



Effects of Foliar Application of Calcium Compounds on Growth and Physiological Characteristics of Scented Geranium (*Pelargonium graveolens* L.) Under Water Deficit Stress

Kobra Sepahvand¹ , Abdolhossein Rezaei Nejad^{2✉} , Sadegh Mousavi-Fard³ ,
Reza Abolghasemi⁴

1. Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: sepahvand.Ko@fa.lu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: rezaeinejad.h@lu.ac.ir
3. Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran. E-mail: mousavifard.s@sku.ac.ir
4. Department of Horticulture Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: abolghasemi.r@lu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The present study was conducted to evaluate the effects of foliar application of nano- and bulk forms of calcium chloride and calcium carbonate on the morphophysiological responses of scented geranium (<i>Pelargonium graveolens</i> L.) under water deficit stress. The experiment was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design with four replications. The first factor was irrigation level at two levels: control (80% available water) and severe water deficit stress (20% available water). The second factor comprised 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). Analysis of variance showed that irrigation stress, calcium concentration, and their interaction significantly affected most of the evaluated traits ($p \leq 0.01$). Application of 10 mM nano-calcium carbonate under 80% available water increased stem strength by 49.5% compared with the control. Foliar application of 15 mM nano-calcium carbonate under 20% available water increased stem strength by 125% compared with the unsprayed control under the same irrigation condition. Application of 15 mM nano-calcium carbonate under control and stress conditions improved the stress resistance index by 40.3% and 50.6%, respectively. In addition, foliar application of 15 mM nano-calcium carbonate and nano-calcium chloride under 80% and 20% available water, respectively, increased plant height by 31% and 45.7%, respectively, compared with the control. Overall, 15 mM nano-calcium carbonate was identified as the most effective treatment for enhancing drought tolerance in scented geranium.
Article history: Received: 8 January 2024 Received in revised form: 19 May 2025 Accepted: 22 July 2025 Published online: Autumn 2025	
Keywords: <i>foliar application,</i> <i>nanoparticles,</i> <i>stress tolerance,</i> <i>specific leaf area.</i>	
Cite this article: Sepahvand, K., Rezaei Nejad, Abdolhossein, Mousavi-Fard, S. & Abolghasemi, R. (2025). Effects of Foliar Application of Calcium Compounds on Growth and Physiological Characteristics of Scented Geranium (<i>Pelargonium graveolens</i> L.) Under Water Deficit Stress.. <i>Iranian Journal of Horticultural Science</i> , 56 (3), 489-507. DOI: https://doi.org/10.22059/ijhs.2025.387858.2238	



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijhs.2025.387858.2238>

Publisher: The University of Tehran Press.

Extended Abstract

Introduction

Scented geranium, scientifically known as *Pelargonium graveolens* L., is a perennial medicinal and ornamental plant belonging to the family Geraniaceae. The essential oil of this plant has been used for centuries in general medicine and dentistry. Owing to its antiviral, antibacterial, antifungal, cell-rejuvenating, astringent, calming, wound-healing, analgesic, antitumor, and antioxidant properties, scented geranium has been associated with various beneficial effects on human health and quality of life.

Water deficit stress is a major 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 mitigating the adverse effects of water deficit stress in plants.

In general, calcium is an essential element that plays a crucial role in plant responses to both biotic and abiotic stresses. Under stress conditions, osmotic regulation is associated with the absorption and accumulation of calcium ions, as well as increases in other ions and organic compounds. Studies have shown that calcium is essential for maintaining cell membrane integrity under various environmental stresses. Calcium nanoparticles (Ca-NPs) can modify pH, organic matter, and cation exchange capacity, thereby increasing the availability of otherwise limited mineral nutrients to plants.

The present study was conducted in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture at Lorestan University to investigate the effects of foliar application of nano- and bulk forms of calcium chloride and calcium carbonate on the morphophysiological responses of scented geranium (*Pelargonium graveolens*) under drought stress conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a two-factor factorial experiment based on 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 comprised 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), resulting in 13 treatment levels and 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 from 20 to 28°C, whereas the nighttime temperature ranged from 15 to 18°C. Relative humidity was maintained at 60–70%, and light intensity ranged from 400 to 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Data were analyzed using Minitab and SAS software, and graphs were prepared using Excel. Treatment means were compared using the Least Significant Difference (LSD) test at the 5% significance level.

Results and Discussion

Analysis of variance indicated that drought stress, different calcium concentrations, 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 increased plant height by 31% and stem diameter by 7.45% compared with the control. In addition, foliar application of 15 mM nano-calcium carbonate under severe drought stress (20% available water) resulted in a 140% increase in leaf number and a 53% improvement in water use efficiency compared with the control. These results demonstrate the positive effects of calcium-based materials, particularly nano-calcium carbonate, on plant growth and related traits under drought conditions.

Furthermore, application of 15 mM nano-calcium carbonate under 20% available water increased root fresh weight by 131% and root dry weight by 205% compared with the control. This treatment also resulted in a 125% increase in stem strength and a 3.4% increase in stem tissue density. Overall, the application of both nano- and bulk calcium materials under drought conditions improved the morphological and physiological characteristics of the plant, enhanced water use efficiency, and increased drought resistance. The greatest positive effects were observed with the application of 15 mM nano-calcium carbonate, which significantly improved plant performance and drought resistance, particularly under water stress conditions.

Nano-calcium carbonate, as a long-term reservoir, provides carbon dioxide to plants and may therefore enhance plant growth by increasing photosynthesis. Higher concentrations of carbon dioxide can suppress the activity of ribulose-1,5-bisphosphate oxygenase and reduce photorespiration.

Conclusions

Foliar application of bulk and nano forms of calcium compounds helped alleviate the adverse effects of drought stress on the morphophysiological and functional traits of scented geranium. Higher concentrations were more effective than lower concentrations. Among the calcium-containing treatments, nano-calcium carbonate had the greatest effect on the evaluated traits. The most effective treatment in this study was identified as 15 mM nano-calcium carbonate.

Author Contributions

ARN and KS planned and designed the research. KS performed the experiments. KS and SMF analyzed the data. ARN, KS, MSF and RA wrote and revised the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This research was supported by Lorestan University, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی اثر محلول پاشی ترکیبات کلسمی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه شمعدانی عطری تحت تنش کم آبیاری

کبری سپهوند^۱ | عبدالحسین رضایی نژاد^۲ | صادق موسوی فرد^۳ | رضا ابوالقاسمی^۴

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: sepahvand.Ko@fa.lu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: rezaeinejad.h@lu.ac.ir

۳. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mousavifard.s@sku.ac.ir

۴. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: abolghasemi.r@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱ تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴ کلیدواژه‌ها: سطح ویژه برگ، محلول پاشی، مقاومت به تنش، نانوذرات.	پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد محلول پاشی مواد نانو و بالک کلرید کلسمیم و کرنات کلسمیم 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 کرنات کلسمیم 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، کلسمیم و اثر متقابل کلسمیم × کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد معنادار شد. کاربرد ۱۰ میلی مولار نانو کرنات کلسمیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۵ درصد استحکام ساقه نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانو کرنات کلسمیم در تیمار تنش آبیاری باعث افزایش ۱۲۵ درصدی استحکام ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری گردید. همچنین کاربرد نانو کرنات کلسمیم 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 نانو کرنات کلسمیم و نانو کلرید کلسمیم 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 نانو کرنات کلسمیم شناخته شد.

استناد: سپهوند، کبری؛ رضایی نژاد، عبدالحسین؛ موسوی فرد، صادق و ابوالقاسمی، رضا (۱۴۰۴). بررسی صفات کمی و کیفی توده‌های مختلف سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) تحت پیش تیمار بذر با اسید هیومیک و بیوزینک. نشریه علوم باغبانی ایران، ۵۶ (۳)، ۵۰۷-۴۸۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijhs.2025.387858.2238>



© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijhs.2025.387858.2238>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

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 فرایندهای 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 نیمه‌خشک است (Muhammad et al., 2022). بنابراین افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی با رفع اثرات خشکسالی از مهمترین چالش‌های سال‌های آینده خواهد بود.

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 به‌دلیل افزایش کارایی جذب این عنصر در تنش‌های محیطی است (Ayyaz et al., 2022). این عنصر در حفظ و پایداری دیواره‌ی 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 فیزیکیوشیمیایی، روش کاربرد (کاربرد برگ، 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 است. این گیاه همیشه سبز و پایا، علفی، دارای ساقه‌های گوشتی پوشیده از کرک به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر تا یک متر است (Rezaei 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 پژوهشی

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 کم‌آبایی 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 در حالی که 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 فتوسنتزی گیاهان را بهبود بخشید 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.

روش‌شناسی پژوهش

آماده‌سازی مواد گیاهی و شرایط رشد

پژوهش حاضر در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان (خرم‌آباد، 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 میلی مولار به همراه شاهد (صفر میلی مولار) جمعاً در ۱۳ سطح (۲۶ ترکیب تیماری) به صورت محلول پاشی 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 محلول پاشی منابع مختلف کلسیم هر دو هفته یکبار به مدت ۲۰ هفته صورت گرفت. بعد از اولین محلول پاشی تیمارهای خشکی (بر حسب دور آبیاری) اعمال شد. برای تعیین میزان آب خاک در ظرفیت مزرع‌ای 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 صفحهٔ سرامیکی محفظه ای برای گردآوری و خروج آب تعبیه شده است. پس از قرار گرفتن نمونهٔ 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 نمونهٔ 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 اندازه گیری 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) قرارداد 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 میان گره 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 به‌عنوان 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).

رابطه ۱)

$$SLA = (leaf\ area) / (leaf\ dry\ mass)$$

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:

رابطه ۲)

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

رابطه ۳)

$$WUE\ (Water\ use\ efficiency)(gDWKg^{-1}H_2O) = \frac{Total\ dry\ weight}{Total\ water\ consumption}$$

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

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

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

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

تجزیه تحلیل آماری

تجزیه وتحلیل داده‌ها با نرم‌افزارهای Minitab و رسم نمودارها با نرم افزار Excel و مقایسه میانگین تیمارها با آزمون حداقل تفاوت معنادار (LSD) در سطح پنج درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهش

ارتفاع گیاه و قطر ساقه

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

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

میانگین مربعات										
منابع	درج	ارتفاع گیاه	قطر ساقه	تعداد گره	تعداد شاخه‌ها	تعداد برگ	طول ریشه	حجم ریشه	نسبت ریشه به شاخساره	سطح مخصوص برگ
تنش کم آبیاری (آ)	۱	۲۳۶۸/۳۸*	۲۱/۴۶*	۷۲۶/۹۵*	۷/۳۵**	۳۷۲۱۵/۷*	۱۱۶/۸۷۶*	۲۳۷۵/۵۸*	۰/۰۱۲۸۷۳*	۴۵۹۷۷/۳*
ب قابل دسترس در خاک)		*	*	*	۳	*	*	*	**	*
کلسیم	۱۲	۳۶/۶۰**	۰/۷۷۷*	۱۸/۳۸*	۳/۳۰**	۸۲۸/۱**	۲۶/۷۳۶*	۵۴/۰۵**	۰/۰۰۴۹۸۵**	۴۹۸/۳**
تنش کم آبیاری × کلسیم	۱۲	۱۶/۴۱**	۰/۵۶۲*	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
تغییرات (در صد)	–	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 معنادار و تفاوت معنادار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم × کم آبیاری نشان داد (جدول ۲) کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به نحوی 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 نانو کلرید 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 میلی‌مولار نانوکربنات 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 میلی‌مولار نانوکلید کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت.

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

تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	ترکیبات کلسیم (میلی‌مولار)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)	تعداد گره	تعداد برگ	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب)	نسبت ریشه به شاخساره	سطح مخصوص برگ (سانتی‌متر بر گرم)
شاهد	۰	۲۸/۷۶j	۶/۲۵de	۲۴/۸۶g	۶۴/۰f	۱۸/۷۹ef	۰/۱۷۳e-h	۷۸/۶g
کلرید کلسیم	۵	۳۲/۴۶ef	۶/۶۳a-c	۲۶/۱۱f	۶۷/۹ef	۱۸/۸۷ed	۰/۱۶۴g-i	۹۱/۴e
کلرید کلسیم	۱۰	۳۳/۸۴cd	۶/۴۵b-d	۲۶/۳۲ef	۷۴/۹d	۲۰/۳۶de	۰/۱۶۶g-i	۹۶/۶cd
کلرید کلسیم	۱۵	۳۴/۳۸c	۶/۷۲ab	۲۷/۳۰de	۷۶/۸d	۲۳/۱۵c	۰/۱۹۳c-e	۱۰۲/۵a
نانو کلرید کلسیم	۵	۳۰/۸۲h	۵/۷۴f	۲۶/۳۵ef	۶۹/۹e	۲۶/۳۴ab	۰/۱۶۹f-i	۹۷/۱c
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۳۳/۷۸cd	۶/۱۳e	۲۷/۱۰d-f	۷۷/۷d	۲۷/۳۶a	۰/۱۹۴c-e	۹۸/۶c
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲۹/۹۶i	۶/۴۵b-d	۲۷/۱۲d-f	۸۴/۳c	۲۷/۶۵a	۰/۲۲۸a	۱۰۵/۷a
کربنات کلسیم	۵	۳۱/۴۵gh	۶/۵۷a-c	۳۳/۲۶ef	۹۱/۰b	۲۱/۴۰cd	۰/۲۱۹ab	۸۶/۶f
کربنات کلسیم	۱۰	۳۲/۴۲ef	۶/۶۲a-c	۲۷/۹۸cd	۹۵/۰b	۲۵/۱۵b	۰/۱۷۹d-g	۹۳/۱de
کربنات کلسیم	۱۵	۳۵/۸۸b	۶/۸۳a	۳۰/۰۱ab	۱۰۳/۱a	۲۵/۹۶ab	۰/۱۸۲d-g	۹۹/۶bc
نانو کربنات کلسیم	۵	۳۲/۱۰fg	۶/۵۳b-d	۲۸/۶۸c	۸۳/۰c	۲۰/۸۶d	۰/۲۰۷a-c	۸۶/۵f
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۳۳/۱۵de	۶/۶۹ab	۲۹/۷۶b	۱۰۱/۰a	۲۲/۹۰c	۰/۱۷۰f-i	۹۶/۹c
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۳۷/۶۸a	۶/۵۷a-c	۳۰/۸a	۸۶/۲c	۲۲/۸۱c	۰/۲۰۷a-c	۱۰۴/۰a
شاهد	۰	۱۸/۳r	۴/۳vi	۲۰/۷۵k	۲۷/۱n	۸/۶۹j	۰/۱۳۴l	۳۹/۱m
کلرید کلسیم	۵	۲۱/۱p	۵/۳۱h	۲۰/۶۵k	۲۸/۳mn	۱۰/۴۵ij	۰/۱۱۸l	۴۴/۷l
کلرید کلسیم	۱۰	۲۲/۱o	۵/۷۲f	۲۲/۱۵hi	۳۲/۰m	۱۳/۰۴h	۰/۱۴۱j-l	۵۴/۱jk
کلرید کلسیم	۱۵	۲۶/۲kl	۵/۲۷h	۲۳/۱۸h	۴۰/۷kl	۱۴/۵۹h	۰/۱۴۸i-k	۶۱/۱i
نانو کلرید کلسیم	۵	۲۳/۱n	۵/۷۴f	۲۱/۰۱jk	۴۹/۹hi	۱۳/۳۶h	۰/۱۳۷j-l	۴۶/۰l
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۲۵/۱m	۵/۷۴f	۲۱/۶۴i-k	۵۵/۵۱g	۱۴/۱۹h	۰/۲۱۹ab	۶۲/۴hi
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲۶/۷k	۶/۳۶c-e	۲۱/۲۵i-k	۵۲/۸gh	۱۶/۸۳g	۰/۲۲۲a	۵۵/۶j
کربنات کلسیم	۵	۱۹/۴q	۵/۵۰f-h	۲۱/۹۸ij	۴۰/۰l	۱۰/۵۵vi	۰/۱۵۶h-j	۴۴/۹l
کربنات کلسیم	۱۰	۲۶/۳kl	۵/۵۴f-h	۲۳/۱۵h	۵۵/۲g	۱۳/۲۴h	۰/۱۸۲d-g	۵۱/۴k
کربنات کلسیم	۱۵	۲۵/۹l	۵/۶۰fg	۲۴/۹۲g	۴۴/۷jk	۱۶/۸۳g	۰/۱۹۷b-d	۶۵/۵h
نانو کربنات کلسیم	۵	۲۱/۲p	۵/۴۹f-h	۲۱/۶۶i-k	۴۴/۰j-l	۱۳/۸۵h	۰/۱۳۱kl	۴۵/۲l
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۲۳/۳n	۵/۶۹f	۲۳/۰۸h	۴۷/۷ij	۱۴/۰vh	۰/۱۹۰c-f	۵۵/۲j
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۲۳/۳n	۶/۴۰c-e	۲۴/۶۴g	۶۵/۱f	۱۷/۶۳fg	۰/۲۰۷a-c	۶۵/۲h

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

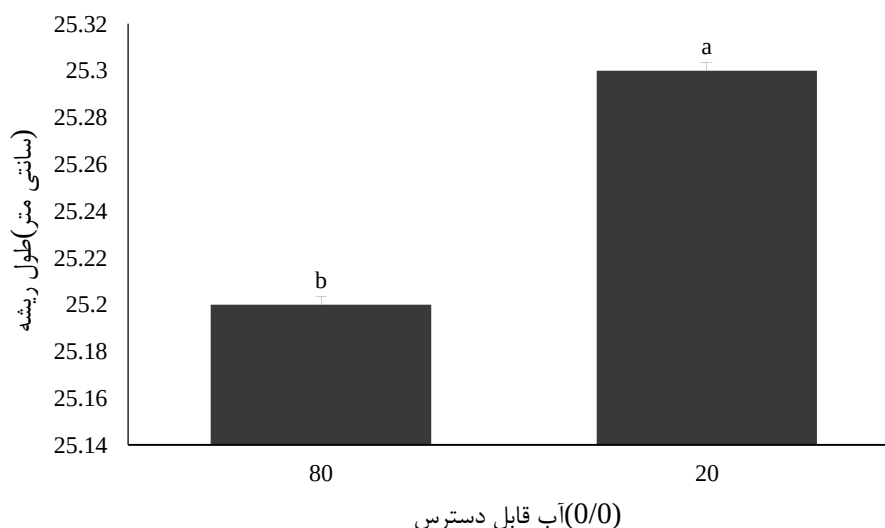
تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۱)، تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ در سطح احتمال یک درصد بر تعداد گره، تعداد شاخه‌های جانبی و برگ معنادار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ 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 نانو کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۳/۹ درصد تعداد گره نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی‌مولار بالک کربنات کلسیم در آبیاری

۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۰ درصد تعداد گره نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. همچنین، کاربرد بالک کلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۴/۲۲ درصد تعداد شاخه های جانبی نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ و ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکلرید کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۳۴/۱ درصد تعداد شاخه های جانبی نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۱ درصد تعداد برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۴۰ درصد تعداد برگ نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

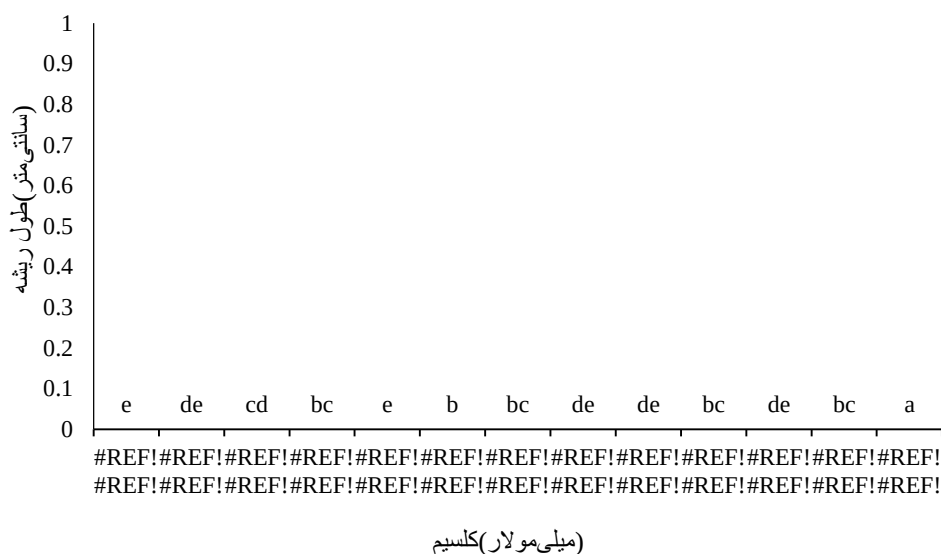
طول و حجم ریشه

نتایج تجزیه وایانس (جدول ۱) نشان داد تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم در سطح احتمال یک درصد بر طول و حجم ریشه معنادار شد و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر حجم ریشه معنادار شد، اما بر طول ریشه معنادار نشد. مقایسه میانگین برهم کنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۲) کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این حجم ریشه در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانوکلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۷ درصد حجم ریشه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی مولار نانوکلرید کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۰/۷ درصد حجم ریشه نسبت به عدم محلول پاشی 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 میلی مولار 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 $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر سطح ویژه برگ و نسبت ریشه به شاخساره معنادار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۲) کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانو کلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۴/۵ درصد سطح ویژه برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار 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 میلی مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. همچنین، کاربرد نانو کلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار 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 تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک ساقه معنادار 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 آزادی	وزن تر ساقه	وزن تر برگ	وزن تر ریشه	وزن خشک ساقه	وزن خشک برگ
تنش کم آبیاری (آب) قابل دسترس در خاک)	۱	۱۸۵۸/۰۹**	۲۰۶۴۷/۶**	۱۰۹۵/۸۹**	۱۰۴/۸۶۱**	۹۳۹/۶۱۸**
کلسیم	۱۲	۶۰/۱۶**	۶۱۲**	۲۰/۹۱**	۳/۷۸۴**	۱۶/۱۲۱**
تنش کم آبیاری $\times$ کلسیم	۱۲	۹/۶۱**	۷۴/۴**	۵/۸۰**	۰/۴۷۰**	۲/۰۸۹**
خطا	۷۸	۱/۲۲	۲/۱	۰/۲۵	۰/۰۱۹	۰/۲۴۷
ضرب	-	۸/۱۲	۳/۲۶	۴/۶۷	۴/۲۷	۴/۶۹
تغییرات (درصد)						

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

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم‌آبیاری نشان داد (جدول ۴) کاربرد مواد کلسیم‌دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد بالک کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۶۳/۷ درصد وزن تر ساقه نسبت به شاهد شد. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۶۹ درصد وزن تر ساقه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانو کربنات کلسیم ۱۵ میلی‌مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۷۵/۹ درصد وزن خشک ساقه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۰ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول‌پاشی ۱۵ میلی‌مولار نانو کربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۸۴/۷ درصد وزن خشک ساقه نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

جدول ۴. مقایسه میانگین ویژگی‌های عملکردی گیاه شمعدانی عطری محلول‌پاشی شده با مواد کلسیم‌دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 تحت تنش کم آبیاری

تنش کم‌آبیاری (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
کلرید کلسیم	۵	۱۵/۷de	۴۶/۲g	۱۱/۳gh	۳/۴۴f	۱۱/۷g	۲/۴۹ef
کلرید کلسیم	۱۰	۱۶/۸d	۵۴/۴e	۱۱/۷g	۳/۵۷d-f	۱۳/۳ef	۲/۸۲d
کلرید کلسیم	۱۵	۱۶/۸d	۵۷/۶cd	۱۳/۵e	۳/۶۹de	۱۴/۳۵cd	۳/۴۹bc
نانو کلرید کلسیم	۵	۱۴/۴ef	۵۰/۳f	۱۲/۶f	۳/۵۳ef	۱۱/۷g	۲/۵۹e
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۱۹/۲c	۵۹/۲c	۱۳/۱ef	۴/۲۹c	۱۳/۸de	۳/۵۲bc
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲۰/۱bc	۷۲/۴a	۱۷/۱a	۴/۶۲b	۱۴/۹abc	۴/۴۸a
کربنات کلسیم	۵	۱۴/۸ef	۵۲/۶e	۱۴/۷c	۳/۵۹d-f	۱۱/۶g	۳/۳۵c
کربنات کلسیم	۱۰	۱۹/۸bc	۶۳/۴b	۱۴/۳cd	۴/۵۳b	۱۵/۰ab	۳/۵۱bc
کربنات کلسیم	۱۵	۲۲/۱a	۶۵/۰b	۱۷/۱a	۴/۲۵c	۱۵/۷a	۳/۶۴b
نانو کربنات کلسیم	۵	۱۵/۴de	۵۶/۰d	۱۳/۸de	۴/۱۵c	۱۲/۷f	۳/۵۱bc
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۲۰/۹ab	۶۳/۳b	۱۵/۹b	۵/۵۰a	۱۵/۳ab	۳/۵۵b
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۲۰/۳ab	۷۲/۲a	۱۴/۸c	۵/۶۳a	۱۵/۶ab	۴/۴۱a
شاهد	۰	۲/۶n	۸/۲۹p	۴/۴۵q	۱/۳۱l	۵/۵۷n	۰/۸۶m
کلرید کلسیم	۵	۶/۵lm	۱۹/۵o	۵/۷۱p	۱/۴۷kl	۶/۵۸m	۰/۹۵lm
کلرید کلسیم	۱۰	۸/۹jk	۲۲/۳n	۷/۴۷mn	۱/۶۲k	۶/۸۴lm	۱/۱۹k
کلرید کلسیم	۱۵	۹/۱j	۲۵/۵m	۹/۵۰j	۲/۵۸hi	۷/۴۳kl	۱/۴۸i
نانو کلرید کلسیم	۵	۵/۸m	۲۶/۶hn	۵/۷۴p	۱/۵۳k	۶/۷۸lm	۱/۱۴kl
نانو کلرید کلسیم	۱۰	۷/۴kl	۳۴/۲jk	۷/۶۸l-n	۲/۶۰hi	۷/۴۰kl	۲/۱۹h
نانو کلرید کلسیم	۱۵	۱۱/۹hi	۳۲/۴k	۸/۵۰k	۲/۶۴h	۸/۰jk	۲/۳۶f-h
کربنات کلسیم	۵	۱۰/۹hi	۲۸/۶l	۶/۷۳o	۱/۵۹k	۶/۶۹m	۱/۲۹k
کربنات کلسیم	۱۰	۱۱/۶hi	۳۵/۸ij	۷/۱۲no	۲/۴۱ij	۷/۱۶lm	۱/۷۲i
کربنات کلسیم	۱۵	۱۱/۹hi	۳۷/۵i	۷/۷۰l-n	۲/۵۰hi	۸/۹۳i	۲/۲۵gh
نانو کربنات کلسیم	۵	۱۰/۶i	۳۷/۴i	۷/۸۳k-m	۱/۶۵k	۸/۲۲j	۱/۲۹k
نانو کربنات کلسیم	۱۰	۱۱/۷hi	۴۲/۳h	۸/۳۱kl	۲/۲۳j	۹/۵۴i	۲/۲۴gh
نانو کربنات کلسیم	۱۵	۱۲/۲gh	۴۲/۸۲h	۱۰/۲۸i	۳/۷۳d	۹/۵۳i	۲/۶۳de

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 کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک برگ معنادار شد. مقایسه میانگین برهم کنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۴) کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد نانوکلید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۷/۴ درصد وزن تر برگ نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکلید کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۱۶/۵ درصد وزن تر برگ نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۰ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۵ درصد وزن خشک برگ نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۰ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۷۱/۳ درصد وزن خشک برگ نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانو و بالک کربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت.

وزن تر و خشک ریشه

بر اساس نتایج تجزیه وایانس (جدول ۳)، تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک ریشه معنادار شد. مقایسه میانگین برهم کنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۴) کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌های در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکلید کلسیم و بالک کربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۸/۳ درصد وزن تر ریشه نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۳۱ درصد وزن تر ریشه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانوکلید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۸۸ درصد وزن خشک ریشه نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۲۰۵/۸ درصد وزن خشک ریشه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

کارایی مصرف آب و شاخص مقاومت به تنش

نتایج تجزیه وایانس (جدول ۵) نشان داد که تاثیر تنش کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر کارایی مصرف آب و شاخص مقاومت به تنش معنادار شد.

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر محلول پاشی مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCO_3 و CaCl_2 بر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه شمعدانی عطری تحت تنش کم آبیاری

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	کارایی مصرف آب	شاخص مقاومت به تنش	استحکام ساقه	تراکم بافت ساقه
تنش کم آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	۱	۱۹/۱۰۱۷**	۸۹۸۸۹/۰**	۰/۰۳۲۲۹۷**	۰/۰۰۰۰۰۰ NS
کلسیم	۱۲	۰/۲۷۲۵**	۶۷۶/۹**	۰/۰۰۳۰۸۹**	۰/۰۰۰۰۰۰ ۳**
تنش کم آبیاری $\times$ کلسیم	۱۲	۰/۰۳۲۸**	۹۶/۶**	۰/۰۰۰۸۹۱**	۰/۰۰۰۰۰۰ ۳**
خطا	۷۸	۰/۰۰۵۸	۹/۸	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰
ضریب تغییرات (درصد)	-	۳/۹۵	۳/۵۹	۴/۹۴	۰/۰۰

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

مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۶)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد ۱۰ میلی مولار نانوکلید کلسیم و ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۴/۸ درصد کارایی مصرف آب نسبت به شاهد شد که با کاربرد ۱۵ میلی مولار نانوکلید کلسیم در همین سطح آبیاری اختلاف معنادار نداشت. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۳ درصد کارایی مصرف آب نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانوکربنات کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۰/۳ درصد شاخص مقاومت به تنش نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۵۰/۶ درصد شاخص مقاومت به تنش نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر محلول پاشی مواد کلسیم دار بالک و نانو CaCl_2 و CaCO_3 بر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه شمع‌دانی عطری تحت تنش کم آبیاری

تنش کم- آبیاری (آب قابل دسترس در خاک)	ترکیبات	کلسیم (میلی مولار)	کارایی مصرف آب (گرم بر لیتر)	شاخص مقاومت به تنش (%)	استحکام ساقه (گرم بر سانتی متر مکعب)	تراکم بافت ساقه (گرم بر سانتی متر مکعب)
۸۰	شاهد	۰	۱/۶۶ef	۱۰۰/۳۳j	۰/۱۱۱f-h	۰/۰۰۳۶g-j
	کلرید کلسیم	۵	۲/۲۹cd	۱۰۰/۳۹ij	۰/۱۰۶h-j	۰/۰۰۳۰k-m
	کلرید کلسیم	۱۰	۲/۳۴bc	۱۰۵/۸۸hi	۰/۱۰۵h-j	۰/۰۰۲۲j-m
	کلرید کلسیم	۱۵	۲/۴۰b	۱۰۸/۳۹gh	۰/۱۰۷g-i	۰/۰۰۳۰k-m
	نانو کلرید کلسیم	۵	۲/۳۸abc	۱۰۷/۰۶g-i	۰/۱۱۴fg	۰/۰۰۴۴b-d
	نانو کلرید کلسیم	۱۰	۲/۵۷a	۱۱۴/۴۳f	۰/۱۲۷e	۰/۰۰۴۳c-f
	نانو کلرید کلسیم	۱۵	۲/۵۵a	۱۲۰/۸۵de	۰/۱۵۴bc	۰/۰۰۴۷a-c
	کربنات کلسیم	۵	۲/۲۲d	۱۱۰/۶۴fg	۰/۱۱۴fg	۰/۰۰۳۳i-l
	کربنات کلسیم	۱۰	۲/۴۲b	۱۱۹/۳۵e	۰/۱۳۹d	۰/۰۰۴۰d-g
	کربنات کلسیم	۱۵	۲/۴۲b	۱۲۵/۷۰c	۰/۱۱۸f	۰/۰۰۳۲j-m
	نانو کربنات کلسیم	۵	۲/۳۷bc	۱۲۵/۱۲cd	۰/۱۲۹e	۰/۰۰۳۸gh
	نانو کربنات کلسیم	۱۰	۲/۴۳bc	۱۳۵/۲۵b	۰/۱۶۶a	۰/۰۰۴۷a-c
۲۰	نانو کربنات کلسیم	۱۵	۲/۵۷a	۱۴۰/۷۸a	۰/۱۴۹c	۰/۰۰۴۴b-d
	شاهد	۰	۱/۱۱l	۴۶/۹۴q	۰/۰۷۱no	۰/۰۰۴۷ab
	کلرید کلسیم	۵	۱/۳۹jk	۵۳/۴۳p	۰/۰۷۰o	۰/۰۰۳۱k-m
	کلرید کلسیم	۱۰	۱/۴۶i-k	۵۵/۲۲op	۰/۰۷۳no	۰/۰۰۲۸m
	کلرید کلسیم	۱۵	۱/۵۵g-i	۵۶/۴۵n-p	۰/۰۹۸kl	۰/۰۰۴۴b-d
	نانو کلرید کلسیم	۵	۱/۳۸k	۵۳/۷۳op	۰/۰۶۶o	۰/۰۰۲۹lm
	نانو کلرید کلسیم	۱۰	۱/۵۳g-i	۵۷/۴۱n-p	۰/۱۰۳i-k	۰/۰۰۳۹fg
	نانو کلرید کلسیم	۱۵	۱/۵۵f-i	۵۹/۰۹no	۰/۰۹۹j-l	۰/۰۰۳۱k-m
	کربنات کلسیم	۵	۱/۴۹ij	۵۴/۲۵op	۰/۰۸۲m	۰/۰۰۳۴h-k
	کربنات کلسیم	۱۰	۱/۵۲hi	۵۷/۱۴n-p	۰/۰۹۱l	۰/۰۰۳۸g-i
	کربنات کلسیم	۱۵	۱/۶۳e-h	۵۹/۷۱mn	۰/۰۹۶kl	۰/۰۰۳۹fg
	نانو کربنات کلسیم	۵	۱/۵۳g-i	۶۳/۶۴lm	۰/۰۷۸mn	۰/۰۰۳۳j-l
	نانو کربنات کلسیم	۱۰	۱/۶۳e-h	۶۶/۲۷l	۰/۰۹۶kl	۰/۰۰۳۷g-i
	نانو کربنات کلسیم	۱۵	۱/۷۰e	۷۰/۷۰k	۰/۱۶۰ab	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 کم آبیاری، سطوح مختلف کلسیم و اثر متقابل کلسیم $\times$ کم آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر استحکام و تراکم بافت ساقه معنادار شد. مقایسه میانگین برهمکنش کلسیم $\times$ کم آبیاری نشان داد (جدول ۶)، که کاربرد مواد کلسیم دار نانو و بالک اثر مثبتی بر این ویژگی‌ها در شرایط تنش و عدم تنش داشت. به طوری که کاربرد ده 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 آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۲۵ درصد استحکام ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد. همچنین، کاربرد نانوکربنات کلسیم و کلرید کلسیم ۱۵ میلی مولار در آبیاری ۸۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۳۰/۵ درصد تراکم بافت ساقه نسبت به شاهد شد. محلول پاشی ۱۵ میلی مولار نانوکربنات کلسیم در آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴/۳ درصد تراکم بافت ساقه نسبت به عدم محلول پاشی در همین شرایط آبیاری شد.

بحث

محلول پاشی ترکیبات کلسیم دار، به ویژه در قالب نانوذرات، توانست اثرات نامطلوب تنش کم آبی را بر ویژگی‌های 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 تاثیر مثبت را بر ویژگی‌های مورفولوژیک از خود نشان داد. این اثر گذاری می تواند به تجزیه تدریجی کربنات کلسیم در سطح برگ یا درون روزه ها نسبت داده شود که منجر به آزاد سازی 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 تاثیر 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، اثر گذاری 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 معنادار 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 نانو ترکیب 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 ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکردی، نقش مؤثری در افزایش تحمل به تنش و ارتقای عملکرد گیاهان در شرایط کم‌آبی ایفا کند.

در میان ترکیبات کلسیم‌دار مورد بررسی، نانوکربنات کلسیم بیشترین تأثیر مثبت را بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه شمعدانی معطر نشان داد. یکی از دلایل احتمالی این تأثیر، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در اطراف روزنه‌ها در نتیجه تجزیه کربنات کلسیم محلول‌پاشی شده است. دو فرضیه اصلی در مورد نحوه آزادسازی CO₂ از کربنات کلسیم روی سطح برگ مطرح شده است. بر اساس فرضیه نخست، در طول شب، کربنات کلسیم موجود بر سطح برگ با CO₂ حاصل از تنفس گیاه و رطوبت شبنم وارد واکنش شده و به بیکربنات کلسیم تبدیل می‌شود. سپس در طول روز، افزایش دما و تبخیر آب منجر به تجزیه بیکربنات کلسیم به کربنات کلسیم و آزادسازی CO₂ با غلظتی بالاتر از غلظت اتمسفری در نزدیکی بافت برگ می‌شود (House, 1981; Zhao et al., 2010; Bilal, 2010). در فرضیه دوم، ورود مستقیم نانوکربنات کلسیم از طریق روزنه‌ها به داخل برگ و آزادسازی CO₂ در فضاهای بین‌سلولی گیاه مطرح است (EL-Aal et al., 2018). این مکانیسم‌ها می‌توانند به بهبود فتوسنتز و وضعیت آبی گیاه کمک کنند، به‌ویژه در شرایط تنش کم‌آبی. در همین راستا، گزارش شده که محلول‌پاشی نانوکربنات کلسیم به میزان ۷/۵ گرم در لیتر در گیاه پنبه موجب کاهش معنادار فشار اسمزی ناشی از کم‌آبی، کاهش نفوذپذیری غشای پلاسمایی، و افزایش محتوای نسبی آب برگ شده است (ElShazly and Abd El-All, 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. هم‌راستی 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 مورفو-فیزیولوژیک و عملکردی شمعدانی معطر تعدیل کنند. غلظت‌های بالاتر تأثیرگذارتر از غلظت‌های پایین بود. در میان مواد کلسیم‌دار نانوکربنات کلسیم بیشترین تأثیر را بر این ویژگی‌ها 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 بیوپار بر برخی خصوصیات مورفو فیزیولوژیک 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> 7.
- 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