.*, 2023; Haghania *et al.*, 2023). همچنین، کاربرد نقاط کوانتومی کرین موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و از این طریق باعث افزایش تحمل و مقاومت گیاه در برابر تنش گردید که نشان‌دهنده اثربخشی این ترکیب به‌عنوان القای سیستم دفاعی گیاه است (Wang *et al.*, 2018; Panahirad *et al.*, 2023). در تأیید یافته‌های ما، Gohari و همکاران (۲۰۲۱) اثر نقاط کوانتومی کرین را بر انگور (*Vitis vinifera*) در شرایط تنش شوری ارزیابی کردند و اظهار داشتند که نقاط کوانتومی کرین می‌تواند با بهبود آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی خسارت ناشی از تنش خشکی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در مجموع، با توجه به سازگاری نقاط کوانتومی کرین با محیط‌زیست و تأثیر مثبت آن بر بهبود کمیّت و کیفیت محصول تولیدی، غلظت ۱۵ بی‌بی‌ام نقاط کوانتومی کرین می‌تواند راهکاری مناسب برای افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی و اقتصادی نعنای گریپ‌فروتی در شرایط نرمال و تنش کم‌آبی باشد.

دفاعی گیاه را در شرایط تنش تنظیم می‌کند اما تجمع بیش از حد  $H_2O_2$  موجب آسیب به غشاء می‌گردد (Asghari *et al.*, 2023; Haghania *et al.*, 2024b). در این مطالعه محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن در شرایط تنش افزایش یافت. افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن در شرایط تنش خشکی را می‌توان با افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای توضیح داد (Haghania *et al.*, 2024a). با این حال، نقاط کوانتومی کرین توانست فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و نقش مهمی در پاکسازی ROS و کاهش میزان آسیب غشای پلاسمایی داشته باشد (Wang *et al.*, 2018). همچنین، کاربرد نقاط کوانتومی کرین می‌تواند پایداری غشای سلولی را افزایش و محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن را در تنش خشکی با افزایش سازوکار محافظتی در سلول‌های گیاهی کاهش دهد (Chakravarty *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2019). مطابق با نتایج ما، Gohari و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که استفاده از نقاط کوانتومی کرین با حذف آسیب ROS و بهبود وضعیت دفاعی گیاه در شرایط خشکسالی باعث کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن شد. به همین ترتیب، Khan و همکاران (۲۰۲۰) اثر مثبت نقاط کوانتومی کرین را بر کاهش محتوای MDA به دلیل بازیابی آسیب غشاء و حفظ یکپارچگی غشاء، عمدتاً به موازات یافته‌های فعلی گزارش کردند. با وجودی که ROS در مراحل مختلف رشد نقش بسزایی در سازگاری با تنش‌ها و تنظیم رشد دارد، اما به‌علت واکنش‌پذیری بالا در غلظت‌های بیش از حد مجاز مولکول‌های زیان‌بار به حساب می‌آید (Ayyaz *et al.*, 2022). بنابراین، در این شرایط می‌تواند به سرعت

## References

- Ahmad, A. and Hassim, M.F.N., 2024. Effects of silica nanoparticles on morpho-histological and antioxidant activities of rice seedlings under drought stress. *South African Journal of Botany*, 168: 497-508. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.03.052>.
- 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(5): 866. <https://doi.org/10.3390/antiox11050866>.
- Akbarzadeh, S., Morshedloo, M.R., Behtash, F., Mumivand, H. and Maggi, F., 2023. Exogenous  $\beta$ -aminobutyric acid (baba) improves the growth,

- essential oil content, and composition of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) under water deficit stress conditions. *Horticulturae*, 9(3): 354. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030354>.
- Alexieva, V., Sergei, I., Mapelli, S. and Karanov, E., 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant Cell Environment*, 24: 1337-1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>
  - Aqeel, U., Parwez, R., Aftab, T., Khan, M.M.A. and Naeem, M., 2023. Silicon dioxide nanoparticles suppress copper toxicity in *Mentha arvensis* L. by adjusting ROS homeostasis and antioxidant defense system and improving essential oil production. *Environmental Research*, 236: 116851. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116851>.
  - Araniti, F., Prinsi, B., Cocetta, G., Negrini, N., Nocito, F.F. and Espen, L., 2024. Impact of cyclic-mild-drought stress on the metabolism of *Mentha spicata* L.: A strategy to improve quality traits. *Industrial Crops and Products*, 210: 118129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118129>
  - Asghari, J., Mahdavia, H., Rezaei-Chiyaneh, E., Banaei-Asl, F., Amani Machiani, M. and Harrison, M.T., 2023. Selenium nanoparticles improve physiological and phytochemical properties of basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought stress conditions. *Land*, 12(1): 164. <https://doi.org/10.3390/land12010164>
  - Ayyaz, A., Fang, R., Ma, J., Hannan, F., Huang, Q., Sun, Y., Javed, M., Ali, S., Zhou, W. and Farooq, M.A., 2022. Calcium nanoparticles (Ca-NPs) improve drought stress tolerance in *Brassica napus* by modulating the photosystem II, nutrient acquisition and antioxidant performance. *NanoImpact*, 28: 100423. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100423>
  - Azizi, A., Bagnazari, M. and 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>
  - Bahreininejad, B., Razmjou, J. and Mirza, M., 2013. Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production*, 7(1): 151-166. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.927>
  - Bai, L., Lv, S., Xiang, W., Huan, S., McClements, D.J. and Rojas, O.J., 2019. Oil-in-water Pickering emulsions via microfluidization with cellulose nanocrystals: 1. Formation and stability. *Food Hydrocolloids*, 96: 699-708.
  - Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39: 205-207. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018060>
  - Beauchamp, C. and Fridovich, I., 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44: 276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
  - Chakravarty, D., Erande, M. and Late, D.J., 2015. Graphene quantum dots as enhanced plant growth regulators: effects on coriander and garlic plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(13): 2772-2778. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7106>
  - D'Agostino, A., Di Marco, G., Canini, A. and Gismondi, A., 2024. Gallic acid as a phytostimulant enhancing yield and quality of *Mentha spicata* L. under deficit-and well-watered conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 219: 105656. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105656>
  - de Sousa Barros, A., de Moraes, S.M., Ferreira, P.A.T., Vieira, Í.G.P., Craveiro, A.A., dos Santos Fontenelle, R.O., de Menezes, J.E.S.A., da Silva, F.W.F. and de Sousa, H.A., 2015. Chemical composition and functional properties of essential oils from *Mentha* species. *Industrial Crops and Products*, 76: 557-564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.004>
  - Farhangi-Abriz, S., Ghassemi-Golezani, K., Torabian, S., Rahimzadeh, S., Osati, F. and 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(9): 621-631. <http://dx.doi.org/10.1007/s00344-024-11464-y>
  - Feng, P., Geng, B., Cheng, Z., Liao, X., Pan, D. and Huang, J., 2019. Graphene quantum dots-induced physiological and biochemical responses in mung bean and tomato seedlings. *Brazilian Journal of Botany*, 42(1): 29-41. <http://dx.doi.org/10.1007/s40415-019-00519-0>
  - Giglou, M.T., Giglou, R.H., Esmaeilpour, B., Azarmi, R., Padash, A., Falakian, M., Sliwka, J., Gohari, G. and Lajayer, H.M., 2022. A new method in the mitigation of drought stress by chitosan-coated iron oxide nanoparticles and growth stimulant in peppermint. *Industrial Crops and Products*, 187: 115286. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115286>
  - Gohari, G., Panahirad, S., Sadeghi, M., Akbari, A.,

- Zareei, E., Zahedi, S.M., Bahrami, M.K. and Fotopoulos, V., 2021. Putrescine-functionalized carbon quantum dot (put-CQD) nanoparticles effectively prime grapevine (*Vitis vinifera* cv. *Sultana*) against salt stress. *BMC Plant Biology*, 21: 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02901-1>
- Gohari, G., Panahirad, S., Sepehri, N., Akbari, A., Zahedi, S.M., Jafari, H., Dadpour, M.R. and 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 (4): 42877-42890. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13794-w>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Mahdavinia, G.R., Shah, A.A. and 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(4): 6681-6695. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-023-01521-y>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Radicetti, E., Rasouli, F., Ruiz-Lozano, J.M. and Sabbatini, P., 2024a. 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>
- Haghaninia, M., Rasouli, F., Javanmard, A., Mahdavinia, G., Azizi, S., Nicoletti, R., Murariu, O.C., Tallarita, A.V. and Caruso, G., 2024b. Improvement of physiological features and essential oil content of *Thymus vulgaris* after soil amendment with chitosan nanoparticles under chromium toxicity. *Horticulturae*, 10(6): 659. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060659>
- Heath, R.L. and Packer, L., 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125: 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Hedge, J.E. and Hofreiter, B.T., 1962. Carbohydrate, 1-19. In: Whistler, R.L. and Be Miller, J.N., (Eds). *Methods in Carbohydrate Chemistry*. Academic Press, New York, 1962p.
- Jahanafrooz, Z., Mousavi, M.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* × *piperita*). *Fitoterapia*, 174: 105875. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105875>
- Kakaei, K., Javan, H., Khamforoush, M. and 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(33): 14684-14691. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.093>
- Khan, I., Raza, M.A., Awan, S.A., Shah, G.A., Rizwan, M., Ali, B., Tariq, R., Hassan, M.J., Alyemeni, M.N., Brestic, M. and Zhang, X., 2020. Amelioration of salt-induced toxicity in pearl millet by seed priming with silver nanoparticles (AgNPs): the oxidative damage, antioxidant enzymes, and ions uptake are major determinants of salt-tolerant capacity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156: 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.018>
- Kulak, M., Yaldiz, G. and Camlica, M., 2023. Applications of some nanoparticles and responses of medicinal and aromatic plants under stress conditions. *Sustainable Agriculture in the Era of the OMICs Revolution*, 193-222. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15568-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15568-0_9)
- Kumar, D., Kumar, A., Nilofer, N., Singh, A.K., Chaudhary, A., Kumar, R., Kedar, S.C., Chanotiya, C.S., Khare, P. and Singh, S., 2024. Maximizing essential oil yield and quality in menthol mint (*Mentha arvensis* L.) by reducing water requirement through deficit irrigation practices. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 4(1): 24-37. <https://doi.org/10.22126/ATIC.2023.9687.1116>
- Li, H., Huang, J., Lu, F., Liu, Y., Song, Y., Sun, Y. and Lifshitz, Y., 2018. Impacts of carbon dots on rice plants: boosting the growth and improving the disease resistance. *ACS Appl Bio Mater* 1(3): 663-672. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00345>
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lim, S.Y., Shen, W. and Gao, Z., 2015. Carbon quantum dots and their applications. *Chemical Society Reviews*, 44: 362-381.
- Mohammadi, H., Parviz, L., Beyrami, A., Anosheh-Bonab, F. and Ghorbanpour, M., 2024. Exposure to TiO<sub>2</sub> nanoparticles (NPs) and zeolite stimulates growth, physiology, and phytochemical characteristics and elevates *Mentha piperita* L. tolerance to salinity stress. *Industrial Crops and Products*, 211: 118228. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118228>
- Morshedloo, M. R., Mumivand, H., Craker, L. E., and Maggi, F. 2018. Chemical composition and antioxidant activity of essential oils in *Origanum vulgare* subsp. *gracile* at different phenological

- stages and plant parts. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2): e13516. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13516>
- Mukarram, M., Khan, M.M.A., Kurjak, D., Lux, A. and Corpas, F.J., 2023. Silicon nanoparticles (SiNPs) restore photosynthesis and essential oil content by upgrading enzymatic antioxidant metabolism in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1116769. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1116769>
  - Mustafa, H., Ilyas, N., Akhtar, N., Raja, N.I., Zainab, T., Shah, T., Ahmad, A. and Ahmad, P., 2021. Biosynthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles and its effects along with calcium phosphate on physicochemical attributes of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 223; 112519. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112519>
  - Nakano, Y. and Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5): 867-875. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
  - Nekoukhou, M., Fallah, S., Pokhrel, L.R., Abbas-Surki, A. and Rostamnejadi, A., 2023. Foliar enrichment of copper oxide nanoparticles promotes biomass, photosynthetic pigments, and commercially valuable secondary metabolites and essential oils in dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) under semi-arid conditions. *Science of the Total Environment*, 863: 160920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160920>
  - Panahirad, S., Dadpour, M., Gohari, G., Akbari, A., Mahdavinia, G., Jafari, H., Kulak, M., Alcázar, R. and 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>
  - Salehi, B., Stojanović-Radić, Z., Matejić, J., Sharopov, F., Antolak, H., Kręgiel, D., Sen, S., Sharifi-Rad, M., Acharya, K., Sharifi-Rad, R. and Martorell, M., 2018. Plants of genus *Mentha*: From farm to food factory. *Plants*, 7(3): 70. <https://doi.org/10.3390/plants7030070>
  - Samadiyan-Sarbangholi, V., Abaszadeh, B., Sefidkon, F. and Yarnia, M., 2024. Biofertilizers' effect on *Satureja bachtiarica* Bunge. traits under irrigation stress at various growth stages. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(1): 142-154. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.352328.2887>
  - Sarani Mallak, M., Allahdou, M., Mehravaran, L. and Piri, H., 2024. Effects of drought stress on biochemical traits and its relationship with growth stage in milk thistle (*Silybum Marianum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(1): 191-205. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.361669.3301>
  - Sepehri, S., Abdoli, S., Asgari Lajayer, B., Astatkie, T. and Price, G.W., 2023. Changes in phytochemical properties and water use efficiency of peppermint (*Mentha piperita* L.) using superabsorbent polymer under drought stress. *Scientific Reports*, 13(1): 21989. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49452-z>
  - Shojaei Baghini, M. H. and Naghizadeh, M., 2024. Evaluation of the effect of foliar application of brassinosteroid and melatonin on some physiological, grain yield and cumin (*Cuminum cyminum* L.) essential oil under drought stress conditions, *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(1): 155-173. <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2023.362048.3310>
  - 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>
  - Upadhyaya, A., Sankhla, D., Davis, T.D., Sankhla, N. and Smith, B.N., 1985. Effect of paclobutrazol on the activities of some enzymes of activated oxygen metabolism and lipid peroxidation in senescing soybean leaves. *Journal of Plant Physiology*, 121: 453-461. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(85\)80081-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(85)80081-X)
  - Wang, H., Zhang, M., Song, Y., Li, H., Huang, H., Shao, M., Liu, Y. and 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>
  - Wang, J., Li, R., Tan, J. and Jiang, Z.T., 2016. Chemical composition of essential oil of grapefruit mint (*Mentha suaveolens* × *piperita*) from China. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 19(4): 1047-1050. <http://dx.doi.org/10.1080/0972060X.2013.831559>
  - Xu, X., Ray, R., GU, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K. and Scrivens, W. A., 2004. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 126(40): 12736-12737. <https://doi.org/10.1021/ja040082h>