Iranian Journal of Horticultural Science
Vol 52, No 3, Autumn 2021 (647-661)
DOI: 10.22059/ijhs.2020.297946.1769

علوم باغبانی ایران
دورهٔ ۵۲، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۴۰۰ (ص ۶۶۱-۶۴۷)

نشریه پژوهشی:

تأثیر نانوسیلیکون بر خصوصیات رشد، فیزیولوژی و بیوشیمیایی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) در شرایط تنش شوری

بهروز اسماعیل‌پور[1*]، مرتضی شیخ علیپور[2] و موسی ترابی گیگلو[3]
۱، ۲ و ۳. استاد، دانشجوی دکتری و دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/٤ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰)

چکیده

تنش شوری یکی از مهمترین عوامل محدودکننده غیرزیستی است که عملکرد گیاهان دارویی را کاهش می‌دهد. به‌منظور مطالعه اثر محلول‌پاشی سطوح مختلف نانوذرات سیلیسیم بر خصوصیات رشد، شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) در شرایط تنش شوری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و هرتکرار شامل دو گلدان در شرایط آبکشت (هیدروپونیک) در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تنش شوری در چهار سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم) و محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیسم در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند. شاخص‌های مورفولوژیک مانند ارتفاع گیاه، تعداد شاخه جانبی، وزن تر و خشک بخش هوایی و شاخص‌های فیزیولوژیک شامل کلروفیل، نشت غشاء، محتوی آب نسبی و شاخص‌های بیوشیمیایی شامل پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد شوری شاخص‌های مورفولوژیک مانند ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص‌های فیزیولوژیک شامل کلروفیل و محتوی آب نسبی را به طور معنی‌داری کاهش داد و باعث افزایش میزان نشت غشاء و مقدار پرولین گردید. درحالی که محلول‌پاشی نانوسیلیسیم از طریق افزایش رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از قبیل آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز موجب کاهش آثار منفی تنش شوری گردید. بهترین اثر بهبوددهندگی نانوسیلیسیم در اکثر شاخص‌های مورد بررسی، تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم بود. بنابراین استفاده از شکل نانو عنصر سیلیسیم به‌عنوان کاهش‌دهنده آثار منفی تنش شوری در بادرشبو پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بادرشبو، تنش شوری، سیلیکون، نانوذرات.

Effects of nano silicon on growth, physiology and biochemical of *Dracocephalum moldavica* L. under salinit stress condiyion

Behrooz Esmaielpour[1*], Mortaza Sheikhalipour[2] and Musa Torabi[3]
1, 2, 3. Associate Professor, Ph.D. Candidate and Assistant Professor, Faculty of Agriculture Science and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: Feb. 23, 2020 - Accepted: Dec. 30, 2020)

ABSTRACT

Salinity stress is one of the most important constraint for yield of medicinal plants. In order to investigation the effects of silicon nanoparticle foliar spraying on growth characteristic, physiological and biochemical parameters of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* **L.**) under salinity stress condition a factorial experiments based on completely randomized design with three repetitions and each repetition, including two pots in hydroponic conditions was carried out at research greenhouse of Mohaghegh Ardabili University at 2018-2019. Experimental factors consisting salinity stress at four levels (0, 50, 100 and 150 mM of Nacl) and foliar spraying of silicon nanoparticle at three levels (0, 100 and 500 mg/l). Morphological studied traits including plant height, fresh and dry weight of plant, physiological parameters such as chlorophyll, electrolyte leakage, relative water contents and biochemical parameters such as proline and antioxidant enzyme activity were measured. Results indicated that salinity stress significantly decreased morphological traits include plant height, fresh and dry weight of plant and physiological parameters such chlorophyll and relative water content of leaves were reduced, while free proline content of leaves and electrolyte leakage from cell membranes were increased. Foliar spraying of silicon nanoparticle alleviated salinity stress effects on dragonhead plants via increases in growth characteristics and enhancing antioxidant enzyme activity such as ascorbate peroxidase and super oxide desmutase. Five hundreds mg/mL of nanosilicon showed the maximum effect on diminishing negative effects of salt stress on most of the parameters. Therefore, the use of nano-form of silicon element is proposed as alleviator of salt stress in dragonhead.

Keywords: Dragonhead, nanoparticle, salinity stress, silicon.

* Corresponding author E-mail: behsmaiel@yahoo.com

مقدمه

بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) گیاهی علفی از تیره Lamiaceae است (Mozaffarian, 2003). این گیاه بومی آسیای مرکزی می‌باشد و در ایران بیشتر در شمال غرب رشد می‌کند (Dastmalchi *et al*, 2007). ارتفاع بوته ۸۰-۶۰ سانتی‌متر، دارای ساقه چهارگوش و ارغوانی (به‌علت وجود ماده آنتوسیانین) است. برگ‌های آن متقابل، دندانه‌دار و سبزرنگ وگلها درشت، با رنگ آبی مایل به بنفش یا سفید می‌باشند (Mozaffarian, 2003). عصاره بادرشبو برای رفع سردرد، سرماخوردگی، ضعف عمومی بدن، رفع دردهای عصبی و اسپاسم‌های معـده و کلیه، دردهای روماتیسمی، شستشوی دهان و در دندان دردها و پیشگیری از انفارکـتوس قلب استفاده می‌شود (Hussein *et al*., 2006). مهم‌ترین ترکیب‌های شناخته‌شده اسانس این گیاه شامل ژرانیل‌استات، ژرانیال، ژرانیول و نرال می‌باشند (Venskutionis *et al*., 1995).

تنش شوری یکی از مهمترین تنش‌های غیر زیستی است که رشد و عملکرد محصولات را در تمام جهان محدود ساخته است (Ahmad *et al*., 2019). تنش شوری حدود ۳۳ درصد زمین‌های کشاورزی آبی جهان را دربرگرفته است و سبب کاهش رشد و عملکرد گیاه به‌میزان ۵۰-۲۰ درصد می‌شود (Shrivastava & Kumar, 2018). علاوه‌براین به‌دلیل هوازدگی سنگهای مادری، بارندگی کم، تبخیر زیاد، آبیاری با آب شور، فعالیت‌های انسانی و اقدامات زراعی ضعیف، گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم میزان شور-شدن زمین ۱۰ درصد سالانه افزایش پیدا می‌کند (Jamil *et al*., 2011; Hasanuzzaman *et al*., 2013). تنش شوری از طریق ایجاد تغییرات آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد که شدت خسارت شوری بسته به طول مدت تنش و مرحله رشد گیاه متفاوت است (Siringam *et al*., 2011). تنش شوری با ایجاد سمیت یونی و تنش اسمزی، بر تمام جنبه‌های توسعه‌ی گیاهی از جوانه‌زنی بذر، رشد رویشی، فعالیت آنزیمی، فرایندهای فتوسنتزی (Gomes-Filho, 2008; Netondo *et al*., 2004)، جذب عناصر غذایی (Hasanuzzaman *et al*., 2013)، سنتز پروتئین (Dantas *et al*., 2007)، سنتز DNA و RNA (Othman *et al*., 2006) و رشد زایشی اثر گذاشته و باعث کاهش رشد گیاه و عملکرد محصول می‌شود (Naeem *et al*., 2017a). تنش شوری موجب ایجاد بیش‌ازحد گونه‌های اکسیژن واکنشی (ROS) و استرس اکسیداتیو می‌شودکه می‌تواند باعث تخریب عمده چربی‌های غشای سلولی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک شود (Hasanuzzaman *et al*., 2013).

سیلیسیم بعد از اکسیژن به‌عنوان دومین عنصر فراوان در سطح زمین یکـی از عناصر غذایی مفید در رشد و سلامت گیاهان می‌باشد. سیلیسیم به‌صورت مونوسیلیسیک‌اسید $Si(OH)_4$ در خاک و آب در دسترس گیاهان است (Swain & Rout, 2017). سیلیسیم علی‌رغم نقش‌های مهم در گیاه به‌عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان عالی شناخته نشده است (Doshi *et al*., 2008). به‌تازگی مطالعات زیادی نشان داده است که کاربرد سیلیسیم در گیاهان به‌طور چشمگیری می‌تواند آثار تنش‌های غیرزیستی و زیستی مانند تنش فلزات سنگین، نمک، خشکی، سرما و یخزدگی را کاهش دهد و آثار مفیدی بر رشد گیاهان داشته باشد (Liang *et al*., 2007; Mohsenzadeh *et al*., 2011, 2012; Shahrtash & Mohsenzadeh, 2011; Cao *et al*., 2017). سیلیسیم از طریق بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه و کاهش جذب سدیم میزان مقاومت به شوری را در گیاهان افزایش می‌دهد (Kiani Chalmardi *et al*., 2012، Rahimi *et al*., 2012). علاوه‌براین سیلیسیم با رسوب درکوتیکول برگ و سلول‌های اپیدرمی، باعث کاهش سرعت تعرق و جلوگیری از پلاسیدگی گیاه طی تنش شوری می‌شود (Liang *et al*., 2003). تأثیر سیلیسیم در کاهش اثرات تنش شوری در گیاهان مختلف مانند جو (Liang *et al*., 2003)، ذرت (Moussa, 2006) و گندم (Tuna *et al*., 2008) گزارش شده است.

کاربرد نوظهور فناوری نانو در علوم گیاهی یکی از موضوعات روز دنیاست که تحقیقات در این حیطه در آغاز راه و رو به گسـترش بوده و هنوز بسیاری از اثرها و کارکردهای نانومواد بر مکانیسم‌های فیزیولوژیک و

متابولیک گیاهان ناشناخته می‌باشد. استفاده از فناوری نانو در دهه‌های اخیر توانسته است تحولات وسیعی در تمام زمینه‌های علوم ایجاد نماید (Peyvandi *et al*., 2011). امروزه افزودن نانوذرات به محلول غذایی گیاهان به‌عنوان کود به‌دلیل داشتن اثرهای بی‌نظیر آنها مانند نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی، توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (El-Ramady *et al*., 2017). استفاده از نانوذرات منجر به افزایش کارآیی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن آثار منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد عنصر می‌شود (Peyvandi *et al.,* 2011). لذا با توجه به گسترش روزافزون خطر شوری و با تاکید بر این‌که تا اواسط قرن بیست ویکم نیمی از اراضی حاصلخیز نیز تحت تأثیر شوری قرار می‌گیرند (Ahmad *et al*., 2019). بنابراین افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش شوری برا ی تامین غذای جمعیت در حال رشد کنونی امری ضروری واجتناب ناپذیر می‌باشد (Shah & Wu, 2019).بنابراین این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر نانوذرات سیلیسیم جهت کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری در گیاه دارویی بادرشبو صورت گرفت.

مواد وروش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملا تصادفی با دو فاکتور تنش شوری در چهار سطح (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) و محلول‌پاشی نانوذرات‌سیلیسیم در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در سه تکرار و هر تکرار شامن دو گلدان در گلخانه آموزشی و پژوهشی و آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۷ درشرایط هیدروپونیک و به‌صورت گلدانی اجرا شد. بستر کشت شامل سه قسمت کوکوپیت و یک قسمت پرلایت بود. جهت انجام این آزمایش بذر بادرشبو از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. نانوذرات مورد مطالعه از شرکت نانوسانی تهیه شد که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است. تصاویر SEM و TEM از نانوذرات سیلیسیم مورد استفاده در این مطالعه نیز در شکل ۱ آمده است. در این مطالعه از Silicon Dioxide (SiO_2) برای سنتز نانوذرات سیلیسیم استفاده گردید.

جهت انجام این آزمایش ابتدا بذرهای بادرشبو در سینی کشت حاوی کوکوپیت کاشته شده و سپس گیاهان در مرحله دو تا سه برگ حقیقی به گلدان اصلی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۲۵ سانتی‌متر منتقل شدند. تغذیه گیاهان توسط محلول هوگلند صورت گرفت که در مراحل اولیه رشد نصف غلظت این محلول برای تغذیه استفاده شد و بعد از مرحله ۸-۶ برگی شدن، گیاهان با غلظت کامل از این محلول دوبار در روز محلول‌دهی شدند. در هربار محلول‌دهی، گیاهان ۳۰۰ میلی‌لیتر محلول‌غذایی دریافت کردند. به‌منظور اعمال تنش، گلدان‌ها هفته‌ای دو بار و در ساعات اولیه روز با محلول غذایی حاوی غلظت‌های صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم محلول‌دهی شدند و این‌کار تا رسیدن به مرحله‌ی گلدهی کامل ادامه یافت. لازم به ذکر است که آبیاری به صورت زهآب بود و محلول زهکش شذه در ته گلدان دوباره به آن اضافه می‌شد. برای جلوگیری از تجمع نمک اضافی در گلدانها در فاصله سه هفته یکبار گلدان‌ها با آب معمولی آبیاری می شدند. محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیسیم در غلظت‌های صفر، ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نیز هفته‌ای یکبار بعد از اعمال تنش شوری صورت گرفت.

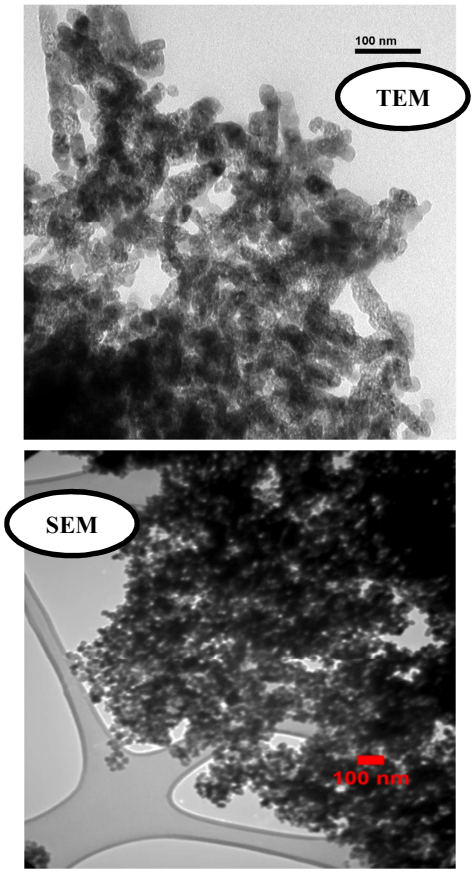
جدول ۱. خصوصیات ساختاری نانو ذرات سیلیسیم مورد استفاده در این آزمایش.

Table 1. Structural properties of silicon nanoparticles used in this experiment.

Structural properties	Silicon nanoparticles
Thermogravimetric analysis (TGA)	5±0.02
Inductively coupled plasma (ICP)	4.9±0.009
Size	20-35
Percent purity	98
Active level (g/m^2)	461

اندازه‌گیری خصوصیات مورفولوژیک شامل تعداد ساقه جانبی، ارتفاع بوته، وزن تر و خشک اندام هوایی گیاهان سه ماه پس از کاشت گیاهان درگلدان انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک ساقه پس از برداشت بوته‌ها ابتدا ریشه و ساقه جدا شده و سپس ساقه وزن شده و در پاکت قرار گرفته آنگاه در آون در دمای ۷۸ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به مدت ۴۸ ساعت خشک

شد (Da Silva Lobato *et al*., 2013). توزین نمونه‌های خشک‌شده با ترازویی با دقت یک‌هزارم گرم انجام شد. شاخص سبزینگی توسط دستگاه کلروفیل‌سنج اسپد (Spad) از ۵ برگ در قسمت پایین، وسط و بالای ساقه گیاه در هر گلدان اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. تصاویر SEM و TEM از نانوذرات سیلیسیم مورد استفاده در مطالعه.

Figure 1. SEM and TEM images of silicon nanoparticles used in the study.

اندازه‌گیری ثبات غشا (نشت مواد یونی) بر اساس روش پیشنهادی Redmann *et al*. (1986) انجام شد. برای این‌منظور ابتدا از برگ کاملاً توسعه‌یافته دیسک‌هایی تهیه و سه بار با آب دیونیزه شستشو شد. نمونه‌ها در ظرف سربسته حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه قرار گرفت و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و توسط دستگاه شیکر تکان داده شد. پس از پایان زمان مورد نظر، قرائت در طول موج ۲۸۰ نانومتر انجام شود (L_t). نمونه به محلول برگردانیده شد، سپس نمونه و محلول در اتوکلاو قرار داده شد و سپس قرائت در طول موج ۲۸۰ نانومتر انجام شد (L_0).

$$٪ \text{نشت مواد محلول} = (L_t / L_0) \times ۱۰۰ \quad (۱)$$

برای اندازه‌گیری شاخص محتوای نسبی آب (RWC) نیم گرم از جوان‌ترین برگ توسعه یافته‌ی تر (FW) جدا کرده و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب دیونیزه قرار داده شد و پس از گذشت این مدت وزن اشباع برگ اندازه‌گیری گردید (TW). سپس برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از این مدت وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد (DW). پس از توزین محتوای نسبی آب (RWC) با استفاده از فرمول زیر تعیین شد (Ritchie & Nguyen, 1990).

$$RWC=[(FW – DW) / (TW – DW)] \times 100 \quad (۲)$$

برای اندازه‌گیری پرولین مقدار ۰/۵ گرم از بافت تازه جوان‌ترین برگ‌ها را به قطعات کوچکتر از ۵ میلی‌لیتر بریده و همراه با ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلیک اسید ۳٪ در یک هاون چینی به مدت ۳ دقیقه سائیده شده و محلول هموژنیزه‌شده توسط کاغذ صافی واتمن شماره ۲ صاف شده و با دو میلی‌لیتر از محلول صاف‌شده با ۲ میلی‌لیتر نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال خالص در یک لوله آزمایش ریخته شده و لوله‌ها به مدت یک ساعت در بن‌ماری با دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس به محلول واکنش در لوله آزمایش و پس از سرد شدن ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه گردید. هرکدام از لوله‌ها، به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه ورتکس گردید. پس از تشکیل دو فاز جداگانه، فاز رنگی بالایی با دقت جدا و مقدار جذب در دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد و مقدار پرولین با استفاده از منحنی استاندارد آن بدست آمد (Bates *et al*., 1973).

فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز طبق روش Nakano & Asada (1981) تعیین گردید. بدین‌ترتیب که سه میلی‌لیتر محلول واکنش آسکوربات‌پراکسیداز شامل ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات (pH=۷) و ۰/۵ میلی‌مول آسکوربیک‌اسید و ۰/۱ میلی‌مول H_2O_2 و ۱۰۰ میکرولیتر آنزیم استخراجی بود. فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز

براساس میزان اکسیدشدن آسکوربات در طول موج ۲۹۰ نانومتر به‌مدت ۲ دقیقه تعیین شد. فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز (SOD) براساس درصد توانایی آن در ممانعت از احیای نوری نیتروبلوتترازولیوم‌کلراید به ترکیب ارغوانی‌رنگ به وسیله رادیکال سوپراکسید حاصل از فتولیز ریبوفلاوین، توسط آنزیم موجود در عصاره مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. یک واحد فعالیت آنزیم SOD مقدار آنزیمی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند تا ۵۰٪ موانع از احیای نوری نیتروبلوتترازولیوم کلرید گردد. فعالیت ویژه آنزیم به‌صورت تعداد واحدهای آنزیم در میلی‌گرم پروتئین گزارش شد (Dhindsa *et al*., 1981).

نتایج و بحث

صفات رشدی

نتایج تجزیهٔ واریانس داده‌ها نشان داد تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد به‌طورمعنی‌داری ارتفاع گیاه، تعداد شاخه جانبی، وزن تر و خشک اندام هوایی، کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). تأثیر نانوذرات سیلیسیم نیز بر ارتفاع گیاه، تعداد شاخه جانبی، وزن تر وخشک اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار شد (جدول۲). اثر متقابل تنش شوری و نانوسیلیسیم نیز بر ارتفاع گیاه، تعداد شاخه جانبی، محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار شد (جدول ۲).

ارتفاع بوته

مقایسه میانگین اثر متقابل شوری و نانوذرات سیلیسیم بر ارتفاع بوته باد رشبو (جدول ۳) نشان داد که تنش شوری منجر به کاهش ارتفاع بوته شده و کاربرد نانوذرات سیلیسیم باعث افزایش ارتفاع بوته و کاهش صدمات ناشی از تنش شوری در گیاه بادرشبو گردید. به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع بوته (۵۱/۲۵ سانتی‌متر) در گیاهان محلول‌پاشی شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم و در شرایط بدون تنش و کمترین ارتفاع بوته (۳۶/۰۴ سانتی‌متر) نیز در گیاهان محلول‌پاشی نشده و در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم به دست آمد.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر نانوسیلیسیم بر خصوصیات رشد بادرشبو در شرایط تنش شوری.

Table 2. Results of variance analysis effect of silicon nanoparticle on growth characteristics of dragonhead under salt stress conditions.

Source of variation	df	Mean of squars					
		Plant height	Number of lateral branches	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	SPAD index	RWC
Salt stress (S)	3	263.46**	16.88**	202.58**	75.29**	101.10**	912.70**
Nano-silicon (N)	2	18.32**	19.52**	198.26**	7.21**	25.69^{ns}	104.58*
S*N	6	11.93**	4.63**	0.21^{ns}	0.28^{ns}	5.21^{ns}	37.80*
Eror	24	3.23	0.86	9.59	0.38	2.83	8.86
CV (%)		4.04	7.87	5.64	7.62	14.08	3.06

ns، * و :** به ترتیب نبود تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

.ns , *, **: Non significantly difference, significantly difference at 5% and 1% of probability level, respectively

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل شوری و نانوسیلیسیم بر صفات مورفوفیزیولوژیک بادرشبو.

Table 3. Mean comparison interaction effect of salinity and silicon nanoparticle on morphophysiological traits of dragonhead.

Treatment combination		Plant height (cm)	Number of lateral branches	RWC (%)
0	0	48.99abc	14b	90.68a
	Nanosilicon 100 mg	50.88ab	14.67a	89.93a
	Nanosilicon 500 mg	51.25a	9.33d	92.57a
Salinity 50 mM	0	45.93dc	13abc	80.918bc
	Nanosilicon 100 mg	47.82bcd	13abc	83.587b
	Nanosilicon 500 mg	47.32cd	12c	82.56867b
Salinity 100 mM	0	39.35gh	12c	73.584de
	Nanosilicon 100 mg	42.56ef	12.66bc	75.84233cd
	Nanosilicon 500 mg	44.91de	11.33c	70.50867def
Salinity 150 mM	0	36.04i	8.66d	65.25967f
	Nanosilicon 100 mg	36.8hi	11.33c	68.56833ef
	Nanosilicon 500 mg	47.21gf	9.33d	66.178f

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.

In each column, means with at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level.

تعداد شاخه‌های جانبی

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها در جدول ۳ نشان داد که بیشترین تعداد شاخه جانبی (۱۴/۶۷) در گیاهان محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم و در شرایط بدون تنش شوری و کمترین تعداد شاخه‌های جانبی (۸/۶۶) در گیاهان محلول‌پاشی نشده و در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم حاصل شد.

وزن تر و خشک ساقه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۴) نشان داد که تنش شوری وزن تر و خشک ساقه را در گیاهان بادرشبو کاهش داد. به طوریکه بیشترین وزن تر (۷۰/۵۹ گرم) و وزن خشک ساقه (۱۱/۰۷ گرم) در تیمار بدون شوری و کمترین مقدار وزن تر (۴۶/۷۴ گرم) و وزن خشک ساقه (۵/۲ گرم) در گیاهان تحت تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم تولید شد. همچنین نتایج مقایسه داده‌ها نشان داد محلول‌پاشی گیاهان با نانوذرات سیلیسیم منجر به افزایش وزن تر و خشک در این گیاه گردید. بیشترین وزن تر (۵۹/۷۵ گرم) و خشک ساقه (۸/۸۷ گرم) به‌ترتیب در گیاهان محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌برلیتر نانوسیلیسیم و کمترین مقدار وزن تر (۵۰/۸۷ گرم) و وزن خشک ساقه (۷/۴۳ گرم) در گیاهان محلول‌پاشی نشده بدست آمد (جدول ۴).

در این مطالعه با افزایش شوری شاخص‌های رشداز قبیل ارتفاع بوته، تعداد شاخه های حانبی و وزن تر و خشک ساقه بادرشبو کاهش یافت و بیشترین میزان کاهش رشد در بالاترین سطح شوری یعنی ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم حاصل شد (جدول‌های ۳ و ۴) که این کاهش رشد گیاه در اثر شوری را می‌توان به کاهش تقسیم‌سلولی وکاهش قدرت سلول‌ها برای جذب آب و بستن روزنه‌ها و به‌حداقل‌رساندن تعرق (Munns, 2002)، افزایش انرژی سوخت‌وساز، کاهش سطح برگ و جذب کربن و افت فتوسنتز در واحد سطح برگ (Alaei *et al*., 2021)، اختلال در سوخت‌وساز کربوهیدرات و پروتئین (Netondo *et al.,* 2004) و یا ترکیبی از این فرآیندها مرتبط دانست. از طرفی دیگر شوری با محدود نمودن جنبه‌های تبادل گازی و کاهش میزان فتوسنتز منجر به کاهش سرعت رشد و پیری زودرس در برگ‌های بالغ می‌شود (Banerjee & Roychoudhury, 2017; Nahar *et al*., 2016). به عبارت دیگر شوری با کاهش فرآیند فتوسنتز در نهایت موجب کاهش عملکرد و مرگ گیاه می‌شود (Wang *et al*., 2015; Mohebi *et al*., 2021). افزایش مقدار شوری می‌تواند منجر به تنش یونی، اسمزی و اکسیداتیو در گیاه شود (Sattar *et al*., 2017). نتایج این پژوهش بیانگر آن است که کاربرد نانوذرات سیلیسیم توانست اثرات نامطلوب شوری روی شاخصهای رویشی گیاه بادرشبو را کاهش دهد و بیشترین تأثیر سیلیسیم در رفع اثرات شوری در غلظت‌های بالای کلرید سدیم (۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) حاصل شد و غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نسبت به غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر در گیاه در برطرف ساختن شوری کارآمدتر بود(جدول ۳). نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های سایر محققین در مورد کاربرد سیلیسیم در تخفیف و کاهش اثرات تنش شوری در محصولاتی مانند برنج، (Wu *et al*., 2015)، گندم (*Triticum aestivum* L.) (Gong *et al.,*2003)، جو (Farhangi-Abriz & Torabian., 2018)، خیار (Yassen *et al*., 2017; Amirossadat *et al*., 2012)، گوجه‌فرنگی (Haghighi & Pessarakli, 2013) و سورگوم (Yin *et al*., 2013)، کدو تنبل (Siddiqui *et al*., 2014) و توت فرنگی (Avestan *et al*., 2019) همخوانی دارد . بررسی‌ها نشان می‌دهند که تغذیه گیاه با سیلیسیم هم در شرایط تنش شوری و هم در شرایط بدون تنش موجب بهبود رشد گیاه می‌شود (Chen *et al*., 2011). سیلیسیم می‌تواند از طریق تنظیم رشد ریشه (Zhu *et al*., 2015)، بهبود وضعیت آب بافت‌های گیاهی (Romero-Aranda *et al*., 2006)، افزایش فعالیت فتوسنتزی (Shu & Liu, 2001)، تحریک فعالیت سیستم خنثی‌کننده گونه‌های اکسیژنی فعال (Al-Aghabary *et al.,* 2004)، کاهش جذب سدیم به‌وسیله گیاه (Gong *et al.,* 2006)، افزایش فعالیت H^+-ATPase مسئول جذب پتاسیم (Tahir *et al.,* 2006) و در تعدیل اثر تنش شوری سهیم باشد. کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش شوری نسبت ریشه به شاخه را افزایش داده و از طریق افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه منجر به بهبود تعادل آبی در گیاه می‌گردد (Wang *et al.,* 2015).

در برنج و سورگوم سیلیسیم رشد ریشه را از طریق افزایش تشکیل حلقه‌های کاسپاری و تحریک سنتز سوبرین و لیگنین و یا افزایش قابلیت توسعه‌پذیری دیواره سلولی در مناطق رشد افزایش می‌دهد (Hattori et al., 2003; Liang et al., 2015).

شاخص سبزینگی

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۴) نشان داد تنش شوری منجر به کاهش شاخص سبزینگی گیاهان بادرشبو گردید. به‌طوریکه بیشترین شاخص سبزینگی (۱۴/۹ واحد اسپد) در تیمار بدون شوری و کمترین مقدار آن (۸/۲ واحد اسپد) در گیاهان تحت تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم تولید شد (جدول ۵). محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیسیم نیز باعث افزایش شاخص سبزینگی در مقایسه با شاهد شد. بیشترین شاخص سبزینگی در گیاهان محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌برلیتر نانوسیلیسیم (۱۲/۸۸ واحد اسپد) و کمترین میزان آن در گیاهان محلول‌پاشی‌نشده (۱۰/۲۶ واحد اسپد) مشاهده گردید.

با افزایش شوری شاخص سبزینگی برگ‌های گیاه بادرشبو کاهش یافت (جدول۴)، که شاخص سبزینگی نشانگر اصلی برای قرارگرفتن گیاه در شرایط تنش در سطح سلولی است (Chutipaijit et al., 2011). شوری خاک از طریق کاهش قدرت تشکیل کمپلکس پروتئین-رنگدانه-چربی و افزایش فعالیت کلروفیلاز سبب کاهش میزان کلروفیل برگ می‌شود. ضمنا کاهش غلظت آهن و پتاسیم (Munns, 2002) قابل استخراج خاک و در نتیجه کاهش جذب و تجمع این عنصر در گیاه نیز می‌تواند ساخت کلروفیل را مختل نماید (Marschner, 1994). از سوی دیگر زوال غشا در اثر شوری نیز در تخریب کلروفیل دخیل هست (Mane et al., 2010). تحت شرایط شوری، سیستم فتوسیستم (PS II) حساس‌تر می‌باشد (Allakhverdiev et al., 2000). Demetriou et al. (2007) گزارش کردند که در شرایط تنش شوری تغییر در فتوسیستم باعث کاهش زیست‌توده گیاهی می‌شود. نتایج این آزمایش بیانگر اثرات مثبت کاربرد نانوذرات سیلیسیم در افزایش شاخص سبزینگی بادرشبو بود و بیشترین افزایش شاخص سبزینگی با محلول‌پاشی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم حاصل شد(جدول ۵). اثر مثبت کاربرد سیلیسیم بر میزان کلروفیل و شاخص سبزینگی در گیاهان رشدکرده در محیط شور به‌وسیله بسیاری از پژوهشگران تأیید شده است (Chen et al., 2011; Reezi et al., 2009). این اثر مثبت می‌تواند ناشی از اثر بازدارندگی سیلیسیم بر جذب سدیم به‌وسیله گیاه باشد که موجب افزایش جذب و تجمع منیزیم و افزایش کارآیی فتوسیستم دو در نتیجه بهبود وضعیت کلروفیل برگ می‌گردد (Reezi et al., 2009; Al-Aghabary et al., 2005). Suriyaprabha et al. (2012) گزارش کردند کاربرد نانوذرات SiO_2 در ذرت به‌طور قابل توجهی وزن خشک را افزایش داده و باعث افزایش ترکیباتی مانند کلروفیل، پروتئین‌ها و فنل‌ها در گیاهان می‌شود. Haghighi & Pessarakli (2013) گزارش کردند تنش شوری باعث کاهش میزان کلروفیل و کارتنوئید گیاهچه‌های گوجه فرنگی گردید، اما تیمار گیاهچه‌های ذرت با سیلیسیم و نانوسیلیسیم باعث کاهش آثار تنش شوری و افزایش میزان کلروفیل و کارتنوئید گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی گردید. Avestan et al. (2019) گزارش کردند کاربرد نانوسیلیسیم در شرایط تنش شوری در توت‌فرنگی باعث افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید گیاه نسبت به حالت شاهد گردید. Zare et al. (2015) نیز گزارش کردند کاربرد سیلیسیم و نانوسیلیسیم در ذرت در شرایط تنش شوری منجر به افزایش میزان کلروفیل و کارتنوئید گردید.

محتوای نسبی آب برگ

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش میزان تنش شوری از محتوای آب برگ کاسته شده و کاربرد نانوذرات سیلیسیم منجر به افزایش محتوای آب برگ در شرایط نرمال و تنش گردید. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۹۲/۵۷ درصد) در گیاهان محلول‌پاشی شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم و در شرایط بدون تنش و کمترین محتوای نسبی آب برگ (۶۵/۲۵ درصد) در گیاهان محلول‌پاشی نشده و در شرایط تنش شوری ۱۵۰میلی‌مولار کلریدسدیم حاصل شد (جدول۳). نتایج این آزمایش نشان داد که با افزایش میزان شوری

محتوای نسبی آب گیاه کاهش می‌یابد (جدول ۳). زیرا تنش شوری باعث کاهش پتانسیل اسمزی محیط شده و در نهایت جذب آب توسط گیاه مختل می‌شود. کاهش جذب آب توسط گیاه، باعث کاهش میزان آب نسبی برگ می‌شود. کاربرد نانوذرات سیلیسیم به صورت محلول‌پاشی، باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ در مقایسه با گیاهان محلول پاشی نشده گردید (جدول ۳)، چون سیلیسیم با رسوب در کوتیکول برگ و در دیواره سلول‌های اپیدرمی و همچنین در ترکیب با ماکرومولکول‌های آلی شامل سلولز، پکتین، لیگنین و گلیکوپروتئین ترکیبات کلوییدی بی‌شکل سطح جذب بالا را تشکیل می‌دهد و میزان کاهش آب از طریق روزنه‌ها را پایین آورده (Gong *et al*., 2006) و باعث کاهش سرعت تعرق و جلوگیری از پلاسیدگی گیاه طی تنش شوری می‌شود (Liang *et al*., 2003; Sacała, 2009). همچنین سیلیسیم با تشکیل لایه دوگانه کوتیکول- سیلیس به‌دلیل افزایش غلظت سیلیسیم و موم از تعرق کوتیکولی گیاه جلوگیری به عمل می‌آورد (Ahmad *et al*., 2011). اگرچه برخی از دانشمندان گزارش کرده‌اند کاربرد سیلیسیم همیشه منجر به کاهش میزان تعرق نمی‌شود. Gong *et al.* (2006) و Zhu *et al.* (2015) گزارش کردند کاربرد سیلسیسم در شرایط شوری از طریق تنظیم میزان جذب آب توسط گیاه منجر به افزایش محتوای آب در برنج و خیار می‌شود. Li *et al.* (2015) گزارش کردند کاربرد سیلیسیم در شرایط شوری در گوجه‌فرنگی باعث افزایش رشد ریشه و هدایت هیدرولیکی ریشه شده و از این طریق باعث افزایش میزان جذب آب توسط ریشه و درنتیجه افزایش محتوای آب برگ می‌شود. Liu *et al.* (2015) نیز گزارش کردند سیلیسیم در شرایط تنش شوری از طریق تنظیم فعالیت آکواپورین‌ها در ریشه منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه و افزایش جذب آب توسط ریشه سورگوم می‌شود.

صفات بیوشیمیایی

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد به‌طور معنی‌داری پرولین، نشت غشا، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۵). تأثیر نانوذرات سیلیسیم نیز بر میزان پرولین، نشت غشا و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۵). اثر متقابل تنش شوری و نانوسیلیسیم نیز به‌طور معنی‌داری میزان پرولین، نشت غشا و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را تغییر داد (جدول ۵).

پرولین

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد افزایش سطوح شوری منجر به افزایش میزان پرولین گردید. درحالیکه کاربرد نانوسیلیسیم میزان پرولین گیاه را کاهش داد. بیشترین محتوای پرولین برگ (۰/۲۲۶ میکروگرم‌برگرم وزن تر) در گیاهان محلول‌پاشی‌نشده و در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم و کمترین محتوای پرولین برگ (۰/۱۴ میکروگرم بر گرم وزن تر) در گیاهان محلول‌پاشی‌نشده در تیمار بدون شوری حاصل شد (جدول ۶).

میزان پرولین به عنوان یک ماده در جهت افزایش تنظیم اسمزی در گیاه بادرشبو در شرایط تنش شوری افزایش یافت و کاربرد نانوذرات سیلیسیم به صورت محلول پاشی نیز باعث کاهش این ماده و اسمولیت سازگاری شد (جدول ۶). در شرایط تنش شوری، گیاه نمک بیشتری جذب می‌کند که پتانسیل اسمزی آن را کاهش می‌دهد (Roychoudhury *et al.,* 2015). گیاهان برای مقابله با آسیب‌های ناشی از نمک و به‌منظور کاهش غلظت یون‌های سمی، تولید محلول‌های سازگاری اسمولیت‌ها و پروتئین‌های آب‌دوست مانند پرولین، پلی‌آمین، گلیسین‌بتایین و غیره را افزایش می‌دهند (Hasanuzzaman *et al*., 2012). پرولین اسیدآمینه‌ای است که در سیتوپلاسم سلول‌ها ساخته می‌شود (Pahlich *et al.,* 1983) و با کاهش پتانسیل اسمزی سیتوسول موجب ایجاد توازن در تجمع نمک در واکوئل می‌گردد (Voetberg & Stewart, 1984). در شرایط شوری زیاد، پرولین هم در تنظیم اسمزی و هم در تحمل گیاه به شوری نقش مهمی ایفا می‌کند. مصرف نانوسیلیسیم در این آزمایش باعث کاهش غلظت پرولین در گیاهان تحت تنش شوری شد. اثر کاربرد سیلیسیم بر کاهش غلظت پرولین در گیاه رشد کرده در محیط شور

به وسیله سایر پژوهشگران نیز مشاهده شده است (Kafi *et al*., 2011). Yin *et al.* (2013) در سورگوم و Pei *et al.* (2010) در گندم گزارش کردند کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش شوری باعث کاهش میزان پرولین گیاه گردید. همچنین Zare *et al.* (2015) گزارش کردند کاربرد نانوسیلیسیم در شرایط تنش شوری در ذرت میزان پرولین را به میزان بیشتری نسبت به سیلیسیم کاهش می‌دهد. Abdel-Haliem *et al.* (2017) گزارش کردند کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش شوری در برنج منجر به افزایش میزان پرولین گیاه گردید. درحالیکه کاربرد نانوسیلیسیم در این شرایط منجر به کاهش میزان پرولین گیاه گردید. نقش پرولین در سازگاری اسمزی بحث‌برانگیز است. در برخی از مطالعات، تجمع پرولین در شرایط تنش نشان‌دهنده افزایش تحمل گیاه در برابر شرایط تنش می‌باشد (Nayyar & Walia, 2003). درحالیکه تحقیقات دیگر پیشنهاد می‌کنند که تجمع پرولین نشانه آسیب تنش در گیاهان می‌باشد (De Lacerda *et al*., 2003). پرولین علاوه‌بر نقش اسمولیتی، می‌تواند به‌عنوان ذخیره کربن و نیتروژن برای مقابله با تنش مفید باشد. مطابق با نتایج این مطالعه Lee *et al.* (2010) و Pei *et al.* (2010) گزارش کردند تامین سیلیسیم همیشه همراه با کاهش پرولین تحمل به تنش را بهبود می‌بخشد. سیلیسیم با تنظیم سطوح فیتوهورمون‌های مرتبط با تنش نظیر آبسیزیک‌اسید، سالیسیلیک‌اسید، جاسمونیک‌اسید، ایندول‌استیک اسید (Fahad *et al*., 2015)، کاهش جذب سدیم توسط ریشه و همچنین کاهش انتقال آن به اندام هوایی، تنش اسمزی را کاهش و باعث بهبود تحمل به تنش می‌شود و از این طریق نیز باعث کاهش پرولین گیاه می‌شود (Hajiboland & Cheraghvareh, 2014).

نشت یونی

مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۶) نشان داد که با افزایش سطوح شوری میزان نشت یونی از غشا افزایش یافت. درحالیکه محلول‌پاشی نانوسیلیسیم منجر به کاهش میزان نشت یونی از غشا گردید. بیشترین میزان نشت غشا (۳۰ درصد) در گیاهان محلول‌پاشی‌نشده و در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم و کمترین میزان آن (۵ درصد) در گیاهان محلول‌پاشی شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم درلیتر نانوسیلیسیم در تیمار بدون شوری حاصل شد. با افزایش میزان شوری نشت یونی از غشای سلولی گیاهان بادرشبو را افزایش داد و کاربرد نانو ذرات سیلیسیم نیز میزان نشت غشا را به صورت معنی داری کاهش داد (جدول ۶).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر شوری و نانوسیلیسیم بر صفات مورفوفیزیولوژیک بادرشبو.

Table 4. Mean comparison effect of salinity and nano-silicon on morphophysiological traits of dragonhead.

Treatment		Shoot fresh weight (g)	Shoot dry weight (g)	SPAD index
Salt stress	0	70.59 a	11.07 a	14.9 a
	Salinity 50 mM	60.2 b	8.61 b	14.7 a
	Salinity 100 mM	46.62 c	6.75 c	10.7 b
	Salinity 150 mM	46.74 d	5.2 d	8.2 c
Silicon nanoparticle	0	50.87 c	7.43 c	10.26 b
	Nanosilicon 100 mg	54.85 b	8.11 b	12.69 a
	Nanosilicon 500 mg	59.75 a	8.87 a	12.88 a

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.

In each column, means with at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر نانوسیلیسیم بر خصوصیات بیوشیمیایی بادرشبو در شرایط تنش شوری.

Table 5. Results of variance analysis effect of silicon nanoparticle on biochemical characteristics of dragonhead under salt stress conditions.

Source of variation	df	Mean of squars			
		Proline	Ion leakage	Ascorbate peroxidase	Super oxidase dismutase
Salt stress	3	0.0058**	868.72**	0.19**	74.38**
Nano silicon	2	0.0018**	188.12**	0.008**	0.87**
S*N	6	0.00038**	116.84**	0.003*	0.49*
Eror	24	0.00005	7.01	0.00059	0.13
CV (%)		4.14	3.60	3.07	6.39

ns، * و :** به ترتیب نبود تفاوت معنی دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns , *, **: Non significantly difference, significantly difference at 5% and 1% of probability level, respectively.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرمتقابل شوری و نانوسیلیسیم بر صفات بیوشیمیایی بادرشبو.

Table 6. Mean comparison interaction effect of salinity and silicon nanoparticle on biochemical traits of dragonhead.

Treatment		Proline (µg/g fw)	Ion leakage (%)	Ascorbate peroxidase (µ mol $d^{-1}mg^{-1}$ protein)	Super oxidase dismutase (µ mol $d^{-1}mg^{-1}$ protein)
0	0	0.1408h	6g	0.6025f	2.1977g
	Nanosilicon 100 mg	0.1485g	6g	0.6037f	2.2123g
	Nanosilicon 500 mg	0.1521g	5h	0.615f	2.239g
Salinity 50 mM	0	0.1734e	12d	0.7064e	4.2637f
	Nanosilicon 100 mg	0.1623f	9f	0.8212d	5.0595e
	Nanosilicon 500 mg	0.1597f	7f g	0.7327e	4.9003ef
Salinity 100 mM	0	0.2017b	25b	0.8167d	7.59cd
	Nanosilicon 100 mg	0.1813d	17c	0.8471cd	8.162ab
	Nanosilicon 500 mg	0.1887c	12d	0.8763c	7.408d
Salinity 150 mM	0	0.2267a	30a	0.9173b	7.8183bcd
	Nanosilicon 100 mg	0.2053b	23bc	0.9673a	8.434b
	Nanosilicon 500 mg	0.2063b	18c	0.9883a	9.1663a

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.

In each column, means with at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level.

پراکسیداسیون لیپید غشا یکی از نشانه‌های تخریب غشا در سطح سلول تحت شرایط تنش شوری می‌باشد (Haghighi & Pessarakli, 2013). زیرا تنش‌های اسمزی از قبیل شوری با بستن روزنه‌ها و کاهش محتوای CO_2 وکاهش تولید کربن سبب تجمع غیرکنترل‌شده گونه‌های اکسیژن فعال نظیر رادیکال‌های سوپراکسید، هیدروژن‌پراکسید، رادیکال‌های هیدرکسیل و غیره شده که باعث آسیب به کلروپلاست‌ها (Hernandez *et al.*, 2000)، برهم خوردن آرایش در غشا و اختلال در دیگر فرایندهای فیزیولوژی، آسیب به DNA و واسرشته‌شدن پروتئین‌ها در سلول‌های گیاهی می‌شود (Hasanuzzaman *et al*., 2013; Soundararajan *et al*., 2018). کاربرد نانوذرات سیلیسیم در شرایط تنش شوری در باعث افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز، پراکسیداز، آسکوربات‌پراکسیداز و گلوتاتیون‌ردوکتاز و کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید و نشت غشا در گیاهان کدو تنبل (Siddiqui *et al*., 2014)، جو (Farhangi-Abdel-Haliem & Torabian 2018) و برنج (Abdel-Haliem *et al*., 2017) گردید.

فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز

مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای شوری و نانوذرات سیلیسیم بر گیاه بادرشبو (جدول ۶) نشان داد که افزایش سطوح تنش شوری و کاربرد نانوسیلیسیم منجر به افزایش میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز گردید. اما نانوسیلیسیوم میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز را به میزان بیشتری نسبت به تنش شوری افزایش داد. بیشترین فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز (۰/۹۸۸ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در گیاهان محلول‌پاشی شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم و در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم حاصل شد که با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم در همان شرایط شوری تفاوت معنی‌داری نداشت و کمترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز (۰/۶۰۲ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در گیاهان محلول‌پاشی‌نشده در تیمار بدون شوری حاصل شد.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری و کاربرد نانوسیلیسیم منجر به افزایش میزان فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز گردیدند. مشابه آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز، تیمار نانوسیلیسیم میزان فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز را به میزان بیشتری نسبت به تنش شوری افزایش داد. بیشترین میزان فعالیت این آنزیم (۹/۱۶ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در گیاهان بادرشبو محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوسیلیسیم در شرایط تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم بدست آمد و کمترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز

(۲/۱۹ میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) در گیاهان محلول‌پاشی نشده در تیمار بدون شوری حاصل شد (جدول ۶).

تنش شوری باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز در گیاه بادرشبو شد و محلول پاشی نانوذرات سیلیسیم نیز فعالیت این آنزیم‌ها را به ویژه در شرایط تنش شوری شدید افزایش داد(جدول ۶). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهانی همانند برنج، توت فرنگی و گندم در معرض تنش شوری گزارش شده است (Kaya *et al*., 2003; Tuna *et al*., 2008). تأثیر سیلیسیم در افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز تحت تنش شوری در گیاه سورگوم (Kafi *et al*., 2011)، جو (Liang *et al*., 2003)، گوجه‌فرنگی (Al-Aghabary *et al*., 2004)، یونجه (Wang *et al*., 2011) و ذرت (Moussa, 2006) گزارش شده است. این افزایش فعالیت آنزیمی در جهت جاروب‌کردن رادیکال‌های آزاد در شرایط شوری می‌باشد (Kusvuran *et al*., 2012; Hasanuzzaman *et al*., 2012). که این امر از پراکسیداسیون لیپیدها جلوگیری می‌کند (Parvaiz & Satyawati, 2008). Li *et al*. (2016) گزارش کردند کاربرد سیلیسیم در گیاه شیرین بیان (*Glycyrrhiza uralensis*) در شرایط تنش شوری منجر به افزایش میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز و کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید می‌شود. پژوهشگران معتقدند که اثر مثبت مصرف سیلیسیم در جلوگیری از کاهش رشد ناشی از شوری نیز به‌دلیل تأثیر این عنصر بر تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ازجمله سوپراکسیددیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز می‌باشد (Wang *et al*., 2011).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد تغذیه گیاهی صحیح با نانوسیلیسیم یکی از مهم‌ترین راهکارها برای کاهش تنش شوری در تولید گیاه بادرشبو است. منبع غذایی معدنی برای گیاهان یک نقش اساسی در بهبود پتانسیل تحمل گیاهان برضد تنش‌های مختلف محیطی شامل شوری بازی می‌کند. کاربرد سیلیسیم تحت تنش شوری باعث افزایش زیست‌توده، رشد گیاه و رنگدانه‌های فتوسنتز می‌شود. سیلیسیم همچنین نقش حیاتی در تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنظیم سنتز محلول‌های سازگاری (پرولین و قندهای محلول) و تعدیل اسمزی تحت هر دو شرایط تنش خشکی و شوری دارد.

REFERENCES

1. Abdel-Haliem, M. E., Hegazy, H. S., Hassan, N. S., & Naguib, D. M. (2017). Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering*, 99, 282-289.
2. Ahmad, P., Ahanger, M. A., Alam, P., Alyemeni, M. N., Wijaya, L., & Ali, S. (2019a). Silicon (Si) supplementation alleviates NaCl toxicity in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] through the modifications of physio-biochemical attributes and key antioxidant enzymes. *Journal of Plant Growth Regulation,* 38, 70-82
3. Ahmed, M., Hassen, F. U., Qadeer, U., & Aslam, M. A. (2011). Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. *African Journal of Agricultural Research*, *6*(3), 594-607.
4. Alaei, M., Karami Zarandi, Z., Arghavani, M., & Salehi, F. (2021). The Study of effects of spermine under salinity stress on morphophysiological characteristics of Catharanthus roseus L. Iranian Journal of Horticultural Science , 52(3), .553-564 (In Farsi).
5. Al-Aghabary, K., Zhu, Z., & Shi, Q. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, *27*(12), 2101-2115.
6. Allakhverdiev, S. I., Sakamoto, A., Nishiyama, Y., Inaba, M., & Murata, N. (2000). Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant Physiology*, *123*(3), 1047-1056.
7. Amirossadat, Z., Mohammadi Ghehsareh, A., & Mojiri, A. (2012). Impact of silicon on decreasing of salinity stress in greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) in soilless culture. *Journal of Biological Environmental Science*, 6(17), 171-174.
8. Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M., & Byrt, C. S. (2019). Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy*, *9*(5), 246.

9. Banerjee, A., & Roychoudhury, A. (2017). Epigenetic regulation during salinity and drought stress in plants: histone modifications and DNA methylation. *Plant Gene*, *11*, 199-204.
10. Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*(1), 205-207.
11. Cao, B. L., Wang, L., Gao, S., Xia, J., & Xu, K. (2017). Silicon-mediated changes in radial hydraulic conductivity and cell wall stability are involved in silicon-induced drought resistance in tomato. *Protoplasma, 254*(6), 2295-2304.
12. Chen, W., Yao, X., Cai, K., & Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, *142*(1), 67-76.
13. Chutipaijit, S., Cha-um, S., & Sompornpailin, K. (2011). High contents of proline and anthocyanin increase protective response to salinity in *'Oryza sativa'* L. spp.'indica'. *Australian Journal of Crop Science*, *5*(10), 1191.
14. Da Silva Lobato, A. K., Guedes, E. M. S., Marques, D. J., & de Oliveira Neto, C. F. (2013). Silicon: a benefic element to improve tolerance in plants exposed to water deficiency. *Responses of Organisms to Water Stress*, 95-113.
15. Dantas, B. F., Ribeiro, L. D. S., & Aragão, C. A. (2007). Germination, initial growth and cotyledon protein content of bean cultivars under salinity stress. *Revista Brasileira de Sementes*, *29*(2), 106-110.
16. Dastmalchi, K., Dorman, H. D., Laakso, I., & Hiltunen, R. (2007). Chemical composition and antioxidative activity of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) extracts. *LWT-Food Science and Technology*, *40*(9), 1655-1663.
17. De Lacerda, C. F., Cambraia, J., Oliva, M. A., Ruiz, H. A., & Prisco, J. T. (2003). Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. *Environmental and Experimental Botany.* 49: 107-120.
18. Demetriou, G., Neonaki, C., Navakoudis, E., & Kotzabasis, K. (2007). Salt stress impact on the molecular structure and function of the photosynthetic apparatus the protective role of polyamines. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, *1767*(4), 272-280.
19. Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, *32*(1), 93-101.
20. Doshi, R., Braida, W., Christodoulatos, C., Wazne, M., & O'Connor, G. (2008). Nano-aluminum: transport through sand columns and environmental effects on plants and soil communities. *Environmental Research*, *106*(3), 296-303.
21. El-Ramady, H., Alshaal, T., Abowaly, M., Abdalla, N., Taha, H. S., Al-Saeedi, A. H., & Sztrik, A. (2017). Nanoremediation for sustainable crop production. In *Nanoscience in Food and Agriculture* 5 (pp. 335-363). Springer, Cham.
22. Fahad, S., Hussain, S., Matloob, A., Khan, F. A., Khaliq, A., Saud, S., & Faiq, M. (2015). Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant Growth Regulation*, *75*(2), 391-404.
23. Farhangi-Abriz, S., & Torabian, S. (2018). Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma,* 255(3), 953-962.
24. Fleck, A. T., Schulze, S., Hinrichs, M., Specht, A., Waßmann, F., Schreiber, L., & Schenk, M. K. (2015). Silicon promotes exodermal casparian band formation in si-accumulating and si-excluding species by forming phenol complexes. *PLoS One*, *10*(9), e0138555.
25. Gomes-Filho, E., Lima, C. R. F. M., Costa, J. H., da Silva, A. C. M., Lima, M. D. G. S., de Lacerda, C. F., & Prisco, J. T. (2008). Cowpea ribonuclease: properties and effect of NaCl-salinity on its activation during seed germination and seedling establishment. *Plant Cell Reports*, *27*(1), 147-157.
26. Gong, H.J., Chen, K.M., Chen, G.C., Wang, S.M., & Zhang, C.L. (2003). Effect of silicon on growth of wheat under drought. *Journal* of *Plant Nutrition*, 26(5), 1055-1063.
27. Gong, H.J., Randall, D.P., & Flowers, T.J. (2006). Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant, Cell & Environment*. 29, 1970-1979.
28. 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.
29. Hajiboland, R., & Cheraghvareh, L. (2014). Influence of Si supplementation on growth and some physiological and biochemical parameters in salt-stressed tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants. *Journal of Sciences,* 25(3), 205-217.
30. Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., da Silva, J. A. T., & Fujita, M. (2012). Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: antioxidant defense is a key factor. In *Crop stress and its management: Perspectives and strategies* (pp. 261-315). Springer, Dordrecht.

31. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2013). Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. In *Ecophysiology and responses of plants under salt stress* (pp. 25-87). Springer, New York, NY.
32. Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxová, M., & Sugimoto, Y. (2003). Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant and Cell Physiology*, 44, 743-749.
33. Hernandez, J. A., Jiménez, A., Mullineaux, P., & Sevilia, F. (2000). Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defences. *Plant Cell and Environment*, *23*(8), 853-862.
34. Hussein, M. S., El-Sherbeny, S. E., Khalil, M. Y., Naguib, N. Y., & Aly, S. M. (2006). Growth characters and chemical constituents of *Dracocephalum moldavica* L. plants in relation to compost fertilizer and planting distance. *Scientia Horticulturae*, *108*(3), 322-331.
35. Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *30*(5), 435-458.
36. Kafi, M., Nabati, J., Masoumi, A., & Mehrgerdi, M. Z. (2011). Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. *Pakistan Journal of Botany*, *43*(5), 2457-2462.
37. Kaya, C., Higgs, D., Ince, F., Amador, B. M., Cakir, A., & Sakar, E. (2003). Ameliorative effects of potassium phosphate on salt-stressed pepper and cucumber. *Journal of Plant Nutrition*, *26*(4), 807-820.
38. Kiani Chalmardi, Z., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H. R. (2012). Evaluation of the effects of silicon nutrition on alleviation of iron deficiency in rice plants (*Oriza sativa* L.) with emphasis on growth and antioxidant enzymes activity. *Iranian Journal of Plant Biology.* 4(14):74-61 (In Farsi).
39. Kusvuran, S., Ellialtioglu, S., Yasar, F., & Abak, K. (2012). Antioxidative enzyme activities in the leaves and callus tissues of salt-tolerant and salt-susceptible melon varieties under salinity. *African Journal of Biotechnology,* 11(3), 635-641.
40. Lee, S. K., Sohn, E. Y., Hamayun, M. Yoon, J. Y., & Lee, I. J. (2010). Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry Systems*, 80, 333-340
41. Liang, Y. C., Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon mediated alleviation of abiotic stress in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147, 422-428.
42. Liang, Y., Chen, Q. I. N., Liu, Q., Zhang, W., & Ding, R. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, *160*(10), 1157-1164.
43. Liu, P., Yin, L., Wang, S., Zhang, M., Deng, X., Zhang, S., & Tanaka, K. (2015). Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 42-51.
44. Mane, A. V., Karadge, B. A., & Samant, J. S. (2010). Salinity induced changes in photosynthetic pigments and polyphenols of *Cymbopogon nardus* (L.) Rendle. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, *2*(3), 338-347.
45. Marschner, H., & Römheld, V. (1994). Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and Soil*, *165*(2), 261-274.
46. Mohebi, M., Babalar, M., Fattahi Moghadam, M.R. & Askary, M.A. (2021). Effects of potassium and calcium on vegetative growth and mineral balance of apple tree grafted on dwarfing rootstocks, under salinity stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 52(2): 429-446 (In Farsi).
47. Mohsenzadeh, S., Shahrtash, M., & Mohabatkar, H. (2011). Interactive effects of salicylic acid and silicon on some physiological responses of cadmium-stressed maize seedlings. *Iranian Journal of Science and Technology,* 201(1), 57-60(In Farsi).
48. Mohsenzadeh, S., Shahrtash, M., & Teixeira de Silva, J. A. (2012) Silicon improves growth and alleviates toxicity of cadmium in maize seedling. *Plant Stress*, 6(1), 39-43.
49. Moussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, 8(3), 293-297.
50. Mozaffarian, V. (2003). *Iranian plant names culture.* University of Tehran Publications. 395 pages. (In Farsi).
51. Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Eenvironment*, *25*(2), 239-250.
52. Naeem, M., Ansari, A. A., & Gill, S. S. (2017). *Essential plant nutrients: uptake, use efficiency, and management.* Springer, 350 pp.
53. Nahar, K., Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2016). Roles of osmolytes in plant adaptation to drought and salinity. In *Osmolytes and plants acclimation to changing environment: Emerging omics technologies* (pp. 37-68). Springer, New Delhi.

54. Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, *22*(5), 867-880.
55. Nayyar, H., & Walia, D. P. (2003). Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid. *Biological Plantarum*, 46, 275-279.
56. Netondo, G. W., Onyango, J. C., & Beck, E. (2004). Sorghum and salinity: I. Response of growth, water relations, and ion accumulation to NaCl salinity. *Crop Science*, 44(3), 797-805.
57. Othman, Y., Al-Karaki, G., Al-Tawaha, A. R., & Al-Horani, A. (2006). Variation in germination and ion uptake in barley genotypes under salinity conditions. *World Journal of Agricultural Sciences*, *2*(1), 11-15.
58. Pahlich, E., Kerres, R., & Jäger, H. J. (1983). Influence of water stress on the vacuole/extravacuole distribution of proline in protoplasts of *Nicotiana rustica*. *Plant Physiology*, *72*(2), 590-591.
59. Parvaiz, A., & Satyawati, S. (2008). Salt stress and phyto-biochemical responses of plants-a review. *Plant Soil and Environment*, *54*(3), 89.-99.
60. Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2010). Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 106-115.
61. Peyvandi, M., Parande, H., & Mirza, M. (2011). Comparison of nano Fe chelate with Fe chelate effect on growth parameters and antioxidant enzymes activity of Ocimum basilicum. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*, 1(4), 89-98 (In Farsi).
62. Rahimi, R., Mohammakhani, A., Roohi, V., & Armand, N. (2012). Effects of salt stress and silicon nutrition on cholorophyll content, yield and yield components in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(21), 1591-1595.
63. Redmann, R. E., Haraldson, J., & Gusta, L. V. (1986). Leakage of UV-absorbing substances as a measure of salt injury in leaf tissue of woody species. *Physiologia Plantarum*, *67*(1), 87-91.
64. Reezi, S., Kalantari, M. B. S., Okhovvat, S. M., & Jeong, B. R. (2009). Silicon alleviates salt stress, decreases malondialdehyde content and affects petal color of salt-stressed cut rose (*Rosa hybrida* L.)'Hot Lady'. *African Journal of Biotechnology*, *8*(8), 1502.
65. Ritchie, S. W., Nguyen, H. T., & Holaday, A. S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, *30*(1), 105-111.
66. Romero-Aranda, M. R., Jurado, O., & Cuartero, J. (2006). Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, *163*(8), 847-855.
67. Roychoudhury, A., Banerjee, A., & Lahiri, V. (2015). Metabolic and molecular-genetic regulation of proline signaling and itscross-talk with major effectors mediates abiotic stress tolerance in plants. *Turkish Journal of Botany*, *39*(6), 887-910.
68. Sacala, E. (2009). Role of silicon in plant resistance to water stress. *Journal of Elementology*, *14*(3), 619-630.
69. Sattar, A., Cheema, M. A., Abbas, T., Sher, A., Ijaz, M., & Hussain, M. (2017). Separate and combined effects of silicon and selenium on salt tolerance of wheat plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, *64*(3), 341-348.
70. Shah, F., & Wu, W. (2019). Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments. *Sustainability*, 11, 1485.
71. Shahrtash, M., & Mohsenzadeh, S. (2011). The effect of silicon on biochemical characteristics of maize seedling infected by *Pythium aphanidermatum* during periods of high temperature and humidity. *Asian Journal Experimental Biology Science*, 2(1), 96-101.
72. Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(2), 123-131.
73. Shu, L. Z., & Liu, Y. H. (2001). Effects of silicon on growth of maize seedlings under salt stress. *Agro-Environmental Protection*, *20*(1), 38-40.
74. Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Faisal, M., & Al Sahli, A. A. (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental toxicology and Chemistry*, *33*(11), 2429-2437.
75. Siringam, K., Juntawong, N., Cha-um, S., & Kirdmanee, C. (2011). Salt stress induced ion accumulation, ion homeostasis, membrane injury and sugar contents in salt-sensitive rice (*Oryza sativa* L. spp. i*ndica*) roots under isoosmotic conditions. *African Journal of Biotechnology*, *10*(8), 1340-1346.
76. Soundararajan, P., Manivannan, A., Ko, C. H., & Jeong, B. R. (2018). Silicon enhanced redox homeostasis and protein expression to mitigate the salinity stress in *Rosa hybrida* 'Rock Fire'. *Journal of Plant Growth Regulation*, *37*(1), 16-34.

77. Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., & Kannan, N. (2012). Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(12), 1294-1296.
78. Swain, R., & Rout, G. R. (2017). Silicon in agriculture. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 233-260). Springer, Cham.
79. Tahir, M. A., Rahmatullah, T., Aziz, M., Ashraf, S., Kanwal, S., & Maqsood, M. A. (2006). Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum L.*) under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, *38*(5), 1715-1722.
80. Tuna, A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., & Girgin, A. R. (2008). Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany*, 62, 10-16.
81. Voetberg, G., & Stewart, C. R. (1984). Steady state proline levels in salt-shocked barley leaves. *Plant Physiology*, *76*(3), 567-570.
82. Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H., & Deng, X. (2015). Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 759, 1-10.
83. Wang, X., Wei, Z., Liu, D., & Zhao, G. (2011). Effects of NaCl and silicon on activities of antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa. *African Journal of Biotechnology*, *10*(4), 545.
84. Wu, J., Guo, J., Hu, Y., & Gong, H. (2015). Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon-mediated alleviation of cadmium stress. *Frontiers in Plant Science*, 6, 453.
85. Yassen, A., Abdallah, E., Gaballah, M., & Zaghloul, S. (2017). Role of silicon dioxide nano fertilizer in mitigating salt stress on growth, yield and chemical composition of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *International Journal of Agricultural Research*, 22, 130-135.
86. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K., & Oka, M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor. Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 3099-3107.
87. Zare, H., Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A., & Mohsenzadeh, S. (2015). Effect of silicon and nanosilicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. *Iranian Journal of Plant Biology*, 7(26), 59-74. (In Farsi).
88. Zhu, Y.X., Xu, X.B., Hu, Y.H., Han, W.H., Yin, J.L., Li, H.L., & Gong, H.J. (2015). Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Reports*, 34, 1629-1646.