

Effects of Foliar Application of Calcium Compounds on Growth and Physiological Characteristics of Geranium Under Water Deficit Stress

ABSTRACT

The present study was conducted to evaluate the effects of foliar application of nano and bulk calcium chloride and calcium carbonate on the morphophysiological responses of scented geranium (*Pelargonium graveolens* L.) under water deficit stress conditions. The experiment was carried out as a factorial experiment in a completely randomized design with four replications. The first factor was irrigation levels at two levels: control (80% available water) and severe stress (20% available water). The second factor was calcium chloride and calcium carbonate in both bulk and nano forms, each applied at concentrations of 5, 10, and 15 mM, along with a control treatment (0 mM). The analysis of variance showed that the effects of irrigation stress, calcium levels, and the interaction between calcium and irrigation were significant ($p \leq 0.01$) for most evaluated traits. The application of 10 mM nano-calcium carbonate under 80% available water increased stem strength by 49.5% compared to the control. Foliar spraying with 15 mM nano-calcium carbonate under 20% available water increased stem strength by 125% compared to the unsprayed control under the same irrigation condition. The application of 15 mM nano-calcium carbonate under control and stress treatments improved the stress resistance index by 40.3% and 50.6%, respectively. Additionally, the foliar application of 15 mM nano-calcium carbonate and nano-calcium chloride under 80% and 20% available water increased plant height by 31% and 45.7%, respectively, compared to the control. The best treatment for enhancing drought tolerance in scented geranium was identified as 15 mM nano-calcium carbonate.

Keywords: Foliar application, Nanoparticles, Stress tolerance, Specific leaf area.

Extended Abstract

Introduction

The Rosageranium, scientifically known as *Pelargonium graveolens* L., is a perennial medicinal and ornamental plant from the Geraniaceae family. The essential oil of this plant has been used for centuries in general medicine as well as in dentistry. Due to its antiviral, antibacterial, antifungal, cell-rejuvenating, astringent, calming, wound-healing, analgesic, anti-tumor, and antioxidant properties, it has positively impacted the quality of life for patients.

Water deficit stress is a limiting factor for crop production in arid and semi-arid regions. In recent years, the application of engineered nanomaterials has been recognized as an innovative approach to mitigate the adverse effects of Water deficit stress in plants.

In general, calcium is one of the elements that plays a crucial role in plant responses to both biotic and abiotic stresses. Osmotic regulation occurs through the absorption and accumulation of calcium ions, as well as an increase in other ions and organic compounds under stress conditions. Studies have shown that the presence of calcium is essential for maintaining cell membrane integrity against various environmental stresses. Calcium nanoparticles (Ca-NPs) modify pH, organic materials, and cation exchange capacity, making limited mineral nutrients available to the plant.

The present study was conducted in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture at Lorestan University, with the aim of investigating the effect of foliar application of nano and bulk forms of calcium chloride and calcium carbonate on the morpho-physiological responses of scented geranium (*Pelargonium graveolens*) under drought stress conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a two-factor factorial design within a completely randomized design (CRD) with four replications. The first factor was deficit irrigation

at two levels: control (80% available water) and severe drought stress (20% available water). The second factor included calcium chloride and calcium carbonate in both bulk and nano forms, each applied at concentrations of 5, 10, and 15 mM, along with a control treatment (0 mM), totaling 13 levels (26 treatment combinations) applied as foliar sprays. During the warm season, a pad and fan cooling system was used to regulate the greenhouse temperature. The average daytime temperature ranged between 20–28°C, while the nighttime temperature ranged between 15–18°C. The relative humidity was maintained at 60–70%, and the light intensity was 400–500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Data analysis was performed using Minitab and SAS software. Graphs were plotted using Excel. Mean comparisons of the treatments were conducted using the Least Significant Difference (LSD) test at a 5% significance level.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance indicated that drought stress, different calcium levels, and the calcium $\times$ drought interaction significantly affected the morphological and physiological traits of the plant. Application of 15 mM nano-calcium carbonate under 80% available water irrigation increased plant height by 31% and stem diameter by 7.45% compared to the control. Additionally, foliar spraying of 15 mM nano-calcium carbonate under severe drought stress (20% available water) led to a 140% increase in leaf number and a 53% improvement in water use efficiency. These results demonstrate the positive impact of calcium-based materials, particularly nano-calcium carbonate, on plant growth and trait enhancement under drought conditions.

Furthermore, the results showed that applying 15 mM nano-calcium carbonate under 20% available water irrigation increased root fresh weight by 131% and root dry weight by 205% compared to the control. This treatment also caused a 125% increase in stem strength and a 3.4% increase in stem tissue density. Overall, the use of both nano and bulk calcium materials under drought conditions improved the morphological and physiological characteristics, enhanced water use efficiency, and increased drought resistance in the plant. The highest positive effects in this study were observed with the application of 15 mM nano-calcium carbonate, which significantly improved plant performance and drought resistance, especially under water stress conditions. Nano calcium carbonate, as a long-term reservoir, provides carbon dioxide to plants. Therefore, it can enhance plant growth by increasing photosynthesis. Higher levels of carbon dioxide can suppress the activity of ribulose-1,5-bisphosphate oxygenase and reduce photorespiration.

Conclusions

The foliar application of bulk and nano calcium compounds helped alleviate the effects of drought stress on the morpho-physiological and functional traits of scented geranium. Higher concentrations were found to be more effective than lower concentrations. Among the calcium-containing treatments, nano calcium carbonate had the most significant impact on these traits. The most effective treatment in this study was determined to be the 15 mM concentration of nano calcium carbonate.

بررسی اثر محلول پاشی ترکیبات کلسیمی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه شمعدانی عطری (*Pelargonium graveolens* L.) تحت تنش کم آبیاری

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد محلول پاشی مواد نانو و بالک کلرید کلسیم و کربنات کلسیم بر پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه شمعدانی عطری تحت شرایط تنش خشکی انجام گرفته است. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل کم آبیاری در دو سطح شاهد (۸۰ درصد آب قابل دسترس) و تنش (۲۰ درصد آب قابل دسترس) و فاکتور دوم کلرید و کربنات کلسیم به صورت بالک و نانو هر کدام با غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی مولار به همراه شاهد (صفر میلی مولار) اعمال شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بیشتر ویژگی‌های تحت تأثیر تنش کم آبیاری، کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد. کاربرد ۱۰ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۵ درصد استحکام ساقه نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در تیمار تنش آبیاری باعث افزایش ۱۲۵ درصدی استحکام ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری گردید. همچنین کاربرد نانوکربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد و ۲۰ درصد آب قابل دسترس به ترتیب باعث افزایش ۴۰/۳ درصدی و ۵۰/۶ درصدی شاخص مقاومت به تنش نسبت به شاهد شد. کاربرد نانوکربنات کلسیم و نانو کلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری شاهد و تنش به ترتیب باعث افزایش ۳۱ درصد و ۴۵/۷ درصد ارتفاع نسبت به شاهد شدند. بهترین تیمار در این پژوهش برای تحمل تنش کم آبی شمعدانی معطر غلظت ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم شناخته شد.

کلیدواژه‌ها: سطح ویژه برگ، محلول پاشی، مقاومت به تنش، نانوذرات.

مقدمه

در سطح جهانی، کشاورزی بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد که تقریباً ۷۰ درصد از برداشت منابع آب در کشورهای توسعه یافته و تا ۹۵ درصد در کشورهای در حال توسعه را تشکیل می‌دهد (Wada et al., 2011). گیاهان در معرض انواعی از تنش‌ها مانند خشکی، شوری، سرمازدگی و یخ‌زدگی، فلزات سنگین و ... قرار می‌گیرند که یکی از مهمترین آنها خشکی است. تنش خشکی را می‌توان فقدان آب کافی مورد نیاز برای رشد طبیعی و تکمیل چرخه زندگی گیاه تعریف کرد که روی فرآیندهای رشد و نمو موثر است و به صورت تغییرات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی بروز می‌کند (Jabereldar et al., 2017). این تنش عامل محدود کننده تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک است (Muhammad Aslam et al., 2022). بنابراین افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی با رفع اثرات خشکسالی از مهمترین چالش‌های سال‌های آینده خواهد بود.

در بین عناصر مختلف کلسیم، جزء عناصری است که به علت نقش‌های مختلف ساختاری و پیام‌رسانی در واکنش گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده اهمیت به‌سزایی دارد. حفظ تنظیم اسمزی از طریق جذب و تجمع یون کلسیم و همچنین افزایش دیگر یون‌ها و ترکیبات آلی در شرایط تنش صورت می‌گیرد. مطالعات نشان داده‌اند که حضور کلسیم برای حفظ غشاء سلولی در برابر تنش‌های مختلف محیطی، در محیط بیرونی ضروری است (Akhtar et al., 2022). همچنین حاکی از تأثیر مثبت کاربرد محلول پاشی کلسیم به دلیل افزایش کارایی جذب این عنصر در تنش‌های محیطی است (Ayyaz et al., 2022). این عنصر در حفظ و پایداری دیواره سلولی غشاءها و پروتئین‌های متصل به غشاء دارای اهمیت می‌باشد (Balantic et al., 2022).

برخی از نانوذرات به جای عمل به عنوان نانوحامل، سبب افزایش رشد گیاه و تحمل به تنش می‌شوند. این نقش‌ها بستگی به خواص فیزیکوشیمیایی، روش کاربرد (کاربرد برگی، هیدروپونیک، خاک) و غلظت اعمال شده نانوذرات دارد (Zhao et al., 2020). طی سال‌های اخیر، کاربرد نانو مواد مهندسی شده به عنوان یکی از راهکارهای نوین در مقابل اثرات مخرب تنش خشکی در گیاهان نتایج امیدوارکننده‌ای داشته است (Hatami et al., 2017).

شمعدانی معطر با نام علمی (*Pelargonium graveolens* L.) گیاهی دارویی- زینتی، چندساله از تیره شمعدانیان (*Geraniales*) است. این گیاه همیشه سبز و پایا، علفی، دارای ساقه‌های گوشتی پوشیده از کرک به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر تا یک متر است (Rezaei Nejad et al., 2020). از نظر زینتی جزو گیاهان برگ زینتی بوده که رایحه سرشاخه‌ها به علت وجود اسانس طرفداران زیادی دارد. اسانس این گیاه از دیرباز در پزشکی عمومی و همچنین دندانپزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل داشتن خواص ضد ویروسی، ضد باکتریایی، ضد قارچی، بازسازی سلولی، قابض بودن، آرام بخشی، ترمیم جای زخم، مسکن، ضد تومور و آنتی‌اکسیدان بر کیفیت زندگی بیماران تأثیر گذار بوده است (Jaradat et al., 2022; Feier et al., 2023). شمعدانی معطر در بعضی کشورها مانند رواندا، آفریقای جنوبی و هند در مزرعه هوای آزاد و در بعضی کشورها مانند ایتالیا و آلمان به‌صورت گلخانه‌ای برای تولید اسانس کشت و کار می‌شود. (Rezaei Nejad et al., 2020).

پیشینه پژوهش

طی تحقیقی گزارش شده با اعمال تنش خشکی به گیاهان شمعدانی ویژگی‌های تعداد برگ، طول بوته، قطر گل و میزان آنتوسیانین را کاهش و میزان آنزیم کاتالاز را افزایش می‌دهد (Habibi and Motallebi, 2022). همچنین، در گزارشی دیگر بیان شد تنش کم‌آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس بر گیاهان شمعدانی، سبب کاهش تعداد برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه (به ترتیب ۷۳، ۴۸/۹، ۵۵/۲ و ۴۶/۸ درصد در مقایسه با تیمار شاهد)، کاهش مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید (به ترتیب ۱۴/۲، ۳۵/۷ و ۲۵/۶ درصد) و عملکرد اسانس (۵۰ درصد) شد. درحالیکه، محتوای مالون دی‌آلدئید، پرولین، نشت یونی و درصد اسانس را به ترتیب ۴۹/۳، ۱۸۸، ۲۲۲ و ۲۶/۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد (Pourveiseh et al., 2024).

مهم‌ترین تفاوت بین دو ماده کلرید کلسیم و کربنات کلسیم در فرمول شیمیایی آن‌هاست. کربنات کلسیم حاوی عناصر کلسیم، کربن و اکسیژن است درحالی‌که کلرید کلسیم حاوی کلسیم و کلرید است. کلسیم یکی از عناصر مورد نیاز گیاهان برای رشد و توسعه سلولی، تقویت دیواره‌های سلولی و فعالیت آنزیمی است. کلر نیز می‌توان عملکرد فستوتزی گیاهان را بهبود بخشد و رشد و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد (Rab and Haq, 2012). محلول پاشی نمک‌های محلول در آب کربناتی مانند کربنات کلسیم با نفوذ به روزنه برگ موجب انتشار دی‌اکسید کربن به بافت برگ گیاهان می‌شوند (Bilal, 2010). نانوذرات کلسیم به طور کلی برای تقویت عملکرد گیاه و تنظیم ساز و کار دفاعی گیاهان تحت تنش‌های زیستی و غیرزیستی از جمله خشکی (Ayyaz et al., 2022)، شوری (Nasrallah et al., 2022)، مقاومت به قارچ عامل کپک خاکستری (*Botrytis cinerea*) پذیرفته شده‌اند (Mogazy et al., 2022). این نانوذرات کلسیم با تعدیل pH، مواد آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی محیط کشت مواد معدنی محدود را در دسترس گیاه قرار می‌دهند (Badihi et al., 2021). تحقیق انجام شده بر روی نانو ذرات نشان داد که محلول پاشی مکمل نانوذرات کلسیم بر گیاهان گوجه فرنگی اثرات سمیت شوری را با بهبود پارامترهای رشدی، آنابولیکی (یون‌های محلول و اسمولیت‌ها) و مکانیسم‌های دفاعی (آنزیمی‌ها و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی) اصلاح کرد (Abeed et al., 2023).

یافتن راهکارهای مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات ناشی از تنش کم‌آبیاری، زمینه را برای افزایش عملکرد و کیفیت گیاه فراهم خواهد نمود. از طرفی، تاکنون تاثیر اعمال تعدیل‌کننده‌های اثر تنش نظیر نانو کلرید کلسیم و کربنات کلسیم بر خصوصیات گیاه شمعدانی عطری مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد محلول پاشی مواد نانو و بالک کلرید کلسیم و کربنات کلسیم بر پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه شمعدانی عطری تحت شرایط تنش خشکی انجام گرفته است.

آماده‌سازی مواد گیاهی و شرایط رشد

پژوهش حاضر در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان (خرم آباد، طول جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و در ارتفاع ۱۱۴۸ متر از سطح دریا) در سال‌های ۱۴۰۲ انجام شد. در فصل گرم برای خنک کردن گلخانه از سیستم پوشال و پنکه استفاده گردید. میانگین دمای روزانه گلخانه ۲۸-۲۰ درجه سانتی‌گراد، دمای شبانه ۱۸-۱۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی بین ۷۰-۶۰ درصد و شدت نور ۵۰۰-۴۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل کم‌آبیاری در دو سطح به ترتیب شامل شاهد (۸۰ درصد آب قابل دسترس)، تنش شدید (۲۰ درصد آب قابل دسترس) و فاکتور دوم شامل کلرید کلسیم و کربنات کلسیم به صورت بالک و نانو هر کدام با غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار به‌همراه شاهد (صفر میلی‌مولار) جمعاً در ۱۳ سطح (۲۶ ترکیب تیماری) به صورت محلول‌پاشی صورت گرفت. در طی انجام آزمایش ابتدا قلمه‌های گیاه شمعدانی عطری ریشه‌دار شد. قلمه‌های ریشه‌دار شده در گلدان‌هایی با قطر دهانه ۱۵ سانتی‌متر کشت شدند. بستر مورد استفاده در گلدان‌ها از مخلوط ماسه، کود دامی و خاک به نسبت (۱:۱:۱) حاصل گردید. بعد از کشت قلمه‌ها تا استقرار کامل گیاه هر گلدان به طور عادی آبیاری شد. سپس محلول‌پاشی منابع مختلف کلسیم هر دو هفته یکبار به مدت ۲۰ هفته صورت گرفت. بعد از اولین محلول‌پاشی تیمارهای خشکی (بر حسب دور آبیاری) اعمال شد. برای تعیین میزان آب خاک در ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. دستگاه صفحه فشاری از یک محفظه مانند دیگ زودپز تشکیل شده است که فشار داخل آن از طریق کمپرسور قابل افزایش است. یک صفحه سرامیکی که قطر آن برابر قطر داخلی دستگاه است درون آن قرار می‌گیرد. در قسمت پایین صفحه سرامیکی محفظه‌ای برای گردآوری و خروج آب تعبیه شده است. پس از قرار گرفتن نمونه خاک در حالت اشباع روی صفحه سرامیکی، درپوش محفظه را بسته و به تدریج فشار داخل محفظه افزایش می‌یابد. با افزایش فشار، آب اضافی از نمونه خاک خارج و وارد مخزن زیر صفحه سرامیکی و از آنجا به خارج هدایت می‌شود. هنگامی که فشار به نقطه پتانسیلی مورد نظر رسید فشار داخل محفظه از طریق شیر تخلیه خارج و با باز کردن درپوش دستگاه، نمونه خاک را به سرعت خارج کرده و درصد جرمی رطوبت آن اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش، سه نمونه خاک گلدان به عنوان سه تکرار در دستگاه با فشار ۰/۰۳ مگاپاسکال (معادل پتانسیل آب خاک در حد ظرفیت مزرعه) و فشار ۱/۵ مگاپاسکال (معادل پتانسیل آب خاک در حد نقطه پژمردگی) قرارداده شد. سپس درصد آب قابل استفاده در حد ۸۰ و ۲۰ درصد محاسبه و به روش وزنی تبدیل به دور آبیاری شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های ریخت‌شناسی، عملکردی و فیزیولوژی

ویژگی‌های ریخت‌شناسی

اندازه‌گیری ارتفاع گیاه در زمان برداشت، از سطح خاک با استفاده از خط‌کش و بر حسب سانتی‌متر انجام شد. تعداد گره ساقه و تعداد شاخه‌های جانبی نیز شمارش و ثبت شد. قطر ساقه نیز در زمان برداشت از میان‌گره سوم از پایین توسط کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد و واحد آن بر حسب میلی‌متر گزارش گردید.

برای اندازه‌گیری سطح برگ گیاه، تمام برگ‌های هر بوته، جدا و توسط دستگاه اسکنر مدل (HP Scanjet G2710) اسکن شد. سپس با استفاده از نرم افزار Image J، اندازه‌گیری‌ها انجام شد و میانگین آن‌ها به عنوان سطح برگ بر حسب سانتی‌متر مربع گزارش گردید. تعداد برگ از طریق شمارش برگ صورت گرفت. برای اندازه‌گیری سطح مخصوص برگ از رابطه زیر استفاده شد (Garnier et al., 2001).

$$SLA = (leaf\ area) / (leaf\ dry\ mass) \quad \text{رابطه (۱)}$$

طول ریشه در زمان برداشت با استفاده از خط‌کش (بر حسب سانتی‌متر)، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حجم ریشه‌ها از طریق اختلاف حجم ایجاد شده پس از قرار گرفتن ریشه در حجم مشخصی از آب براساس قانون ارشمیدوس بر حسب سانتی‌متر مکعب، محاسبه شد (Bohm, 1979).

ویژگی‌های عملکردی

به‌منظور اندازه‌گیری وزن تر و خشک شاخساره و ریشه در اواخر دوره آزمایش، قسمت‌های هوایی از سطح خاک گلدان برداشت و بلافاصله وزن تر هر بخش (برگ، ساقه) به‌صورت جداگانه، توسط ترازوی دیجیتالی با دقت یک میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. بعد از ثبت وزن تر، نمونه‌ها در پاکت‌های جداگانه قرار داده شدند. سپس به آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت منتقل و دوباره توزین شدند. به‌منظور سنجش ماده خشک ریشه‌ها، پس از برداشت شاخساره، ریشه گیاهان جدا و وزن تر آن‌ها ثبت (توسط ترازوی دیجیتالی با دقت یک میلی‌گرم) شد. برای تعیین وزن خشک ریشه نیز نمونه‌ها به آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت انتقال داده شدند.

ویژگی‌های فیزیولوژی

شاخص مقاومت به تنش (Fischer and Maurer, 1998) و کارایی مصرف آب (Jaleel and Gopi, 2008) با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شدند:

$$STI \text{ (Stress tolerance index)} (\%) = \frac{\text{Total dry weight (gr)}}{\text{Control dry weight (gr)}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$WUE \text{ (Water use efficiency)} (gDWK^{-1}H_2O) = \frac{\text{Total dry weight}}{\text{Total water consumption}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

برای محاسبه تراکم بافت ساقه و استحکام ساقه از روابط زیر استفاده گردید:

$$\text{Stem dry weight (g)} / \text{stem length} = \text{Stem strength (g cm}^{-1}\text{)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{Tissue density (g cm}^{-3}\text{)} = \text{stem dry weight (g)} / \text{stem volume (cm}^{-3}\text{)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\text{Stem volume (cm}^{-3}\text{)} = \pi r^2 h \quad r = \text{stem diameter (cm)} / 2 \quad h = \text{stem length (cm)}$$

تجزیه تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزارهای Minitab و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح ۵ درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهشی

ارتفاع گیاه و قطر ساقه

نتایج تجزیه وایانس نشان داد تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال ۰/۰۱ بر ارتفاع گیاه و قطر ساقه معنی دار شد (جدول ۱).

جدول ۱. تجزیه وایانس اثر محلول پاشی مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 بر ویژگی های مورفولوژیک گیاه شمعدانی عطری تحت تنش کم آبیاری

میانگین مربعات										
منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	قطر ساقه	تعداد گره	تعداد شاخه‌های جانبی	تعداد برگ	طول ریشه	حجم ریشه	نسبت ریشه به شاخساره	سطح مخصوص برگ
تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	۱	۲۳۶۸/۳۸**	۲۱/۴۶**	۷۲۶/۹۵**	۷۳/۳۵**	۳۷۳۱۵/۷**	۱۱۶/۸۷۶**	۲۳۷۵/۵۸**	۰/۰۱۲۸۷۳**	۴۵۹۷۷/۳**
کلسیم	۱۲	۳۶/۶۰**	۰/۷۷۷**	۱۸/۳۸**	۳/۳۰**	۸۲۸/۱**	۲۶/۷۳۶**	۵۴/۰۵**	۰/۰۰۴۹۸۵**	۴۹۸/۳**
تنش کم آبیاری $\times$ کلسیم	۱۲	۱۶/۴۱**	۰/۵۶۳**	۱۱/۸۸**	۱/۸۰**	۲۹۲/۱**	۲/۷۰۳ns	۱۱/۲۴**	۰/۰۰۲۱۸۹**	۴۷/۷**
خطا	۷۸	۰/۲۷	۰/۰۴۰	۰/۵۶۳	۰/۰۵۳۴	۹/۳	۳/۰۷۶	۱/۵۹	۰/۰۰۰۲۵۱	۶/۵
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱/۸۵	۳/۳۳	۳/۰۰	۶/۲۸	۴/۷۷	۶/۸۸	۶/۸	۸/۹۰	۳/۴۴

ns، * و ** به ترتیب عدم وجود تفاوت معنی دار و تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱.

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۲)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانو کربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۱ درصدی ارتفاع نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکلیرد کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۵/۷ درصد قطر ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۹/۳ درصد ارتفاع نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۸/۷ درصد قطر ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکلیرد کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی دار نداشت.

جدول ۲. مقایسه میانگین ویژگی های مورفولوژیک گیاه شمعدانی عطری محلول پاشی شده با مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 تحت تنش کم آبیاری

تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	ترکیبات	کلسیم (میلی مولار)	ارتفاع گیاه (سانتی متر)	قطر ساقه (میلی متر)	تعداد گره	تعداد شاخه های جانبی	تعداد برگ	حجم ریشه (سانتی متر مکعب)	نسبت ریشه به شاخساره	سطح مخصوص برگ (سانتی متر بر گرم)
	شاهد	۰	۲۸/۷۶j	۶/۲۵de	۲۴/۸۶g	۳/۲۷c	۶۴/۰f	۱۸/۷۹ef	۰/۱۷۳e-h	۷۸/۶g
	کلرید کلسیم	۵	۳۲/۴۶ef	۶/۶۳a-c	۲۶/۱۱f	۴/۱۵b	۶۷/۹ef	۱۸/۸۷ed	۰/۱۶۴g-i	۹۱/۴e
	کلرید کلسیم	۱۰	۳۳/۸۴cd	۶/۴۵b-d	۲۶/۳۲ef	۴/۲۸b	۷۴/۹d	۲۰/۳۶de	۰/۱۶۶g-i	۹۶/۶cd
	کلرید کلسیم	۱۵	۳۴/۳۸c	۶/۷۲ab	۲۷/۳۰de	۵/۳۷a	۷۶/۸d	۲۳/۱۵c	۰/۱۹۳c-e	۱۰۲/۵a
	نانو کلرید کلسیم	۵	۳۰/۸۲h	۵/۷۴f	۲۶/۳۵ef	۵/۱۸a	۶۹/۹e	۲۶/۳۴ab	۰/۱۶۹f-i	۹۷/۱c

۹۸/۶c	۰/۱۹۴c-e	۲۷/۳۶a	۷۷/۷d	۵/۱۹a	۲۷/۱۰d-f	۶/۱۳e	۳۳/۷۸cd	۱۰	نانو کلرید کلسیم	۸۰
۱۰۵/۷a	۰/۲۲۸a	۲۷/۶۵a	۸۴/۳c	۳/۲۸c	۲۷/۱۲d-f	۶/۴۵b-d	۲۹/۹۶i	۱۵	نانو کلرید کلسیم	
۸۶/۶f	۰/۲۱۹ab	۲۱/۴۰cd	۹۱/۰b	۴/۳۰b	۳۳/۲۶ef	۶/۵۷a-c	۳۱/۴۵gh	۵	کربنات کلسیم	
۹۳/۱de	۰/۱۷۹d-g	۲۵/۱۵b	۹۵/۰b	۵/۳۶a	۲۷/۹۸cd	۶/۶۲a-c	۳۲/۴۲ef	۱۰	کربنات کلسیم	
۹۹/۶bc	۰/۱۸۲d-g	۲۵/۹۶ab	۱۰۳/۱a	۳/۳۷c	۳۰/۰۱ab	۶/۸۳a	۳۵/۸۸b	۱۵	کربنات کلسیم	
۸۶/۵f	۰/۲۰۷a-c	۲۰/۸۶d	۸۳/۰c	۴/۲۵b	۲۸/۶۸c	۶/۵۳b-d	۳۲/۱۰fg	۵	نانو کربنات کلسیم	
۹۶/۹c	۰/۱۷۰f-i	۲۲/۹۰c	۱۰۱/۰a	۵/۳۶a	۲۹/۷۶b	۶/۶۹ab	۳۳/۱۵de	۱۰	نانو کربنات کلسیم	
۱۰۴/۰a	۰/۲۰۷a-c	۲۲/۸۱c	۸۶/۲c	۵/۳۳a	۳۰/۸a	۶/۵۷a-c	۳۷/۶۸a	۱۵	نانو کربنات کلسیم	
۳۹/۱m	۰/۱۲۴l	۸/۶۹j	۳۷/۱n	۱/۳۹f	۲۰/۷۵k	۴/۳vi	۱۸/۳r	۰	شاهد	
۴۴/۷l	۰/۱۱۱l	۱۰/۴۵ij	۲۸/۳mn	۲/۳۱d	۲۰/۶۵k	۵/۳۱h	۲۱/۱p	۵	کلرید کلسیم	
۵۴/۱jk	۰/۱۴۱j-l	۱۳/۰۴h	۳۲/۰m	۲/۳۴d	۲۲/۱۵hi	۵/۷۲f	۲۲/۱o	۱۰	کلرید کلسیم	
۶۱/۱i	۰/۱۴۸i-k	۱۴/۵۹h	۴۰/۷kl	۳/۳۰c	۲۳/۱۸h	۵/۲۷h	۲۶/۲kl	۱۵	کلرید کلسیم	
۴۶/۰l	۰/۱۳۷j-l	۱۳/۳۶h	۴۹/۹hi	۲/۲۹d	۲۱/۰۱jk	۵/۷۴f	۲۳/۱n	۵	نانو کلرید کلسیم	
۶۲/۴hi	۰/۲۱۹ab	۱۴/۱۹h	۵۵/۵۱g	۳/۳۱c	۲۱/۶۴i-k	۵/۷۴f	۲۵/۱m	۱۰	نانو کلرید کلسیم	۲۰
۵۵/۶j	۰/۲۲۲a	۱۶/۸۳g	۵۲/۸gh	۴/۳۱b	۲۱/۲۵i-k	۶/۳۶c-e	۲۶/۷k	۱۵	نانو کلرید کلسیم	
۴۴/۹l	۰/۱۵۶h-j	۱۰/۵۷i	۴۰/۰l	۲/۳۸d	۲۱/۹۸ij	۵/۵۰f-h	۱۹/۴q	۵	کربنات کلسیم	
۵۱/۴k	۰/۱۸۲d-g	۱۳/۲۴h	۵۵/۲g	۳/۲۲c	۲۳/۱۵h	۵/۵۴f-h	۲۶/۳kl	۱۰	کربنات کلسیم	
۶۵/۵h	۰/۱۹۷b-d	۱۶/۸۳g	۴۴/۷jk	۲/۳۷d	۲۴/۹۲g	۵/۶۰fg	۲۵/۹l	۱۵	کربنات کلسیم	
۴۵/۲l	۰/۱۳۱kl	۱۳/۸۵h	۴۴/۰j-l	۳/۳۰c	۲۱/۶۶i-k	۵/۴۹f-h	۲۱/۲p	۵	نانو کربنات کلسیم	
۵۵/۲j	۰/۱۹۰c-f	۱۴/۰۷h	۴۷/۷ij	۳/۰۹c	۲۳/۰۸h	۵/۶۹f	۲۳/۳n	۱۰	نانو کربنات کلسیم	
۶۵/۲h	۰/۲۰۷a-c	۱۷/۶۳fg	۶۵/۱f	۳/۳۴c	۲۴/۶۴g	۶/۴۰c-e	۲۳/۳n	۱۵	نانو کربنات کلسیم	

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک در هر ستون می‌باشند، بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌داری هستند ($P < 0.05$).

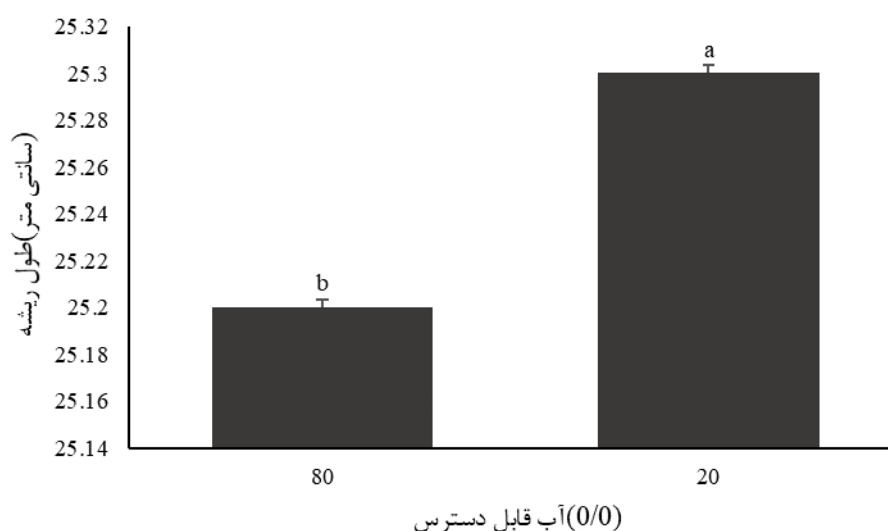
تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۱)، تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم‌آبیاری تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ در سطح احتمال یک درصد بر تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ معنی‌دار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۲) که کاربرد مواد کلسیم‌دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری‌که کاربرد نانو کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۳/۹ درصد تعداد گره نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار بالک کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۰ درصد تعداد گره نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. همچنین، کاربرد بالک کلرید کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب

قابل دسترس باعث افزایش ۶۴/۲۲ درصد تعداد شاخه‌های جانبی نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ و ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکلیرد کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۳۴/۱ درصد تعداد شاخه‌های جانبی نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد. کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۱ درصد تعداد برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۴۰ درصد تعداد برگ نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

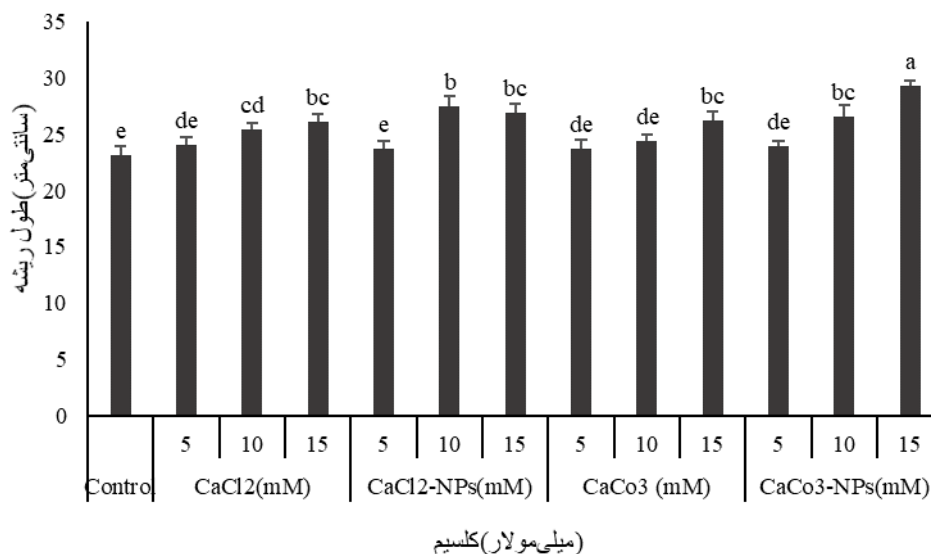
طول و حجم ریشه

نتایج تجزیه وایانس (جدول ۱) نشان داد، که تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم در سطح احتمال یک درصد بر طول و حجم ریشه معنی‌دار شد و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر حجم ریشه معنی‌دار شد اما بر طول ریشه معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۲)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این حجم ریشه در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانوکلیرد کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۷ درصد حجم ریشه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانوکلیرد کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۰/۷ درصد حجم ریشه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، با توجه به شکل ۱، سطح آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۰/۴ درصد طول ریشه نسبت به سطح آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس شد.



شکل ۱. اثر تنش کم آبیاری بر طول ریشه گیاه شمعدانی عطری

کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم طول ریشه را ۲۶/۵۸ درصد نسبت به عدم محلول پاشی مواد کلسیم دار افزایش داد (شکل ۲).



شکل ۲. اثر محلول پاشی مواد کلسیم دار بالک و نانو کلرید کلسیم و کربنات کلسیم بر طول ریشه گیاه شمعدانی عطری

سطح ویژه برگ و نسبت ریشه به شاخساره

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۱)، تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر سطح ویژه برگ و نسبت ریشه به شاخساره معنی دار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم آبیاری نشان داد (جدول ۲)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانوکلرید کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۴/۵ درصد سطح ویژه برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی دار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی‌مولار بالک کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۷/۵ درصد سطح ویژه برگ نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی دار نداشت. همچنین، کاربرد نانوکلرید کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد و ۲۰ درصد آب قابل دسترس به ترتیب باعث افزایش ۳۱/۸ درصد و ۷۹ درصد صفت نسبت ریشه به شاخساره نسبت به عدم محلول پاشی در این سطوح آبیاری شد.

وزن تر و خشک ساقه

نتایج تجزیه وایانس (جدول ۳) نشان داد که تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک ساقه معنی دار شد.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر محلول پاشی مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 بر ویژگی‌های عملکردی گیاه شمعدانی عطری تحت

تنش کم آبیاری

میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه	وزن تر ساقه	وزن تر برگ	وزن تر ریشه	وزن خشک ساقه	وزن خشک برگ
وزن خشک						

ریشه	آزادی						
۷۵/۶۵۵۰**	۹۳۹/۶۱۸**	۱۰۴/۸۶۱**	۱۰۹۵/۸۹**	۲۰۶۴۷/۶**	۱۸۵۸/۰۹**	۱	تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)
۲/۹۸۶۱**	۱۶/۱۲۱**	۳/۷۸۴**	۲۰/۹۱**	۶۱۲**	۶۰/۱۶**	۱۲	کلسیم
۰/۱۹۷۹**	۲/۰۸۹**	۰/۴۷۰**	۵/۸۰**	۷۴/۴**	۹/۶۱**	۱۲	تنش کم آبیاری × کلسیم
۰/۰۱۸۴	۰/۲۴۷	۰/۰۱۹	۰/۲۵	۲/۱	۱/۲۲	۷۸	خطا
۵/۳۹	۴/۶۹	۴/۳۷	۴/۶۷	۳/۲۶	۸/۱۲	-	ضریب تغییرات (درصد)

ns، * و **: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم آبیاری نشان داد (جدول ۴)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۳/۷ درصد وزن تر ساقه نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۶۹ درصد وزن تر ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانو کربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۷۵/۹ درصد وزن خشک ساقه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی دار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۸۴/۷ درصد وزن خشک ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

جدول ۴. مقایسه میانگین ویژگی‌های عملکردی گیاه شمعدانی عطری محلول پاشی شده با مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 تحت تنش کم آبیاری

تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	ترکیبات	کلسیم (میلی مولار)	وزن تر ساقه (گرم)	وزن تر برگ (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ساقه (گرم)	وزن خشک برگ (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)
شاهد	۰	۱۳/۵fg	۴۶/۰g	۱۰/۸hi	۳/۲۰g	۱۰/۵h	۲/۳۸fg	۲/۳۸fg
کلرید کلسیم	۵	۱۵/۷de	۴۶/۲g	۱۱/۳gh	۳/۴۴f	۱۱/۷g	۲/۴۹ef	۲/۴۹ef
کلرید کلسیم	۱۰	۱۶/۸d	۵۴/۴e	۱۱/۷g	۳/۵vd-f	۱۳/۳ef	۲/۸۲d	۲/۸۲d
کلرید کلسیم	۱۵	۱۶/۸d	۵۷/۶cd	۱۳/۵e	۳/۶۹de	۱۴/۳۵cd	۳/۴۹bc	۳/۴۹bc
نانو کلرید کلسیم	۵	۱۴/۴ef	۵۰/۳f	۱۲/۶f	۳/۵۳ef	۱۱/۷g	۲/۵۹e	۲/۵۹e
۸۰ نانو کلرید کلسیم	۱۰	۱۹/۲c	۵۹/۲c	۱۳/۱ef	۴/۲۹c	۱۳/۸de	۳/۵۲bc	۳/۵۲bc
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲۰/۱bc	۷۲/۴a	۱۷/۱a	۴/۶۲b	۱۴/۹bc	۴/۴۸a	۴/۴۸a
کربنات کلسیم	۵	۱۴/۸ef	۵۲/۶e	۱۴/۷c	۳/۵۹d-f	۱۱/۶g	۳/۳۵c	۳/۳۵c
کربنات کلسیم	۱۰	۱۹/۸bc	۶۳/۴b	۱۴/۳cd	۴/۵۳b	۱۵/۰ab	۳/۵۱bc	۳/۵۱bc
کربنات کلسیم	۱۵	۲۲/۱a	۶۵/۰b	۱۷/۱a	۴/۲۵c	۱۵/۷a	۳/۶۴b	۳/۶۴b
نانو کربنات کلسیم	۵	۱۵/۴de	۵۶/۰d	۱۳/۸de	۴/۱۵c	۱۲/۷f	۳/۵۱bc	۳/۵۱bc
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۲۰/۹ab	۶۳/۳b	۱۵/۹b	۵/۵۰a	۱۵/۳ab	۳/۵۵b	۳/۵۵b
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۲۰/۳ab	۷۲/۲a	۱۴/۸c	۵/۶۳a	۱۵/۶ab	۴/۴۱a	۴/۴۱a

کلسیم							
۰/۸۶m	۵/۵۷n	۱/۳۱l	۴/۴۵q	۸/۲۹p	۲/۶n	۰	شاهد
۰/۹۵lm	۶/۵۸m	۱/۴۷kl	۵/۷۱p	۱۹/۵o	۶/۵lm	۵	کلرید کلسیم
۱/۱۹k	۶/۸۴lm	۱/۶۲k	۷/۴۷mn	۲۲/۳n	۸/۹jk	۱۰	کلرید کلسیم
۱/۴۸i	۷/۴۳kl	۲/۵۸hi	۹/۵۰j	۲۵/۵m	۹/۱j	۱۵	کلرید کلسیم
۱/۱۴kl	۶/۷۸lm	۱/۵۳k	۵/۷۴p	۲۶/۶hn	۵/۸m	۵	نانو کلرید
							کلسیم
۲/۱۹h	۷/۴۰kl	۲/۶۰hi	۷/۶۸l-n	۳۴/۲jk	۷/۴kl	۱۰	نانو کلرید
							کلسیم
۲/۳۶f-h	۸/۰jk	۲/۶۴h	۸/۵۰k	۳۲/۴k	۱۱/۹hi	۱۵	نانو کلرید
							کلسیم
۱/۲۹k	۶/۶۹m	۱/۵۹k	۶/۷۳o	۲۸/۶l	۱۰/۹hi	۵	کربنات کلسیم
۱/۷۲i	۷/۱۶lm	۲/۴۱ij	۷/۱۲no	۳۵/۸ij	۱۱/۶hi	۱۰	کربنات کلسیم
۲/۲۵gh	۸/۹۳i	۲/۵۰hi	۷/۷۰l-n	۳۷/۵i	۱۱/۹hi	۱۵	کربنات کلسیم
۱/۲۹k	۸/۲۲j	۱/۶۵k	۷/۸۳k-m	۳۷/۴i	۱۰/۶i	۵	نانو کربنات
							کلسیم
۲/۲۴gh	۹/۵۴i	۲/۲۳j	۸/۳۱kl	۴۲/۳h	۱۱/۷hi	۱۰	نانو کربنات
							کلسیم
۲/۶۳de	۹/۵۳i	۳/۷۳d	۱۰/۲۸i	۴۲/۸۲h	۱۲/۲gh	۱۵	نانو کربنات
							کلسیم

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک در هر ستون می‌باشند، بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌داری هستند ($P < 0.05$).

وزن تر و خشک برگ

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۳)، تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک برگ معنی‌دار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۴)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری‌که کاربرد نانوکلرید کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۷/۴ درصد وزن تر برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانوکلرید کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۱۶/۵ درصد وزن تر برگ نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. همچنین، کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۵ درصد وزن خشک برگ نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۷۱/۳ درصد وزن خشک برگ نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانو و بالک کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت.

وزن تر و خشک ریشه

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۳)، تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۴)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌های در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری‌که کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانوکلرید کلسیم و بالک کربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۸/۳ درصد وزن تر ریشه نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۳۱ درصد وزن تر ریشه نسبت به عدم محلول‌پاشی در

همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانوکلیرد کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۸۸ درصد وزن خشک ریشه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۰۵/۸ درصد وزن خشک ریشه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

کار آبی مصرف آب و شاخص مقاومت به تنش

نتایج تجزیه وایانس (جدول ۵) نشان داد که تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر کار آبی مصرف آب و شاخص مقاومت به تنش معنی‌دار شد.

جدول ۵. تجزیه وایانس اثر محلول‌پاشی مواد کلسیم‌دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 بر ویژگی‌های

فیزیولوژیک گیاه‌شمعدانی عطری تحت تنش کم آبیاری

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	کارایی مصرف آب	شاخص مقاومت به تنش	استحکام ساقه	تراکم بافت ساقه
تنش کم‌آبیاری (آب قابل دسترس در خاک) کلسیم	۱	۱۹/۱۰۱۷**	۸۹/۸۸۹/۰**	۰/۰۳۲۲۹۷**	۰/۰۰۰۰۰۰ NS
تنش کم‌آبیاری × کلسیم	۱۲	۰/۲۷۲۵**	۶۷۶/۹**	۰/۰۰۳۰۸۹**	۰/۰۰۰۰۰۰۲**
خطا	۷۸	۰/۰۰۵۸	۹/۸	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۰۰
ضریب تغییرات (درصد)	-	۳/۹۵	۳/۵۹	۴/۹۴	۰/۰۰

NS، * و **: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۶)، که کاربرد مواد کلسیم‌دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانوکلیرد کلسیم و ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۴/۸ درصد کار آبی مصرف آب نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی‌مولار نانوکلیرد کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۳ درصد کار آبی مصرف آب نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانوکربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۰/۳ درصد شاخص مقاومت به تنش نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۰/۶ درصد شاخص مقاومت به تنش نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی مواد کلسیم‌دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 بر ویژگی‌های فیزیولوژیک

گیاه‌شمعدانی عطری تحت تنش کم آبیاری

تنش کم‌آبیاری (آب قابل دسترس)	کلسیم (میلی‌مولار)	کارایی مصرف آب	شاخص مقاومت به	استحکام ساقه (گرم)	تراکم بافت ساقه (گرم بر سانتی‌متر)
-------------------------------	--------------------	----------------	----------------	--------------------	------------------------------------

در خاک)	(گرم بر لیتر)	تنش (%)	بر سانتی متر (مکعب)	مکعب)
شاهد	۰	۱/۶۶ef	۱۰۰/۳۳j	۰/۰۰۳۶g-j
کلرید کلسیم	۵	۲/۲۹cd	۱۰۰/۳۹ij	۰/۰۰۳۰k-m
کلرید کلسیم	۱۰	۲/۳۴bc	۱۰۵/۸۸hi	۰/۰۰۳۲j-m
کلرید کلسیم	۱۵	۲/۴۰b	۱۰۸/۳۹gh	۰/۰۰۳۰k-m
نانو کلرید کلسیم	۵	۲/۳۸abc	۱۰۷/۰۶g-i	۰/۰۰۴۴b-d
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۲/۵۷a	۱۱۴/۴۴f	۰/۰۰۴۳c-f
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲/۵۵a	۱۲۰/۸۵de	۰/۰۰۴۷a-c
کربنات کلسیم	۵	۲/۲۲d	۱۱۰/۶۴fg	۰/۰۰۳۳i-l
کربنات کلسیم	۱۰	۲/۴۲b	۱۱۹/۳۵e	۰/۰۰۴۰d-g
کربنات کلسیم	۱۵	۲/۴۲b	۱۲۵/۷۰c	۰/۰۰۳۲j-m
نانو کربنات کلسیم	۵	۲/۳۷bc	۱۲۵/۱۲cd	۰/۰۰۳۸gh
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۲/۴۳bc	۱۳۵/۲۵b	۰/۰۰۴۷a-c
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۲/۵۷a	۱۴۰/۷۸a	۰/۰۰۴۴b-d
شاهد	۰	۱/۱۱l	۴۶/۹۴q	۰/۰۰۴۷ab
کلرید کلسیم	۵	۱/۳۹jk	۵۳/۴۳p	۰/۰۰۳۱k-m
کلرید کلسیم	۱۰	۱/۴۶i-k	۵۵/۲۲op	۰/۰۰۲۸m
کلرید کلسیم	۱۵	۱/۵۵g-i	۵۶/۴۵n-p	۰/۰۰۴۴b-d
نانو کلرید کلسیم	۵	۱/۳۸k	۵۳/۷۳op	۰/۰۰۲۹lm
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۱/۵۳g-i	۵۷/۴۱n-p	۰/۰۰۳۹fg
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۱/۵۵f-i	۵۹/۰۹no	۰/۰۰۳۱k-m
کربنات کلسیم	۵	۱/۴۹ij	۵۴/۲۵op	۰/۰۰۳۴h-k
کربنات کلسیم	۱۰	۱/۵۲hi	۵۷/۱۴n-p	۰/۰۰۳۸g-i
کربنات کلسیم	۱۵	۱/۶۳e-h	۵۹/۷۱mn	۰/۰۰۳۹fg
نانو کربنات کلسیم	۵	۱/۵۳g-i	۶۳/۶۴lm	۰/۰۰۳۳j-l
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۱/۶۳e-h	۶۶/۲۷l	۰/۰۰۳۷g-i
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۱/۷۰e	۷۰/۷۰k	۰/۰۰۴۹a

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک در هر ستون می‌باشند، بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌داری هستند.
($P < 0.05$)

استحکام و تراکم بافت ساقه

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۵)، تاثیر تنش کم‌آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم × کم‌آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر استحکام و تراکم بافت ساقه معنی‌دار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۶)، که کاربرد مواد کلسیم‌دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری‌که کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۵ درصد استحکام ساقه نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۲۵ درصد استحکام ساقه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانو کربنات کلسیم و کلرید کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۰/۵ درصد تراکم بافت ساقه نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴/۳ درصد تراکم بافت ساقه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

محلول پاشی ترکیبات کلسیم دار، به ویژه در قالب نانوذرات، توانست اثرات نامطلوب تنش کم آبی را بر ویژگی های مورفولوژیک گیاه شمعدانی معطر به طور مؤثری تعدیل کند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش غلظت محلول پاشی باعث افزایش اثربخشی آن شده و در میان ترکیبات مورد استفاده، نانوکربنات کلسیم بیشترین تأثیر مثبت را بر ویژگی های مورفولوژیک از خود نشان داد. این اثرگذاری می تواند به تجزیه تدریجی کربنات کلسیم در سطح برگ یا درون روزنه ها نسبت داده شود که منجر به آزادسازی دی اکسید کربن و افزایش غلظت آن در نزدیکی کلروپلاست ها می شود (Bilal, 2010; EL-Aal, 2018). افزایش سطح CO_2 در برگ ها، از طریق بهبود فرآیند فتوسنتز، رشد گیاه را ارتقا می دهد. از سوی دیگر، نانوکربنات کلسیم با نقش مخزن آهسته رهش دی اکسید کربن می تواند به طور مداوم این گاز را در اختیار سیستم فتوسنتزی قرار دهد و از این طریق به افزایش بازده فتوسنتزی و کاهش تنفس نوری از طریق سرکوب فعالیت اکسیژنازی آنزیم RuBisCO کمک کند (Abd El-Aal and Eid, 2018). این یافته ها با مطالعات گذشته نیز هم راستا هستند؛ برای مثال، در بررسی اثر نانوذرات کلسیم، منیزیم و روی بر رشد گل کلم، نانوذرات کلسیم بیشترین تأثیر را در بهبود رشد و ساختار تشریحی برگ در مقایسه با شاهد داشتند (Tawfic et al., 2024). همچنین، اثر محافظتی نانوذرات کلسیم در شرایط تنش شوری نیز گزارش شده است، به گونه ای که در گیاه گوجه فرنگی تحت تنش شدید شوری (۲۰۰ میلی مولار)، محلول پاشی نانوکلسیم موجب کاهش اثرات منفی و بهبود عملکرد گیاه گردید (Abeed et al., 2023). این شواهد در مجموع نشان می دهد که کاربرد نانوذرات کلسیم، به ویژه نانوکربنات کلسیم، می تواند راهبردی مؤثر برای کاهش اثرات تنش های محیطی و ارتقای رشد گیاهان زینتی نظیر شمعدانی معطر باشد.

محلول پاشی ترکیبات کلسیم دار به صورت بالک و نانو، تأثیر قابل توجهی در کاهش اثرات منفی تنش کم آبی بر ویژگی های عملکردی گیاه شمعدانی معطر نشان داد. نتایج به روشنی بیانگر آن بود که افزایش غلظت محلول پاشی، اثرگذاری بیشتری در بهبود عملکرد گیاه داشته و نانوکربنات کلسیم در میان تیمارهای مورد بررسی، بیشترین تأثیر مثبت را از خود نشان داد. نانوکربنات کلسیم، به عنوان یک ترکیب فعال، قادر است با القای مقاومت فیزیولوژیک، رشد گیاه را در شرایط تنش تقویت کند (Tantawy et al., 2014; Hua et al., 2015). شواهد تجربی نیز مؤید این اثرات است؛ به گونه ای که کاربرد محلول ۰/۳ درصد نانوکربنات کلسیم موجب افزایش معنی دار تعداد دانه در سنبله و بهبود عملکرد گندم در مقایسه با کودهای ترکیبی گردید. به طور خاص، تیمارهای ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد این نانوترکیب توانستند به ترتیب عملکرد را تا ۳۴/۷ و ۲۶ درصد نسبت به شاهد افزایش دهند (Gao et al., 2024). این یافته ها با نتایج پژوهش حاضر همخوانی داشته و نشان می دهد که نانوکربنات کلسیم می تواند از طریق بهبود ویژگی های فیزیولوژیکی و عملکردی، نقش مؤثری در افزایش تحمل به تنش و ارتقای عملکرد گیاهان در شرایط کم آبی ایفا کند.

در میان ترکیبات کلسیم دار مورد بررسی، نانوکربنات کلسیم بیشترین تأثیر مثبت را بر ویژگی های فیزیولوژیکی گیاه شمعدانی معطر نشان داد. یکی از دلایل احتمالی این تأثیر، افزایش غلظت دی اکسید کربن در اطراف روزنه ها در نتیجه تجزیه کربنات کلسیم محلول پاشی شده است. دو فرضیه اصلی در مورد نحوه آزادسازی CO_2 از کربنات کلسیم روی سطح برگ مطرح شده است. بر اساس فرضیه نخست، در طول شب، کربنات کلسیم موجود بر سطح برگ با CO_2 حاصل از تنفس گیاه و رطوبت شبنم وارد واکنش شده و به بیکربنات کلسیم تبدیل می شود. سپس در طول روز، افزایش دما و تبخیر آب منجر به تجزیه بیکربنات کلسیم به کربنات کلسیم و آزادسازی CO_2 با غلظتی بالاتر از غلظت اتمسفری در نزدیکی بافت برگ می شود (House, 1981; Zhao et al., 2010; Bilal, 2010). در فرضیه دوم، ورود مستقیم نانوکربنات کلسیم از طریق روزنه ها به داخل برگ و آزادسازی CO_2 در فضاهای بین سلولی گیاه مطرح است (EL-Aal et al., 2018). این مکانیسم ها می توانند به بهبود فتوسنتز و وضعیت آبی گیاه کمک کنند، به ویژه در شرایط تنش کم آبی. در همین راستا، گزارش شده که محلول پاشی نانوکربنات کلسیم به میزان ۷/۵ گرم در

لیتر در گیاه پنبه موجب کاهش معنی‌دار فشار اسمزی ناشی از کم‌آبی، کاهش نفوذپذیری غشای پلاسمایی، و افزایش محتوای نسبی آب برگ شده است (ElShazly and Abd El-Aal, 2019). علاوه بر این، محلول‌پاشی ترکیبی نانوذرات کلسیم و اکسید روی نیز اثرات مثبت قابل توجهی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاه گوجه‌فرنگی داشته است (Farooq et al., 2023). به‌طور مشابه، روستا و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأثیر مثبت نانوکربنات کلسیم را بر بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه پونه در انواع سامانه‌های کشت از جمله خاکی، هیدروپونیک گلخانه‌ای، و هیدروپونیک عمودی تحت نور LED گزارش کرده‌اند. هم‌راستایی این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر، نقش کلیدی نانوکربنات کلسیم در ارتقاء پاسخ فیزیولوژیکی گیاهان در شرایط تنش محیطی را به‌خوبی تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

محلول‌پاشی مواد کلسیم‌دار بالک و نانو توانستند اثر تنش کم‌آبی را بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکردی شمعدانی معطر تعدیل کنند. غلظت‌های بالاتر تأثیرگذارتر از غلظت‌های پایین بود. در میان مواد کلسیم‌دار نانوکربنات کلسیم بیشترین تأثیر را بر این ویژگی‌های داشت. کاربرد نانوکربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۰/۳ درصد و در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۰/۶ درصد شاخص مقاومت به تنش نسبت به شاهد شد. بهترین تیمار در این پژوهش نیز غلظت ۱۵ میلی‌مولار کربنات کلسیم شناخته شد.

منابع

پورویسه، رضا؛ رضایی نژاد، عبدالحسین و موسوی فرد، صادق (۱۴۰۳). اثر کود دامی و بیوجار بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه شمعدانی معطر (*Pelargonium graveolens* L.) تحت تنش کم آبیاری. نشریه علوم باغبانی ایران، ۵۵(۲): ۳۴۹-۳۷۰.

حبیبی، لیلا و مطلبی. الهام (۱۴۰۰). بررسی اثر سطوح مختلف ورمی کمپوست و خاکبرگ بر برخی ویژگی‌های شمعدانی (*Pelargonium* spp.) تحت تنش خشکی. نشریه گیاه زیست فناوری ایران. ۱۶ (۴): ۴۵-۵۷.

REFERENCES

- Abd El-Aal, M.M.M. & Eid, R.S. (2018). Effect of foliar spray with lithovit and amino acids on growth, bioconstituents, anatomical and yield features of soybean plant. *Plant Biotechnology*, 11:187-201.
- Abeed, A.H.A., AL-Huqail, A. A., Albalawi, S., Alghamdi, S.A., Ali, B., Alghanem, S.M.S., Al-Haithloul, H. A. S., Amro, A., Tammam, S. A. & El-Mahdy, M.T. (2023). Calcium nanoparticles mitigate severe salt stress in *Solanum lycopersicon* by instigating the antioxidant defense system and renovating the protein profile. *South African Journal of Botany*, 161: 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.005>
- Akhtar, N., Ilyas, N., Arshad, M., Meraj, T. A., Hefft, D. I., Jan, B.L. & Ahmad, P. (2022). The impact of calcium, potassium, and boron application on the growth and yield characteristics of Durum Wheat under Drought conditions. *Agronomy*, 12 (8): 1917.
- Ayyaz, A., Fang, R., Ma, J., Hannan, F., Huang, Q., Athar, H.U. & 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* 100423. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100423>.
- Badihi, L., Gerami, M., Akbarinodeh, D., Shokrzadeh, M. & Ramezani, M. (2021). Physio-chemical responses of exogenous calcium nanoparticle and putrescine polyamine in saffron (*Crocus sativus* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(1):119-133. doi: 10.1007/s12298-020-00923-x.
- Balantic, K., Weiss, V. U., Allmaier, G. & Kramar, P. (2022). Calcium ion effect on phospholipid bilayers as cell membrane analogues. *Bioelectrochemistry*, 143: 107988.

- Bilal, A. B. (2010). Recommended application of lithovit on different plants. In 3rd e Conference on Agriculture Bio. Sciences IeCAB. 1st- 15th June 2010.
- Bohm, W., 1979. *Methods of studying root systems*. Ecological Studies, SpringerVerlag., Berlin, 188 p.
- El-Aal, A. (2018). Effect of foliar spray with lithovit and amino acids on growth, bioconstituents, anatomical and yield features of soybean plant. *Annals of Agricultural Science*, Moshtohor, 56 (4th ICBA), 187-202.
- El-Shazly, M.W. & Abd El All, A.M. (2019). Response of Giza 86 cotton cultivar to foliar feeding with Lithovit and boron. *international journal of advanced research in biological sciences*, 6(1):33-49.
- Farooq, A., Javad, S., Jabeen, K., Shah, A.A., Ahmad, A., Shah, A.N., Alyemeni, M.N., Mosa, W. F.A & Abbas, A. (2023). Effect of calcium oxide, zinc oxide nanoparticles and their combined treatments on growth and yield attributes of *Solanum lycopersicum* L. *Journal of King Saud University – Science*, 35: 102647. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102647>
- Feier, R., Sireteanu Cucui, R.M., Ratiu, R.F., Baci, D., Galea, C., Sachelarie, L. Nistor, C., Cocos, D., Hurjui, L.L. & Cernei, E.R. (2023). Comparative Study of Ozonated Olive Oil and Extra Virgin Olive Oil Effects on Oral Hygiene. *MDPI, Applied Sciences*, 13(5), 2831; <https://doi.org/10.3390/app13052831>
- Fischer, R. A. & Maurer, R. (1998). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29: 897-912.
- Gao, Y., Chen, S., Yang, M., Hao, Z., Wang, X. & Shi, Y. (2024). Nano calcium carbonate improves wheat nitrogen accumulation and grain yield by enhancing soil nitrogen supply and flag leaf photosynthetic characteristics. *Field Crops Research*, 310: 109341. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109341>
- Garnier, E., Shipley, B., Roumet, C. & Laurent, G.(2001). A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Functional Ecology*. 15(5): 688-695. <https://www.jstor.org/stable/826696>
- Habibi, L. & Motallebi, M. (2022). Investigation of the effect of different levels of vermicompost and leaf soil on some geranium (*Pelargonium* spp.) characteristics under drought stress. *Iranian Journal of Plant and Biotechnology*. 16(4): 45-57. (In Persian).
- Hatami M, Hadian J & Ghorbanpour M. (2017). Mechanisms underlying toxicity and stimulatory role of single-walled carbon nanotubes in *Hyoscyamus niger* during drought stress simulated by polyethylene glycol. *Journal of Hazardous Materials*, 324: 306 - 20.
- Hosseini, S.A., Rethore, E., Pluchon, S., Ali, N., Billiot, B. & Yvin, J.C. (2019). Calcium application enhances drought stress tolerance in sugar beet and promotes plant biomass and beetroot sucrose concentration. *International journal of molecular sciences*, 20, 15, 3777, 2019.
- House, W.A. (1981). Kinetics of crystallisation of calcite from calcium bicarbonate solutions. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 77(2), 341-359.
- Hua, K.H., Wang, H.C., Chung, R.S. & Hsu, J.C. (2015). Calcium carbonate nanoparticles can enhance plant nutrition and insect pest tolerance. *Journal of Pest Science*. 40:208–213. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D15-025>.
- Jabereldar, A.A., El Naim, A.M., Abdalla, A.A., & Dagash, Y.M. (2017). Effect of water stress on yield and water use efficiency of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 7(1), 1-6. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20170701.01>
- Jaleel, C.A., Gopi, R. & Panneerselvam, R. (2008). Growth and photosynthetic pigments responses of two varieties of *Catharanthus roseus* to triadimefon treatment. *Comptes Rendus Biologies*, 331 (4): 272-277.
- Jaradat, N., Hawash, M., Qadi, M., Abualhasan, M., Odetallah, A., Qasim, G., Reem Awayssa, R., Akkawi, A., Abdullah, I., & Al-Maharik, N. (2022). Chemical Markers and Pharmacological Characters of *Pelargonium graveolens* Essential Oil from Palestine. *MDPI, Molecules*, 27(17), 5721; <https://doi.org/10.3390/molecules27175721>
- Mogazy, A.M., Mohamed, H.I. & El-Mahdy, O.M. (2022). Calcium and iron nanoparticles: A positive modulator of innate immune responses in strawberry against *Botrytis cinerea*. *Process Biochemistry*. 115: 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.02.014>.
- Muhammad Aslam, M., Waseem, M., Jakada, B. H., Okal, E. J., Lei, Z., Saqib, H. S. A., & Zhang, Q. (2022). Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants. *International journal of molecular sciences*, 23(3), 1084.

- Nasrallah, A.K., Kheder, A.A., Kord, M.A., Fouad, A.S., El-Mogy, M.M. & Atia, M.A. (2022). Mitigation of salinity stress effects on broad bean productivity using calcium phosphate nanoparticles application. *Horticulturae* 8, 75. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010075>.
- Pourveiseh, R., Rezaei Nejad, A. & Mousavi-Fard, S. (2024). Effect of Animal Manure and Biochar on Some Morphophysiological and Biochemical Characteristics of *Pelargonium graveolens* L. Under Water Deficit Stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 55(2): 349-370. (In Persian).
- Rab, A. & Haq, I.U. (2012). Foliar application of calcium chloride and borax influences plant growth, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(6), 695-701.
- Rezaei Nejad, A., Izadi, Z., Sepahvand, K., Mumivand, H. & Mousavifard, S. (2020) Changes in total phenol and some enzymatic and non-enzymatic antioxidant activities of rose-scented geranium (*Pelargonium graveolens*) in response to exogenous ascorbic acid and iron nutrition. *Journal of Ornamental Plants* 10: 27-36.
- Roosta, H.R., Samadi, A. & Bikdeloo, M. (2023). Different cultivation systems and foliar application of calcium nanoparticles affect the growth and physiological characteristics of pennyroyal (*Mentha pulegium* L.). *Scientific Reports*, 13:20334. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47855-6>
- Tantawy A.S., Salama Y.A.M., Abdel-Mawgoud A.M.R. & Ghoname A.A. (2014). Comparison of chelated calcium with nano calcium on alleviation of salinity negative effects on tomato plants. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2014;3:912-6.
- Tawfic, G.A., El-Mohammady, M. M.S. & Azoz, S.N. (2024). Impact of Foliar Spray with Some Nutrients as Nano-Particles on Growth, Yield, Enzymatical and Anatomical Changes of Cauliflower. *Scientific Journal of Agricultural Sciences*, 6 (2): 1-20. <https://doi.org/10.21608/sjas.2024.285778.1418>.
- Wada, Y., Van Beek, L.P.H., Viviroli, D., Durr, H.H., Weingartner, R. & Bierkens, M.F. (2011). Global monthly water stress. 2. Water demand and severity of water stress. *Water Resources Research*, 47(7): 1-18.
- Zhao, D.F., Buchholz, A., Mentel, T.F., Müller, K.P., Borchardt, J., Kiendler-Scharr, A., & Wahner, A. (2010). Novel method of generation of Ca (HCO₃)₂ and CaCO₃ aerosols and first determination of hygroscopic and cloud condensation nuclei activation properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(17), 8601-8616.
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Min Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z. & Ji, R. (2020). Nanobiotechnology in Agriculture: Use of Nanomaterials to Promote Plant Growth and Stress Tolerance *Journal of Agricultural and Food Chemistry*., DOI: 10.1021/acs.jafc.9b06615 • Publication Date (Web): 31 Jan 2020