

ISSN: 3041-9638

<https://jrpsm.asnrkh.ac.ir/>

Open Access

Research Article

Studying the effect of using silicon nanoparticles on some morphophysiological and biochemical characteristics of dill under the climatic conditions of Isfahan-Iran

M. Raei¹, H. A. Asadi-Gharneh¹  and M. Abrahimi²

¹Department of Horticulture, Institute of Agriculture, Water, Food and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

²Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran.

Received: 16 May 2026

Accepted: 01 Sep 2026

Published: 01 Sep 2026

Corresponding**Author:**

Hossein Ali Asadi-Gharneh

Email:

asadigharneh@iau.ac.ir

Keywords:

Anthocyanin, Dill populations, Reducing sugars, Foliar spraying, Nanosilicon dioxide

Citation:

Raei, M., Asadi-Gharneh, H. A., Abrahimi, M (2026). Studying the effect of using silicon nanoparticles on some morphophysiological and biochemical characteristics of dill under the climatic conditions of Isfahan-Iran. *Journal of Research in Plant Metabolites*, 4(2), 23-39.

Doi:10.22034/jrpsm.2026.581899.1114

Extended Abstract

Background and objectives: Investigating the effects of the application of nanoparticles, including silicon, on plants has attracted the attention of many researchers today. A review of the available sources shows that most of the research has been on the effects of nanoparticles on agricultural plants, and medicinal plants, despite their high importance, have received less attention. Therefore, the lack of available information regarding the effect of silicon nanoparticles on medicinal plants, especially dill, and also due to the influence of environmental and genetic factors on the growth of medicinal plants and the importance of identifying the indigenous populations of the region and studying their phytochemical compounds with the aim of selecting the best ones, extracting essential oils and improving the breed, makes the necessity of implementing this experiment more obvious than ever. Therefore, this experiment was carried out with the aim of investigating the effect of silicon nanoparticles on some morphophysiological and biochemical characteristics of dill in the climatic conditions of Isfahan-Iran.

Materials and Methods: This experiment was conducted to investigate the effect of silicon nanoparticles on some morphophysiological and biochemical characteristics of dill (*Anethum graveolens* L.) in the climatic conditions of Isfahan, Iran, as a factorial in a randomized complete block design with three replications. In this experiment, the effect of silicon nanoparticles (nanosilicon dioxide, SiO₂) at four levels including 0, 25, 50 and 100 mg.L⁻¹ was investigated on 10 dill populations including Harand, Dezfoul, Gorgan, Hamedan, Tehran, Ghaenat, Behbahan, Kashan, Ardestan and Shiraz. Seeds of different dill populations were collected from different regions of the country and identified by the Agricultural Research Center and Natural Resources of Isfahan Province. Seeds were sown in rows in 1.5 m² plots with a row spacing of 1 m and a plant spacing of 50 cm. Silicon nanoparticles were used as a foliar spray in the first two stages of plant growth and 10 days after that. Drip irrigation and all maintenance were performed during the growth and development period. In this experiment, plant fresh and dry weight, stem and root length, total chlorophyll content, chlorophyll a/b ratio, anthocyanin content, reducing sugar content, proline content, ascorbate peroxidase enzyme activity and essential oil content were investigated. Statistical analyses were performed as factorial in a randomized complete block design using SAS9.4 software. Comparison of mean traits was performed using two-way analysis of variance and Duncan's test.

Results: The results of the analysis of variance of traits showed that the effect of silicon nanoparticles and population and their interaction on the traits of plant fresh and dry weight, stem and root length, total chlorophyll content and chlorophyll b/a ratio, anthocyanin, reducing sugars, proline and ascorbate peroxidase enzyme activity had statistically significant differences. The highest plant fresh and dry weight and essential oil content were observed in the foliar spray treatment of 50 mg.L⁻¹ nanosilicon concentration × Hamedan population. The highest stem and root length, total chlorophyll content, reducing sugars content and ascorbate peroxidase enzyme activity were obtained in the foliar spray treatment of 50 mg.L⁻¹ nanosilicon concentration × Dezfoul population. Based on the results of comparing the mean traits, the highest chlorophyll a/b ratio belonged to the foliar spray treatment of 50 mg.L⁻¹ nanosilicon × Ghaenat population. The results of comparing the mean traits showed that the highest anthocyanin and proline content was observed in the foliar spray treatment of 100 mg.L⁻¹ nanosilicon × Dezfoul population. The compounds observed in dill essential oil were α-Thujene, α-Pinene, Myrcene, Carvone, α-phellandrene and Limonene. The highest and lowest compounds in the essential oil were Carvone and α-Thujene, respectively. The highest amounts of α-Thujene, Myrcene and Limonene were observed in the foliar spray treatment of 50 mg.L⁻¹ nanosilicon × Hamedan population.

Conclusion: It seems that the cultivation of Hamedan population and foliar spraying of 50 mg.L⁻¹ of silicon nanoparticles in the climatic conditions of Isfahan-Iran will be a suitable option for cultivation in similar environmental conditions due to the achievement of greater plant weight and essential oil production (and the highest amount of α-Thujene, Myrcene and Limonene).





تأثیر نانوذرات سیلیکون بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شوید در شرایط آب‌وهوایی اصفهان

مجتبی راعی^۱، حسینعلی اسدی قارنه^۱  و مرتضی ابراهیمی^۲

^۱ گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
^۲ مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

چکیده

سابقه و هدف: بررسی اثرات کاربرد نانوذرات از جمله سیلیکون بر گیاهان، امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها در رابطه با اثر نانوذرات بر گیاهان زراعی بوده است و گیاهان دارویی علیرغم اهمیت بالای آن‌ها توجه کم‌تری را به خود معطوف داشته‌اند. بنابراین کمبود اطلاعات موجود در رابطه با اثر نانوذرات سیلیکون بر گیاهان دارویی به ویژه گیاه شوید و اثر عوامل محیطی و ژنتیکی بر رشد این گیاهان، ضرورت اجرای این آزمایش را بیش از پیش آشکار می‌سازد. علاوه بر این، اهمیت شناسایی جمعیت‌های بومی منطقه و مطالعه ترکیبات فیتوشیمیایی آن‌ها باهدف انتخاب برترین‌ها و اصلاح نژاد این مساله را بیش از پیش حایز اهمیت می‌سازد. لذا این آزمایش با هدف بررسی تأثیر کاربرد نانوذرات سیلیکون بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شوید در شرایط آب‌وهوایی اصفهان به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش اثر نانوذرات سیلیکون (نانوسیلیکون دی‌اکساید، SiO_2) در چهار سطح شامل ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بر ۱۰ جمعیت شوید شامل هرنه، دزفول، گرگان، همدان، تهران، قائنات، بهبهان، کاشان، اردستان و شیراز بررسی شد. بذور جمعیت‌های مختلف گیاه شوید از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری و توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان شناسایی شدند. بذور به صورت ردیفی در کرت‌های ۱/۵ مترمربعی با فاصله ردیف یک متر و فاصله بین بوته ۵۰ سانتی‌متر کشت شدند. نانوذرات سیلیکون به‌صورت محلول‌پاشی در دو مرحله ۲۰ و ۳۰ روز پس از کاشت (۴ و ۱۰ برگی بوته) مورد استفاده قرار گرفت. آبیاری به صورت قطره‌ای و کلیه مراقبت‌های داشت طی دوره رشد و نمو انجام گرفت. در این آزمایش وزن تر و خشک بوته، طول ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل کل، نسبت کلروفیل a/b، محتوای آنتوسیانین، محتوای قندهای احیا، محتوای پرولین، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و محتوای اسانس مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل‌های آماری به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با استفاده از نرم افزار SAS9.4 انجام شد. مقایسه میانگین صفات با استفاده از آنالیز واریانس دوطرفه و آزمون دانکن صورت گرفت.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که اثر نانوذرات سیلیکون و جمعیت و نیز اثر متقابل آن‌ها بر صفات وزن تر و خشک بوته، طول ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b، آنتوسیانین، قندهای احیا، پرولین و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بودند. بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته و محتوای اسانس در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان مشاهده شد. بیش‌ترین طول ساقه و ریشه، میزان کلروفیل کل، محتوای قندهای احیا و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول به دست آمد. براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، بیش‌ترین نسبت کلروفیل a/b به تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات تعلق داشت. نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین محتوای آنتوسیانین و پرولین در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول مشاهده شد. بیش‌ترین میزان آلفا-توجن (α -Thujene)، میرسن (Myrcene) و لیمونن (Limonene) در تیمار محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان مشاهده شدند.

نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد کشت جمعیت همدان و محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات سیلیکون در شرایط آب و هوایی اصفهان - ایران به دلیل دستیابی به وزن بوته و تولید اسانس بیشتر (و بیش‌ترین میزان آلفا-توجن، میرسن و لیمونن) گزینه مناسبی جهت کشت در شرایط محیطی مشابه خواهد بود.

نویسنده مسئول:

حسینعلی اسدی قارنه

ایمیل:

asadigharneh@iau.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

آنتوسیانین، جمعیت‌های شوید، قندهای احیا، محلول‌پاشی، نانوسیلیکون دی‌اکساید

نحوه استناد:

راعی، م.، اسدی قارنه، ح.ع.، ابراهیمی. (۱۴۰۵). تأثیر نانوذرات سیلیکون بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی شوید در شرایط آب و هوایی اصفهان. مجله پژوهش در متابولیت‌های گیاهی، دوره ۴، شماره ۲، صفحات: ۲۳-۳۹.

Doi:10.22034/jrpsm.2026.581899.1114

مقدمه

استفاده روزافزون از گیاهان دارویی و فرآورده‌های دارویی حاصل از آن‌ها نقش این گیاهان را در چرخه اقتصادی جهانی بسیار پررنگ کرده است، به‌طوری‌که مصرف رو به افزایش آن‌ها به کشورهای در حال توسعه محدود نبوده و در کشورهای پیشرفته نیز توسعه فراوانی یافته است. صرف‌نظر از ارزش اقتصادی گیاهان دارویی، این گیاهان قابل تطبیق با روش‌های کشت ارگانیک هستند که تمایل تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها را به همراه دارد (Ahmadi and Omid, 2018). گیاه شوید (*Anethum graveolens*) یکی از گیاهان دارویی است که دارای خواص زیادی در طب مدرن و سنتی می‌باشد. این گیاه متعلق به خانواده چتریان، یکساله، علفی و معطر بوده که منشأ آن نواحی شرقی مدیترانه است (Zahedi and Asadi, 2024). تمام پیکر گیاه شوید حاوی اسانس است. مقدار اسانس شوید در اندام‌های مختلف و شرایط اقلیمی متفاوت بسیار متغیر است. تحقیقات نشان می‌دهد که اسانس آن از شروع ساقه‌دهی به‌تدریج افزایش می‌یابد و تا مرحله گلدهی به حداکثر رسیده و از این مرحله به بعد به‌تدریج از میزان آن کاسته می‌شود (Chahal et al., 2017).

تنش‌های محیطی مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را مختل می‌کنند (Coskun et al., 2016; Luyckx et al., 2017; Yousefi et al., 2025). در حال حاضر یک راه مطلوب به منظور مقابله با تنش‌های محیطی، استفاده از گیاهان متحمل به شرایط تنش‌زا می‌باشد. افزایش تحمل گیاهان از راه‌های مختلف شامل شناسایی جمعیت‌ها، ژنوتیپ‌ها و ارقام متحمل، روش‌های به‌نژادی و استفاده از برخی تنظیم‌کننده‌های رشد است (Yousefi et al., 2025 a,b). استفاده از سیلیکون باعث فعالیت بیشتر مکانیسم‌های دفاعی گیاه و مقابله با تنش می‌شود و می‌تواند در بهبود خسارت‌های وارد شده به گیاه نقش مؤثری داشته باشد.

سیلیکون به عنوان یک تنظیم‌کننده آنزیمی مهم و یک عنصر مفید زیست‌فعال برای رشد گیاه در طول تنش در نظر گرفته می‌شود (Wang et al., 2019; Verma et al., 2021). اشکال مختلف سیلیکون می‌توانند به عنوان کاهش‌دهنده‌های تنش زیستی و غیرزیستی همراه با اثرات مفید آن بر رشد و بهره‌وری گیاه در طول تنش استفاده شوند (Verma et al., 2020). همچنین اشاره شده است که سیلیکون ممکن است در دیواره‌های بافت‌های اپیدرمی و عروقی تک‌لپه‌ای‌ها تجمع یابد تا انتقال جذب آب را همراه با آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ظرفیت فتوسنتزی افزایش دهد (Wang et al., 2019; Younis et al., 2020). نتایج به دست آمده از تحقیقات گذشته نشان داده است که سیلیکون به دلیل حفظ فعالیت

فتوسنتزی بالا و استفاده کارآمد از نور و انتقال محصولات جذب شده به مخزن سبب افزایش عملکرد گیاه می‌شود (Yang et al., 2025). کاربرد سیلیکون فاکتورهای رشد درونی را افزایش می‌دهد و منجر به توسعه ریشه‌های متراکم‌تر (قطر، مساحت، حجم و طول ریشه) و زیست‌توده شاخساره گیاهان تحت تنش می‌شود. سیلیکون همچنین افزایش انعطاف‌پذیری دیواره سلولی در ناحیه رشد و افزایش نسبت ریشه به شاخه و افزایش توانایی جذب آب را تحریک می‌کند (Verma et al., 2021). سیلیکون نقش مهمی در متعادل کردن جذب، انتقال و توزیع مواد معدنی به بخش‌های هوایی گیاهان در طول تنش ایفا می‌کند (Verma et al., 2020). زیرا تجمع مواد مغذی، یعنی منیزیم، نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم، آهن، روی، منگنز و مس، را در گیاهان در شرایط تنش افزایش می‌دهد (Iqbal et al., 2023). غلظت بالای سیلیکون در برگ‌های گیاه، بیوسنتز رنگدانه‌های کلروفیل را افزایش داده و تجزیه آن به دلیل تنش را کاهش می‌دهد. افزایش سطح رنگدانه‌ها به خودی خود باعث بهبود پاسخ‌های فتوسنتزی می‌شود (Verma et al., 2020). کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت تنش ممکن است فعالیت‌های آنزیمی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز را افزایش دهد (Verma et al., 2020). از این رو، سیلیکون به طور مثبت سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی در گیاهان را تنظیم می‌کند و توسط سیستم‌های آنزیمی آنتی‌اکسیدانی برای کاهش آسیب اکسیداتیو در گیاهان تحت تنش، سم‌زدایی گونه‌های اکسیژن فعال را انجام می‌دهد (Kim et al., 2017). محققان بیان کردند که افزایش ارتفاع گیاه در شرایط کاربرد سیلیکون می‌تواند به دلیل رسوب سیلیکون در بافت‌های گیاه باشد که باعث ایستادگی برگ‌ها و ساقه می‌شود (Jain et al., 2017). بررسی اثرات کاربرد نانوذرات از جمله سیلیکون بر گیاه، امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها در رابطه با اثر نانوذرات بر گیاهان زراعی بوده است و گیاهان دارویی علیرغم اهمیت بالای آن‌ها توجه کمتری را به خود معطوف داشته‌اند. بنابراین کمبود اطلاعات موجود در رابطه با اثر کاربرد نانوذرات سیلیکون بر گیاهان دارویی به ویژه گیاه شوید و همچنین به دلیل تأثیر عوامل محیطی و ژنتیکی بر رشد گیاهان دارویی و اهمیت شناسایی جمعیت‌های بومی منطقه و مطالعه ترکیبات فیتوشیمیایی آن‌ها باهدف انتخاب برترین‌ها، استخراج اسانس و اصلاح نژاد، ضرورت اجرای این آزمایش را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت مزرعه‌ای در شهرستان نجف آباد، استان اصفهان، ایران با موقعیت جغرافیایی طول $5^{\circ}38'32''$ شمالی و عرض

کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b: به منظور اندازه‌گیری میزان کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b، از روش Lichtenthaler and Buschmann, (2001) استفاده شد.

محتوای آنتوسیانین: به منظور بررسی تیمارهای آزمایش بر محتوای آنتوسیانین از روش Wagner (1979) استفاده شد. بدین منظور ۰/۲۵ گرم برگ گیاه با یک میلی‌لیتر متانول یک درصد اسیدی (۹۹ به ۱ به ترتیب متانول و اسید کلرید ریک) کاملاً ساییده شد. عصاره درون فالکون ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. در ادامه جذب آن به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۵۰ نانومتر قرائت و توسط فرمول زیر رنگیزه آنتوسیانین محاسبه شد.

رابطه ۱: $\text{عرض کووت} \times \text{ضریب خاموشی} / \text{حجم}$

نهایی محلول $\times$ ضریب رقت $\times A550 = \text{غلظت آنتوسیانین}$

ضریب خاموشی $= 33000 \text{ cm}^{-2} \text{ mol}^{-1}$

محتوای قندهای احیا: محتوای قندهای احیا با استفاده از روش رنگ‌سنجی (Somogyi (1952) اندازه‌گیری شد. ۵۰ میلی‌گرم از نمونه خشک و آسیاب‌شده در ۱ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد داغ در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار سانتریفیوژ شد. سپس، سوپرناتانت جمع‌آوری شده و مرحله بالا تا ۳ بار بر روی رسوبات باقی‌مانده تکرار شد. سپس ۱ میلی‌لیتر از عصاره با ۱ میلی‌لیتر معرف مسی Somogyi (حاوی سولفات مس، سدیم کربنات، سدیم بی‌کربنات، پتاسیم سدیم تارتارات و سدیم سولفات) مخلوط و در حمام آب جوشان به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه حرارت داده و رنگ قرمز آجری مشاهده شد. پس از سرد شدن، ۱ میلی‌لیتر معرف آرسنومولیدات و ۳ میلی‌لیتر آب مقطر به مخلوط افزوده شد و جذب محلول در طول موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. مقدار قند نمونه‌ها بر اساس منحنی استاندارد گلوکز محاسبه و با استفاده از رابطه زیر به صورت میلی‌گرم بر گرم وزن خشک گزارش گردید و در نهایت به صورت درصد به دست آمد.

رابطه ۲: $\text{Sugar (mg/g DW)} = C \times V \times DF / W$

که در آن: C: غلظت به دست‌آمده از منحنی استاندارد (mL/mg)، V: حجم نهایی عصاره (mL)، DF: ضریب رقت و W: وزن نمونه خشک (g) می‌باشند.

محتوای پرولین: برای اندازه‌گیری محتوای پرولین به روش Bates et al., (1973) عمل شد.

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: ابتدا برای تهیه عصاره آنزیمی، بافت تازه گیاهی در هاون سرد و در حضور بافر استخراج حاوی ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات سدیم با pH 7.0، ۰/۱ میلی‌مولار

"۵۵'۲۱'۵۱ شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۶۰۰ متر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به انجام شد. در این پژوهش اثر کاربرد سطوح مختلف نانوذرات سیلیکون بر ۱۰ جمعیت مختلف شوید (*Anethum graveolens*) شامل هرنه، دزفول، گرگان، همدان، تهران، قائنات، بهبهان، کاشان، اردستان و شیراز مورد مطالعه قرار گرفت. تیمار نانوذرات سیلیکون نیز در چهار سطح شامل ۱- شاهد (آب مقطر)، ۲- غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، ۳- غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و ۴- غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود.

بذور جمعیت‌های مختلف گیاه شوید از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری و توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان شناسایی شدند. کاربرد نانوذرات سیلیکون به صورت محلول‌پاشی بر روی برگ در دو مرحله ابتدای رشد گیاه و ۱۰ روز پس از آن انجام گرفت.

تهیه محلول نانوذرات سیلیکون: به منظور تهیه تیمارهای نانوذرات سیلیکون مورد نظر از نانو سیلیکون دی‌اکساید (SiO_2) شرکت فاین نانو تهران با اندازه ذرات ۳۰-۲۰ نانومتر استفاده و غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آن تهیه شد. کاربرد نانوذرات سیلیکون به صورت محلول‌پاشی بر روی برگ گیاه در دو مرحله ۲۰ و ۳۰ روز پس از کاشت (۴ و ۱۰ برگی بوته) انجام گرفت. پس از آماده‌سازی زمین جهت کشت، ۴۵ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژنی و ۴۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفوری مورد استفاده قرار گرفت. بذور به صورت ردیفی در کرت‌های ۱/۵ مترمربعی (طول ۱/۵ متر در عرض یک متر) با فاصله ردیف یک متر و فاصله بین بوته ۵۰ سانتی‌متر کشت شدند. بین جمعیت‌های مختلف فاصله ۰/۵ متری در نظر گرفته شد. آبیاری به صورت قطره‌ای و کلیه مراقبت‌های داشت طی دوره رشد و نمو انجام گرفت. کشت در ۲۰ فروردین‌ماه و برداشت در ۳۰ اردیبهشت‌ماه (۴۰ روز پس از کاشت، به منظور ممانعت از ورود گیاه به مرحله زایشی) صورت گرفت.

وزن تر و خشک بوته و طول ساقه و ریشه: به منظور بررسی اثر تیمارهای آزمایش بر وزن تر و خشک بوته و طول ساقه و ریشه، پنج بوته از هر تیمار برداشت شده و پس از اندازه‌گیری طول ساقه و ریشه و جدا نمودن اجزای بوته، وزن تر و خشک بوته (پس از قرارگیری به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد) محاسبه گردید. به منظور بررسی طول ریشه، خاک اطراف ریشه (پس از آبیاری و رسیدن رسوب خاک به حد مطلوب) به طور کامل توسط بیل خارج و به آرامی ریشه از خاک جداسازی و شسته شد. سپس طول بلندترین ریشه از ابتدا تا انتهای ریشه توسط خطکش اندازه‌گیری شد.

SAS9.4 انجام شد. مقایسه میانگین صفات با استفاده از آنالیز واریانس دوطرفه و آزمون دانکن در سطح ۱ و ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که اثر نانوذرات سیلیکون و جمعیت و نیز اثر متقابل آن‌ها بر صفات وزن تر و خشک بوته، طول ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b، آنتوسیانین، قندهای احیا، پرولین و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز دارای اختلاف آماری معنی‌دار بودند (جدول ۱).

وزن و طول بوته: نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته (۳۷/۳ و ۲/۱۹ میلی گرم در بوته) در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان (فاقد اختلاف آماری معنی‌دار با تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول) مشاهده شد. کاربرد نانوذرات سیلیکون باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه در اغلب جمعیت‌های شوید در مقایسه با شاهد شد. کم‌ترین وزن تر و خشک بوته نیز به ترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی غلظت ۲۵ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات با میزان ۱۱/۶۴ گرم بر بوته و شاهد × جمعیت قائنات با میزان ۰/۸۷ گرم بر بوته به دست آمد (جدول ۲).

باتوجه به نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین طول ساقه و ریشه در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول به ترتیب با میزان ۴۸/۲۷ و ۳۰/۴۰ سانتی‌متر به دست آمد. کم‌ترین میزان این صفات نیز به تیمار محلول‌پاشی غلظت ۲۵ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات با میزان ۱۳/۱۱ و ۸/۳۰ سانتی‌متر اختصاص داشت (جدول ۲).

محتوای کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b: میزان کلروفیل کل تحت تاثیر محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکون افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل (۱۵/۰۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) به تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول تعلق داشت. کم‌ترین میزان این صفت نیز در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۲۵ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات (۵/۳۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، بیش‌ترین نسبت کلروفیل a/b (۲/۰۱) در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات مشاهده شد. کم‌ترین میزان این صفت نیز در تیمار شاهد × جمعیت هرنند (۱/۲۷) به دست آمد (جدول ۳).

EDTA (اتیلن‌دی‌آمین تترااستیک اسید)، ۲٪ PVPP (پلی‌وینیل پلی‌پیرولیدون) و ۲ میلی‌مولار آسکوربات همگن شد. سپس نمونه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ و سوپرناتانت به‌عنوان عصاره آنزیمی استفاده شد. برای سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز، مخلوط واکنش نهایی شامل ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم با pH 7.0، ۰/۵ میلی‌مولار آسکوربات، ۰/۱ میلی‌مولار EDTA و ۰/۱ میلی‌مولار H₂O₂ در حجم نهایی ۱ میلی‌لیتر تهیه شد. واکنش با افزودن عصاره آنزیمی آغاز شد و کاهش جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر به‌مدت ۱۰ تا ۳۰ ثانیه ثبت گردید. فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی ۲.۸ میلی‌مولار معکوس بر سانتی‌متر محاسبه و به‌صورت فعالیت ویژه بر واحد پروتئین گزارش شد.

رابطه ۳:

$$\text{APX activity (Umg}^{-1}\text{protein)} = (\Delta A_{29} / \text{min} \times V_t) / (2.80 \times V_s \times C_p)$$

Cp = غلظت پروتئین عصاره (mg mL⁻¹)

محتوای اسانس: در ادامه آزمایش با هدف بررسی محتوای اسانس، براساس نتایج به دست آمده از صفات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی یک جمعیت برتر (همدان)، متوسط (شیراز) و ضعیف (گرگان) انتخاب شد.

به منظور جداسازی اسانس گیاه شوید، پس از اعمال تیمار، نمونه‌های گیاهی از هر تیمار برداشت و در شرایط سایه خشک و سپس خرد گردید. برای اسانس‌گیری از دستگاه کلونجر استفاده شد (Rustaiyan *et al.* 2006). بدین منظور ۸۰ گرم از بافت گیاهی خشک درون دستگاه کلونجر در محیط آبی (تا جایی که سطح گیاه را کامل آب بپوشاند) به مدت دو ساعت عصاره‌گیری شد. اسانس به‌وسیله ۱۰ میلی‌لیتر n-هگزان بدون آب جمع‌آوری شد و مخلوط به دست آمده به دستگاه کروماتوگرافی گازی منتقل شد (Kazemi, 2002). درنهایت برای شناسایی اسانس از دستگاه گاز کروماتوگرافی مدل Hewlett-Packard با ستون موئینه به طول ۵۰ متر و دتکتور از نوع انتخابگر جرمی Hp-5970 استفاده شد. انرژی یونیزاسیون ۷۰ الکترونولت و درجه حرارت ۲۵۰ درجه سانتیگراد برای تولید منبع یون، رقیق کردن نمونه‌ها به روش شکافت با نسبت ۱:۱۰۰، ستون موئینه به طول ۵۰ متر و قطر داخلی ۰/۲ میلی‌لیتر، ضخامت فیلم ۲۵ میکرومتر و ذرات از جنس متیل سیلیکون کراس لینک شده، فاز متحرک گاز هلیوم با سرعت یک میلی‌لیتر در دقیقه و برنامه دمایی از ۶۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد با تغییرات چهار درجه و دمای قسمت تزریق ۲۰۰ درجه سانتیگراد (Lord and Pawliszyn, 2000).

تجزیه و تحلیل‌های آماری: تجزیه و تحلیل‌های آماری به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با استفاده از نرم افزار

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات وزن تر و خشک بوته، طول ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b، محتوای آنتوسیانین، محتوای قندهای احیا، محتوای پرولین و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در شرایط کاربرد نانوذرات سیلیکون بر جمعیت‌های مختلف شوید

Table 1- Results of the analysis of variance of the mean square of fresh and dry plant weight, stem and root length, total chlorophyll content and chlorophyll a/b ratio, anthocyanin content, reducing sugar content, proline content and ascorbate peroxidase enzyme activity under the conditions of application of silicon nanoparticles on different dill populations.

محتوای کلروفیل کل Total chlorophyll content	طول ریشه Root length	طول ساقه Stem length	وزن خشک بوته Dry plant weight	وزن تر بوته Fresh plant weight	درجه آزادی df	منابع تغییرات SOV
0.048 ns	1.209 ns	4.052 ns	0.0001 ns	1.366 ns	2	تکرار Replication
45.571 **	454.986 **	748.478 **	1.356 **	379.766 **	3	نانوذرات سیلیکون Silicon nanoparticles
54.907 **	249.909 **	637.895 **	1.002 **	317.903 **	9	جمعیت شوید Dill populations
0.438 **	4.757 **	12.962 **	0.018 **	8.281 **	27	نانوذرات سیلیکون × جمعیت شوید Silicon nanoparticles × Dill populations
0.210	1.127	3.181	0.000	2.248	78	خطا Error
4.74	5.92	6.55	0.77	6.38	-	ضریب تغییرات CV
فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ascorbate peroxidase enzyme activity	محتوای پرولین proline content	محتوای قند احیا reducing sugar content	محتوای آنتوسیانین anthocyanin content	نسبت کلروفیل a/b chlorophyll a/b ratio	درجه آزادی df	منابع تغییرات SOV
0.0001 ns	0.008 ns	0.001 ns	0.001 ns	0.003 ns	2	تکرار Replication
0.009 **	0.054 **	1.478 **	15.950 **	0.067 **	3	نانوذرات سیلیکون Silicon nanoparticles
0.233 **	0.073 **	1.078 **	19.008 **	0.288 **	9	جمعیت شوید Dill populations
0.0001 **	0.008 **	0.013 **	0.707 **	0.015 **	27	نانوذرات سیلیکون × جمعیت شوید Silicon nanoparticles × Dill populations
0.000001	0.008	0.001	0.001	0.003	78	خطا Error
1.13	26.75	2.34	0.65	3.37	-	ضریب تغییرات CV

* و ** به ترتیب دارای اختلاف آماری معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد و ns فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

* and **: respectively significant at the level of 5% and 1% and ns: no significant difference

افزایش محتوای آنتوسیانین در اغلب جمعیت‌های شوید در مقایسه با شاهد شد. کم‌ترین محتوای آنتوسیانین نیز در تیمار شاهد × جمعیت قائنات با میزان ۱/۹۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به دست آمد (جدول ۳).

محتوای آنتوسیانین: نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین محتوای آنتوسیانین (۷/۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به تیمار محلول‌پاشی غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول تعلق داشت. کاربرد نانوذرات سیلیکون باعث

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف نانوذرات سیلیکون × جمعیت‌های مختلف شوید بر صفات وزن تر و خشک بوته، طول ساقه و

ریشه و محتوای کلروفیل کل

Table 2- Results of the comparison of the average interaction effect of different levels of silicon nanoparticles × different dill populations on the traits of fresh and dry plant weight, stem and root length and total chlorophyll content.

محتوای کلروفیل کل		طول ریشه		طول ساقه		وزن خشک بوته		وزن تر بوته		جمعیت شوید	ذرات نانو سیلیکون
Total chlorophyll content (mg.g ⁻¹)		Root length (cm)		Stem length (cm)		Dry plant weight (g. plant ⁻¹)		Fresh plant weight (g. plant ⁻¹)		Dill populations	Silicon nanoparticles
10.45	g-j	18.00	l-o	30.00	hi	1.37	g-j	23.30	g-j	Hamedan	شاهد Control
7.78	pq	12.77	v	18.30	q-t	0.98	q-s	16.73	q-s	Harand	
7.77	pq	13.50	t-v	20.47	o-r	1.06	n-q	18.10	n-q	Behbahan	
8.40	m-p	15.00	q-t	24.23	l-n	1.20	k-n	20.47	k-n	Kashan	
8.05	n-p	14.03	r-v	22.07	n-p	1.14	m-p	19.37	m-p	Shiraz	
12.20	de	19.00	j-m	33.37	e-g	1.42	g-i	24.13	g-i	Dezfoul	
6.07	t-v	10.00	w	17.80	r-t	0.90	rs	15.30	rs	Gorgan	
10.30	h-j	17.53	m-o	28.37	i-k	1.32	i-k	22.43	i-k	Tehran	
5.84	uv	9.53	w	17.47	st	0.87	t	14.77	s	Ghaenat	
9.35	kl	17.07	n-p	26.51	j-l	1.26	j-m	21.40	j-m	Ardestan	
12.04	de	25.00	de	38.33	bc	1.85	bc	31.40	bc	Hamedan	۲۵ میلی گرم بر لیتر 25 mg.L ⁻¹
8.33	n-p	16.57	o-q	20.70	o-q	1.20	k-n	20.47	k-n	Harand	
8.73	l-n	18.00	l-o	24.20	l-n	1.32	i-k	22.43	i-k	Behbahan	
9.74	jk	19.57	i-l	29.60	hi	1.55	e-g	26.40	e-g	Kashan	
9.31	kl	18.57	k-n	26.17	kl	1.43	g-i	24.27	g-i	Shiraz	
13.33	bc	24.67	de	39.50	b	1.84	bc	31.30	bc	Dezfoul	
7.25	qr	12.50	v	19.00	q-s	1.04	o-r	17.60	o-r	Gorgan	
11.46	ef	22.70	fg	33.67	d-f	1.71	cd	29.10	cd	Tehran	
5.39	v	8.30	w	13.11	u	1.01	s	11.64	t	Ghaenat	
10.89	f-i	21.70	gh	29.13	h-j	1.63	de	27.70	de	Ardestan	
13.86	b	29.03	ab	46.90	a	2.19	a	37.30	a	Hamedan	۵۰ میلی گرم بر لیتر 50 mg.L ⁻¹
10.20	ij	20.40	h-j	25.40	lm	1.35	g-j	23.03	g-j	Harand	
11.18	fg	21.27	g-i	30.50	g-i	1.47	f-h	25.07	f-h	Behbahan	
10.84	f-i	24.00	ef	36.50	cd	1.71	cd	29.00	cd	Kashan	
10.70	g-i	22.10	gh	31.90	f-h	1.60	d-f	27.23	d-f	Shiraz	
15.09	a	30.40	a	48.27	a	2.12	a	36.00	a	Dezfoul	
8.53	m-o	15.03	q-t	23.00	m-o	1.17	l-o	19.90	l-o	Gorgan	
13.47	b	27.77	bc	40.73	b	1.88	b	32.03	b	Tehran	
8.23	n-p	15.03	q-t	25.00	lm	1.15	m-p	19.50	m-p	Ghaenat	
11.99	de	26.10	cd	34.13	d-f	1.82	bc	31.00	bc	Ardestan	
10.98	f-h	21.03	g-i	31.40	f-h	1.65	de	28.03	de	Hamedan	۱۰۰ میلی گرم بر لیتر 100 mg.L ⁻¹
7.18	q-s	14.57	r-u	18.50	q-t	1.01	p-s	17.13	p-s	Harand	
7.80	o-q	13.70	s-v	20.60	o-r	1.08	n-q	18.43	n-q	Behbahan	
9.13	k-m	15.37	p-s	24.50	l-n	1.39	g-j	23.70	g-j	Kashan	
8.63	l-n	13.13	uv	19.87	p-s	1.30	i-l	22.10	i-l	Shiraz	
12.60	cd	21.50	gh	35.50	c-e	1.67	de	28.43	de	Dezfoul	
6.71	r-t	9.17	w	15.63	tu	0.99	q-s	16.80	q-s	Gorgan	
10.87	f-i	19.73	h-j	26.00	kl	1.54	e-g	26.20	e-g	Tehran	
6.46	s-u	8.67	w	15.67	tu	0.89	t	15.10	s	Ghaenat	
9.77	jk	15.70	p-r	26.67	j-l	1.48	f-h	25.20	f-h	Ardestan	

ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

Columns with the same letters do not have statistically significant differences according to Duncan's test.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرمتقابل سطوح مختلف نانوذرات سیلیکون × جمعیت‌های مختلف شوید بر صفات نسبت کلروفیل a/b، محتوای آنتوسیانین، محتوای قندهای احیا، محتوای پرولین و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

Table 3- Results of the comparison of the average interaction effect of different levels of silicon nanoparticles × different dill populations on the traits of chlorophyll a/b ratio, anthocyanin content, reducing sugar content, proline content and ascorbate peroxidase enzyme activity

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ascorbate peroxidase enzyme activity ($\mu\text{M H}_2\text{O}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ protein}$)		محتوای پرولین proline content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		محتوای قند احیا reducing sugar content (%)		محتوای آنتوسیانین anthocyanin content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		نسبت کلروفیل chlorophyll a/b ratio		جمعیت شوید Dill populations	ذرات نانو سیلیکون Silicon nanoparticles
0.47	g	0.38	b-k	1.56	j	4.11	q	1.47	r-t	همدان Hamedan	شاهد Control
0.22	x	0.23	k-o	1.00	rs	2.48	ee	1.27	u	هرند Harand	
0.25	v	0.25	i-o	1.20	p	2.94	aa	1.64	j-m	بهبهان Behbahan	
0.38	o	0.29	f-o	1.30	o	3.47	wx	1.49	p-t	کاشان Kashan	
0.30	r	0.27	g-o	1.22	p	3.23	z	1.57	l-q	شیراز Shiraz	
0.50	e	0.39	a-i	1.70	gh	4.36	n	1.80	d-g	دزفول Dezful	
0.15	aa	0.20	m-o	0.99	st	2.11	ii	1.87	b-e	گرگان Gorgan	
0.43	j	0.36	c-l	1.54	jk	4.02	r	1.48	q-t	تهران Tehran	
0.12	dd	0.17	o	0.94	t	1.91	jj	1.81	d-g	قائنات Ghaenat	
0.39	n	0.32	d-n	1.40	m	3.64	u	1.57	l-q	اردستان Ardestan	۲۵ میلی گرم بر لیتر 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
0.50	e	0.42	a-f	1.80	f	5.00	j	1.51	o-s	همدان Hamedan	
0.24	w	0.24	j-o	1.23	p	2.88	bb	1.47	st	هرند Harand	
0.28	t	0.26	h-o	1.33	no	3.51	w	1.56	m-q	بهبهان Behbahan	
0.41	l	0.34	d-l	1.50	kl	4.00	r	1.58	k-p	کاشان Kashan	
0.33	q	0.31	e-o	1.46	l	3.81	t	1.66	i-l	شیراز Shiraz	
0.54	b	0.45	a-e	2.01	d	5.23	h	1.74	f-i	دزفول Dezful	
0.17	y	0.22	l-o	1.19	p	2.40	ff	1.90	bc	گرگان Gorgan	
0.47	g	0.40	a-h	1.75	fg	4.76	m	1.55	m-s	تهران Tehran	
0.13	cc	0.50	a-c	1.00	rs	2.16	hh	1.92	ab	قائنات Ghaenat	۵۰ میلی گرم بر لیتر 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
0.44	i	0.37	b-k	1.72	g	4.16	p	1.75	f-h	اردستان Ardestan	
0.51	d	0.41	a-g	2.20	b	6.41	e	1.56	m-s	همدان Hamedan	
0.26	u	0.24	j-o	1.50	kl	3.55	v	1.40	t	هرند Harand	
0.29	s	0.26	i-o	1.80	f	4.31	o	1.59	k-o	بهبهان Behbahan	
0.42	k	0.32	d-n	1.70	gh	5.06	i	1.57	l-q	کاشان Kashan	
0.34	p	0.28	g-o	1.74	g	4.80	l	1.80	c-g	شیراز Shiraz	
0.55	a	0.42	a-f	2.39	a	6.61	d	1.73	g-j	دزفول Dezful	
0.17	y	0.20	m-o	1.32	no	3.45	x	1.89	b-d	گرگان Gorgan	
0.48	f	0.35	d-l	2.07	c	6.12	f	1.80	d-g	تهران Tehran	۱۰۰ میلی گرم بر لیتر 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
0.14	bb	0.18	no	1.36	mn	2.74	cc	2.01	a	قائنات Ghaenat	
0.45	h	0.32	d-m	1.87	e	5.55	g	1.67	h-k	اردستان Ardestan	
0.50	e	0.50	ab	1.65	hi	7.01	b	1.50	o-s	همدان Hamedan	
0.25	v	0.29	f-o	1.05	rs	2.69	dd	1.49	p-t	هرند Harand	
0.29	s	0.33	d-m	1.21	p	3.37	y	1.63	k-n	بهبهان Behbahan	
0.40	m	0.38	b-j	1.40	m	3.90	s	1.50	o-s	کاشان Kashan	
0.33	q	0.36	d-l	1.31	no	4.09	q	1.54	n-s	شیراز Shiraz	
0.53	c	0.52	a	1.86	e	7.10	a	1.77	fg	دزفول Dezful	
0.16	z	0.24	j-o	1.09	q	2.92	aa	1.82	c-g	گرگان Gorgan	تهران Tehran
0.47	g	0.46	a-d	1.64	i	6.70	c	1.50	o-s	تهران Tehran	
0.13	cc	0.22	l-o	1.07	qr	2.28	gg	1.83	b-f	قائنات Ghaenat	
0.43	j	0.44	a-e	1.50	kl	4.93	k	1.58	k-p	اردستان Ardestan	

ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

Columns with the same letters do not have statistically significant differences according to Duncan's test.

به دست آمد. کم‌ترین میزان این صفت نیز به تیمار شاهد × جمعیت قائنات با میزان ۰/۱۲ میکرومول H_2O_2 بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین اختصاص داشت (جدول ۳).

محتوای اسانس: نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد که اثر نانوذرات سیلیکون و جمعیت و نیز اثر متقابل نانوذرات سیلیکون × جمعیت بر صفت محتوای اسانس دارای اختلاف آماری معنی‌دار بودند (جدول ۴). بررسی نتایج محتوای اسانس نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان این صفت به ترتیب به تیمار محلول‌پاشی ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون × جمعیت همدان با میزان ۱/۸۸ درصد و تیمار شاهد × جمعیت گرگان با میزان ۱/۲۱ درصد تعلق داشت (جدول ۵). ترکیبات مشاهده شده در اسانس شوید عبارت بودند از α -Thujene، α -Pinene، Myrcene، Carvone، α -phellandrene و Limonene. بیش‌ترین و کم‌ترین ترکیبات موجود در اسانس نیز Carvone و α -Thujene بودند. بیش‌ترین میزان ترکیبات α -Thujene، Myrcene و Limonene در تیمار محلول‌پاشی ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون × جمعیت همدان مشاهده شدند (جدول ۶).

محتوای قندهای احیا: بررسی نتایج محتوای قندهای احیا نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان این صفت به ترتیب به تیمار کاربرد ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول با میزان ۲/۳۹ درصد و تیمار شاهد × جمعیت قائنات با میزان ۰/۹۴ درصد تعلق داشت (جدول ۳).

محتوای پرولین: محتوای پرولین تحت تاثیر محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکون افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین محتوای پرولین (۰/۵۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول مشاهده شد. کاربرد نانوذرات سیلیکون باعث افزایش محتوای پرولین در اغلب جمعیت‌های شوید در مقایسه با شاهد شد. کم‌ترین میزان این صفت نیز در تیمار شاهد × جمعیت قائنات (۰/۱۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد (جدول ۳).

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: باتوجه به نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول با میزان ۰/۵۵ میکرومول H_2O_2 بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات محتوای اسانس در شرایط کاربرد نانوذرات سیلیکون بر جمعیت‌های مختلف شوید

Table 4- Results of the analysis of variance of the mean square of the essential oil content under the conditions of application of silicon nanoparticles on different dill populations

محتوای اسانس Essential oil content	درجه آزادی df	منابع تغییرات SOV
0.0004 ns	2	تکرار Replication
0.470 **	3	نانوذرات سیلیکون Silicon nanoparticles
0.049 **	2	جمعیت شوید Dill populations
0.0007 **	6	نانوذرات سیلیکون × جمعیت شوید Dill populations × Silicon nanoparticles
0.0002	22	خطا Error
0.835	-	ضریب تغییرات CV

* و ** به ترتیب دارای اختلاف آماری معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد و ns فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

* and **: respectively significant at the level of 5% and 1% and ns: no significant difference

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف نانوذرات سیلیکون × جمعیت‌های مختلف شوید بر محتوای اسانس

Table 5- Results of the comparison of the average interaction effect of different levels of silicon nanoparticles × different dill populations on the essential oil content

محتوای اسانس Essential oil content	جمعیت شوید Dill populations	ذرات نانو سیلیکون Silicon nanoparticles
1.31	Hamedan همدان	شاهد Control
1.25	Shiraz شیراز	
1.21	Gorgan گرگان	
1.65	Hamedan همدان	۲۵ میلی گرم بر لیتر 25 mg.L ⁻¹
1.55	Shiraz شیراز	
1.52	Gorgan گرگان	
1.88	Hamedan همدان	۵۰ میلی گرم بر لیتر 50 mg.L ⁻¹
1.63	Shiraz شیراز	
1.61	Gorgan گرگان	
1.72	Hamedan همدان	۱۰۰ میلی گرم بر لیتر 100 mg.L ⁻¹
1.79	Shiraz شیراز	
1.72	Gorgan گرگان	

ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

Columns with the same letters do not have statistically significant differences according to Duncan's test.

جدول ۶- نوع و درصد ترکیبات اسانس شوید تحت سطوح مختلف نانوذرات سیلیکون در جمعیت‌های همدان، شیراز و گرگان

Table 6- Type and percentage of dill essential oil compounds under different levels of silicon nanoparticles in the populations of Hamedan, Shiraz and Gorgan

Hamedan, Shiraz and Gorgan												RI	R-index	Composition of essential compounds
100			50			25			شاهد Control					
mg.L ⁻¹			میلی گرم بر لیتر			میلی گرم بر لیتر			میلی گرم بر لیتر					
گرگان	شیراز	همدان	گرگان	شیراز	همدان	گرگان	شیراز	همدان	گرگان	شیراز	همدان			
0.62	0.66	0.72	0.91	0.94	0.97	0.91	0.93	0.96	0.8	0.8	0.9	936	1	α -Thujene
2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	2.7	2.8	2.7	3.1	3.1	3.0	94811111	2	α -Pinene
1.9	1.8	1.9	1.9	2.1	2.2	1.9	1.8	1.9	1.9	1.8	1.9	99822222	5	Myrcene
28.2	30.1	34.7	37.1	40.7	46.6	40.1	43.5	49.8	31.3	34.2	38.6	1006	6	Carvone
13.7	15.5	17.1	15.8	17.9	19.6	17.7	20.0	21.9	19.1	21.3	23.1	1011	7	α -phellandrene
10.0	11.7	14.6	10.6	12.3	15.3	9.8	11.3	14.1	8.4	9.8	12.2	1050	11	Limonene

می‌شود رشد ریشه افزایش یابد که خود افزایش جذب عناصر غذایی و آب و در نتیجه افزایش تجمع ماده خشک در لندام هوایی را در پی دارد (Kumar *et al.*, 2025). همچنین سیلیکون با کمپلکس کردن یون‌های فلزی سمی موجود در محیط ریشه، سبب بهبود رشد گیاه می‌گردد (Verma *et al.*, 2020). براساس نتایج Teixeira *et al.*, (2022) بیان کردند که در روش محلول‌پاشی سیلیکون، اثرات فیزیولوژیکی آن در کاهش تنش ناشی از کمبود آب برابر یا حتی بیشتر از کاربرد ریشه‌ای بود. (Camargo and Keeping, 2021) عنوان کردند که رسوب سیلیکون روی برگ‌ها در روش محلول‌پاشی باعث بهبود جذب نور خورشید، افزایش ظرفیت فتوسنتز و افزایش تجمع ماده خشک می‌شود. (Hussain *et al.*, 2021) نشان دادند که محلول‌پاشی سیلیکون سبب بهبود شاخص کلروفیل و وزن خشک و حجم ریشه می‌شود. همچنین کاربرد سیلیکون از طریق افزایش

سیلیکون نقش چشمگیری در رشد، تغذیه، مقاومت در برابر تنش‌های گوناگون و عملکرد دارد (Thakral *et al.*, 2021). سیلیکون با افزایش تحرک ریزمغذی‌ها و در دسترس بودن عناصر غذایی، عملکرد را افزایش می‌دهد (Khan., 2025). سیلیکون می‌تواند تحمل به تنش در گیاه را با تغییر میزان اسمولیت‌ها مانند پرولین، گلیسین‌بتائین، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، کربوهیدرات‌ها، قند محلول و آمینواسیدها افزایش دهد که منجر به افزایش تجمع ماده خشک در گیاه می‌گردد (Manimaran *et al.*, 2025). سیلیکون، تنظیم اسمزی را بهبود بخشیده و از طریق افزایش سطح اسمولیت‌ها در افزایش فعالیت فتوسنتزی و رشد بهتر به ویژه در شرایط تنش مؤثر است (Kang *et al.*, 2026) که بهبود رشد و تجمع ماده خشک را در پی دارد. نتایج Khan *et al.*, (2024) نشان داد که سیلیکون در بهبود رشد طولی ریشه و اندام هوایی گیاهان مؤثر است. کاربرد سیلیکون موجب

افزایش می‌یابد. کاربرد سیلیکون نیز با تاثیر بر متابولیسم قندها، موجب افزایش قندهای محلول و در نتیجه پتانسیل اسمزی می‌شود (Ulloa *et al.*, 2021). گزارش شده است که در شرایط تنش افزایش پرولین و قندهای محلول موجب حفظ تورژانس سلول‌ها شده و به بهبود جذب آب حتی در پتانسیل‌های پایین آب خاک کمک می‌کند (Alam *et al.*, 2025). گزارش شده است که تولید پرولین با قندهای محلول ارتباط دارد، زیرا یکی از مسیرهای تولید پرولین، گلوتامات است و با افزایش تولید قندهای محلول، میزان گلوتامات افزایش می‌یابد و سنتز پرولین بیشتر می‌شود (Alikhani and Mahmoudi, 2019). همچنین بیان شده است که کاربرد سیلیکون از طریق افزایش جذب نیتрат و آمینواسیدهای آزاد، افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ گندم را در پی داشت که در نهایت پتانسیل اسمزی گیاه را بهبود بخشید (Hajiboland *et al.*, 2016). با کاربرد کودهای زیستی، محتوای قندهای محلول و پرولین افزایش یافته که باعث افزایش ظرفیت اسمزی می‌شود. این امر خود منجر به افزایش شیب پتانسیل آب و در نتیجه بهبود جذب آب و رشد گیاه در شرایط تنش می‌گردد (Asghari *et al.*, 2020). برخی محققان بیان داشتند که محلول‌پاشی سیلیکون از طریق افزایش استحکام برگ‌ها به دلیل رسوب آن در لایه اپیدرم و افزایش هدایت روزنه‌ای، افزایش سطح برگ و فتوسنتز را در پی دارد (Hajipour and Jabarzadeh, 2018). همچنین گزارش شده است که کاربرد سیلیکون با افزایش حجم ریشه و محتوای کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آمینه موجب افزایش سطح برگ می‌شود (Trejo-Téllez *et al.*, 2020). با بهبود تنظیم اسمزی از طریق افزایش سطح اسمولیت‌ها در تیمار با سیلیکون، افزایش فعالیت فتوسنتزی و رشد بهتر در شرایط تنش مشاهده شد (Hameed *et al.*, 2021). نقش سیلیکون در بهبود تنظیم اسمزی، فعالیت آنزیمی، سنتز، ذخیره‌سازی و حفظ قند پیش از این گزارش شده است (Wang *et al.*, 2019). قندهای ساکارز، فروکتوز و ترهالوز، اسیدهای آمینه‌های پرولین، گلیسین و آلانین و سایر مواد حاوی نیتروژن و گوگرد، نقش‌های حیاتی در کاهش رادیکال‌های آزاد، محافظت از غشاها و آنزیم‌ها و حفظ تعادل اسمزی دارند (Handa *et al.*, 2018). اسیدهای آمینه‌ی پرولین یک محلول اسمزی سازگار است که در شرایط تنش به غلظت‌های بالایی در سلول‌های گیاهی می‌رسد. میزان تجمع پرولین در سلول‌های گیاهی به عنوان نشانه زیستی تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Haghighi *et al.*, 2022). (Shayesteh Pahangeh *et al.*, 2022) بیان کردند که پرولین سبب تنظیم اسمزی، ذخیره کربن و نیتروژن برای استفاده در طول دوره بهبود تنش، پایداری پروتئین‌ها و غشاها و پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد. سیلیکون با تغییر میزان پرولین، گلايسين‌بتائين، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، کربوهیدرات‌ها، قند محلول

سطح برگ سبب بهبود توانایی برگ‌ها در جذب نور و ظرفیت فتوسنتزی شده و رشد گیاه را افزایش می‌دهد. (Badem and Söylemez, 2022) افزایش رشد به واسطه کاربرد سیلیکون را به بهبود طول و وزن خشک ریشه مرتبط دانستند. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که کاربرد سیلیکون (تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) سبب بهبود محتوای کلروفیل کل شد. تاثیر سیلیکون بر رشد گیاه می‌تواند به دلیل افزایش استحکام برگ‌ها، تاثیر بر فراساختار کلروپلاست و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ باشد (Rastogi *et al.*, 2021). کاربرد سیلیکون می‌تواند از طریق سمیت‌زدایی گونه‌های رادیکال آزاد القاشده تحت تنش، از تخریب کلروفیل و آنزیم‌های دخیل در سنتز آن جلوگیری کند و موجب بهبود کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II گردد (Qin *et al.*, 2016). نتایج (Badem and Söylemez, 2022) نشان داد که بخشی از افزایش محتوای کلروفیل به واسطه محلول‌پاشی سیلیکون به افزایش وزن و حجم ریشه مرتبط است. همچنین بیان کردند که کاربرد سیلیکون می‌تواند با افزایش طول و وزن خشک ریشه و بهبود جذب آب و عناصر غذایی، محتوای کلروفیل را بهبود بخشد. محلول‌پاشی سیلیکون از طریق افزایش محتوای کلروفیل و بهبود فرایندهای فتوسنتزی و انتقال بیش‌تر مواد فتوسنتزی به ریشه، سبب افزایش وزن و حجم ریشه شد. محلول‌پاشی با نانوسیلیکون سبب افزایش بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند محتوای کلروفیل کل و دیگر ویژگی‌های فیزیولوژیکی شد. همچنین کاربرد نانوسیلیکون موجب بهبود فسفریلاسیون اکسیداتیو، پلیمریزاسیون پروتئین و فعالیت‌های آنزیمی شد (Alharbi *et al.*, 2022). سیلیکون با بهبود تعادل آبی، تحریک سیستم آنزیمی و فعال نمودن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش سنتز ترکیب‌های فنلی، تعادل هورمونی و سنتز کلروفیل بر افزایش فتوسنتز، تولید زیست توده و مقاومت گیاهان به تنش مؤثر است (Kim *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2019). کاربرد سیلیکون با تقویت مکانیسم‌های مقاومتی از جمله ترشح اسیدهای آلی شده و با تاثیر بر فعالیت آنزیم‌ها، افزایش محتوای آنتوسیانین را در پی دارد (Vieira-Filho and Monteiro, 2022). گزارش شده است که کاربرد سیلیکون از طریق جذب نیترات بیشتر، بهبود آمینواسیدهای آزاد و افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول، محتوای آنتوسیانین برگ گندم را افزایش داد (Hajiboland *et al.*, 2016). همچنین گزارش شده است که محلول‌پاشی سیلیکون تحت شرایط تنش با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای اسمولیت‌های سازگار و آنتوسیانین و کاهش محتوای پراکسید هیدروژن، موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدهید رازیانه شد (Mosapour Yahyaabadi and Asgharipour, 2016). زمان تنش، پتانسیل اسمزی از طریق تجمع محلول‌های سازگار (قندهای محلول و پرولین) در سیتوپلاسم

است (Emamveridian *et al.*, 2018). در حقیقت تولید ترکیب‌های اسانسی به عنوان یک پاسخ دفاعی از طرف گیاه برای مقابله با شرایط تنش در نظر گرفته می‌شود (Ghorbanpour *et al.*, 2016). یکی از اصلی‌ترین سازوکارهایی که تحت آن سیلیکون تنش را در گیاهان کاهش می‌دهد کمک به تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس‌ها در گیاه است. از جمله متابولیت‌های دیگری نیز که افزایش آن‌ها در اثر حضور سیلیکون گزارش شده است می‌توان به اسیدهای آلی، ترکیب‌های فنولی و فالونوئیدی اشاره کرد. به نظر می‌رسد با توجه به تأثیر سیلیکون در افزایش رشد و نمو گیاه، می‌توان یکی از دلایل بیشتر شدن میزان اسانس را افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه دانست که این افزایش می‌تواند منجر به تولید بیشتر اسانس شود (Yang *et al.*, 2025). اسانس هر گیاه دارای چند ترکیب اصلی و غالب است که نسبت به سایر ترکیبات آن درصد بیشتری را به خود اختصاص داده و تعیین کننده خواص کلی آن اسانس هستند. ترکیبات اصلی اسانس شوید شامل لیمونین، آلفا فلاندرون و کارون می‌باشد (Krüger and Hammer, 1996). رشد و نمو گیاهان و همچنین سنتز و تجمع متابولیت‌های ثانویه در آن‌ها به میزان زیادی تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. متابولیت‌های ثانویه نقش مهمی در سازگار نمودن گیاه با تغییرات محیطی مانند انواع تنش‌ها دارد (Yang *et al.*, 2018). محلول‌پاشی نانو سیلیکون باعث تغییر در میزان اسانس گیاه شوید شد. نتایج این آزمایش نشان داد که تأثیر تیمار با نانو سیلیکون موجب افزایش درصد اسانس در مقایسه با شاهد شد. نتایج آزمایش Xu *et al.*, (2024) نشان داد که افزودن سیلیکون و کلسیم سبب بهبود عملکرد و کیفیت روغن اسانسی نعنای شد. همچنین کاربرد سیلیکون و کلسیم ترکیب اسانس را تغییر داده و موجب افزایش محتوای کارون، لیمونن و اوسیمین شد. همچنین مشاهده شد که سیلیکون و کلسیم می‌توانند فتوسنتز و جذب مواد مغذی را تنظیم کنند تا عملکرد گیاه افزایش و با تنظیم سنتز ترپنوئیدها، محتوای اجزای اسانس تغییر و کیفیت اسانس بهبود یابد (Xu *et al.*, 2024). گزارش شده است که تغذیه سیلیسیم و تنش کم‌آبی، ترکیب اسانس گل محمدی را از طریق افزایش غلظت ترکیبات الکلی مونوترپنوئیدی غیرحلقوی شامل سیترونلول، سیترونلول استات، ژرانیول و اوژنول تغییر داد (Farahani *et al.*, 2021). این محققان همچنین افزایش غلظت متیل اوژنول و هپتادکان در اسانس را با کاربرد سیلیسیم مشاهده کردند، در حالی که، غلظت ترکیبات آلکانی در اسانس کاهش یافت. Hassan *et al.*, (2024) گزارش کردند که کاربرد سیلیکون، تولید متابولیت‌های ثانویه را در محصولات دارویی تحت شرایط تنش افزایش می‌دهد. Mukarram *et al.*, (2023) نیز بیان کردند که نانوذرات سیلیکون، بیوسنتز اسانس را افزایش می‌دهد. Tajik Esmaeili (2025) نیز بیان

و آمینواسیدها، تحمل به تنش در گیاه را افزایش می‌دهد (Yin *et al.*, 2016; Hajiboland *et al.*, 2016; Bezerra *et al.*, 2019). گزارش کردند که کاربرد سیلیکون از طریق افزایش پتانسیل آب و محتوای نسبی آب در برگ‌ها، سطح سیلیکون در آن‌ها را افزایش داد و پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه را بهبود بخشید. علاوه بر این، سیلیکون تجمع پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان را در ارقام مقاوم به خشکی و حساس تحت تنش آب افزایش داد. این نتایج حکایت از وجود نقش موثر سیلیکون بر افزایش سطح پرولین یا فعالیت آسکوربات پراکسیداز در حذف گونه‌های فعال اکسیژن داشت. Hameed *et al.*, (2021) بیان کردند که در شرایط تنش با کم شدن تعرق گیاه، در ابتدا چرخه زانتوفیل به منظور جلوگیری از تخریب کلروپلاست فعال شده و مزاد الکترون‌های برانگیخته شده‌ی نشسته از غشای تیلاکوئید را خنثی و به حرارت تبدیل نموده و دمای برگ افزایش می‌یابد. اما با افزایش سطح تنش و مختل شدن چرخه گزانتوفیل مسیر زیست ساخت کاروتنوئیدها متوقف شده و احتمالاً مسیر زیست‌ساخت برخی آنتی‌اکسیدانت‌ها مانند آلفاتوکوفرول و یا اسیدهای آمینه‌ای مانند پرولین فعال می‌شود. کاربرد سیلیکون سبب تقلیل اثرات منفی تنش و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه می‌شود و با افزایش آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و سوپراکسیدپراکسیداز، محتوای کلروفیل را حفظ می‌نماید (Camargo and Keeping, 2021). سیلیکون در سطح برگ از طریق روزنه و یا کرک‌ها وارد گیاه شده و از طریق جریان شیره سلولی به اندام‌های مختلف انتقال می‌یابد و با نفوذ در ساقه و برگ باعث استحکام فیزیکی اندام‌ها می‌شود (Ullah *et al.*, 2025). همچنین فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی، تبادلات گازی و سیستم آنتی‌اکسیدانی را بهبود می‌بخشد که نتیجه آن افزایش کارایی گیاه است (Etesami and Jeong, 2018). با این حال به نظر می‌رسد یکی از دلایل اصلی کاهش آنتی‌اکسیدان‌ها در غلظت بالای سیلیکون (۱۰۰ میلی گرم بر لیتر)، شروع پاسخ فوق حساسیت و سمی شدن سلول‌ها به دلیل ارتباط بیشتر محرک‌ها با آن‌ها و ایجاد اثر بازخوردی و عدم بیان ژن‌های مؤثر باشد (Hazrati Jahan *et al.*, 2017). نتایج مطالعه Ahmad *et al.*, (2019) نشان داد که کاربرد سیلیکون از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش گونه‌های فعال اکسیژن شده و میزان پراکسید هیدروژن (محتوای مالون دی آلدئید) کاهش و پرولین افزایش می‌یابد. زیرا سیلیکون نقشی حیاتی در جذب آب ریشه، هموستاز مواد معدنی و مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی دارد (Hussain *et al.*, 2021; Mostofa *et al.*, 2021).

یکی از اصلی‌ترین سازوکارهایی که تحت آن سیلیکون اثر تنش در گیاهان را کاهش می‌دهد، کمک به تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه

آروماتیک، فعالیت مهارکنندگی رادیکال نشان داده‌اند (Ben Hsouna et al., 2017). ویژگی‌های لیپوفیلیک مونوترپن‌ها می‌تواند به غشاهای سلولی نفوذ کند، سیالیت را افزایش دهد و آنزیم‌های جاسازی شده را مهار کند. همچنین اثر اجزای اصلی اسانس مانند کاروون بر ظرفیت نگهداری آب مشاهده شده است (Mujović et al., 2024). گزارش شده است که اجزای اسانس مانند کاروون و لیمون با حذف رادیکال‌های آزاد و مهار یون‌های فلزی پیش‌اکسیدان، اثرات اکسیدانی را کاهش می‌دهند و در نتیجه ساختار پروتئین را تثبیت کرده و ظرفیت هیدراتاسیون را حفظ می‌کنند (Mujović et al., 2024). کاروون، لیمون و سایر ترپنوئیدها که به دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی خود شناخته شده‌اند، می‌توانند گونه‌های فعال اکسیژن را حذف و از آسیب اکسیداتیو به پروتئین‌ها ممانعت کنند (Mujović et al., 2024).

نتیجه گیری

نتایج آزمایش حاضر نشان داد که بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته و محتوای اسانس در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان مشاهده شد. بیش‌ترین طول ساقه و ریشه، میزان کلروفیل کل، محتوای قندهای احیا و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول به دست آمد. براساس نتایج مقایسه میانگین صفات، بیش‌ترین نسبت کلروفیل a/b به تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت قائنات تعلق داشت. نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که بیش‌ترین محتوای آنتوسیانین و محتوای پرولین در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت دزفول مشاهده شد. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که اسانس شویید دارای ترکیباتی از جمله α -Thujene، α -Pinene، Myrcene، Carvone، α -phellandrene و Limonene بود. Carvone، α -Thujene بیش‌ترین و کم‌ترین ترکیبات موجود در اسانس را نشان دادند. در میان تیمارهای مورد بررسی، تیمار محلول‌پاشی ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان، بیش‌ترین میزان α -Thujene، Myrcene و Limonene را نشان داد. لذا به نظر می‌رسد به دلیل دستیابی به بیش‌ترین بیش‌ترین وزن تر و خشک بوته و محتوای اسانس (و بیش‌ترین میزان α -Thujene، Myrcene و Limonene) در تیمار محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون × جمعیت همدان، کشت جمعیت همدان و محلول‌پاشی غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانو سیلیکون گزینه مناسبی جهت کشت در شرایط محیطی مشابه خواهد بود.

کردند که کاربرد سیلیکون، صفات رشدی و فیتوشیمیایی و محتوای اسانس را افزایش داد. آن‌ها بیان کردند که اجزای اصلی اسانس شناسایی شده شامل کارواکرول، تیمول، لینالول و پاراسیمن بودند. نتایج Rezghiyan et al., (2025) نشان داد که محلول‌پاشی ۱/۵ میلی مولار نانو سیلیکون سبب دستیابی به بیش‌ترین میزان اسانس در گیاه شاهدانه شد. بیش‌ترین میزان کانابیدیول در اسانس نیز در تیمار ۰/۵ میلی مولار نانو سیلیکون به دست آمد. Amiripour et al., (2021) نیز عنوان کردند با افزایش غلظت سیلیکون، عملکرد اسانس افزایش یافت. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که ترکیبات اسانس شویید عبارت بودند از α -Thujene، α -Pinene، Myrcene، Carvone، α -phellandrene و Limonene و بیش‌ترین ترکیب موجود در اسانس نیز Carvone بود. نتایج بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که تغییرات در غلظت و ترکیب اجزای مختلف اسانس را می‌توان به شرایط آب و هوایی و مناطق جغرافیایی مختلف و همچنین متابولیسم، بلوغ و بخشی از گیاه که اسانس از آن استخراج می‌شوند، نسبت داد (Bhatia et al., 2023). علاوه بر این، زمان برداشت، شرایط نگهداری و تکنیک‌های استخراج همگی بر عملکرد و ترکیب روغن ضروری تأثیر می‌گذارند (Jianu et al., 2021). اجزای اصلی در مرحله رویشی آلفا-فلاندرن، لیمون، بتا-فلاندرن و پارا-سیمن هستند و پارا-سیمن، کاروون و اتر شویید به عنوان اجزای اصلی در طول دوره گلدهی شناسایی شدند (Milenković et al., 2024). شویید حاوی طیف وسیعی از ترکیبات اسانس، کاروون، لیمون، اسید چرب، رطوبت، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر، خاکستر و عناصر معدنی مانند کلسیم، پتاسیم، منیزیم، فسفر، سدیم، ویتامین A و نیاسین است (Kaur and Arora, 2010). ترکیب Carvone بیشتر در صنایع غذایی و لبنی کاربرد دارد و علاوه بر آن چندین کاربرد Carvone به عنوان عطر و طعم دهنده، کاربرد در زمینه پزشکی از جمله ضد میکروب (de Carvalho et al., 2006)، ضد سرطان (Islam, 2019) و تنظیم‌کننده سیستم ایمنی (Raphael and Kuttan, 2003) اهمیت این مونوترپن را توجیه می‌کند. همچنین گزارش شده است که Carvone نمی‌تواند در آب حل شود، اما می‌تواند در حلال‌های آلی حل شود. این ترکیب در صنایع طعم‌دهنده، آروماتراپی و خوشبوکننده هوا بسیار ارزشمند است و همچنین دارای خواص ضد قارچی، آنتی‌اکسیدانی و حشره‌کشی و همچنین ضد سرطانی است (Kaur et al., 2021). ترکیبات موجود در اسانس به ویژه کاروون و لیمون می‌توانند با حذف گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد از لیپیدها در برابر اکسیداسیون محافظت کنند (Zolfaghari et al., 2023). اگرچه اسانس فاقد ترکیبات فنلی کلاسیک است، اما فعالیت مهارکنندگی متوسط آن را می‌توان به مونوترپن‌های اکسیژن‌دار مانند کاروون و لیمون نسبت داد که علیرغم نداشتن گروه‌های هیدروکسیل

منابع

- Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alam, P., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., and Ali, S. (2019). Silicon (Si) supplementation alleviates NaCl toxicity in mung bean (*Vigna radiata* L.) through the modifications of physio-biochemical attributes and key antioxidant enzymes. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 70–82.
- Ahmadi, K., and Omid, H. (2018). The effect of drought stress on physiological traits, peroxidase activity and grain yield of five populations of *Lallemantia royleana* Benth. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 34(3), 412–429.
- Alam, T., Jalil, S., Jilani, Gh., Chaudhry, A.N., Ul-Haq, Z., Naz, I., Khan, M.A., Yang, X., Brestic, M., Skalicky, M., and El Sabagh, A. (2025). Enhancing crop resilience to water stress through iron nanoparticles: A critical review of applications and implications. *Plant Stress*, 16, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100905>
- Alharbi, K., Osman, H. S., Rashwan, E., Hafez, E. M., and Omara, A. E. D. (2022). Stimulating the growth, anabolism, antioxidants, and yield of rice plants grown under salt stress by combined application of bacterial inoculants and nano-silicon. *Plants*, 11(24), 3431. <https://doi.org/10.3390/plants11243431>
- Alikhani, S., and Mahmoudi Zarandi, M. (2019). Effect of coinoculation with endomycorrhiza, *Pseudomonas aeruginosa* and *Rhizobium meliloti* on *Medicago sativa* under water stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 32(1), 155–166.
- Amiripour, A., Ghanbari Jahromi, M., Soori, M. K., and Mohammadi Torkashvand, A. (2021). Changes in essential oil composition and fatty acid profile of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves under salinity and foliar-applied silicon. *Industrial Crops and Products*, 168(3), 113599. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113599>
- Asghari, B., Khademian, R., and Sedaghati, B. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition. *Scientia Horticulturae*, 263, 109–132.
- Badem, A., and Söylemez, S. (2022). Effects of nitric oxide and silicon application on growth and productivity of pepper under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*, 34, 102189.
- Bates, L. S., Waldern, R. P., and Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207.
- Ben Hsouna, A., Ben Halima, N., Smaoui, S., and Hamdi, N. (2017). Citrus Lemon Essential Oil: Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activities with Its Preservative Effect against *Listeria Monocytogenes* Inoculated in Minced Beef Meat. *Lipids Health and Disease*, 16: 146.
- Bezerra, B. K. L., Lima, G. P. P., Reis, A. R. D., Silva, M. D. A., and Camargo, M. S. D. (2019). Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- Bhatia, S., Al-Harrasi, A., Jawad, M., Shah, Y.A., Al-Azri, M.S., Ullah, S., Anwer, M.K., Aldawsari, M.F., Koca, E., and Aydemir, L.Y. (2023). A Comparative Study of the Properties of Gelatin (Porcine and Bovine)-Based Edible Films Loaded with Spearmint Essential Oil. *Biomimetics*, 8: 172.
- Camargo, M. S., and Keeping, M. G. (2021). Silicon in sugarcane: Availability in soil, fertilization and uptake. *Silicon*, 13, 3691–3701.
- Chahal, K., Monika, A. K., Bhardwaj, U., and Kaur, R. (2017). Chemistry and biological activities of *Anethum graveolens* L.(dill) essential oil: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(2), 295–306.
- de Carvalho, C.C.C.R., & da Fonseca, M.M.R. (2006). Carvone: Why and how should one bother to produce this terpene. *Food Chemistry*, 95(3): 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.003>
- Emamverdian, A., Ding, Y., Xie, Y., and Sangari, S. (2018). Silicon Mechanisms to Ameliorate Heavy Metal Stress in Plants. *Biomed Research International*, 2018, 8492898. <https://doi.org/10.1155/2018/8492898>
- Etesami, H., and 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.
- Farahani, H., Sajedi, N. A., Madani, H., Changizi, M., and Naeini, M. R. (2021). Effect of foliar-applied silicon on flower yield and essential oil composition of Damask rose (*Rosa damascena* Miller) under water deficit stress. *Springer Nature*.
- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., and Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 138, 111584. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111584>
- Ghorbanpour, M., Asgari Lajayer, H., and Hadian, J. (2016). Influence of copper and zinc on growth, metal accumulation and chemical composition of essential oils in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Medicinal Plants*, 15, 132–144.
- Haghighi, T. M., Saharkhiz, M. J., Kavooosi, G., and Jowkar, A. (2022). Monitoring amino acid profile and protein quality of *Licorice (Glycyrrhiza glabra* L.) under drought stress, silicon nutrition and mycorrhiza inoculation. *Scientia Horticulturae*, 295, 110808.
- Hajiboland, R., Cherghvareh, L., and Dashtebani, F. (2016). Effect of silicon supplementation on wheat plants under salt stress. *Journal of Plant Process and Function*, 5(18), 1–12.
- Hajipour, H., and Jabarzadeh, Z. (2018). Growth and photosynthetic responses of chrysanthemum to foliar application of sodium and calcium silicate. *Journal of plant process and function*, 6(19), 138–129.
- Hameed, A., Ahmed, M.Z., Hussain, T., Aziz, E., Ahmad, N., Gul, B., and Nielsen, B.L. (2021). Effects of Salinity Stress on Chloroplast Structure and Function. *Cells*, 10(8), 2023. <https://doi.org/10.3390/cells10082023>
- Handa, N., Kohli, S. K., Kaur, R., Sharma, N., and Bali, P. (2018). Role of compatible solutes in enhancing antioxidative defense in plants exposed to metal toxicity. In B. B. Dhiman (Ed.), *Plants under metal and metalloid stress: Responses, tolerance and remediation* (pp. 207–228). Springer Nature.

- Hassan, K. M., Ajaj, R., Abdelhamid, A. N., Ebrahim, M., Hassan, I. F., Hassan, F. A. S., Alam-Eldein, Sh. M., and Ali, M. A. A. (2024). Silicon: A powerful aid for medicinal and aromatic plants against abiotic and biotic stresses for sustainable agriculture. *Horticulturae*, 10(8), 806. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080806>
- Hazrati Jahan, R., Zare, N., Dezhsetan, S., and Sheikhzadeh Mosaddeg, P. (2017). Enhanced taxol-precursor. *Journal of System and Management Sciences*, 33, 73–89.
- Hussain, S., Mumtaz, M., Manzoor, S., Shuxian, L., Ahmed, I., Skalicky, M., Brestic, M., Rastogi, A., Ulhassan, Z., Shafiq, I., Suleyman, I., Allakhverdiev, A., Khurshid, H., Yang, W., and Liu, W. (2021). Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 43–52.
- Iqbal, M., Khan, R., Nazir, F., Maheshwari, Ch., Chopra, P., Chhillar, H., and Sreenivasulu, N. (2023). Mineral nutrients in plants under changing environments: A road to future food and nutrition security. *The Plant Genome*, 16(4), e20362. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20362>
- Islam, M.T. (2019). Literature & scientifically carvone is an anticancer agent. *Pharmacologyonline*, 2: 24-30. <https://B2n.ir/d31982>
- Jain, R., Singh, S. P., Singh, A., Singh, S., Tripathi, P., Ram, K., Gaur, A., Jain, N., Shukla, S. K., Chandra, A., and Solomon, S. (2017). Changes in growth, yield, juice quality and biochemical attributes of sugarcane in response to orthosilicic acid granules. *Sugar Tech*, 19(3), 300–304.
- Jain, R., Singh, S. P., Singh, A., Singh, S., Tripathi, P., Ram, K., Gaur, A., Jain, N., Shukla, S. K., Chandra, A., and Solomon, S. (2017). Changes in growth, yield, juice quality and biochemical attributes of sugarcane in response to orthosilicic acid granules. *Sugar Tech*, 19(3), 300–304.
- Jianu, C., Stoin, D., Cocan, I., David, I., Pop, G., Lukinich-Gruia, A.T., Mioc, M., Mioc, A.S., oica, C., and Muntean, D. (2021). In Silico and In Vitro Evaluation of the Antimicrobial and Antioxidant Potential of Mentha × Smithiana R. GRAHAM Essential Oil from Western Romania. *Foods*, 10: 815.
- Kang, X., Zou, Y., Liu, X., Shi, W., Leng, Y., Niu, Z., and Zeng, X. (2026). Silicon Improves Salt Tolerance through Osmotic Adjustment, Enhancing Antioxidant Capacity and Up-Regulating Ions Transporter Genes Expression in *Vigna radiata* L. *Russian Journal of Plant Physiology*, 73(1). <https://doi.org/10.1134/S1021443725605543>
- Kaur, G.J., and Arora, D.S. (2010). Bioactive potential of *Anethum graveolens*, *Foeniculum vulgare* and *Trachyspermum ammi* belonging to the family Umbelliferae. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4: 087–094.
- Kaur, V., Kaur, R., and Bhardwaj, U. (2021). A review on dill essential oil and its chief compounds as natural biocide. *Flavour and Fragrance Journal*, 36: 412–431.
- Kazemi, F. (2002). *Effect of different drying methods and Essential method of obtaining on the essential qualitative and essential oil components Roman chamomile flowers* [Dissertation]. Tarbiat Modares University.
- Khan, A. L. (2025). Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO₂ sequestration. *Journal of Advanced Research*, 71, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>
- Khan, A.L. (2024). Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO₂ sequestration. *J Adv Res*, 71, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.05.027>
- Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., and Lee, I. J. (2017). Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. *Frontiers in Plant Science*, 8, 510. <https://doi.org/doi:10.3389/fpls.2017.00510>
- Krüger, H., and Hammer, K. (1996). A New Chemotype of *Anethum graveolens* L. *Journal of Essential Oil Research*, 8(2), 205–206. <https://doi.org/10.1080/10412905.1996.9700596>
- Kumar, A., Choudhary, A., Kaur, H., Singh, Kh., Guha, S., Choudhary, D. R., Sonkar, A., Mehta, S., and Husen, A. (2025). Exploring the role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management. *Discover Applied Sciences*, 7(5), 406. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06866-w>
- Lichtenthaler, H. K., and Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, F4(1). <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Lord, H., and Pawliszyn, J. (2000). Evolution of solid-phase microextraction technology. *Journal of Chromatography A*, 885(1-2), 153–193.
- Manimaran, G., Duraisamy, S., Subramaniam, T., Rangasamy, A., Alagarsamy, S., James, P., Selvamani, S., Perumal, D., Veerappan, M., Arunan, Y.R., and Periakaruppan, J. (2025). Silicon-driven approaches to salinity stress tolerance: Mechanisms, uptake dynamics, and microbial transformations. *Plant Stress*, 16, 100825. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100825>
- Milenković, L., Ilić, Z.S., Stanojević, L., Danilović, B., Šunić, L., Kevrešan, Ž., Stanojević, J., and Cvetković, D. (2024). Chemical composition and bioactivity of dill seed (*Anethum graveolens* L.) essential oil from plants grown under shading. *Plants*, 13: 886.
- Mosapour Yahyaabadi, H., and Asgharipour, M. R. (2016). Effects of drought stress and its interaction with silicon on stimulates the antioxidant system and lipid peroxidation in Fennel (*Foeniculum vulgare*). *Plant process and function*, 5(16), 71–84.
- Mostofa, M. G., Rahman, M. M., Ansary, M. M. U., Keya, S. S., Abdelrahman, M., Miah, M. G., Phan Tran, L.-S., and Zaynab, Z. (2021). Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(6), 918–934. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>
- Mujović, M., Šojić, B., Peulić, T., Kocić-Tanackov, S., Ikonić, P., Božović, D., Teslić, N., Županjac, M., Novaković, S., and Jakanović, M. (2024). Effects of Dill (*Anethum graveolens*) Essential Oil and Lipid Extracts as Novel Antioxidants and Antimicrobial Agents on the Quality of Beef Burger. *Foods*, 13: 896.
- Mukarram, M., Khan, M., Kurjak, D., Lux, A., and Corpas, F. J. (2023). Silicon nanoparticles (SiNPs) restore photosynthesis and essential oil content by upgrading

enzymatic antioxidant metabolism in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1116769>

Nakano, Y., and Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 22(5), 867-880.

Qin, L., Kang, W., Qi, Y., Zhang, Zh., and Wang, N. (2016). The influence of silicon application on growth and photosynthesis response of salt stressed grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(3). <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2087-9>

Raphael, T.J., & Kuttan, G. (2003). Immunomodulatory activity of naturally occurring monoterpenes carvone, limonene, and perillid acid. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, 25(2): 285-294. <https://doi.org/10.1081/iph-120020476>

Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajhashemi, Sh., Kumari, P., Yang, X., and Brestic, M. (2021). Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...? *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48.

Rezghiyan, A., Esmacili, H., and Farzaneh, M. (2025). Nanosilicon application changes the morphological attributes and essential oil compositions of hemp (*Cannabis sativa* L.) under water deficit stress. *Scientific Reports*, 27(15), 3400. doi:10.1038/s41598-025-87611-6

Rustaiyan, A., Masoudi, S., Ameri, N., Samiee, K., and Monfared, A. (2006). Volatile constituents of *Ballota aucheri* Boiss., *Stachys benthamiana* Boiss. and *Perovskia abrotanoides* Karel. growing wild in Iran. *Journal of Essential Oil Research*, 18(2), 218-221.

Sharma, A., Singh, R. K., Singh, P., Vaishnav, A., Guo, D. -J., Verma, K. K., and Srivastava, R. B. L. (2021). Insights into the bacterial and nitric oxide-induced salt tolerance in sugarcane and their growth-promoting abilities. *Microorganisms*, 9(11), 2203. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112203>

Shayesteh Pahangeh, E., Aliarab, A., Sadati, S.-E., Espahbodi, K., and Karimian, Z. (2022). Effect of soil moisture content on survival, growth, and physiological characteristics of wild cherry (*Prunus avium* L.) seedlings. *Iranian Journal of Forest*, 13, 57-69.

Somogyi, M. (1952). Notes on sugar determination. *Journal of Biological Chemistry*, 195, 19-23.

Tajik Esmacili, S. (2025). Biostimulant effects of silicon-rich horsetail extract on morphological and growth characteristics of *Zataria multiflora*. *Current Applied Sciences*. <https://doi.org/10.22034/cas.2025.228771>

Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., and Rocha, A. M. S. (2022). Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(6), 805-814.

Thakral, V., Bhat, J. A., Kumar, N., Myaka, B., Sudhakaran, S., Patil, G., Sonah, H., Shivaraj, S. M., and Deshmukh, R. (2021). Role of silicon under contrasting biotic and abiotic stress conditions provides benefits for climate smart cropping. *Environmental and Experimental Botany*, 189, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104545>

Trejo-Téllez, L. I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H. F., Ramírez-Olvera, S. M., Bello-Bello, J. J., and Gómez-Merino, F. C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *Peer Journal*, 8(e9224), 1-28.

Ullah, M. S., Mahmood, A., Alawadi, H. F. N., Seleiman, M. F., Khan, B. A., Javaid, M. M., Wahid, A., Abdullah, F., Wasonga, D. O., and Alawadi, H. F. N. (2025). Silicon-mediated modulation of maize growth, metabolic responses, and antioxidant mechanisms under saline conditions. *BMC Plant Biology*, 25(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-06013-4>

Ulloa, M., Nunes-Nesi, A., da Fonseca-Pereira, P., Poblete-Grant, P., Reyes-Díaz, M., and Cartes, P. (2021). The effect of silicon supply on photosynthesis and carbohydrate metabolism in two wheats (*Triticum aestivum* L.) cultivars contrasting in response to phosphorus nutrition. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 236-248. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.022>

Verma, K. K., Song, X. P., Li, D. M., Singh, M., Rajput, V. D., Malviya, M. K., and Li, Y. R. (2020). Interactive role of silicon and plant-rhizobacteria mitigating abiotic stresses: A new approach for sustainable agriculture and climate. [Publication information incomplete; assumed to be a review or research article].

Verma, K. K., Song, X. P., Zeng, Y., Guo, D. J., Singh, M., Rajput, V. D., and Li, Y. R. (2021). Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 582-592.

Vieira-Filho, O., and Monteiro, F.A. (2022). Silicon improves photosynthetic activity and induces antioxidant enzyme activity in *Tanzania guinea* grass under copper toxicity. *Plant Stress*, 3, 100045.

Wagner, G. J. (1979). Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology*, 64(1), 88-93.

Wang, Y., Zhang, B., Jiang, D., Chen, G., and Wang, X. (2019). Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 158, 117-124.

Xu, L., Wang, F., Liu, Y., Wang, M., Chen, X., Wang, E., and Yan, J. (2024). Beneficial elements silicon and calcium can be used as supplements to improve the yield and quality of the *Mentha spicata* L. essential oils. *Industrial Crops and Products*, 214, 118506. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118506>

Yang, L., Wen, K. S., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F., and Wang, Q. (2018). Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules*, 23(4), 762.

Yang, Y., Huang, L., Yu, L., Zhu, F., Chang, J., Li, M., Wang, Sh., Wang, Ch., and Zhan, H. (2025). Silicon Accumulation and Photosynthetic Capacity of *Dendrocalamus brandisii* in Response to Sodium Silicate Foliar Application Across Vegetative Phenological Stages. *Plants*, 14(17), 2624. <https://doi.org/10.3390/plants14172624>

Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., and Deng, X. (2016). Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in

Sorghum bicolor L. *Plant, Cell and Environment*, 39(1), 245–258.

Younis, A. A., Khattab, H., and Emam, M. M. (2020). Impacts of silicon and silicon nanoparticles on leaf ultrastructure and TaPIP1 and TaNIP2 gene expressions in heat stressed wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, 64(1), 343–352.

Yousefi, F., Abdali Mashhadi, A., Lotfi Jalal Abadi, A., Shafeinia, A., Jalily, S. and Soltani, N. (2025). The effect of spraying tryptophan on the physiological characteristics of the periwinkle plant (*Catharanthus roseus* L.) under drought stress. *BMC Plant Biology*, 25, 1782. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12870-025-07831-w>

Yousefi, F., Abdali Mashhadi, A., Lotfi Jalal Abadi, A., Shafeinia, A., Jalily, S. and Soltani, N. (2025). Evaluation

of the expression pattern of TIAs pathway genes in response to Tryptophan amino acid treatment and drought stress in *Catharanthus roseus*. *Plos one*, 20(10), e0333313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333313>

Zahedi, M., and Asadi-Gharneh, H.A. (2024). Essential Oil as Influenced by Foliar Application of Polyamines. *Journal of Medicinal Plants and By-products*. 2: 353-360. https://jmpb.areeo.ac.ir/article_129705.html

Zolfaghari, A., Bazargani-Gilani, B., and Aghajani, N. (2023). Edible Film Based on Corn Zein Containing Dill Extract and Essential Oil/ β -Cyclodextrin Inclusion Complex: Shelf Life Enhancement of Common Carp Fillet. *Food Sciences & Nutrition*. 11: 4275–4288.