

Evaluation of the effect of silicon and nanosilicon on photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence indices of *Satureja rechingeri* Jamzad under drought stress

Elham Sabzian Malai¹, Khodayar Hemmati^{*2}, Hasan Mumivand³

1. Ph.D. Student of Horticultural Science, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: elham_sabzian@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Horticultural Science, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: kh_hemmati@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran. E-mail: mumivand.h@lu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Drought is one of the most important factors restricting agricultural production, which seriously affects crop yield. Water deficit in plants leads to disturbance in physiological processes such as reduction of photosynthesis. Silicon is the second most abundant element in the earth's crust, which plays a role in plant resistance to biotic and abiotic stresses. Therefore, according to the medicinal importance of <i>Satureja rechingeri</i> Jamzad, the objective of this experiment is to investigate the effect of silicon and nanosilicon on leaf length and width traits, photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Satureja rechingeri</i> Jamzad under drought stress.
Article history: Received: 10.30.2023 Revised: 11.20.2023 Accepted: 01.02.2024	Materials and Methods: this experiment was performed as factorial based on the randomized complete design in three replications under greenhouse conditions. The factors include drought stress in three levels of severe stress, medium stress and none stress respectively (50-60, 70-80 and 90-100% of soil moisture based on field capacity) and silicon foliar spraying in five levels (0, 50 and 100 mg/L of silicon, 50 and 100 mg/L of nanosilicon).
Keywords: Irrigation regimes, Photosystem II, Silisium, Silisium nanodioxide	Results: The interaction effect of silicon and drought stress on leaf width, all chlorophyll fluorescence parameters and concentration of photosynthetic pigments except carotenoid was significant ($P<0.05$). The highest amount leaf width was obtained in the treatment of none stress with foliar spraying of 50 mg/l silicon. the highest contents of chl-a and total chlorophyll was obtained in the treatment of nanosilicon 50 mg/L under none stress and the highest amount of chlorophyll b was achieved with the treatment of nanosilicon 50 and silicon 100 mg/L under none stress treatment. The lowest amount of minimal fluorescence (F_0) belonged to the control treatment and the highest amount of maximal fluorescence (F_m) and variable fluorescence (F_v) was observed under medium stress without foliar. Silicon 50, 100 mg/L and nanosilicon 50 mg/L treatments in none stress in addition to zero and 50 mg/L silicon concentrations in medium stress had the highest maximum quantum yield of photosystem II (F_v/F_m). The highest efficiency of water splitting system (F_v/F_0) was observed in silicon 50 mg/L treatment under none stress. The highest electron

transport flux per RC (ET_0/RC) was obtained in the treatment of 100 mg/L nanosilicon in none stress. The highest trapped energy flux per RC (TR_0/RC) and dissipated energy flux per RC (DI_0/RC) were obtained under severe stress without foliar spraying. The highest quantum yield of electron transport (ΦE_0) was observed in control, silicon 50 and 100 mg/L and nanosilicon 50 mg/L treatments under medium stress.

Conclusion: Severe drought stress caused a decrease in photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence indices, and the application of silicon and nanosilicon improved the destructive effects of drought stress on the amount of photosynthetic pigments and fluorescence indices.

Cite this article: Sabzian Malai, Elham, Hemmati, Khodayar, Mumivand, Hasan. 2025. Evaluation of the effect of silicon and nanosilicon on photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence indices of *Satureja rechingeri* Jamzad under drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 32 (1), 1-22.



© The Author(s).

DOI: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثر سیلیکون و نانوسیلیکون بر رنگزه های فتوستتزی و شاخص های فلورسانس کلروفیل مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri* Jamzad) تحت تنش خشکی

الهام سبزیان ملانی^۱، خدایار همتی^{۲*}، حسن موموند^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: elham_sabzian@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: kh_hemmati@gu.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: mumivand.h@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: خشکی یکی از مهم ترین عوامل محدودکننده تولیدات کشاورزی است که به طور جدی عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می دهد. کمبود آب در گیاهان منجر به اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند کاهش فتوستتزی می شود. سیلیکون دومین عنصر فراوان پوسته کره زمین است که در مقاومت گیاه به تنش های زیستی و غیرزیستی نقش دارد. بنابراین با توجه به اهمیت دارویی مرزه رشینگری (<i>Satureja rechingeri</i> Jamzad)، هدف از این پژوهش، بررسی اثر سیلیکون و نانوسیلیکون بر صفات طول و عرض برگ، رنگزه ها و پارامترهای فلورسانس کلروفیل مرزه رشینگری تحت تنش خشکی می باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲	مواد و روش ها: این آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در شرایط گلخانه انجام شد. عامل ها شامل تنش خشکی در سه سطح تنش شدید، متوسط و عدم تنش به ترتیب (۶۰-۵۰، ۸۰-۷۰ و ۱۰۰-۹۰ درصد رطوبت خاک بر پایه ظرفیت زراعی) و محلول پاشی سیلیکون در پنج سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون) بودند.
واژه های کلیدی: رژیم های آبیاری، سیلیسیم، فتوسیستم II، نانودی اکسید سیلیسیم	یافته ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد؛ اثر متقابل سیلیکون و تنش خشکی بر عرض برگ، تمامی پارامترهای فلورسانس کلروفیل و غلظت رنگزه های فتوستتزی به جز کاروتنوئید معنی دار بود ($P < 0.05$). بیشترین مقدار عرض برگ در تیمار عدم تنش با محلول پاشی ۵۰ میلی گرم بر

لیتر سیلیکون به دست آمد. بیشترین محتوای کلروفیل a و کل در تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون در عدم تنش و بیشترین مقدار کلروفیل b با تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون تحت عدم تنش حاصل شد. کمترین مقدار فلورسانس حداقل (F_0) متعلق به تیمار شاهد عدم تنش بود. بیشترین فلورسانس حداکثر (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v) در گیاهان تحت تنش متوسط بدون محلول پاشی تیمارهای سیلیکون مشاهده شد. تیمارهای ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون و ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون تحت تیمار عدم تنش به علاوه غلظت های صفر و ۵۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون در تنش متوسط دارای بالاترین عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m) بودند. با محلول پاشی ۵۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون تحت عدم تنش بیشترین کارایی سامانه تجزیه آب فتوسیستم II (F_v/F_0) حاصل شد. بیشترین میزان انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET_0/RC) در تیمار ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون در عدم تنش به دست آمد. بیشترین میزان گرفتن الکترون و اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش (TR_0/RC)، (DI_0/RC) تحت تنش شدید بدون محلول پاشی حاصل شد و بالاترین عملکرد کوانتومی انتقال الکترون (ΦE_0) در تیمارهای شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون و ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون تحت تنش متوسط مشاهده شد.

نتیجه گیری: تنش شدید خشکی باعث کاهش رنگیزه های فتوستتزی و شاخص های فلورسانس کلروفیل شد. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون اثرات مخرب تنش خشکی بر میزان رنگیزه های فتوستتزی و شاخص فلورسانس را بهبود بخشید.

استناد: سبزیان ملائی، الهام، همتی، خدایار، مومیوند، حسن (۱۴۰۴). بررسی اثر سیلیکون و نانوسیلیکون بر رنگیزه های فتوستتزی و شاخص های فلورسانس کلروفیل مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri* Jamzad) تحت تنش خشکی. نشریه پژوهش های تولید گیاهی، ۳۲ (۱)، ۲۲-۱.

DOI: -----



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

مرزه رشینگری (*Satureja rechingeri* Jamzad) گیاهی چندساله از خانواده نعنائیان (Lamiaceae)، بسیار معطر با قاعده چوبی به ارتفاع ۵۰ سانتی متر و ساقه‌های منشعب، برگ‌های مترکم و متشکل از ۲ تا ۸ گل است. گل‌ها زرد کم‌رنگ و لبه آن ارغوانی است. این گیاه در مناطق خشک، آفتابی و خاک‌های سنگلاخی-آهکی جنوب غرب ایران (استان‌های لرستان، ایلام و خوزستان) به صورت خودرو رشد می‌کند (۱). مرزه رشینگری حاوی اسانس و یک منبع غنی از کارواکرول است. علاوه بر این اسیدهای فنلی آزاد به‌ویژه اسید رزمارینیک در عصاره مرزه در مقادیر قابل توجهی وجود دارند، به همین جهت از فعالیت زیستی قابل توجهی برخوردار است (۲).

باتوجه به محدودیت‌های شدید منابع آبی در اکثر مناطق کشور، در کشور ما تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین تنش تأثیرگذار بر گیاهان زراعی و باغی معرفی شده است (۳). خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولیدات کشاورزی است که به‌طور جدی عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۴). تقریباً ۸۰ تا ۹۵ درصد زیست‌توده تازه گیاه را آب در برمی‌گیرد که نقش حیاتی در رشد و نمو و سوخت‌وساز گیاه بر عهده دارد (۵). کمبود آب در گیاهان منجر به اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند کاهش فتوسنتز و تعرق می‌شود (۶). کمبود آب به‌طور مستقیم از طریق کاهش CO_2 در دسترس و کاهش انتشار آن در روزنه و مزوفیل برگ، باعث کاهش فتوسنتز می‌شود. با این حال با افزایش کمبود آب، عوامل غیرروزنه‌ای مانند فعالیت ریبولوز ۱ و ۵- بیس فسفات و عملکرد کوانتومی نقش مهمی در فرایند جذب فتوسنتزی ایفا می‌کنند (۴). فتوسنتز در مجموعه‌های حاوی آنتن‌های گیرنده نور و مراکز واکنش فتوشیمیایی انجام می‌شود. غالب رنگدانه‌ها

به‌عنوان یک مجموعه آنتن عمل می‌کنند؛ نور را دریافت کرده و انرژی آن را به مجموعه مرکز واکنش منتقل می‌کنند (۷). دستگاه فتوسنتزی انرژی نور را در غشای تیلاکوئید کلروپلاست به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کند. رنگیزه‌های کلروفیل و کاروتنوئید مسئول جذب نور هستند که باعث فتوسنتز می‌شوند (۸). کلروفیل به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین رنگدانه در فتوسنتز می‌تواند منعکس‌کننده وضعیت رشد گیاهان و میزان تنش باشد. محتوای کلروفیل، نسبت کلروفیل a، b و کاروتنوئید تحت تنش خشکی تغییر می‌کند. بنابراین کلروفیل به نوبه خود باعث تغییر در عملکرد فتوسنتزی می‌شود (۹). انرژی نور جذب شده توسط مولکول‌های کلروفیل در هدایت فتوسنتز استفاده می‌شود و انرژی اضافی یا به‌صورت حرارت پراکنده می‌شود یا به‌صورت نور با طول‌موج بلندتر دوباره منعکس می‌شود که به آن فلورسانس کلروفیل می‌گویند. این سه فرآیند در رقابت با هم رخ می‌دهند به‌طوری‌که افزایش بازدهی یکی باعث کاهش عملکرد دو فرآیند دیگر می‌شود (۱۰). فلورسانس کلروفیل شاخص مهم تبدیل انرژی فتوسنتزی در فتوسیستم II کلروپلاست است (۱۱). با افزایش فلورسانس کلروفیل در شرایط تنش خشکی، کارایی فتوسنتز کاهش می‌یابد. بنابراین ارزیابی فلورسانس کلروفیل می‌تواند برای تعیین وضعیت فیزیولوژی گیاه و آسیب به سازوکار فتوسنتزی استفاده شود (۱۲).

استفاده از کودهای سیلیکون به‌عنوان یک رویکرد مهم سازگار با محیط‌زیست شناخته شده است (۱۳). سیلیکون (سیلیسیم) دومین عنصر فراوان پوسته کره زمین است که با وجود این که عنصری ضروری برای گیاه نیست اما در مقاومت گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارد (۱۴). سیلیکون عمدتاً به شکل سیلیکات‌های معدنی و سیلیسیم‌دی‌اکسید (SiO_2) وجود دارد. اما بیش‌تر این اشکال برای گیاه غیرقابل

قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که غلظت‌های پایین نانوسیلیکون (۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) اثر معنی‌داری بر افزایش کلروفیل، فلورسانس کلروفیل، فنل و عملکرد اسانس داشت (۲۴). در پژوهشی دیگر بر روی گیاه آرابیدوپسیس مشخص شد جذب و عمل نانوذرات منحصر از طریق روزنه و جذب خارج سلولی در حفره‌های هوا در مزوفیل اسفنجی برگ اتفاق می‌افتد. هم‌چنین نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در مقایسه با SiO_2 نانو، تیمار با محلول Si(OH)_4 در غلظت‌های بالا برای گیاه تنش‌زا بود و باعث ایجاد کلروز در برگ می‌شود (۲۵). بررسی اثر سیلیکون و نانوسیلیکون در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی مولار بر گوجه گیلاسی (*Solanum lycopersicum* L. cv. Falcato) تحت تنش شوری نشان داد که سیلیکون و نانوسیلیکون باعث بهبود سرعت فتوسنتز، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب گیاه تحت تنش شوری می‌شود (۲۶). تاکنون هیچ مطالعه‌ای در مورد اثر سیلیکون و نانوسیلیکون بر مرزه رشینگری در شرایط تنش خشکی صورت نگرفته است. طی سال‌های گذشته داروهای زیادی از گونه‌ی اندمیک مرزه رشینگری فرموله شده و به بازار عرضه گردیده است، در نتیجه تقاضای روزافزونی برای مواد خام این گیاه وجود دارد. باتوجه به اهمیت دارویی گیاه مرزه رشینگری و بحران کمبود آب در کشور، هدف از این پژوهش مطالعه اثر محلول‌پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون بر صفات طول و عرض برگ، محتوای رنگدانه‌ها و فلورسانس کلروفیل این گیاه تحت تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به صورت گلدانی در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان (واقع در جنوب غربی شهرستان خرم‌آباد با طول جغرافیایی

دسترس هستند. گیاهان می‌توانند سیلیکون را فقط به شکل اسید مونوسیلیسیک (H_4SiO_4) که به طور طبیعی در خاک وجود دارد جذب کنند. اما غلظت آن به بافت خاک، مواد آلی، مواد معدنی، pH و غیره بستگی دارد (۱۵). اسید سیلیسیک توسط ریشه گیاه جذب می‌شود و در آوند چوبی از طریق جریان تعلق به سمت اندام‌های هوایی منتقل می‌شود. در آن‌جا سیلیس به شکل سیلیکای آمورف^۱ ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) رسوب می‌کند (۱۶). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اثرات سودمند سیلیکون با میزان تجمع آن در گیاهان مرتبط است که به طور قابل توجهی بین و درون گونه‌های گیاهی متفاوت است (۱۷). پژوهش‌های انجام شده طی دو دهه گذشته، نشانگر نقش مهم نانوذرات در کشاورزی و صنایع غذایی بوده است (۱۸). نانوذرات دارای اندازه‌ای کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر و حاوی ۲۰ تا ۱۵۰۰۰ اتم هستند (۱۹). نانوسیلیس نسبت به سیلیس غیرنانو دارای نسبت سطح به حجم بیشتر، خواص حرارتی و الکتریکی منحصربه‌فرد و قدرت نفوذپذیری بالاتری در سلول‌های گیاهی است (۲۰). طبق مطالعات پیشین، تنش خشکی منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ و رنگیزه‌های فتوسنتزی در مرزه خوزستانی (*Satureja khuzistanica* Jamzad) شد (۲۱). هم‌چنین تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی فتوسیستم II، افزایش رنگیزه‌های کاروتنوئید، آنتوسیانین و فلورسانس حداقل در شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum*) شد (۲۲). در شرایط تنش خشکی محتوای کلروفیل کل و حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II در گیاه زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) کاهش یافت (۲۳). در پژوهشی اثر غلظت‌های مختلف نانوسیلیکون را بر گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) مورد مطالعه

1- Amorphous

در نهایت میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید برحسب میلی گرم در گرم وزن تر برگ به ترتیب از طریق رابطه های ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه گردید (۲۷).

$$\text{Chl a} = (11.24 A_{662}) - (2.04 A_{645}) \quad (۱)$$

$$\text{Chl b} = (20.13 A_{645}) - (4.19 A_{662}) \quad (۲)$$

$$\text{Total Chl} = (7.05 A_{662}) + (18.09 A_{645}) \quad (۳)$$

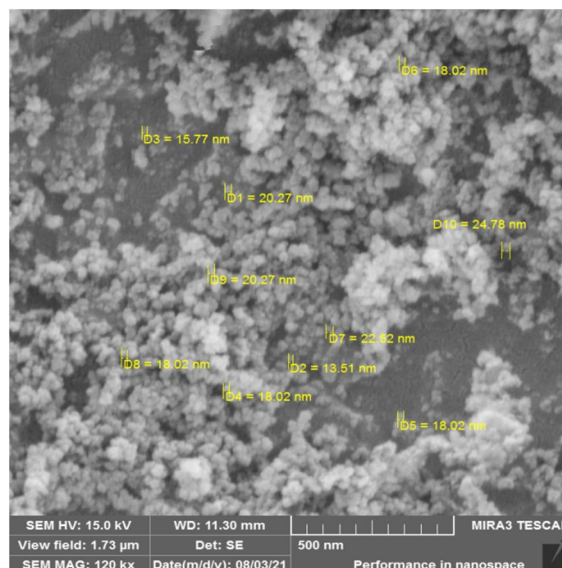
$$\text{Car} = 1000 A_{470} - 1.90 \text{ Chl a} - 63.14 \text{ Chl b} / 214 \quad (۴)$$

سنجش پارامترهای فلورسانس کلروفیل با استفاده از دستگاه فلوریمتر مدل Pocket PEA ساخت شرکت Hansatech انگلستان انجام شد. بدین منظور با استفاده از گیره در برگ های بالغ گیاه (برگ ۷ و ۸) تاریکی ایجاد شد؛ بعد از ۲۰ دقیقه توسط دستگاه، نور قرمز به برگ تابانده شد سپس پارامترهای F_0 (حداقل فلورسانس کلروفیل وقتی تمام مراکز واکنش فتوسیستم II باز هستند)؛ F_m (حداکثر فلورسانس کلروفیل وقتی تمام مراکز واکنش فتوسیستم II بسته هستند)؛ F_v (شدت فلورسانس متغیر)؛ F_v/F_m (حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II)؛ ΦE_0 (عملکرد کوانتومی انتقال الکترون)؛ TR_0/R_c (میزان گرفتن الکترون به ازای هر مرکز واکنش)؛ ET_0/R_c (میزان انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش)؛ DI_0/R_c (میزان اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش) و F_v/F_0 (کارایی سامانه تجزیه آب فتوسیستم II) قرائت شدند. اندازه گیری در ساعت ۱۰-۱۳ انجام شد. جهت سنجش صفات طول و عرض برگ، مقدار طول و عرض ۱۰ عدد برگ بالغ میانی در هر تکرار با استفاده از کولیس اندازه گیری شد و بر حسب میلی متر محاسبه گردید.

۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳ دقیقه و ارتفاع ۱۱۱۷ متر از سطح دریا) انجام شد. فاکتور اول، تنش خشکی به روش وزنی در سه سطح تنش شدید، متوسط و عدم تنش به ترتیب (۵۰-۶۰ درصد، ۷۰-۸۰ درصد و ۹۰-۱۰۰ درصد رطوبت خاک بر پایه ظرفیت زراعی) و فاکتور دوم شامل محلول پاشی سیلیکون در پنج سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون بر حسب میزان SiO_2) بوده است. سیلیکون از منبع سیلیکات پتاسیم از برند آلفا ایسر ساخت کشور آمریکا و نانوسیلیکون از برند US Reaserch آمریکا تهیه شد.

نشاهای مرزه رشینگری از مرکز جهاد دانشگاهی خرم آباد تهیه و به گلدان های پلاستیکی سطلی با قطر دهانه ۱۶/۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۳ سانتی متر حاوی خاک زراعی، ماسه و کود دامی پوسیده به نسبت ۱:۲:۲ منتقل شدند. تا زمان استقرار کامل گیاه به مدت دو ماه، آبیاری به صورت یکسان در همه گلدان ها انجام شد. سپس تنش خشکی بر حسب ظرفیت زراعی و به روش وزنی اعمال شد. اعمال تنش تا زمان گلدهی گیاه ادامه داشت. تیمارهای محلول پاشی الیستورها در سه مرحله: دو روز قبل از شروع اعمال رژیم های مختلف آبیاری براساس سطوح تنش، یک ماه بعد از محلول پاشی اول در مرحله رشد رویشی و در زمان گلدهی اعمال شدند. ده روز بعد از آخرین محلول پاشی، اندازه گیری صفات شروع شد. محتوای رنگیزه های فتوسنتزی به روش لیچنتالر^۱ (۱۹۸۷) اندازه گیری شد. به این منظور ۰/۱ گرم برگ تازه در هاون چینی با ازت مایع ابتدا خرد و سپس با ۱۰ میلی لیتر استون خالص سائیده شد. محلول حاصل به مدت ۱۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفوژ گردید. سپس جذب محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج های ۴۷۰، ۶۶۲ و ۶۴۵ نانومتر قرائت شد.

داده‌ها با نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم گردید.



شکل ۱- تصویر نانو ذرات سیلیکون با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).

Fig. 1. Image of silicon nanoparticles by scanning electron microscope (SEM).

نتایج و بحث

مطابق نتایج این پژوهش، تنش ۷۰ درصد خشکی باعث کاهش طول و عرض برگ در گیاه نعنای سبز (*Mentha spicata*) شد (۲۸). همچنین تنش خشکی طول و عرض برگ را در گیاه پونه‌سای (*Nepeta pogonosperma* Jamzad et Assadi) کاهش داد (۲۹). رشد گیاه در مناطق محدودی از سلول‌ها به نام مریستم فعال است. تقریباً تمام میتوزها و سیتوکینزها در این منطقه اتفاق می‌افتد و باعث افزایش طول سلول می‌شوند. تنش خشکی معمولاً رشد و سوخت‌وساز سلول را در این منطقه تغییر می‌دهد. اولین و مهم‌ترین اثر هر تنش غیرزنده کاهش اندازه برگ است؛ تنش خشکی باعث کاهش رشد سلولی و کاهش تقسیم سلولی می‌شود که در درازمدت با کاهش اندازه سلول‌های بالغ بر اندازه برگ تأثیر می‌گذارد (۳۰). در گیاهان تحت تنش، مقدار و جذب آب کاهش می‌یابد که در رشد برگ اثر می‌گذارد و در نهایت باعث کاهش رشد گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد؛ اثر تنش خشکی در سطح احتمال یک درصد و اثر تیمار سیلیکون در سطح احتمال پنج درصد بر صفات طول و عرض برگ معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل تنش خشکی و سیلیکون در سطح احتمال یک درصد بر عرض برگ معنی‌دار شد اما بر طول برگ اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۱). طبق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین مقدار طول برگ (۱۸/۸ میلی‌متر) در تیمار عدم تنش با محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوسیلیکون حاصل شد و بیش‌ترین مقدار عرض برگ (۱۵/۱ میلی‌متر) در تیمار عدم تنش با محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکون غیر نانو به‌دست آمد. کم‌ترین مقدار طول برگ (۱۴/۹ میلی‌متر) تحت تنش متوسط بدون محلول‌پاشی و کم‌ترین میزان عرض برگ (۱۲/۱۲ میلی‌متر) تحت تنش شدید بدون محلول‌پاشی مشاهده شد (شکل‌های ۲ و ۳).

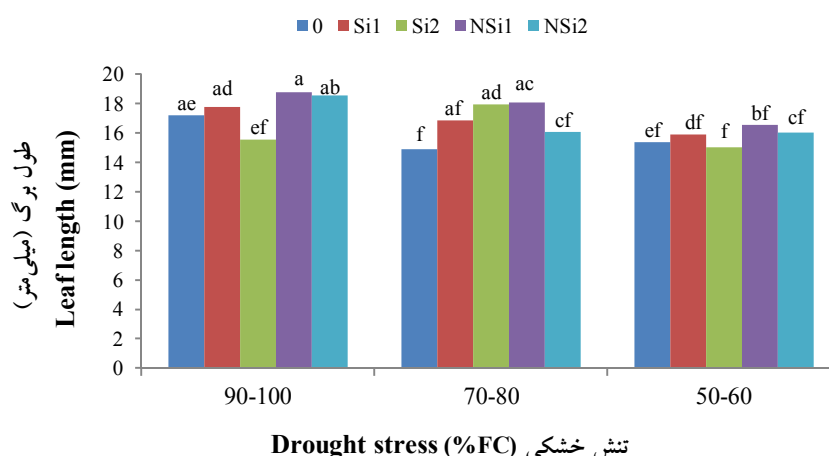
می‌شود (۱۳). سیلیکون با ایجاد یک لایه دوگانه سیلیکا-کوتیکول روی اپیدرم برگ منجر به افزایش سفتی دیواره سلولی، کاهش سرعت ترق و حفظ توژسانس برگ می‌شود (۳۱). سیدلر فاطمی و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که سیلیکون باعث افزایش سطح برگ در توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa* Duch cv "selva") تحت تنش شوری شد (۳۲). در پژوهشی مشخص شد که نانوسیلیکون باعث افزایش سطح برگ در خیار (*Cucumis sativus* L.) در شرایط تنش خشکی می‌شود (۳۳).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و سیلیکون بر طول و عرض برگ و رنگ‌های فتوسنتزی مرزه رشینگری.

Table 1. Variance analysis of the effect of drought stress and silicon on leaf length and width photosynthetic Pigments of *Satureja rechingeri*.

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی DF	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid
خشکی Drought	2	12.12**	4.29**	0.085*	0.005 ^{ns}	0.10*	0.0015 ^{ns}
سیلیکون Silicon	4	5.25*	2.54*	0.085**	0.015**	0.17**	0.009*
سیلیکون × خشکی Drought × Silicon	8	3.08 ^{ns}	2.32**	0.064**	0.01*	0.13**	0.004 ^{ns}
خطا Error	30	1.58	0.7	0.016	0.003	0.029	0.0031
ضریب تغییرات CV (%)		7.52	6.32	8.34	10.93	8.12	13.14

^{ns}, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد
^{ns}, * and ** non-significant, significant at P<0.05 and P<0.01, respectively

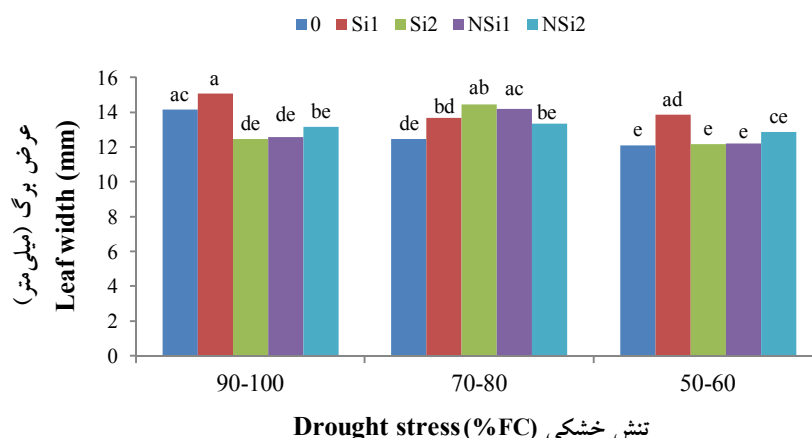


شکل ۲- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر طول برگ مرزه رشینگری.

Fig. 2. Interaction of Silicon and drought on leaf length of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P<0.05$).



شکل ۳- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر عرض برگ مرزه رشینگری.

Fig. 3. Interaction of Silicon and drought on leaf width of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

مقادیر کلروفیل کل (۲/۴۸ میلی گرم در گرم وزن تر) و کلروفیل a (۱/۸۲ میلی گرم در گرم وزن تر) تحت تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون در شرایط عدم تنش حاصل شد. بیشترین محتوای کلروفیل b با کاربرد ۵۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون (۰/۶۱ میلی گرم در گرم وزن تر) و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون (۰/۶۱ میلی گرم در گرم وزن تر) تحت تیمار عدم تنش به دست آمد. بیشترین مقدار کاروتنوئید (۰/۴۹ میلی گرم در گرم وزن تر) مربوط به غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون تحت تنش شدید خشکی بود. کمترین مقدار کلروفیل کل (۱/۶۸ میلی گرم در گرم وزن تر)، کلروفیل a (۱/۲۵ میلی گرم در گرم وزن تر)، کلروفیل b (۰/۴ میلی گرم در گرم وزن تر) و کاروتنوئید (۰/۳۵ میلی گرم در گرم وزن تر) در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیس در تنش متوسط مشاهده شد (جدول ۲).

طبق نتایج تجزیه واریانس، اثر تنش خشکی بر کلروفیل کل و a در سطح احتمال پنج درصد معنی دار گردید. اما بر کلروفیل b و کاروتنوئید اثر معنی داری نداشت. اثر تیمار سیلیکون بر کلروفیل کل، a و b در سطح احتمال یک درصد و بر محتوای کاروتنوئید در سطح احتمال پنج درصد معنی دار شد. همچنین اثر متقابل خشکی و سیلیکون بر کلروفیل کل و a در سطح احتمال یک درصد و بر کلروفیل b در سطح احتمال پنج درصد معنی دار شد درحالی که اثر متقابل سیلیکون و تنش خشکی بر محتوای کاروتنوئید معنی دار نشد (جدول ۱). جدول مقایسه میانگین نشان داد که تنش متوسط خشکی باعث افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در مرزه رشینگری شد اما با افزایش شدت تنش، مقدار آن‌ها کاهش پیدا کرد. در گیاهان تحت عدم تنش و تنش شدید خشکی، محلول‌پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون افزایش محتوای رنگیزه‌ها را به دنبال داشت. به‌طوری که بیشترین

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سیلیکون و تنش خشکی بر رنگزه‌های فتوسنتزی مرزه رشینگری.

Table 2. Mean comparison of the effect of drought stress and silicon on photosynthetic Pigments of *Satureja rechingeri*.

کاروتنوئید Carotenoid (mg/g F.W)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg/g F.W)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg/g F.W)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg/g F.W)	سیلیکون Silicon (mg/l)	تنش خشکی Drought
0.39 ^{bd}	2.05 ^{be}	0.49 ^{cd}	1.51 ^{be}	سیلیکون صفر Silicon0	عدم تنش FC 100%
0.38 ^{bd}	2.03 ^{ce}	0.51 ^{bc}	1.49 ^{be}	سیلیکون ۵۰ Silicon50	
0.47 ^{ab}	2.31 ^{ac}	0.61 ^a	1.64 ^{ab}	سیلیکون ۱۰۰ Silicon100	
0.4 ^{ad}	2.48 ^a	0.61 ^a	1.81 ^a	نانوسیلیکون ۵۰ Nanosilicon50	
0.41 ^{ad}	2.11 ^{be}	0.51 ^{bc}	1.55 ^{bd}	نانوسیلیکون ۱۰۰ Nanosilicon100	
0.46 ^{ac}	2.3 ^{ac}	0.59 ^{ab}	1.65 ^{ab}	سیلیکون صفر Silicon0	تنش متوسط FC 70%
0.43 ^{ad}	2.24 ^{ac}	0.53 ^{ac}	1.65 ^{ab}	سیلیکون ۵۰ Silicon50	
0.46 ^{ac}	2.22 ^{ac}	0.52 ^{ac}	1.65 ^{ab}	سیلیکون ۱۰۰ Silicon100	
0.44 ^{ac}	2.23 ^{ac}	0.53 ^{ac}	1.65 ^{ab}	نانوسیلیکون ۵۰ Nanosilicon50	
0.35 ^d	1.68 ^f	0.4 ^d	1.5 ^f	نانوسیلیکون ۱۰۰ Nanosilicon100	
0.37 ^{cd}	1.87 ^{ef}	0.51 ^{ac}	1.31 ^{ef}	سیلیکون صفر Silicon0	تنش شدید FC 50%
0.47 ^{ab}	2.32 ^{ab}	0.59 ^{ab}	1.63 ^{ab}	سیلیکون ۵۰ Silicon50	
0.49 ^a	2.18 ^{bd}	0.52 ^{ac}	1.61 ^{ac}	سیلیکون ۱۰۰ Silicon100	
0.39 ^{bd}	1.88 ^{ef}	0.48 ^{cd}	1.36 ^{df}	نانوسیلیکون ۵۰ Nanosilicon50	
0.41 ^{ad}	1.9 ^{df}	0.44 ^{cd}	1.41 ^{cf}	نانوسیلیکون ۱۰۰ Nanosilicon100	

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$)

برگ‌ها ممکن است مستقیماً به دلیل تخریب کلروفیل ناشی از خشکی باشد. به علاوه خشکی جذب عناصر غذایی را برای گیاه دشوار می‌کند که کمبود عناصر بروز علائم کاهش کلروفیل را به دنبال دارد (۴).

همانند نتایج این پژوهش گزارش‌هایی وجود دارد که افزایش شدت تنش خشکی باعث کاهش رنگزه‌های فتوسنتزی در مرزه خوزستانی، مفراح و آویشن باغی شد (۳۴، ۳۵ و ۳۶). کاهش کلروفیل در

نتایج این پژوهش نشان داد؛ محلول پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون از کاهش رنگیزه‌ها در تنش شدید خشکی جلوگیری کرد این در حالی است که غلظت‌های سیلیکون غیرنانو نسبت به نانوسیلیکون عملکرد بالاتری در شرایط تنش شدید داشتند. اثر افزایش سیلیکون بر رنگیزه‌های فتوسنتزی در گاوزبان اروپایی تحت تنش خشکی، نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند (۳۹). سیلیکون در شرایط تنش خشکی با افزایش تبدلات گازی، بهبود وضعیت H_2O و کاهش سطح ROS باعث بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (۴۰). نتایج تجزیه واریانس نشان داد؛ اثر تنش خشکی و سیلیکون در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل سیلیکون و تنش خشکی در سطح احتمال پنج درصد بر شاخص فلورسانس حداقل (F_0) معنی‌دار شد (جدول ۳).

افزایش کلروفیل در تنش متوسط را می‌توان به مقاوم بودن گیاه ربط داد. در بررسی ۱۳ رقم گندم، مشخص شد که سطح کلروفیل ارقام حساس گندم تحت تنش خشکی کاهش یافت، درحالی‌که میزان کلروفیل ارقام گندم مقاوم هم‌چنان حفظ شد (۳۷). هم‌چنین دستوران و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که تنش خشکی باعث افزایش محتوای کلروفیل در گل‌گاوزبان (*Borago officinalis* L.) شد. آن‌ها دلیل این امر را به کاهش سطح برگ و افزایش دریافت تشعشعات خورشید نسبت دادند (۳۸). رستمی و همکاران (۲۰۱۸) علت افزایش کلروفیل در تنش ملایم خشکی در گیاه نعنای سبز (*Mentha spicata*) را افزایش وزن مخصوص برگ دانستند به‌طوری‌که تنش ملایم با کاهش سطح برگ باعث تجمع سلول‌های بیش‌تری در برگ شده و افزایش غلظت کلروفیل را سبب می‌شود (۲۸).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و سیلیکون بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل مرزه رشینگری.

Table 3. Variance analysis of the effect of drought stress and silicon on chlorophyll fluorescence indices of *Satureja rechingeri*.

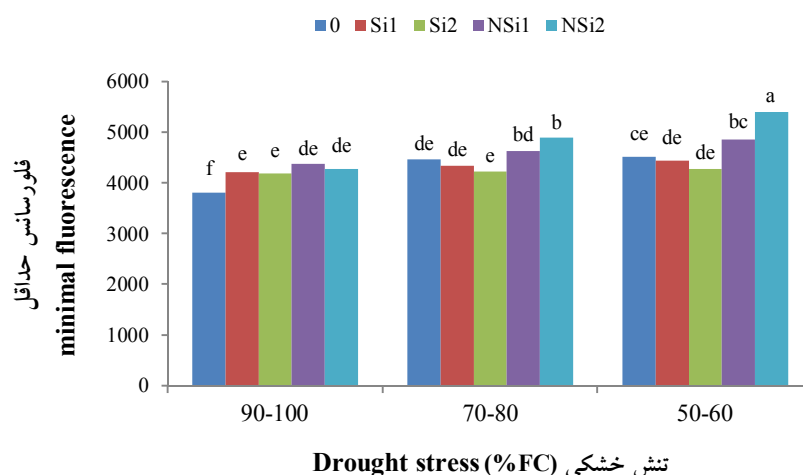
منابع تغییرات Sources of variations	DF	درجه آزادی	فلورسانس حداقل	Fm	فلورسانس متغیر	Fv	عملکرد کوانتومی فتوسنتز II	Fv/Fm	کارایی سامانه تجزیه آب	Fv/F ₀	انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش	ETo/RC	عملکرد کوانتومی انتقال الکترون	ΦE_0	اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش	Dio/RC	گرفتن الکترون به ازای هر مرکز واکنش	TRo/RC
خشکی Drought	2		1055306**	59048676**	80401116**	0.007**	8.3**	0.05**	0.005**	0.07**	0.197**							
سیلیکون Silicon	4		658032.4**	13274788**	8567724*	0.0005 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.02**	0.001 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.03*							
سیلیکون × خشکی Drought × Silicon	8		141802*	13400202**	10263026**	0.001**	0.8**	0.01**	0.002**	0.013**	0.023**							
خطا Error	30		51891.1	2490990	2262728	0.0002	0.123	0.002	0.0006	0.0037	0.009							
ضریب تغییرات CV (%)			5.1	5.8	6.6	1.68	6.9	4.5	26.9	8.87								

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** non-significant, significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively

فلورسانس حداقل (۵۴۰۸) در تیمار نانوسیلیس ۱۰۰ تحت تنش شدید خشکی مشاهده شد و کمترین مقدار این شاخص (۳۸۱۷) در تیمار شاهد بود (شکل ۴).

طبق نتایج مقایسه میانگین، تنش خشکی باعث افزایش فلورسانس حداقل (F_0) در مرزه رشینگری شد. محلول پاشی هیچ کدام از تیمارها باعث کاهش معنی دار این شاخص نشد. بیشترین مقدار شاخص



شکل ۴- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر فلورسانس حداقل (F_0) مرزه رشینگری.

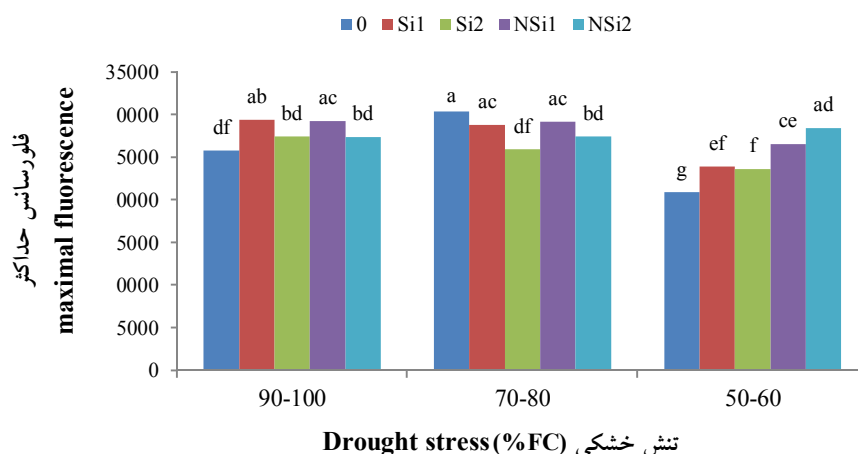
Fig. 4. Interaction of Silicon and drought on minimal fluorescence of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) می باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

شدند. جدول مقایسه میانگین نشان داد که بین تیمارهای نانوسیلیس و سیلیکون غیرنانو در گیاهان تحت تنش شدید، اختلاف معنی داری وجود دارد به طوری که هر دو غلظت نانوسیلیکون به خصوص غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون نسبت به سیلیکون غیرنانو عملکرد بالاتری داشتند. بیشترین مقدار شاخص F_m (۳۰۳۸۳) و شاخص F_v (۲۵۹۲۰) در تنش متوسط بدون محلول پاشی مشاهده شد و کمترین مقدار شاخص F_m (۲۰۹۴۰) و شاخص F_v (۱۶۴۲۲) در تنش شدید خشکی بدون محلول پاشی حاصل شد (شکل های ۵ و ۶).

اثر تنش خشکی و سیلیکون و اثر متقابل خشکی و سیلیکون در سطح احتمال یک درصد بر شاخص فلورسانس حداکثر (F_m) معنی دار شد. همچنین شاخص فلورسانس متغیر (F_v) در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر معنی دار فاکتور تنش خشکی و اثر متقابل تنش خشکی و سیلیکون و در سطح احتمال پنج درصد تحت تأثیر معنی دار سیلیکون قرار گرفت (جدول ۳). تنش متوسط خشکی افزایش فلورسانس حداکثر (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v) را در پی داشت اما تنش شدید مقدار آن ها را کاهش داد. محلول پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون باعث افزایش شاخص های F_v و F_m در گیاهان تحت تنش شدید و عدم تنش

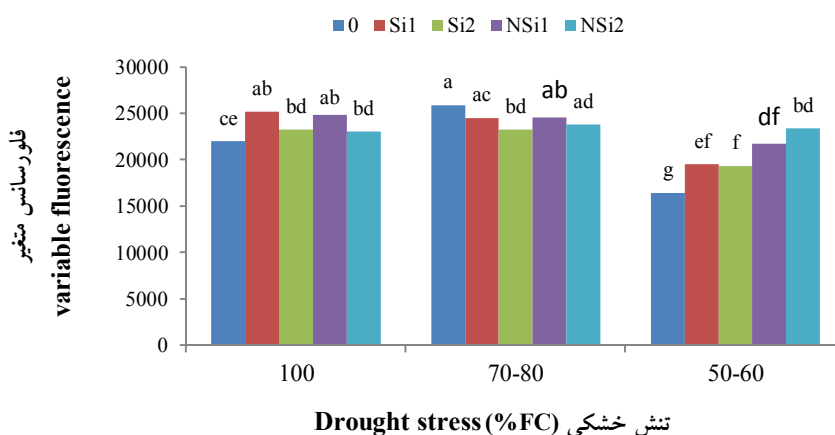


شکل ۵- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر فلورسانس حداکثر (F_m) مرزه رشینگری.

Fig. 5. Interaction of Silicon and drought on maximal fluorescence (F_m) of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).



شکل ۶- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر فلورسانس متغیر (F_v) مرزه رشینگری.

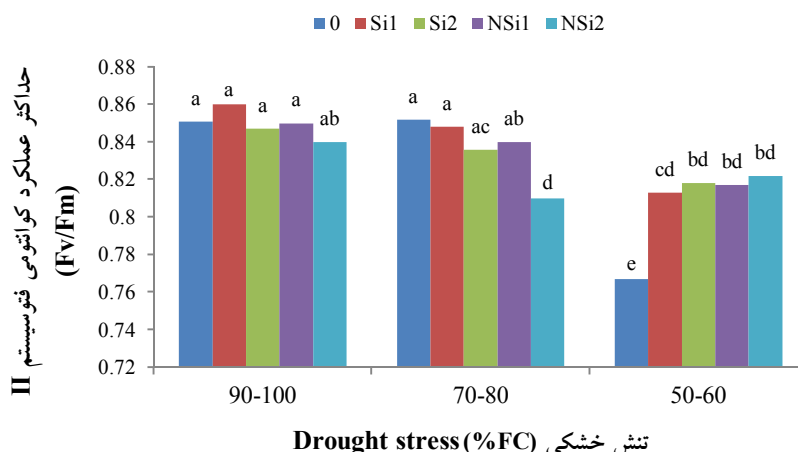
Fig. 6. Interaction of Silicon and drought on variable fluorescence of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

میزان شاخص F_v/F_m (۰/۷۷) در تیمار تنش شدید خشکی بدون محلول‌پاشی به دست آمد و بیش‌ترین مقدار این شاخص (۰/۸۶) با محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکون تحت شرایط عدم تنش حاصل شد (شکل ۷).

اثر تیمار خشکی و اثر متقابل خشکی و سیلیکون در سطح احتمال یک درصد بر شاخص حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m) معنی‌دار شد. تنش شدید خشکی شاخص F_v/F_m را به شدت کاهش داد. محلول‌پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون عملکرد آن را تا حد زیادی بهبود بخشید. کم‌ترین



شکل ۷- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) مرزه رشینگری.

Fig. 7. Interaction of Silicon and drought on maximum quantum yield of photosystem II (Fv/Fm) of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) می باشند.

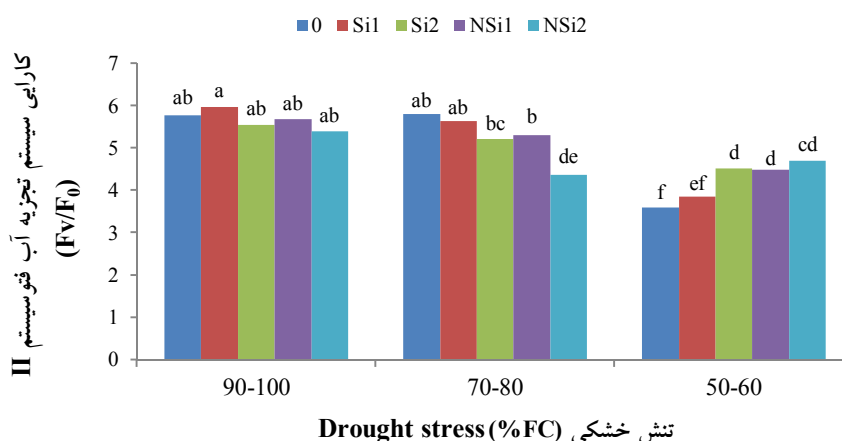
Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

II را نشان می دهد (۴۴). گزارش هایی از کاهش F_m ، F_v ، F_v/F_m و افزایش F_0 تحت تنش خشکی در شنبلیله، لوبیا و لوبیا چیتی وجود دارد (۲۲، ۴۵ و ۴۶). در پژوهشی گزارش کردند که سیلیکون باعث افزایش F_m ، F_0 و F_v/F_m در دانه رست های برنج شد (۴۷). نتایج بررسی های دیگر نشان داد که محلول پاشی سیلیکون باعث افزایش F_v/F_m در گوجه فرنگی و نیشکر تحت تنش خشکی شد که با نتایج ما مطابقت دارد (۴۸ و ۴۹). اثر تنش خشکی و اثر متقابل خشکی و سیلیکون در سطح احتمال یک درصد بر شاخص کارایی سامانه تجزیه آب فتوسیستم II (F_v/F_0) و شاخص عملکرد کوانتومی انتقال الکترون (ΦE_0) معنی دار شد (جدول ۳). طبق نتایج مقایسه میانگین، تنش شدید خشکی باعث کاهش معنی دار F_v/F_0 و ΦE_0 شد. استفاده از سیلیکون و نانوسیلیکون باعث افزایش این شاخص ها شد (شکل های ۵ و ۶). بیش ترین مقدار شاخص F_v/F_0 (۵/۹۷) در تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون تحت عدم تنش و کم ترین مقدار این شاخص (۳/۵۹) در گیاهان شاهد تنش

فتوسیستم II در مقایسه با فتوسیستم I مقاومت بالایی به کمبود آب دارد و اثرات منفی آن تنها در شرایط تنش بالای خشکی رخ می دهد (۴۱). کاهش فلورسانس حداکثر (F_m) و افزایش فلورسانس حداقل (F_0) در شرایط تنش بیانگر اختلال در دریافت نور در فتوسیستم II است (۴۲). کاهش فلورسانس حداکثر در تنش شدید خشکی نشان دهنده افزایش خاموشی غیرفوتوشیمیایی به صورت گرما می باشد (۴۳). علت افزایش فلورسانس حداقل، احتمالاً مهار مرکز واکنش فتوسیستم II است که از جریان الکترون از پذیرنده کوئینون A به کوئینون B جلوگیری می کند و کارایی به دام انداختن انرژی در فتوسیستم II را کاهش می دهد. کاهش شاخص حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (F_v/F_m) از ویژگی های رویدادهای خشکی است. در این شرایط فیزیولوژیکی، سازکارهای حفاظتی تحت تأثیر کمبود آب قرار می گیرند و منجر به آسیب به غشا می شوند. کاهش در F_v/F_m به معنی کاهش کارایی فرآیند تبدیل فوتوشیمیایی است که آسیب و مهار فعالیت فتوسیستم

شاخص (۰/۴۹) در محلول‌پاشی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو سیلیکون تحت تنش متوسط مشاهده شد (شکل ۹).

شدید خشکی مشاهده شد (شکل ۸). بیش‌ترین میزان شاخص عملکرد کوانتومی انتقال الکترون (۰/۵۸) با محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکون تحت تنش متوسط به‌دست آمد و کم‌ترین مقدار این

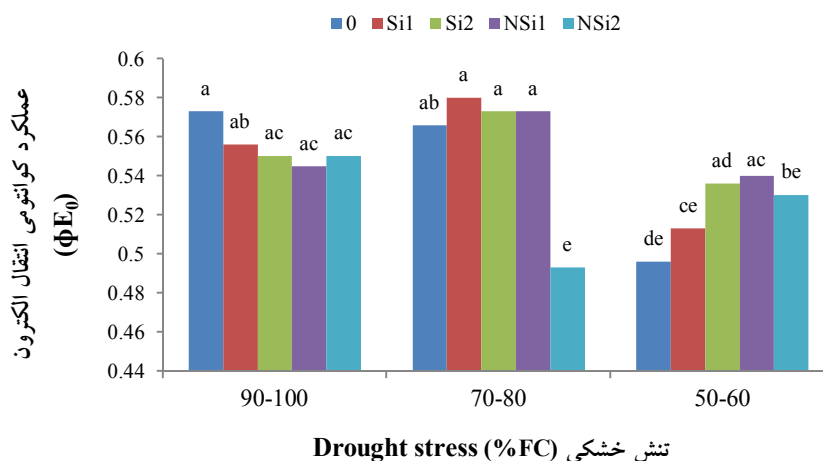


شکل ۸- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر کارایی سامانه تجزیه آب فتوسیستم II (F_v/F_0) مرزه رشینگری.

Fig. 8. Interaction of Silicon and drought on efficiency of water splitting system of photosystem II (F_v/F_0) of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).



شکل ۹- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر عملکرد کوانتومی انتقال الکترون (ΦE_{0s}) مرزه رشینگری.

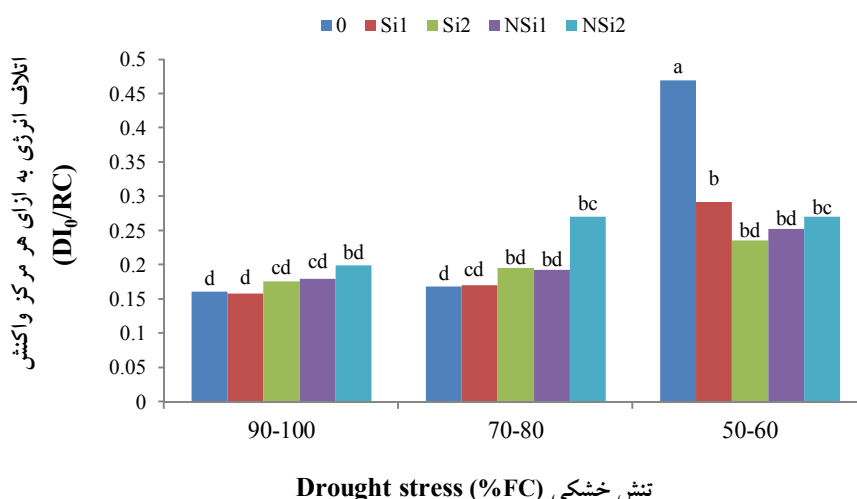
Fig 9. Interaction of Silicon and drought on quantum yield of electron transport (ΦE_{0s}) of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

(DI₀/RC) را تحت تنش شدید کاهش دادند. بیشترین میزان شاخص DI₀/RC (۰/۴۷) در تنش شدید خشکی بدون محلولپاشی مشاهده شد و کمترین مقدار این شاخص (۰/۱۵۸) در تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون در گیاهان تحت عدم تنش مشاهده شد (شکل ۱۰). بیشترین میزان شاخص ET₀/RC (۰/۸۵) با محلولپاشی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانوسیلیکون و کمترین مقدار این شاخص (۰/۶) در تیمار ۵۰ میلی گرم بر لیتر سیلیکون در عدم تنش حاصل شد (شکل ۱۱). بیشترین میزان شاخص TR₀/RC (۱/۳۲) در تنش شدید خشکی بدون محلولپاشی به دست آمد (شکل ۱۲).

طبق نتایج تجزیه واریانس، اثر تنش خشکی و اثر متقابل خشکی و سیلیکون بر شاخصهای افزایش اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش (DI₀/RC)، میزان انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET₀/RC) و میزان گرفتن الکترون به ازای هر مرکز واکنش (TR₀/RC) در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد، تنش شدید خشکی باعث افزایش اتلاف انرژی، میزان انتقال الکترون و همچنین میزان گرفتن الکترون به ازای هر مرکز واکنش شد (شکل های ۷، ۸ و ۹). تمام غلظت های سیلیکون و نانوسیلیکون تا حد زیادی مقدار شاخص اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش

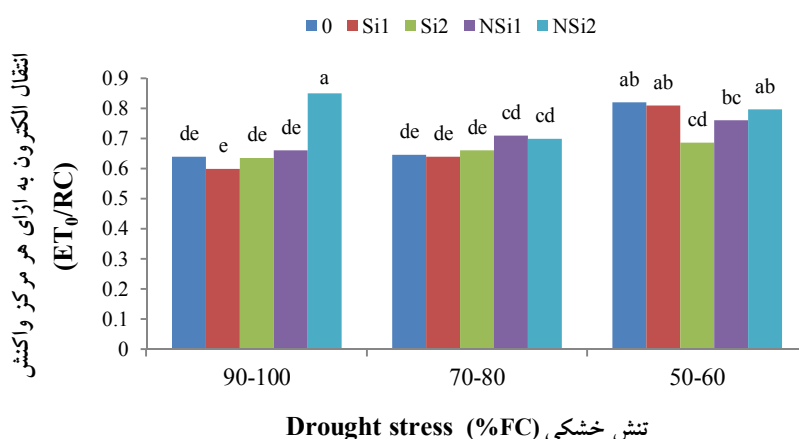


شکل ۱۰- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر میزان اتلاف انرژی به ازای هر مرکز واکنش (DI₀/RC) مرزه رشینگری.

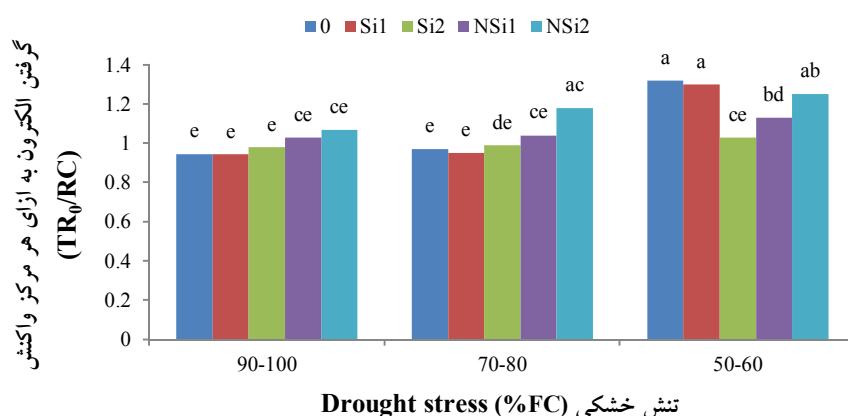
Fig. 10. Interaction of Silicon and drought on Dissipated energy flux per RC (DI₀/RC) of *Satureja rechingeri*.

حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) می باشند.

Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).



شکل ۱۱- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر میزان انتقال الکترون به ازای هر مرکز واکنش (ET_0/RC) مرزه رشینگری.
Fig. 11. Interaction of Silicon and drought on Electron transport flux per RC (ET_0/RC) of *Satureja rechingeri*.
 حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.
 Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).



شکل ۱۲- اثر متقابل سیلیکون و خشکی بر میزان گرفتن الکترون به ازای هر مرکز واکنش (TR_0/RC) مرزه رشینگری.
Fig. 12. Interaction of Silicon and drought on Trapped energy flux per RC (TR_0/RC) of *Satureja rechingeri*.
 حروف مشابه در هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) می‌باشند.
 Similar letter in each column denote nonsignificance ($P < 0.05$).

الکترون فتوستتزی می‌باشد. افزایش TR_0/RC نشان‌دهنده مهار اکسیداسیون مجدد کوئینون^۱ A است که نمی‌تواند الکترون‌ها را به کوئینون B منتقل کند. در نتیجه باعث افزایش اتلاف انرژی می‌گردد (۹). با توجه به این‌که ET_0/RC فقط براساس انتقال الکترون در مراکز فعال واکنش بیان می‌شود بنابراین افزایش آن

کارایی سیستم تجزیه آب فتوسیستم II شاخص بسیار حساسی از پتانسیل فتوستتزی در گیاهان تحت تنش است. کاهش این پارامتر نشان‌دهنده تحت‌تأثیر قرار گرفتن کارایی فتوستتزی و زنجیره انتقال الکترون است (۵۰). فلورسانس کلروفیل از تغییر در حالت اکسیداسیون-احیا در پذیرنده کوئینون اولیه ناشی می‌شود و منعکس‌کننده کاهش در زنجیره انتقال

1- Quinone

کربوکسیلاز و تجمع فسفر غیر آلی در برگ‌ها نسبت داد (۳۷).

نتیجه‌گیری کلی

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تنش متوسط افزایش یافت اما تنش شدید خشکی باعث کاهش آن شد. تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون این کاهش را جبران کرد. تنش شدید خشکی افزایش معنی‌دار فلورسانس حداقل، اتلاف انرژی و گرفتن الکترون به‌ازای هر مرکز واکنش را به‌دنبال داشت. محلول‌پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون باعث بهبود این صفات شدند. همچنین تنش شدید خشکی باعث کاهش معنادار فلورسانس حداکثر و فلورسانس متغیر، کارایی سامانه تجزیه آب، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II و عملکرد کوانتومی انتقال الکترون شد. تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون مقدار این پارامترها را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند.

نشان‌دهنده افزایش مراکز غیرفعال است و کوئینون A نمی‌تواند الکترون را به‌صورت کارآمد به کوئینون B منتقل کند، بنابراین میزان آن افزایش یافته اما عملکرد الکترون کاهش یافته است (۴۵). در جریان برانگیختگی کلروفیل، خاموش شدن غیر فتوشیمیایی الکترون برانگیخته بر خاموش شدن فتوشیمیایی الکترون برانگیخته غلبه می‌کند و از این‌رو، عملکرد کوانتومی فتوسنتز کاهش و تلفات انرژی به شکل نور و گرما افزایش می‌یابد (۴۱). گزارش شده است که تنش دمایی بالا شاخص‌های ET_0/RC ، TR_0/RC و DI_0/RC را در گندم افزایش داد (۵۱).

بهبود عملکرد فتوسنتزی با کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت خشکی را می‌توان به عوامل متعددی از جمله بهبود رنگدانه‌های فتوسنتزی، ویژگی‌های تبادلات گازی، افزایش پتانسیل آب، کاهش تنش اکسیداتیو و کاهش خسارت به کلروپلاست، کاهش محدودیت روزنه‌ها، پایداری کلروفیل، افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو، فعالیت آنزیم فسفوانول پیروات

منابع

1. Jamzad, Z. (2009). Thymus and Satureja species of Iran. *Research Institute of Forest and Rangelands*. 171p. [In Persian]
2. Hadian, J., Akramian, M., Heydari, H., Mumivand, H., & Asghari, B. (2012). Composition and in vitro antibacterial activity of essential oils from four *Satureja* species growing in Iran. *Natural product research*, 26 (2), 98-108.
3. Kafi, M., Borzooee, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A., & Nabati, J. (2009). Physiology of environmental stresses in plants. Jahad Daneshgahi Mashhad Press. [In Persian]
4. Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7 (3), 50.
5. Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10 (2), 259.
6. Said-Al, A., Omer, E. A., & Naguib, N. Y. (2009). Effect of water stress and nitrogen fertilizer on herb and essential oil of oregano (*Origanum vulgare* L.). *International Agrophysics*, 23, 269-275.
7. Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (No. Ed. 6). Sinauer Associates Incorporated.
8. Yamori, W. (2016). Photosynthesis and respiration. In *Plant factory* (pp. 141-150). Academic Press.

9. Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R. & Li, M. (2021). Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 280, 109933.
10. Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of experimental botany*, 51 (345), 659-668.
11. Mareckova, M., Bartak, M., & Hajek, J. (2019). Temperature effects on photosynthetic performance of Antarctic lichen *Dermatocarpon polyphyllizum*: a chlorophyll fluorescence study. *Polar Biol.* 42 (4), 685-701.
12. Zhang, H., Hu, H., Zhang, X., Wang, K., Song, T., & Zeng, F. (2012). Detecting Suaeda salsa L. chlorophyll fluorescence response to salinity stress by using hyperspectral reflectance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 581-588.
13. 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.
14. Laane, H. M. (2018). The effects of foliar sprays with different silicon compounds. *Plants*, 7 (2), 45.
15. Tubana, B. S., & Heckman, J. R. (2015). Silicon in soils and plants. *Silicon and plant diseases*, 7-51.
16. Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S. A., & Abbas, F. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 15416-15431.
17. Yan, G. C., Nikolic, M., YE, M. J., Xiao, Z. X., & Liang, Y. C. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (10), 2138-2150.
18. Maswada, H. F., Mazrou, Y. S., Elzaawely, A. A., & Eldein, S. M. A. (2020). Nanomaterials. Effective tools for field and horticultural crops to cope with drought stress: A review. *Spanish journal of agricultural research*, 18 (2), 15.
19. Liu, W. T. (2006). Nanoparticles and their biological and environmental applications. *Journal of bioscience and bioengineering*, 102 (1), 1-7.
20. Mathur, P., & Roy, S. (2020). Nanosilica facilitates silica uptake, growth and stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 157, 114-127.
21. Shariat, A., Karimzadeh, G., Assareh, M. H., & Hadian, J. (2017). Variations of physiological indices and metabolite profiling in *Satureja khuzistanica* in response to drought stress. *Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research*, 25 (2), 232-246. [In Persian]
22. Baghbani-Arani, A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mashhadi-Akbar-Boojar, M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2017). Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fluorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under deficit water stress. *Industrial Crops and Products*, 109, 346-357.
23. Ahmadi, H., Babalar, M., Askari Sarcheshmeh, M. A., & Morshedloo, M. R. (2020). The effect of water deficiency stress and citrulline on essential oil content, photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) in different harvests. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 52 (3), 593-604. [In Persian]
24. Ahmad, B., Khan, M. M. A., Jaleel, H., Shabbir, A., Sadiq, Y., & Uddin, M. (2020). Silicon nanoparticles mediated increase in glandular trichomes and regulation of photosynthetic and quality attributes in *Mentha piperita* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 346-357.
25. El-Shetehy, M., Moradi, A., Maceroni, M., Reinhardt, D., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B., & Schwab, F. (2021). Silica nanoparticles enhance disease resistance in *Arabidopsis* plants. *Nature Nanotechnology*, 16 (3), 344-353.
26. Haghighi, M., & Pessarakli, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on

- salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161, 111-117.
27. Lightenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* 148, 350-382.
 28. Rostami, G., Moghaddam, M., Saeedi Pooya, E., & Ajdarian, L. (2019). The effect of humic acid foliar application on some morphophysiological and biochemical characteristics of spearmint (*Mentha spicata* L.) in drought stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12 (1), 95-110. [In Persian]
 29. Ramezan, G., & Abbaszadeh, B. (2016). The effect of drought stress on yield, content and percentage of essential oil of *Nepeta pogonosperma* Jamzad et Assadi under different plant density. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 31 (6), 1071-1085. [In Persian]
 30. Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104 (3).
 31. Malik, M. A., Wani, A. H., Mir, S. H., Rehman, I. U., Tahir, I., Ahmad, P., & Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 165, 187-195.
 32. Seyed lor, L., tabatabaei, J., & Fallahi, E. (2009). The effect of silicon on the growth and yield of strawberry grown under saline conditions. *Journal of Horticultural Science*, 23 (1). [In Persian]
 33. Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N., & Al-Otaibi, A. (2019). Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 1-10.
 34. Gorgini Shabankareh, H., & Khorasaninejad, S. (2017). Effects of sodium nitroprusside on physiological, biochemical and essence characteristics of savory (*Satureja khuzestanica*) under deficit water regimes. *Journal of plant production*, 24 (3), 55-70. [In Persian]
 35. Sayyari, M., Moradi Farsa, M., & Azizi, A. (2022). The Effect of Drought Stress at Different Developmental Stages on Growth and Some Phytochemical Parameters of *Nepeta crispa*. *Journal of Crops Improvement*, 24 (2), 545-561. [In Persian]
 36. Ghaderi, A. A., Fakheri, B. A. R. A. T. A. L. I., & Nezhad, N. M. (2018). Evaluation of the morphological and physiological traits of thyme (*thymus vulgaris* L.) under water deficit stress and foliar application of ascorbic acid. *Journal of Crops Improvement*, 19 (4). [In Persian]
 37. Zaefyzadeh, M., Quliyev, R. A., Babayeva, S., & Abbasov, M. A. (2009). The effect of the interaction between genotypes and drought stress on the superoxide dismutase and chlorophyll content in durum wheat landraces. *Turkish Journal of biology*, 33 (1), 1-7.
 38. Dastborhan, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2015). Influence of seed priming and water stress on selected physiological traits of borage. *Folia Horticulturae*, 27 (2), 151-159.
 39. Kimiaei, M. R., Sirousmehr, A., & Fakheri, B. A. (2022). The Effect of Silicon on Quantitative and Physiological Characteristics of Borage (*Borago officinalis* L.) under Irrigation Regimes. *Journal of Crops Improvement*, 24 (2), 631-643. [In Persian]
 40. Bhardwaj, S., & Kapoor, D. (2021). Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1044-1053.
 41. Lauriano, J. A., Ramalho, J. C., Lidon, F. C., & doCéu Matos, M. (2006). Mechanisms of energy dissipation in peanut under water stress. *Photosynthetica*, 44, 404-410.
 42. Ranjbar, F. A., & Dehghani, B. R. (2016). Impact of salinity stress on photochemical efficiency of photosystem

- ii, chlorophyll content and nutrient elements of nitere bush (*Nitraria schoberi* L.) Plants.
43. Lee, T. Y., Woo, S. Y., Kwak, M. J., Inkyin, K., Lee, K. E., Jang, J. H., & Kim, I. R. (2016). Photosynthesis and chlorophyll fluorescence responses of *Populus sibirica* to water deficit in a desertification area in Mongolia. *Photosynthetica*, 54, 317-320.
44. Falqueto, A. R., da Silva Júnior, R. A., Gomes, M. T. G., Martins, J. P. R., Silva, D. M., & Partelli, F. L. (2017). Effects of drought stress on chlorophyll a fluorescence in two rubber tree clones. *Scientia Horticulturae*, 224, 238-243.
45. Afshar Mohamadian, M., Omidipour, M., & Jamal Omid, F. (2018). Effect of different drought stress levels on chlorophyll fluorescence indices of two bean cultivars. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 31 (3), 511-525. [In Persian]
46. Soheili Movahhed, S., Esmaeili, M., Jabbari, F., Khorramdel, S., & Fouladi, A. (2017). Effects of water deficit on Relative Water Content, Chlorophyll Fluorescence indices and seed yield in four pinto bean genotypes. *Journal of Crop Production*, 10 (1), 169-190. [In Persian]
47. Mehraban Joubani, P., Barzegar, A., Barzegar Golchini, B., Ramezani Sayyad, A., & Abdolzadeh, A. (2019). Comparison of effects of iron excess and application of silicon on fluorescence of chlorophyll in shoot and developmental changes in root of rice seedlings. *Iranian Journal of Plant Biology*, 11 (3), 17-32. [In Persian]
48. Verma, K. K., Song, X. P., Zeng, Y., Guo, D. J., Singh, M., Rajput, V. D., ... & 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.
49. Zhang, Y., Yu, S. H. I., Gong, H. J., Zhao, H. L., Li, H. L., Hu, Y. H., & Wang, Y. C. (2018). Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (10), 2151-2159.
50. Moradi, M., abedy, B., Aroiee, H., Aliniaiefard, S., & Ghasemi Bezdi, K. (2023). Effect of Different Light Spectral on Photosynthetic Performance, Growth Indicators and Essential Oil Content of *Salvia officinalis* L. *Journal Of Horticultural Science*. [In Persian]
51. Mathur, S., Allakhverdiev, S. I., & Jajoo, A. (2011). Analysis of high temperature stress on the dynamics of antenna size and reducing side heterogeneity of Photosystem II in wheat leaves (*Triticum aestivum*). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1807 (1), 22-29.