Journal of Vegetables Sciences, Autumn & Winter 2024, Vol 7, No 14(2), Pages 178-194

doi: 10.22034/IUVS.2023.1986684.1268 Article Type: Research Online ISSN: 2676-4822

The Effect of Silicon Foliar Application on Some Physiological Traits of Summer Savory (*Satureja hortensis* L.) under Drought Stress

Fereshteh Raeesi Sadati[1], Esmaeil Chamani[2*], Asgar Sartip[3], Mohsen Pazhohi[4] and Hossien Sartip[1]

1- Ph.D. Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Ph.D. Student, Department of Agronomy & Plant Breeding, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Green Space Expert, Ardabil Municipality, Ardabil, Iran

4- M.Sc. Graduate, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[*]**Corresponding author:** echamani@uma.ac.ir

(**Received:** 24 January 2023 **Revise:** 03 April 2023 **Accepted:** 07 April 2023)

Extended Abstract

1. **Introduction:** Summer savory (*Satureja hortensis* L.) is an annual herbaceous plant. The leaves of the plant are spear-shaped, opposite, with a short petiole. The leaves and flowering branches of summer savory are used in traditional medicine with known anti-flatulent, anti-heartache, anti-parasitic, stomach tonic, stimulant and expectorant effects. Spraying or foliar feeding is a method to reduce the stabilization of chemical fertilizers in the soil and as a result reduce environmental risks, including reducing soil and water pollution. With this feeding method, elements can be provided to the plant as quickly as possible. Silicon is the second mineral element in the soil after oxygen, and in higher plants, it usually causes the physical strength of the organs by penetrating the stem and leaves, and also improves physiological and metabolic processes, gas exchanges and strengthens the antioxidant system. Also, this element has beneficial effects on the growth, performance and tolerance of some plants against biotic and abiotic stresses. The form of silicon solution in soil is silicic acid Si $(OH)_4$. The amount of silicon in plants is 0.1 to 10% of the dry weight of the plant. The use of fertilizers containing silicon in the soil affects growth and development in two ways. First, the improvement of silicon nutrition strengthens the plant's protection system against adverse environmental conditions. On the other hand, treating soil with compounds containing geochemically active silicon improves the chemical and physical properties of soil and increases the availability of nutrients for plants. The objective of this research was to investigate the influence of silicon application on some physiological and morphological characteristics of summer savory under drought stress conditions.
2. **Materials and Methods:** In order to investigate the effect of silicon foliar application on the summer savory characteristics under deficit irrigation conditions, a factorial experiment was conducted based on randomized complete blocks design with four replications. The experiment was carried out at the vegetable production farm of Ardabil municipality during the years 2021-2022. The investigated factors included the first, drought stress at three levels (40, 60, and 80% field capacity (FC)) and the second, silicon foliar spraying at four levels (0 (control), 0.5, 1, and 1.5 mM L^{-1}). Drought stress was induced at the stage of 4 to 6 sub-branches and silicon solutions were foliar applied at two stages including a week before the induction of drought stress, and a week after that. Distilled water was also used as control treatment. In the present study, pots with a diameter of 20 cm, a height of 30 cm, a capacity of 3 kg with 3 holes at the bottom were used to cultivate savory plants. Before the induction of drought stress, the savory plants were regularly irrigated up to the field capacity. Drought stress was applied at the stage of 4 to 6 sub-branches based on crop capacity and after the stress induction, sampling was done.
3. **Results and Discussion:** The obtained results showed that drought stress negatively affected plant fresh weight, dry weight, height, soluble sugar content, chlorophyll a, b and total and carotenoid content, but proline content increased by 61.03% under highest level of drought stress comparing to control. The highest soluble sugar content was recorded in savory plants sprayed with silicon 1 mM L^{-1} and grown under drought level of 40% FC (4.76 mg g^{-1} FW). On the other hand, the lowest value of this trait was

obtained in plants treated with silicon 0.5 mM L^{-1}, and grown under drought level of 80% FC (3.16 mg g^{-1} FW). In the present study, the decrease in chlorophyll of the savory plant under drought stress could be probably related to the increase in the production of oxygen free radicals, peroxidase and phenolic compounds, because the absorption of excess energy by the photosynthetic system often stimulates the production of reactive oxygen species. Silicon foliar application had a positive and significant effect on the examined traits, so the negative effects of drought stress were alleviated by increasing silicon concentration.

4. **Conclusion:** In general, it could be stated that silicon could be used as a useful element to increase the performance of agricultural-garden plants, as well as to increase plants tolerance rate against environmental stresses (including drought stress). On the other hand, the application of silicon up to a concentration of 1.5 mM L^{-1} had a positive effect on alleviation of the adverse effects of deficit irrigation on savory plant characteristics.

Keywords: *Satureja hortensis* L., Chlorophyll, Drought stress, Dry weight, Proline

Citation: Raeesi Sadati, F., Chamani, E., Sartip, A., Pazhohi, M. & Sartip, S. (2024). The effect of silicon foliar application on some physiological traits of summer savory (*Satureja hortensis* L.) under drought stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 14(2), 178-194. doi: 10.22034/IUVS.2023.1986684.1268

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

دوفصلنامه علمی علوم سبزی‌ها، سال ۷، دوره ۱۴، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صفحات (۱۹۴-۱۷۸)

دانشگاه ایلام شاپا الکترونیکی: ۴۸۲۲-۲۶۷۶ نوع مقاله: پژوهشی doi: 10.22034/IUVS.2023.1986684.1268

تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون بر برخی از صفات فیزیولوژیکی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis* L.) تحت تنش خشکی

فرشته رئیسی ساداتی[۱]، اسماعیل چمنی[۲*]، عسگر سرتیپ [۳]، محسن پژوهی [۴] و حسین سرتیپ[۱]

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- کارشناس فضای سبز، شهرداری اردبیل، اردبیل، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل ایران

[*]نویسنده مسئول: echamani@uma.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۰۱/۱۴ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۱/۱۸)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون بر خنثی‌سازی اثرات منفی تنش خشکی بر برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های گیاه مرزه تابستانه در طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی شهرداری اردبیل انجام گرفت. فاکتورهای مورد بررسی در این پژوهش شامل الف) تنش خشکی در سه سطح (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) و ب) محلول‌پاشی سیلیکون در چهار سطح (غلظت‌های صفر (شاهد)، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار در لیتر) بودند. تنش خشکی در مرحله ۴ تا ۶ شاخه فرعی و براساس ظرفیت زراعی اعمال شد و بعد از اعمال شرایط تنش، نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری صفات انجام گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری موجب کاهش وزن تر، وزن خشک، ارتفاع، قند محلول، کلروفیل a، b و کل و کاروتنوئید شد، اما میزان پرولین آزاد سلول‌ها تحت شرایط تنش افزایش یافت. محلول‌پاشی سیلیکون، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر صفات مورد بررسی داشت، به‌طوری که با افزایش غلظت سیلیکون اثرات منفی تنش خشکی تعدیل یافت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که می‌توان از سیلیکون به‌عنوان یک عنصر مفید در جهت افزایش عملکرد گیاهان زراعی و باغی، و همچنین افزایش تحمل به تنش‌های محیطی (از جمله تنش کم‌آبی) استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ***Satureja hortensis* L.**، پرولین، تنش خشکی، کلروفیل، وزن خشک

استناد: رئیسی ساداتی، ف.، چمنی، ا.، سرتیپ، ع.، پژوهی، م. و سرتیپ، ح. (۱۴۰۲). تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون بر برخی از صفات فیزیولوژیکی مرزه تابستانه (*Satureja hortensis* L.) تحت تنش خشکی. *علوم سبزی‌ها*، ۱۴(۲)، ۱۹۴-۱۷۸.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به‌صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

گیاه مرزه (*Satureja hortensis* L.) متعلق به خانواده نعناعیان و شامل گونه‌های یک ساله و اغلب چند ساله است (Hajhashemi, 2002). مرزه تابستانه به‌همراه مرزه زمستانه تنها گونه‌های این جنس هستند که به عنوان سبزی، ادویه یا گیاه دارویی کشت می‌شوند (Hadian, 2008). مرزه تابستانه گیاهی علفی، یک ساله، دارای ساقه چهارگوش، مستقیم و به ارتفاع ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است. برگ‌های گیاه نیزه‌ای شکل، متقابل و دارای دمبرگ کوتاه می‌باشند (Peiri & Fazeli, 2022). گل‌ها منظم و دو جنسی و میوه‌ها کوچک، کروی و از نوع فندقه هستند (Rechinger, 1982). برگ‌ها و سرشاخه‌های گلدار مرزه تابستانه در طب سنتی با اثرات شناخته‌شده ضد نفخ، ضد دل درد، ضد انگل، مقوی معده، محرک و خلط‌آور مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zargari, 1997; Sefidkon *et al*., 2006). علی‌رغم مطالعات گسترده‌ای که درمورد تأثیر تنش‌های محیطی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی انجام شده، اطلاعات درمورد واکنش گیاهان دارویی به این تنش‌ها بسیار اندک است (Rahimi *et al*., 2019).

خشکی به‌عنوان یک تنش چند بعدی، اثرات متعددی روی گیاهان دارد و بسیاری از ویژگی‌های مرفولوژیکی و فرآیندهای فیزیولوژیکی مرتبط با رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Amerian *et al*., 2023). این تنش باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS)، خسارت به غشای سلولی، بازدارندگی انتقال الکترون، تخریب ساختار کلروپلاست‌ها، کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاهش پروتئین و درنهایت کاهش نرخ فتوسنتز می‌گردد (Hosseinzadeh *et al*., 2016; Raeesi Sadati *et al*., 2021). اولین پاسخ گیاهان به تنش خشکی تنظیم اسمزی و بستن روزنه‌ها می‌باشد که از این رو باعث حفظ رطوبت داخل بافت شده و همچنین به‌طور همزمان از آن برای جذب آب از محیط استفاده می‌کند که در نتیجه آن فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سلول‌ها حفظ می‌گردد (De Oliveira Maia Junior, 2020). در شرایط تنش رطوبتی، پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی، حذف رادیکال‌های آزاد و ROSها، حفاظت ماکروملکول‌ها از دنتاتوره شدن و تنظیم pH سلولی نقش دارد. علاوه بر این، پرولین به‌عنوان منبع نیتروژن و کربن برای گیاهان تحت تنش شدید عمل می‌کند و تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد (Amini *et al*., 2015). زمانی‌که گیاهان در معرض تنش‌های غیر زیستی قرار می‌گیرند، میزان پرولین آن‌ها افزایش می‌یابد تا ساختارهای سلولی و آنزیمی را در برابر فاکتورهای تنش‌زا حفاظت کند (Hassanpour & Ranjber, 2019). القای سنتز پرولین از نخستین پاسخ‌های گیاه به تنش محیطی محسوب می‌شود (Shahraki *et al*., 2021). کربوهیدرات‌ها گروهی از ترکیبات آلی هستند که افزایش آن‌ها به‌عنوان یک پیام متابولیکی عمل کرده و موجب افزایش بیان ژن‌های مربوط به دفاع و کاهش فتوسنتز می‌شود (Kocal *et al*., 2008). Khorasaninejad و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش‌های خود که بر روی گیاه اسطوخودوس تحت تنش شوری انجام گرفت، نشان دادند که این تنش باعث کاهش طول ساقه، وزن تر ساقه و و وزن تر و خشک ریشه می‌گردد.

برای انجام فعالیت‌های طبیعی فیزیولوژیک گیاهان عناصر کم‌مصرف به‌اندازه عناصر پرمصرف اهمیت دارند (Singh *et al*., 2017). سیلیکون دومین عنصر معدنی در خاک پس از اکسیژن بوده و تقریباً ۳۱ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد (Tripathi *et al*., 2020). سیلیکون در گیاهان عالی معمولاً با نفوذ در ساقه و برگ باعث استحکام فیزیکی اندام‌ها می‌شود. همچنین، این عنصر باعث بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی، تبادلات گازی و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی شده که نتیجه آن افزایش کارآیی گیاه در مواجهه با انواع تنش‌های محیطی است (Etesami & Jeong, 2018). همچنین کاربرد سیلیکون آثار منفی تنش شوری را با افزایش طول و وزن‌تر و خشک اندام هوایی و ریشه گیاه کاهش می‌دهد (Mahdieh *et al*., 2015). سیلیکون اثرهای مفیدی بر رشد، افزایش فتوسنتز، عملکرد و

بهبود تحمل برخی گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی دارد (Askarnejad *et al*., 2019). شکل محلول سیلیکون در خاک، اسید سیلیسیک $Si(OH)_4$ است که با غلظت ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌مولار در خاک وجود دارد. میزان سیلیکون در گیاهان ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک گیاه است که با برخی از عناصر ضروری پرمصرف برابری می‌کند (Khan *et al*., 2016). مصرف کودهای حاوی سیلیکون در خاک از دو طریق بر رشد و نمو تأثیر دارد، اول این که بهبود تغذیه سیلیکون موجب تقویت سیستم حفاظتی گیاه در برابر بیماری‌ها، حمله حشرات و شرایط نامساعد محیطی می‌شود، از سوی دیگر تیمار کردن خاک با ترکیبات حاوی سیلیکون فعال از نظر ژئوشیمیایی سبب بهبود وضعیت آب در خاک، بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاه شده و از این طریق حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهد (Epstein, 1999; Hussain *et al*., 2020).

محلول‌پاشی یا تغذیه برگی روشی جهت کاهش تثبیت کودهای شیمیایی در خاک و در نتیجه کاهش خطرات محیطی از جمله کاهش آلودگی خاک و آب است. همچنین تغذیه برگی، در مواقعی که پدیده آنتاگونیستی برای انتقال برخی مواد از راه ریشه وجود دارد و یا افزودن موادی به خاک که موجودات زنده خاک را از بین می‌برد، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. با این روش تغذیه می توان عناصر را در سریع‌ترین زمان ممکن در اختیار گیاه قرار داد (Kafi *et al*., 2011; Raeesi Sadati *et al*., 2021).

نتایج پژوهش‌های متعدد حاکی از آن است که کاربرد سیلیس سبب افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی ازجمله خشکی گردیده است (Maghsoudi *et al*., 2016; Maghsoudi & Maghsoudi, 2016). Nabipour و Zamani (۲۰۲۰) دریافتند که استفاده از سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی باعث جبران اثرات سوء کاهش سطح رطوبتی در صفات مورد بررسی گردید. Asemeh و Pourakbar (۲۰۲۲) بیان کردند که سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون، به‌ویژه نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، توانایی کاهش سمیت حاصل از تنش شوری را در زعفران داشته و می‌تواند در افزایش مقاومت گیاهان زعفران در برابر تنش شوری نقش مهمی داشته باشد. Veisi و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که کاربرد نانوذرات سیلیکون منجر به کاهش اثرات منفی تنش شوری، بهبود پارامترهای رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد کمی (تولید گل) و کیفی (میزان کوئرسیتین) گیاه همیشه بهار در مقایسه با شاهد شد و نیز بیان کردند که از غلظت مناسب نانوذرات سیلیکون در کاهش اثرات منفی تنش شوری و افزایش محتوای متابولیت‌های مهم دارویی گیاه همیشه بهار می‌توان استفاده کرد. مطالعات نشان داده است که نانوذرات سیلیکون با افزایش فعالیت فتوسنتزی، بهبود وضعیت آب، کاهش جذب سدیم، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش سطح پراکسیداسیون لیپید در گیاهان در معرض تنش نسبت به سیلیکون مؤثرتر عمل کردند (Tripathi *et al*., 2017; Ghorbanpour *et al*., 2020).

با توجه به اثرات منفی و مخرب تنش خشکی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی و باغی و همچنین ارزش غذایی و دارویی بالای گیاه مرزه تابستانه، مطالعه حاضر با هدف بررسی و ارزیابی تأثیر محلول‌پاشی سیلیکون بر برخی از صفات فیزیولوژیکی و خصوصیات رشدی مرزه تابستانه تحت تنش کم‌آبی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی سیلیکون بر روی مرزه تابستانه تحت تنش کم‌آبی، به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تولیدات گیاهی شهرداری اردبیل با چهار تکرار اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل فاکتور اول تنش خشکی در سه سطح (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم شامل محلول‌پاشی سیلیکون در چهار سطح (صفر (شاهد)، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار در لیتر) بود. قبل از اجرای

آزمایش از خاک مزرعه نمونه تهیه شده و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید (جدول۱). تنش خشکی در مرحله ۴ تا ۶ شاخه فرعی اعمال شد و محلول‌پاشی برگی سیلیکون در دو مرحله، یک هفته قبل از اعمال خشکی و یک هفته بعد از اعمال تنش خشکی انجام شد، همچنین، از آب مقطر به‌عنوان تیمار شاهد استفاده گردید. در پژوهش حاضر، از گلدان-هایی با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با ظرفیت ۳ کیلوگرم خاک و دارای ۳ عدد سوراخ در ته گلدان برای زهکشی استفاده شد. تا قبل از اعمال تیمار-های تنش، گیاهان مرزه به‌طور منظم در حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند. برای محاسبه میزان آب مورد نیاز هر گلدان از روش توزین گلدان‌ها و تعیین میانگین آن به‌عنوان آب مصرفی تیمارها، استفاده گردید (Daneshmandi & Azizi, 2009).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1-Physical and chemical characteristics of experimental soil

بافت خاک Soil texture	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب) Apparent specific gravity (g/cm^3)	رطوبت ظرفیت زراعی (٪) Field capacity moisture (%)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity ($ds\ m^{-1}$)	اسیدیته pH
رسی-شنی Clay-Sand	1.3	26.4	1.2	7.56

سنجش قندهای محلول

استخراج قندهای محلول از جوان‌ترین برگ‌های گیاه انجام شد. برای اندازه‌گیری میزان کربوهیدرات، ابتدا ۰/۵ گرم از بافت برگی برداشته و سپس ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ به آن اضافه و در هاون چینی کاملاً هموژن گردید و به لوله آزمایش درب‌دار منتقل شده و به‌مدت ۳۰ ثانیه ورتکس شد. مایع رویی جدا و به لوله دیگری منتقل شده و سپس دو بار و در هر بار ۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ به بخش جامد باقی‌مانده اضافه و کاملاً شستشو گردید و بخش مایع رویی به لوله آزمایش منتقل شده و در نهایت ۱۵ میلی‌لیتر از عصاره به‌دست آمد. عصاره حاصل، به‌مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. بعد از جداسازی روشناور، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی انتخاب و داخل لوله‌های آزمایشی ریخته شد. سپس، ۳ میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه‌شده به آن اضافه و به‌مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد. پس از خنک شدن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل U 160A SHIMADZO ساخت کشور ژاپن با سل کوارتزی) قرائت گردید (Irigoyen *et al*., 1992).

سنجش پرولین آزاد

میزان پرولین برگ با استفاده از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، نمونه‌های بافت برگی با سولفوسالیسیلیک اسید ۳٪ استخراج گردید. سپس در لوله جداگانه دیگری، به ۲ میلی‌لیتر از عصاره حاصل، ۲ میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال خالص اضافه شد. در ادامه، لوله‌ها به‌مدت یک ساعت در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و پس از خارج شدن از آب جوش، ۲ میلی‌لیتر تولوئن به محلول اضافه و در یخ قرار گرفت. بعد از تشکیل دو فاز جداگانه، فاز رنگی بالایی، با دقت جداسازی و میزان جذب به‌کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد.

سنجش کلروفیل و کارتنوئید برگ

برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a، b و کل از روش Porra (۲۰۰۵) و همچنین برای سنجش میزان کاروتنوئید از روش Lichtenthaler و Wellburn (۱۹۸۳) استفاده شد. به این منظور، ۵۰۰ میلی‌گرم از هر برگ انتخابی در ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد هموژن گردید و پس از انجام سانتریفیوژ با سرعت

۱۳۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۵ دقیقه، مایع رویی برداشته و حجم آن به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله بعد به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب نور در طول موج‌های ۶۶۳/۶، ۶۴۶/۶ و ۴۷۰ نانومتر به‌ترتیب برای کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید قرائت گردید. درنهایت با استفاده از ۱ تا ۴ غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی محاسبه شد.

رابطه ۱ $Chlorophyll\ a = 12.25(A663.6) - 2.55(A646.6)$

رابطه ۲ $Chlorophyll\ b = 20.31(A646.6) - 4.91(A663.6)$

رابطه ۳ $Total\ Chlorophyll = 17.76(A646.6) + 7.34(A663.6)$

رابطه ۴ $Carotenoids = (1000A470 - 3.27[chl\ a] - 104[chl\ b])/227$

در روابط فوق A طول موج اسپکتروفتومتر را نشان می‌دهد.

کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌های حاصل از این آزمایش، با کمک نرم افزار SAS. 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی × سیلیکون بر صفات وزن تر، کلروفیل a، b و کل و میزان قند محلول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین، اثرات اصلی تنش خشکی و تیمار سیلیکون بر صفات وزن خشک، ارتفاع بوته و محتوای کاروتنوئید معنی‌دار بود. محتوای پرولین فقط تحت تأثیر سطوح تنش خشکی قرار گرفت.

با افزایش غلظت سیلیکون، وزن خشک و ارتفاع بوته افزایش یافت، به‌طوری که بیش‌ترین وزن خشک با کاربرد ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون (۰/۱۲ گرم در بوته) و کمترین مقدار در شاهد (۰/۰۷ گرم در بوته) مشاهد شد که با یکدیگر اختلاف ۴۱/۶۶ درصدی داشتند. محلول‌پاشی سیلیکون ۱/۵ میلی‌مولار موجب افزایش ۴۲/۷۳ درصدی ارتفاع بوته گیاه مرزه نسبت به شاهد شد (جدول ۲). با افزایش سطح تنش خشکی وزن خشک و ارتفاع بوته کاهش یافت، به‌طوری که بیشترین مقدار این صفات تحت تنش خشکی ۸۰ درصد ظرفیت زراعی (به‌ترتیب ۰/۱۳۱ گرم و ۳۸/۵۸ سانتی‌متر) و کمترین مقدار تحت تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد (به‌ترتیب ۰/۰۷۳ گرم و ۲۰/۸۳ سانتی‌متر) (جدول ۲). افزایش شدت تنش خشکی موجب کاهش محتوای رنگیزه کارتنوئید گردید و این موضوع در حالی بود که افزایش غلظت تیمار سیلیکون موجب حفظ و بهبود محتوای کارتنوئید شد (جدول ۲).

در پژوهشی مشابه، تنش خشکی در گیاه خرفه باعث کاهش ارتفاع و وزن خشک کل اندام هوایی شد (Enanlofar *et al*., 2012). Eskandari (۲۰۱۳) بیان کرد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار پارامترهای رشد شامل طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه، قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع و نهایتاً وزن تر و خشک اندام هوایی مرزه گردید. طبق نتایج پژوهش‌های پیشین بر روی سایر گیاهان، از آنجا که در شرایط تنش رطوبتی فشار تورژسانس سلول‌های ساقه کاهش می‌یابد و از طرفی تولید مواد اصلی فتوسنتز نیز کم می‌شود، لذا طول میانگره‌های ساقه و درنتیجه ارتفاع بوته تحت تأثیر تنش رطوبتی دچار کاهش خواهد شد (Farhadi *et al*., 2017). بررسی‌ها حاکی از آن است که کاهش رشد گیاه می‌تواند به این علت باشد که تنش‌های زیستی و غیرزیستی باعث تضعیف پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه از جمله ارتفاع، تعداد برگ، سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ می‌شوند (Omara *et al*., 2019; Hafez *et al*., 2020). همچنین Emaratpardaz و همکاران (۲۰۱۶) کاهش خشک کل گیاه، سطح برگ، شاخص کلروفیل و ارتفاع بوته در گیاه مرزه را طی تنش شوری گزارش کردند. Khajeh و همکاران (۲۰۱۵) با کاربرد سیلیکون بر روی گندم گزارش کردند که بیشترین ارتفاع در سطح محلول‌پاشی ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون حاصل شد. از طرفی، سیلیس در اطراف سلول‌های نگهبان روزنه و در دیواره سلولی آن‌ها رسوب می‌کند و جلوی باز شدن کامل روزنه‌ها را می‌گیرد و لذا باعث کاهش تعرق روزنه‌ای نیز می‌شود که این عامل سبب افزایش وزن تر اندام‌ها می‌شود (Liang *et al*., 2015). Torabi و همکاران

(۲۰۱۳) بیان کردند گیاهانی که تحت تیمار ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون بودند، بیشترین طول، عرض و شاخص روزنه را نسبت به شاهد و دیگر تیمارها داشتند. همچنین، تأثیرات مثبتی بر وزن‌تر اندام هوایی و محتوای کلروفیل کل نشان دادند. Asemeh و Pourakbar (۲۰۲۲) گزارش کردند که محلول‌پاشی سیلیکون و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون در گیاهان رشدیافته تحت تیمار شوری موجب افزایش طول اندام هوایی و وزن خشک گیاه شد، در صورتی که تنش شوری موجب کاهش طول اندام هوایی و وزن خشک اندام هوایی گردید. Zare و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی اثر سیلیسیوم بر شاخص‌های رشدی گیاه سویا در شرایط تنش شوری دریافتند که ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه، مقدار کلروفیل و جیبرلین با غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سیلیسیوم افزایش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که کاربرد سیلیسیوم آثار منفی تنش شوری را با افزایش طول و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه کاهش می‌دهد. Mahdavi و همکاران (۲۰۱۸) گزارش نمودند که در غلظت یک میلی‌مولار سیلیسیم وزن خشک اندام هوایی و کربوهیدرات‌ها و فعالیت آنزیم پلی‌فنول اکسیداز و نیز میزان کلروفیل b و a در گیاه نعناع بیشتر از شاهد بود. Askarnejad و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که کاربرد ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون به‌ترتیب موجب افزایش ۲۲، ۵ و ۳۵ درصدی ارتفاع، وزن تر و وزن خشک ریشه نسبت به عدم کاربرد این ماده در حالت بدون تنش رطوبتی (تیمار شاهد) شد. Veisi و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که کاربرد نانوذرات سیلیکون در غلظت ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر باعث افزایش معنی‌دار پارامترهای مورفولوژیکی (شامل ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد گل) و فیزیولوژیکی (شامل محتوی نسبی آب برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی) گیاه همیشه بهار گردید. Shokri و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکون تأثیر معناداری بر وزن تر و میزان زیست‌توده خیار داشت. به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های فوق مطابقت داشت، به‌طوری که کاهش رشد ناشی از اعمال تنش خشکی و افزایش رشد در اثر کاربرد تیمارهای سیلیکون مشاهده گردید. همچنین، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تحت شرایط تنش خشکی، میزان کاروتنوئید گیاه کاهش یافته و این رنگیزه نتوانسته است نقش حفاظتی خود را ایفا کند. کاهش محتوای کاروتنوئید می‌تواند به دلیل اکسید شدن این رنگیزه توسط گونه‌های اکسیژن فعال باشد (Omara *et al.*, 2019). Oliviera-Neto و همکاران (۲۰۰۹) تغییرات متابولیکی را عامل کاهش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه ذرت خوشه‌ای در شرایط تنش خشکی بیان نمودند. این محققان گزارش کردند که کاهش کارایی استفاده از کربن و افزایش تولید اتانول و لاکتات سبب کاهش سنتز کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی در مرحله زایشی گیاه، تسریع پیری برگ و تجزیه رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌شود. کاهش محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش خشکی در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Ahmed *et al.*, 2009; Raeesi Sadati *et al.*, 2021). Torabi و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون موجب افزایش میزان کاروتنوئید گیاه گاوزبان دارویی گردید. Fahimi و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که سیلیکات کلسیم با غلظت یک میلی‌مولار باعث افزایش محتوای رنگدانه‌ای (کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها) زعفران در شرایط تنش شوری و شاهد شد. احتمالاً سیلیس در غلظت‌های بهینه از طریق افزایش جذب عناصر غذایی سبب افزایش محتوای رنگدانه‌ای گیاه می‌شود (Delavar *et al.*, 2019).

جدول ۲- اثر متقابل تنش خشکی و تیمار سیلیکون بر وزن خشک، ارتفاع و محتوای کاروتنوئید گیاه مرزه تابستانه

Table 2- Interaction of drought stress and silicon treatment on dry weight, height and carotenoid content of summer savory plant

تیمار (تنش – سیلیکون) Treatment (Stress – Silicon)	وزن خشک گیاه (گرم) Plant dry weight (g)	ارتفاع گیاه (سانتیمتر) Plant height (cm)	محتوای کارتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Carotenoid content (mg g^{-1} FW)
۸۰ درصد ظرفیت زراعی 80 % FC	0.131 a	38.58 a	3.03 a
۶۰ درصد ظرفیت زراعی 60 % FC	0.105 b	29.33 b	2.65 b
۴۰ درصد ظرفیت زراعی 40 % FC	0.073 c	20.83 c	2.29 c
صفر (شاهد) 0 (Control)	0.07 c	21.00 c	2.17 c
۰/۵ میلی‌مولار سیلیکون 0.5 mM silicon	0.09 b	28.78 b	2.58 b
۱ میلی‌مولار سیلیکون 1 mM silicon	0.11 ab	31.89 b	2.82 ab
۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون 1.5 mM silicon	0.12 a	36.67 a	3.06 a

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (آزمون چنددامنه‌ای دانکن – سطح احتمال ۵ درصد)

Common letters in each column indicate no significant difference (Duncan's multiple range test – probability level of 5%)

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بالاترین وزن تر بوته (۱/۲ گرم) تحت رژیم آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی سیلیکون در غلظت ۱/۵ میلی‌مولار بدست آمد (جدول ۳). با افزایش سطح تنش خشکی میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل کاهش معنی‌داری یافت، اما محلول‌پاشی سیلیکون سبب افزایش معنی‌داری در میزان کلروفیل گیاه مرزه گردید. بیش‌ترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل (به‌ترتیب با میانگین ۲/۸۰، ۵/۶۴ و ۸/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) با محلول‌پاشی ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکون به‌دست آمد (جدول ۳). کمترین میزان کلروفیل b (۰/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل کل (۰/۸۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط تنش خشکی شدید مشاهده شد (جدول ۳). با افزایش سطح تنش خشکی میزان قند محلول کاهش یافت، اما با افزایش غلظت سیلیکون میزان قند محلول گیاه مرزه به‌طور معنی‌داری افزایش بافت، به‌طوری که بیشترین و کمترین میزان قند محلول گیاه مرزه به‌ترتیب در برهمکنش تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و سیلیکون یک میلی‌مولار، و تنش خشکی ۸۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار به‌ثبت رسید. کاربرد سیلیکون ۱/۵ میلی‌مولار تحت تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی موجب افزایش ۱۲/۱۷ درصدی میزان قند محلول نسبت به شرایط شاهد شد (جدول ۳).

بنابر گزارشات منتشرشده، تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاهان می‌شود (Rahimi *et al*., 2019). Esmaeelpour و همکاران (۲۰۱۳) اظهار نمودند که تنش خشکی بر میزان کلروفیل برگ گیاه مرزه تابستانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، به‌طوری که با افزایش تنش خشکی میزان کلروفیل در برگ گیاهان مرزه کاهش یافته و حداکثر مقدار کلروفیل در گیاهان تحت تیمار آبیاری کامل و کمترین میزان کلروفیل نیز در گیاهان پرورش‌یافته در شرایط تنش ۳۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید. کاهش غلظت کلروفیل در شرایط کم-آبی می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدودکننده غیرروزنه-ای به‌حساب آید. کاهش میزان کلروفیل تحت تنش کم-آبی می‌تواند به‌علت افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن

باشد که این عوامل سبب پراکسیداسیون و تجزیه رنگیزه کلروفیل می‌گردند (Sharifa & Muriefah, 2015). نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که سیلیکون باعث کاهش خسارات ناشی از تنش گردید و میزان رنگدانه-های فتوسنتزی در اثر تیمار سیلیکون در مقایسه با تیمار خشکی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. یافته‌های حاصل از این مطالعه درمورد تأثیر تیمار سیلیکون بر رنگیزه‌های فتوسنتزی با نتایج Cao و همکاران (۲۰۱۵) که اظهار داشتند سیلیکون از کاهش کلروفیل برگ‌های گوجه‌فرنگی تحت تنش خشکی جلوگیری کرده و به بهبود سرعت فتوسنتز خالص کمک می‌کند، مطابقت دارد. در پژوهش حاضر کاهش کلروفیل گیاه مرزه تحت تنش خشکی، احتمالاً می‌تواند به‌دلیل افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن، پراکسیداز و ترکیبات فنولی باشد، زیرا جذب انرژی مازاد توسط دستگاه فتوسنتزی، اغلب تولید گونه‌های فعال اکسیژن را تحریک می‌کند که این وضعیت با تخریب رنگیزه‌های جذب کننده نور تا حدودی قابل کنترل است (Hadi *et al*., 2017). به نظر می‌رسد کاربرد ریزمغذی‌هایی نظیر سیلیسیم در مرحله رویشی از طریق افزایش سطح و دوام برگ باعث افزایش قدرت منبع و افزایش تولید مواد فتوسنتزی می-شود (Amiri *et al*., 2014). همچنین، سیلیس بر تولید غلظت‌های بالاتر آنزیم ریبولوز بیس‌فسفات کربوکسیلاز در برگ مؤثر می‌باشد. این آنزیم سوخت-وساز دی‌اکسیدکربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی‌اکسیدکربن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (Sonobe *et al*., 2011). در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است که کاربرد سیلیکون، در بسیاری از گونه-های گیاهان تحت تنش خشکی رنگدانه‌های فتوسنتزی را افزایش داده است (Da Silva Lobato, 2013). از جمله دلایل افزایش میزان کلروفیل در تیمار سیلیکون می‌توان به تأثیر سیلیکون در حذف یا سمیت‌زدایی رادیکال‌های آزاد، بهبود سیستم دفاعی گیاه و افزایش کارآیی فتوسیستم II اشاره کرد (Tripathi *et al*., 2017). گزارش شده است که در صورت کمبود سیلیس، مقدار کلروفیل کم شده و در نتیجه کارایی فتوسنتز گیاه کاهش می‌یابد. دلیل این امر به نقش سیلیس در زنجیره فتوسنتزی و ممانعت از تخریب زنجیره کلروفیلی توسط این ماده نسبت داده شده است. تجمع کربوهیدرات‌های محلول در برگ معرف بالا بودن قدرت برگ در تولید این ترکیبات و یا نیاز به کربوهیدرات‌های محلول در تنظیم اسمزی برگ است (Narimani *et al*., 2021). به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی سیلیکون در غلظت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار توانسته تا حدودی از شدت تنش بکاهد، که با نتایج سایر محققین هم‌خوانی دارد (Farazi *et al*., 2018). Rostami و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که کاربرد نانو اکسید روی و آهن موجب افزایش غلظت قندهای محلول در بوته‌های گندم رشدیافته در خاک شور شد. بیشترین تأثیر مثبت محلول‌پاشی سیلیکون در شرایط تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که در این شرایط کاربرد یک میلی‌مولار سیلیکون، افزایش ۳۳/۴۸ درصدی قند محلول در مقایسه با شاهد، به‌همراه داشت (جدول ۳). این پدیده احتمالاً مکانیزم سازش گیاه برای حفظ پتانسیل اسمزی مناسب در شرایط تنش است. Asemeh و Pourakbar (۲۰۲۲) بیان کردند که مقدار قندهای محلول گیاه زعفران در تیمار سیلیکون و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار به‌ترتیب ۲/۵۵، ۱۰/۶۲، ۴/۵۶ و ۵/۵۱ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت.

جدول ۳- اثر متقابل تنش خشکی و تیمار سیلیکون بر صفات گیاه مرزه تابستانه

Table 3- Interaction of drought stress and silicon treatment on traits of summer savory plant

تنش خشکی Drought stress	سیلیکون (میلی‌مولار) Silicon (mM)	وزن تر (گرم) Fresh weight (g)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll a (mg g^{-1} FW)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll b (mg g^{-1} FW)	کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Total chlorophyll (mg g^{-1} FW)	قند محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Soluble sugar (mg g^{-1} FW)
۸۰ درصد ظرفیت زراعی 80 % FC	0	0.71 bc	0.493 def	1.32 d	1.82 de	3.566 cd
	0.5	1.09 a	0.846 c	1.93 b	2.77 bc	3.163 d
	1	1.12 a	1.030 b	1.99 b	3.03 b	3.286 d
	1.5	1.20 a	2.800 a	5.64 a	8.44 a	3.440 cd
۶۰ درصد ظرفیت زراعی 60 % FC	0	0.67 cd	0.386 f	0.86 f	1.25 f	3.540 cd
	0.5	0.83 b	0.636 de	1.35 d	2.00 d	3.750 bcd
	1	0.61 c	0.446 f	1.59 c	2.04 d	3.910 bc
	1.5	0.75 bc	0.640 d	1.84 b	2.66 c	4.006 bc
۴۰ درصد ظرفیت زراعی 40 % FC	0	0.60 c	1.190 g	0.62 g	0.82 g	3.516 cd
	0.5	0.64 c	0.380 f	0.86 f	1.24 f	4.213 b
	1	0.67 bc	0.383 f	1.26 de	1.65 e	4.760 a
	1.5	0.69 bc	0.460 ef	1.10 e	1.65 e	4.000 bc

حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (آزمون چنددامنه‌ای دانکن – سطح احتمال ۵ درصد)

Common letters in each column indicate no significant difference (Duncan's multiple range test – probability level of 5%)

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش خشکی محتوای پرولین افزایش یافت، به‌طوری که بیشترین غلظت پرولین (۱۲/۹۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) تحت تنش خشکی ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ثبت رسید. این سطح از تنش خشکی موجب افزایش ۶۰/۹۹ درصدی محتوای پرولین نسبت به شرایط شاهد شد (جدول ۴). افزایش فعالیت آنزیم اورنیتین آمینوترانسفراز (آنزیم سنتزکننده پرولین) و یا ممانعت از فعالیت آنزیم‌های کاتالیزکننده پرولین مانند پرولین اکسیداز و پرولین هیدروژناز، می‌تواند از دلایل افزایش محتوای پرولین در چنین شرایطی باشد (Babaei *et al*., 2017).

جدول ۴- اثر تنش خشکی بر محتوای پرولین گیاه مرزه تابستانه

Table 4- Effect of drought stress on proline content of summer savory plant

تنش خشکی Drought stress	۸۰ درصد ظرفیت زراعی 80 % FC	۶۰ درصد ظرفیت زراعی 60 % FC	۴۰ درصد ظرفیت زراعی 40 % FC
پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Proline (mg g^{-1} FW)	8.05 c	10.41 b	12.96 a

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد (آزمون چنددامنه‌ای دانکن – سطح احتمال ۵ درصد)

Common letters indicate no significant difference (Duncan's multiple range test – probability level of 5%)

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد سیلیکون تا غلظت ۱/۵ میلی‌مولار تأثیر مثبتی بر کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر صفات رشدی و فیزیولوژیکی گیاه مرزه تابستانه داشت. بنابراین، از سیلیکون می‌توان به‌عنوان یک عنصر مفید در افزایش مقاومت گیاه مرزه به تنش‌های محیطی (از جمله تنش خشکی) استفاده کرد.

سپاس‌گزاری

از همکاری و مساعدت کلیه اشخاص حقیقی و حقوقی در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

- Amerian, M., Khoramivafa, M. & Rabani, B. A. (2023). Effect of selenium and humic acid on germination and some morphological characteristics of quinoa under drought and salinity stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 6(2), 1-16. (In Farsi) doi: 10.22034/iuvs.2022.537591.1177
- Askarnejad, M., Sodaeeizadeh, H., Mosleh Arani, A., Yazdani Biouki, R. & Mavandi, P. (2019). Effect of silicon in improving drought tolerance of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under moisture stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(3), 847-863. (In Farsi)
- Asemeh, M. & Pourakbar, L. (2022). The effect of silicon and silicon dioxide nanoparticle on growth factors, osmolytes and ionic content of saffron (*Crocus Sativus* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 35(2), 31-41. (In Farsi)
- Amiri, A., Bagheri, A., Khajeh, M., Najafabadi, P. F. & Yadollahi, P. (2014). Effect of silicone foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under limited irrigation conditions. *Journal of Crop production*, 5(4), 361-372.
- Ahmed, C. B., Rouina, B. B., Sensoy, S., Boukhris, M. & Abdallah, F. B. (2009). Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and experimental botany*, 67(2), 345-352.
- Amini, S., Ghobadi, C. & Yamchi, A. (2015). Proline accumulation and osmotic stress, an overview of p5cs gens in plants. *Journal of Plant Molecular Breeding*, 3(2), 44-55.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
- Babaei, K., Seyed Sharifi, R., Pirzad, A. & Khalilzadeh, R. (2017). Effects of bio fertilizer and nano Zn-Fe oxide on physiological traits, antioxidant enzymes activity and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 381-389.
- Cao, B. L., Ma, Q., Zhao, Q., Wang, L. & Xu, K. (2015). Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress. *Scientia Horticulturae*, 194, 53-62.
- Delavar, K., Ghanati, F., Zare-Maivan, H. & Behmanesh, M. (2019). Effects of silicon nutrition on the physiological parameters of maize. *Journal of Plant Process and Function*, 7(27), 45-58. (In Farsi)
- De Oliveira Maia Júnior, S., de Andrade, J. R., dos Santos, C. M., Silva, A. L. J., Endres, L., Silva, J. V. & dos Santos Silva, L. K. (2020). Osmoregulators' accumulation minimizes the effects of drought stress in sugarcane and contributes to the recovery of photochemical efficiency in photosystem II after

rewatering. *Acta physiologiae plantarum*, 42(4), 1-11.
- Daneshmandi, M. S. & Azizi, M. (2009). Effects of drought and mineral Zywolayt application of quantitative and qualitative characteristics of basil, Hungarian cultivars (*Ocimum basilicum* L. var. Keshkeny levelu). *Congress of Horticultural Sciences*, Rasht. pp, 123-129.
- Da Silva Lobato, A. K., Guedes, E. M. S., Marques, D. J. & de Oliveira Neto, C. F. (2013). Silicon: a benefic element to improve tolerance in plants exposed to water deficiency. *Responses of organisms to water stress*, InTech. pp, 95-113. doi: 10.5772/46157
- Eskandari, M. (2013). Changes in growth parameters and essential oil content of *Satureja bachtiarica* Bunge under the effects of 28-Homobrassinolid and drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 29(1), 176-186. (In Farsi)
- Esmaeelpour, B., Jalilv, P. & Hadian, J. (2013). Effect of drought stress and mycorrhizal fungi on some morpho-physiological traits and performance of Summer Savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agroecology*, 5(2), 169-177. (In Farsi)
- Etesami, H. & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 881-896.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology*, 50, 641-664.
- Emaratpardaz, J., Hami, A. & Ghohari, G. (2016). Evaluation of growth characteristics and essential oil yield of *Satureja hortensis* L. under salinity and Zn foliar spraying. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. *26*(3), 132-141.
- Enanlofar, M., Omidi, H. & Pazoky, A. R. (2012). Morphological changes, agricultural and oil content Purslane (*Portulaca olercea* L.) affected by drought and bio fertilizer / nitrogen chemical. *Medicinal Plants of Journal*, 12(4), 170-184.
- Farhadi, H., Azizi, M. & Nemati, S. H. (2017). The effect of water deficit stress on morphological characteristics and yield components of landraces (T*rigonella foenum-graecum* L.) fenugreek eight. *Crop Science Research in Arid Regions*, 1(1), 120-132.
- Farazi, M., Goldani, M., Nasiri Mahallati, M., Nezami, A. & Rezaei, J. (2018). Investigating the effect of silicon and potassium foliar spraying and additional soil application of potassium on quantitative and qualitative yield of sugar beet (*Betavulgaris* L.) under moisture stress conditions. *Applied Agricultural Research*, 31(3), 1-19. (In Farsi)
- Ghorbanpour, M., Mohammadi, H. & Kariman, K. (2020). Nanosilicon-based recovery of barley (*Hordeum vulgare*) plants subjected to drought stress. *Environmental Science: Nano*, 7(2), 443-461.
- Hafez, Y. M., Mourad, R. Y., Nasr, E. B., Attia, K. O. T. B., Abdelaal, K. A., Ghazy, A. I. & Mohammed, A. A. (2020). Biochemical and

molecular characterization of non-host resistance keys in food crops. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(4), 1091-1099.

- Hajhashemi, V., Ghannadi, A. & Pezeshkian, S. K. (2002). Antinociceptive and anti-inflammatory effects of *Satureja hortensis* L. extracts and essential oil. *Journal of ethnopharmacology*, 82(2-3), 83-87.
- Hassanpour, N. F. & Ranjber, M. (2019). Effect of lead and putresine interactions on cress (*Lipidium sativum*) seedling physiological and biochemical factors. *Journal of Crop Ecophysiology*, 10(35), 39-51.
- Hussain, B., Lin, Q., Hamid, Y., Sanaullah, M., Di, L., Khan, M. B. & Yang, X. (2020). Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Science of the Total Environment*, 712, 136497.
- Hosseinzadeh, S. R., Amiri, H. & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica*, 54(1), 87-92. (In Farsi)
- Hadian, J. (2008). Assessment of genetic diversity of savory native species from Iran. *Horticultural Science thesis. Tehran University*, pp, 180.
- Hadi, H., Seyed Sharifi, R. & Namvar, A. (2017). Phytoprotectants and abiotic stresses. *Urmia University Publication.* 341p. (In Farsi)
- Irigoyen, J. J., Emerich, D. W. & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants. *Plant Physiol*, 84, 55-60.
- Khajeh, M., Mosavinik, M., Siroosmehr, A., Yadoalahi Dehcheshmeh, P. & Amiri, A. (2015). Effects of water stress and spraying silicone on wheat yield and photosynthetic pigments in Sistan. *Crop Physiology*, 26(7), 5-19. (In Farsi)
- Khan, W. U. D., Aziz, T., Maqsood, M. A., Sabir, M., Ahmad, H. R., Ramzani, P. M. A. & Naseem, M. (2016). Silicon: a beneficial nutrient under salt stress, its uptake mechanism and mode of action. In *Soil science: Agricultural and environmental prospectives* (pp, 287-301). Springer, Cham.
- Khorasaninejad, S., Soltanloo, H., Hadian, J. & Atashi, S. (2016). The effect of salinity stress on the growth, quantity and quality of essential oil of lavender (*Lavandula angustifulia* Miller). *Journal of Horticulture Science*, 30(2), 209-216.
- Kafi, M., Nabati, J., Masoumi, A. & Mehrgerdi, M. Z. (2011). Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.). *Pakistan Journal of Botany*, 43(5), 2457-2462.
- Kocal, N., Sonnewald, U. & Sonnewald, S. (2008). Cell wallbound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction between tomato and *Xanthomonas campestris* pv.

Vesicatoria. *Plant Physiology*, 148(3), 1523-1536.

- Lichtenthaler, H. K. & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, 591-592.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H. & Song, A. (2015). Silicon in agriculture: From theory to practice. *(Springer Publishing: Dordrecht, the Netherlands).*
- Mahdieh, M., Habibollahi, N., Amirjani, M., Abnosi, M. & Ghorbanpour, M. (2015). Exogenous silicon nutrition ameliorates salt-induced stress by improving growth and efficiency of PSII *in Oryza sativa* L. cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15, 1050-1060.
- Mahdavi, M., Esmaielpour, B. & Fatemi, H. (2018). Effect of silicon nutrition on growth and physiology of spearmint (*Mentha spicata*) under cadmium stress condition. *Iranian Journal of Horticultural Sciences*, 49(1), 185-198. (In Farsi)
- Maghsoudi, K., Emam, Y. & Pessarakli, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 1001-1015. (In Farsi)
- Maghsoudi, K. & Maghsoudi, K. (2016). The effect of exogenous silicon on seed germination and seedling growth of wheat cultivars under salt stress conditions. *Iran Agricultural Research*, 35(2), 1-8. (In Farsi)
- Nabipour, Z. & Zamani, Gh. (2020). Effect of silicon application on morphological and physiological characteristics of sunflower (*Helianthus.annuus* L.) under different moisture levels. *Bi-Quarterly Journal of Plant Production*, 10(1): 33-43.
- Narimani, H., Seyed Sharifi, R. & Aghaei, F. (2021). Effect of foliar and soil application of zinc on grain weight and some biochemical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Journal of Crops Improvement*, 24(2), 269-281. (In Farsi)
- Omara, R. I., El-Kot, G. A., Fadel, F. M., Abdelaal, K. A. & Saleh, E. M. (2019). Efficacy of certain bioagents on patho-physiological characters of wheat plants under wheat leaf rust stress. *Physiological and molecular plant pathology*, 106, 102-108.
- Oliviera-Neto, C. F., Silva-Lobato, A. K., Goncalves-Vidigal, M. C., Costa, R. C. L., Santos Filho, B. G., Alves, G. A. R., Silva-Maia, W. J. M., Cruz, F. J. R., Neres, H. K. B. & Santos Lopes, M. J. (2009). Carbon compounds and chlorophyll contents in sorghum submitted to water deficit during three growth stages. *Science and Technology*, 7, 588-593.
- Peiri, T. & Fazeli, A. (2022). Identification of ecotypes and different species of savory (*Satureja* spp.) using DNA barcoding genes. *Journal of Vegetables Sciences*, 6(1), 82-96. (In Farsi) doi: 10.22034/iuvs.2022.540180.1179
- Porra, R. J. (2005). The chequered history of the development and use

- Sefidkon, F., Abbasi, K. & Khaniki, G. B. (2006). Influence of drying and extraction methods on yield and chemical composition of the essential oil of *Satureja hortensis*. *Food chemistry*, 99(1), 19-23.
- Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzade Ansari, N. & Struve, D. (2022). Effect of silica nanoparticles on yield of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Ahvaz region. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production,* 32(1), 279-292.
- Shahraki, H., Mahdi Nezhad, N., Fakheri, B. & Haddadi, F. (2021). The effect of synthesis nanosilver by plant extract on morphological and antioxidant properties of artichoke (*Cynara scolymus* L.) under salinity stress. *Plant Production*, 44(1), 103-114
- Sharifa, S. & Muriefah, A. (2015). Effects of paclobutrazol on growth and physiological attributes of Soybean (*Glycine max*) plants grown under water stress conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 81-93.
- Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A. E., Kobayashi, S. & Inanaga, S. (2010). Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 71-82.
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Lux, A. & Vaculik, M. (2020). Silicon in plant biology: from past to present, and future challenges. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6699-6702.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K. & of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis research*, 73(1), 149-156.
- Rechinger, K. H. (1982). Satureja. In Flora desiranischen hoclandes and der umrahmenden gebirge. *Akademische druku verlags antalt Graz Austria*, 150, 495–504.
- Raeesi Sadati, S. Y., Godekahriz, S. J., Ebadi, A. & Sedghi, M. (2021). Effect of zinc oxide nanoparticles on some biochemical and morphological characteristics of wheat under drought conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 31(2), 233-250. (In Farsi)
- Rostami, Q., Moghadam, M., Ghasemi Pirbaluti, A. & Tehrani, A. (2020). Effect of sulfate and nanoparticles of iron and zinc on biomass, amount and composition of essential oils of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Research*, 33(3), 505-515. (In Farsi)
- Rahimi, S., Hatami, M. & Ghorbanpour, M. (2019). Effect of seed priming with nanosilicon on morpho-physiological characteristics, quercetin content and antioxidant capacity in *Calendula officinalis* L. under drought stress conditions. *Journal of Medicinal Plants*, 18(72), 186-203.
- Singh, G., Sarvanan, S., Rajawat, K. S., Rathore, J. S. & Singh, G. (2017). Effect of different micronutrients on plant growth, yield and flower bud quality of broccoli (*Brassica Oleracea* var. Italica). *Current Agriculture Research Journal*, 5(1), 108-115.

Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70-81.

- Torabi, P. H. D., Majd, A., Enteshari, S. H. & Irian, S. (2013). Study of effect of silicon on some anatomical and physiological characteristics of borage (*Borago officinalis* L.) in hydroponic conditions. *Journal of Cell and Tissue (JCT),* 4(3), 275-285. (In Farsi)
- Veisi, Z., Ghorbanpour, M. & Akramian, M. (2022). The effects of silicon nanoparticles on morpho-physiological and biochemical parameters of *Calendula officinalis* L. plants under salinity stress in hydroponic culture conditions. *Journal of Plant Process and Function,* 11(47), 211-229. (In Farsi)
- Zargari, A. (1997). Medicinal Plant. *Tehran University Press.* 4, 969p.
- Zare, F., Khorasaninejad, S. & Hemmati, K. (2018). The effect of silicon on some morpho-physiological and phytochemical traits of Purple Coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Biology,* 10(3), 55-68. (In Farsi)