The effect of silicon on some morpho-physiological and phytochemical traits of Purple Coneflower (*Echinacea purpurea* L.) under salinity stress

Farshad Zare, Sarah Khorasaninejad *, Khodayar Hemmati
Department of Horticulture, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Abstract
Salinity is one of the most significant abiotic stresses that affects plant growth and yield in various ways. On the other hand, silica, the second most abundant element in the Earth's crust, increases plants' tolerance under stress; therefore, given the importance of the Purple Coneflower, we investigated the effect of silicon on some of the morphological and phytochemical traits of this a medicinal plant under salt stress. For this purpose, a pot experiment was conducted as a factorial based on a completely randomized design with four levels of salinity (control, 25, 50 and 75 mM sodium chloride), four levels of silicon (control, 0.75, 1.5 and 2.25 mM), and four replications. The experiment was done in greenhouse of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources in 2016. The stress was imposed in hydroponics (perlite and coir) culture medium with Hoagland nutrition solution. Since flowering begun, growth, morphological, physiological and phytochemical indices including root length, fresh weight of shoots and roots, dry weight of shoots and roots, leaf scorch, leaf relative water content, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, total chlorophyll, total flavonoids, total phenol and antioxidant activity of the root were measured. Salt stress increased all measured traits to a moderate amount and then decreased them. All traits except the percentage of leaf scorch improved with silicon concentration. The interaction of these two factors was significant in all traits except fresh and dry weight of shoots and the percentage of leaf scorch. In addition, the negative effects of salinity stress, especially on low to moderate levels decreased significantly in growth, morphophysiological and phytochemical traits of the plant with silicon and thereby the growth improved. So, the best salinity concentration to increase the biochemical factors was 25 mM of sodium chloride and the best concentration of silicon to reduce the negative effects of salinity stress was 2.25 mM.
Keywords: Dry weight, Hogland, Hydroponic, Leaf burn

* Corresponding Author: khorasaninejad@gau.ac.ir

Copyright©2018, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

زیست‌شناسی گیاهی ایران، سال دهم، شمارهٔ سی و هفتم، پاییز ۱۳۹۷، صفحهٔ ۵۵-۶۸
تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۶/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۱ و ۹۷/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

اثر سیلیسیوم در برخی صفات مورفوفیزیولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) در تنش شوری

فرشاد زارع، سارا خراسانی نژاد *، خدایار همتی
گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

شوری از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که با روش‌های متفاوت بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر می‌گذارد. همچنین سیلیسیوم، دومین عنصر فراوان پوستهٔ زمین، مقاومت به تنش را در گیاهان افزایش می‌دهد؛ بنابراین باتوجه‌به اهمیت دارویی گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.)، آزمایشی گلدانی برای بررسی اثر سیلیسیوم در صفات ریخت‌شناختی و فیتوشیمیایی این گیاه در تنش شوری به‌صورت فاکتوریل برپایهٔ طرح کاملاً تصادفی با غلظت‌های شوری صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید و سیلیسیوم با غلظت‌های صفر، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار در چهار تکرار انجام شد. تنش در محیط‌کشت هیدروپونیک (پرلیت و کوکوپیت) و محلول غذایی هوگلند اعمال شد. پس از شروع گل‌دهی، شاخص‌های رشدی، ریخت‌شناختی، فیزیولوژیک و فیتوشیمیایی ازجمله طول ریشه، وزن تر اندام هوایی و ریشه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، سوختگی برگ، آب نسبی برگ، کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، کلروفیل کل، فلاونوئیدکل، فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ریشه اندازه‌گیری شدند. تنش شوری، همهٔ صفات اندازه‌گیری‌شده را تا مقدار متوسط افزایش و سپس کاهش داد. با افزایش غلظت سیلیسیوم، همهٔ صفات بجز درصد سوختگی برگ بهبود یافتند. اثر متقابل این دو عامل در همهٔ صفات بجز وزن تر و خشک اندام هوایی و درصد سوختگی برگ معنی‌دار بود و آثار منفی ناشی از تنش شوری به‌ویژه در مقادیر کم تا متوسط در صفات رشدی، مورفوفیزیولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه با سیلیسیوم، بسیار کاهش یافت و رشد را بهبود داد؛ به‌طوری‌که بهترین غلظت شوری برای افزایش فاکتورهای بیوشیمیایی، ۲۵ میلی‌مولار سدیم کلرید و بهترین غلظت سیلیسیوم برای کاهش آثار منفی تنش شوری، ۲/۲۵ میلی‌مولار بود.

واژه‌های کلیدی: درصد سوختگی برگ، وزن خشک، هوگلند، هیدروپونیک

* نگارندهٔ مسئول: نشانی پست الکترونیک: khorasaninejad@gau.ac.ir، شمارهٔ تماس: ۰۱۷۳۲۴۴۰۸۷۰

Copyright©2018, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

مقدمه

شوری خاک شرایطی است که در خاک غلظت‌های زیاد نمک وجود دارد. هدایت الکتریکی (EC) این خاک‌ها برابر با چهار دسی‌زیمنس بر متر یا بیشتر است (Brown, 2008). این مقدار از شوری خاک، عملکرد بیشتر محصولات کشاورزی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Munns and Tester, 2008). درحال‌حاضر سطح درخورتوجهی از زمین‌های کشاورزی تا حدی شور هستند و وسعت زمین‌های شور درحال افزایش است (Pitman and Läuchli, 2002). برای نمونه از دلایل شوری روزافزون خاک زمین‌های کشاورزی، آبیاری نامناسب و بیش از حد نیاز است (Mahajan and Tuteja, 2005). با افزایش شوری خاک، زمین‌های کشاورزی تخریب می‌شوند و تخمین زده شده است که ۵۰ درصد از این زمین‌ها تا نیمهٔ قرن ۲۱ استفاده‌شدنی نخواهند بود (Hasanuzzaman *et al*., 2013). آثار نامطلوب شوری بر گیاهان به سه گروه کلی شامل کاهش پتانسیل اسمزی خاک، تخریب ساختمان فیزیکی خاک و افزایش غلظت یون‌های سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) تقسیم می‌شوند (Sreenivasulu *et al*., 2007).

ثابت شده است شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ رشد گیاهان زراعی است؛ به‌طوری‌که تیمار گلرنگ با پتاسیم کلرید کاهش ارتفاع، طول ریشه و وزن تر اندام هوایی این گیاه را نسبت به شاهد باعث شد (Gengmao *et al*., 2015). همچنین افزایش مقدار نمک به‌طور معنی‌داری سطح برگ، طول ساقه، قطر ساقه، تعداد گل و وزن خشک اندام‌های مختلف گل‌گاوزبان را کاهش داد (Jaffel *et al*., 2011). در همین راستا نتایج پژوهش‌ها نشان دادند تنش شوری کاهش کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید را باعث می‌شود؛ به‌طوری‌که افزایش شوری میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید را در آویشن، آویشن شیراز، کاکوتی کوهی (Koocheki *et al*., 2008) و مرزه (Najafi *et al*., 2010) کاهش داد که کاهش میزان کلروفیل گیاهانی که در محیط شور رشد کرده‌اند به‌دلیل افزایش تجزیهٔ کلروفیل و جلوگیری از سنتز این رنگ‌دانه‌ها است (García-Sánchez *et al*., 2002). علاوه‌براین در رازیانه کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی به‌دلیل شوری، به اختلال در جذب یون‌های دخیل در سنتز کلروپلاست و پروتئین‌ها و تجزیهٔ پلاستیدها نسبت داده می‌شود (El-Wahab, 2006). همچنین شوری آثار نامطلوب بر جوانه‌زنی گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش تنش شوری سرعت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی و طول ریشه‌چهٔ این گیاه کاهش یافت (Alizade Ahmadabadi and Khorasaninejad, 2016). در همین راستا از نتایج بررسی اثر تنش شوری در اسطوخودوس (*Lavandula angustifolia*) در کشت هیدروپونیک مشخص شد با افزایش شوری؛ طول ساقه، وزن تر ساقه و وزن تر و خشک ریشهٔ این گیاه کاهش یافت و طول ریشه و درصد اسانس ابتدا تا غلظت شوری ۲۵ میلی‌مولار افزایش و سپس کاهش یافت (Khorasaninejad *et al*. 2016). در پژوهش دیگری با بررسی اثر تنش شوری در کشت هیدروپونیک در نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita*)، مشخص شد تیمارهای مختلف شوری آثار

چشمگیر و معنی‌داری بر همهٔ صفات ریخت‌شناختی، کمیت اسانس و ترکیب اجزاء اسانس نعناع‌فلفلی دارند و نعناع‌فلفلی تحمل متوسطی نسبت به تنش شوری دارد (Khorasaninejad *et al.* 2010).

پس از اکسیژن، سیلیسیوم فراوان‌ترین عنصر پوستهٔ زمین است که بسته به نوع گیاه ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک آن را تشکیل می‌دهد (Khan *et al.* 2016). سیلیسیوم افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها را موجب می‌شود؛ بنابراین نقش آن در رشد گیاه در زمان تنش نسبت به شرایط عادی مشهودتر است (Ma and Yamaji, 2008). آثار مفید سیلیکون برای گیاهان شامل افزایش فتوسنتز، افزایش مقاومت به آفات و بیماری‌ها، کاهش سمی‌بودن عناصر و مقاومت به تنش‌ها هستند (Ma *et al.*, 2004; Ahmed *et al.*, 2014). اثر سیلیسیوم در کاهش تنش شوری در برنج، خیارسبز و گوجه‌فرنگی بررسی شده است. گزارش‌ها نشان می‌دهند اگرچه سدیم کلرید رشد را کاهش می‌دهد، سیلیسیوم به‌طور معنی‌داری اثر آن را کم می‌کند (Zhu *et al.*, 2004; Al-aghabary *et al.*, 2005). همچنین سیلیسیوم، پتانسیل اسمزی را در برگ‌های گندم کاهش می‌دهد و جذب آب را از ریشه تسهیل می‌کند (Chen *et al.*, 2011). در همین راستا با کاربرد غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سیلیسیوم در محیط‌کشت سویا، ارتفاع گیاه، بیومس تازه و خشک، محتوای کلروفیل و سطح جیبرلین داخلی افزایش یافت و کاربرد هم‌زمان سیلیسیوم با شرایط تنش شوری در کشت هیدروپونیک، کاهش آثار مخرب تنش شوری را در رشد و توسعهٔ سویا سبب شد (Lee *et al.*, 2010).

سرخارگل (*E. purpurea*) به‌دلیل خواص دارویی در بسیاری از کشورها کشت و استفاده می‌شود (Omidbaigi, 2002). این گیاه حاوی مواد مؤثر ارزشمندی مانند ترکیبات آلکیل‌آمیدی، پلی‌ساکاریدی و اسانس است (Sabra, 2012). دربارهٔ میزان تحمل گونه‌های جنس *Echinacea* به تنش شوری در کشت هیدروپونیک مشخص شده است تفاوت زیادی بین سه گونهٔ *Echinacea purpurea*، *Echinacea palida* و *Echinacea angustifolia* وجود دارد؛ به‌طوری‌که میان گونه‌ها، بیشترین میزان بقا مربوط به *E. purpurea* و کمترین مربوط به *E. angustifolia* است. همچنین سرعت فتوسنتز در *E. angustifolia* در غلظت‌های کم شوری کاهش یافت؛ درحالی‌که در *E. purpurea* و *E. pallida* در غلظت‌های بیشتر یعنی ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌مولار سدیم کلرید کاهش یافت که نشان‌دهندهٔ حساسیت نسبتاً زیاد این جنس است که به‌ترتیب *E. purpurea*، *E. pallida* و *E. angustifolia* بیشترین مقاومت را به تنش شوری دارند (Sabra *et al.*, 2012b). در بررسی دیگری مشخص شد در تنش شوری در کشت هیدروپونیک، متابولیت‌های ثانویه در هردو گونهٔ *E. purpurea* و *E. angustifolia* در معرض شوری تا ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید بیشترین کیفیت را داشتند؛ ولی در گونهٔ *E. pallida* بیشترین ترکیبات در میزان شوری بیشتر تولید شد (Sabra *et al.*, 2012a).

باتوجه‌به اهمیت دارویی گیاه سرخارگل و

محدودیت‌های تولید مزرعه‌ای این گیاه به‌دلیل شوری خاک و آب‌های کشاورزی، در آزمایش حاضر، نقش سیلیسیوم در کاهش آثار منفی تنش شوری در ویژگی‌های رشدی، مورفوفیزیولوژیک و فیتوشیمیایی سرخارگل بررسی شد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر تنش شوری و سیلیسیوم در برخی شاخص‌های رشدی، ریخت‌شناختی و فیتوشیمیایی سرخارگل (*E. purpurea*) آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل برپایهٔ طرح کاملاً تصادفی با چهار غلظت شوری صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید (NaCl) و سیلیسیوم با چهار غلظت صفر، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار در چهار تکرار در سال ۱۳۹۵ در گلخانهٔ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد.

نشاهای گیاه سرخارگل در گلدان‌های پرشده با پرلیت و کوکوپیت به نسبت دو به یک کاشته شدند و تا زمان استقرار کامل، گیاهچه‌ها با محلول غذایی هوگلند باغلظت یک‌دوم، محلول‌دهی شدند. پس از دو هفته برای اعمال تنش شوری، سدیم کلرید (NaCl) خالص به محلول غذایی هوگلند اضافه شد و به‌مدت ۴۵ روز ادامه یافت و برای جلوگیری از تجمع نمک‌ها، گلدان‌ها هفته‌ای یک‌بار با آب فراوان آبیاری شدند؛ سپس سیلیسیوم در سه وعده و به‌جای سدیم کلرید، به محلول غذایی اضافه شد. پس از شروع گل‌دهی، شاخص‌های رشدی و ریخت‌شناختی مانند ارتفاع بوته، طول ریشه، تعداد برگ، وزن‌تر و خشک اندام‌هوایی و وزن‌تر و خشک ریشه اندازه‌گیری شدند که اندازه‌گیری طول ریشه پس از شستن ریشه‌ها با خط‌کش انجام شد. سطح برگ با دستگاه سطح برگ‌سنج (مدل Cambridge، شرکت Delta T Device، انگلستان) اندازه‌گیری شد. درصد سوختگی به‌صورت ظاهری و با درجه‌بندی کیفی محاسبه شد (Halevy *et al*., 1987). برای اندازه‌گیری آب نسبی برگ، قطعات یک سانتی‌متری از برگ جدا و وزن شدند و با قرار گرفتن در تاریکی و دمای چهار درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت، وزن اشباع و سپس با خشک‌شدن در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد وزن خشک به دست آمد. آب نسبی برگ از رابطهٔ ۱ محاسبه شد (Barrs and Weatherley, 1962).

رابطهٔ ۱

$$RWC = \frac{\text{وزن خشک} - \text{وزن تر}}{\text{وزن خشک} - \text{وزن آماس}} \times ۱۰۰$$

برای اندازه‌گیری کلروفیلa، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید، ۰/۵ گرم از بافت تازه خرد و در لولهٔ آزمایش ریخته شد؛ سپس ۱۰ میلی‌لیتر دی متیل‌سولفوکسید (DMSO) خالص به آن اضافه و به‌مدت سه ساعت در آون با دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از صاف‌کردن نمونه‌ها با کاغذ صافی، یک میلی‌لیتر از محلول صاف‌شده برداشت و به حجم پنج میلی‌لیتر رسانده شد و با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل 2800، شرکت Unico، USA) میزان جذب محلول به‌دست‌آمده در طول‌موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد. مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید از رابطه‌های ۲، ۳ و ۴ به دست آمد (Barns *et al*., 1992).

رابطهٔ ۲

$$Chl.a= [12.7(A663)-2.69(A645)]\times V/W$$

رابطهٔ ۳

$$Chl.b= [22.9(A645)-4.68(A663)]\times V/W$$

رابطهٔ ۴

$$Car = [7.6(A480)-1.49(A510)]\times V/W$$

در رابطه‌های یادشده V و W به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ حجم نهایی محلول برحسب میلی‌لیتر و وزن نمونه برحسب گرم هستند.

برای تهیهٔ عصارهٔ متانولی برای اندازه‌گیری فنل‌کل، فلاونوئیدکل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، یک گرم از ریشهٔ خشک‌شده به ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد اضافه شد و پس از آنکه به‌مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت از کاغذ صافی عبور داده شد.

اندازه‌گیری فنل‌کل با فولین - سیوکالتیو (Mrozikiewicz *et al*., 2010) انجام شد. بدین‌منظور ۲۰ میکرولیتر از عصارهٔ تهیه‌شده با ۱/۶ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط و ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین به محلول یادشده اضافه شد. پس از پنج دقیقه ۳۰۰ میکرولیتر محلول سدیم کربنات ۲۰ درصد به محلول اضافه شد. نمونه‌ها پس از هم‌زدن به‌مدت ۳۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شدند؛ سپس جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۷۶۰ نانومتر خوانده شده و نتایج برحسب میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم نمونهٔ خشک محاسبه شدند. برای رسم نمودار کالیبراسیون از غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر گالیک اسید در متانول ۸۰ درصد استفاده شد. فنل کل بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم ریشهٔ خشک به دست آمد.

فلاونوئید کل با روش نورسنجی آلومینیوم کلرید (Bannayan *et al*., 2008) اندازه‌گیری شد. در این روش به ۰/۵ میلی‌لیتر عصارهٔ گیاهی، ۱/۵ میلی‌لیتر متانول، ۰/۱ میلی‌لیتر محلول یک درصد آلومینیوم کلراید، ۰/۱ میلی‌لیتر محلول پتاسیم استات یک مولار و ۲/۸ میلی‌لیتر آب‌مقطر اضافه شد. پس از ۳۰ دقیقه نگه‌داری در دمای محیط، جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر خوانده شد و برای رسم نمودار استاندارد از غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر استاندارد کوئرسیتین استفاده شد.

میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی با اندازه‌گیری درصد مهار رادیکال آزاد دی فنیل پیکریل هیدرازیل (DPPH) اندازه‌گیری شد (Guo *et al*., 2005)؛ به‌طوری‌که در این روش یک میلی‌لیتر از محلول متانولی یک مولار دی فنیل پیکریل هیدرازیل با یک میلی‌لیتر از عصارهٔ متانولی به‌شدت مخلوط شد. مخلوط حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق در تاریکی نگه‌داری و درنهایت، جذب آنها در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر خوانده شد و فعالیت برحسب درصد نسبی مهار دی فنیل پیکریل هیدرازیل با رابطهٔ ۵ محاسبه شد.

رابطهٔ ۵

$$DPPH(\%)= \frac{\text{جذب نمونه(٪)}-\text{جذب شاهد(٪)}}{\text{جذب شاهد (٪)}} \times ۱۰۰$$

تحلیل آماری: محاسبات آماری این آزمایش با نرم‌افزار SAS نسخهٔ ۹/۱ انجام شدند و برای مقایسهٔ میانگین‌ها از آزمون LSD استفاده شد.

نتایج

باتوجه‌به نتایج تجزیهٔ واریانس در جداول ۱ و ۲، تنش شوری بر طول ریشه، وزن تر اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی، وزن تر ریشه، وزن

خشک ریشه، سوختگی برگ، سطح برگ، آب نسبی برگ، کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید، کلروفیل کل، فلاونوئیدکل ریشه، فنل کل ریشه و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ریشه در سطح یک درصد تأثیر معنی‌دار داشت.

علاوه‌برآن، اثر سیلیسیوم در طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه، آب نسبی برگ، کلروفیل a، کلروفیل b در سطح یک درصد و بر وزن تر و خشک اندام هوایی و کاروتنوئید در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل تنش شوری و سیلیسیوم نیز در وزن تر و خشک ریشه، طول ریشه، آب نسبی برگ، کلروفیل a، کلروفیلb، کلروفیل کل، فلاونوئید ریشه، فنل ریشه در سطح یک درصد و در کاروتنوئید در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول۱- نتایج تجزیهٔ واریانس تأثیر تنش شوری و سیلیسیوم در شاخص‌های رشدی و مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی سرخارگل

منبع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات							
		طول ریشه	سطح برگ	وزن‌تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	آب نسبی برگ	سوختگی برگ
شوری	۳	۲۰۱/۰۹**	۵۳۷۶**	۶۶۵۳**	۹۸/۰۹**	۲۰۷/۳۷**	۴/۷۴**	۲۷۴۴**	۱۶۵۹۳**
سیلیسیوم	۳	۱۵۱/۱۳**	۲۱۳۲**	۵۱۲/۸*	۲۳/۲۸*	۹۶/۴۸**	۶/۳۸**	۲۵۱**	۲۹۷/۴ ns
شوری×سیلیسیوم	۹	۳۷/۳۸**	۱۸۱/۳**	۲۱۳/۳ ns	۴/۵۷ns	۲۰/۷۲**	۲/۲۳**	۲۲۳**	۱۳۴/۴ ns
خطا	۴۸	۵/۰۳	۳۱/۵	۱۵۴/۲	۶/۱	۶/۲۹	۰/۲۵	۵۳/۷۴	۲۶۷/۱
ضریب تغییرات (٪)		۱۲/۴۲	۵/۳۶	۲۴/۶۸	۲۸/۰۳	۹/۸۸	۸/۹۶	۱۳/۱۵	۳۱/۸۸

ns بیان‌کنندهٔ معنی‌دارنبودن است. * و ** به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال P≤۰/۰۵ و P≤۰/۰۱ هستند.

جدول۲- نتایج تجزیهٔ واریانس تأثیر تنش شوری و سیلیسیوم در شاخص‌های فیتوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل

منبع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات							
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	فلاونوئید ریشه	فنل ریشه	فعالیت آنتی‌اکسیدانی ریشه
شوری	۳	۱۲/۰۹**	۳/۴۵**	۲۸/۰۵**	۱/۰۳**	۱۸۴۱۳**	۱۷۸۸۴**	۷۷۲۹**
سیلیسیوم	۳	۴/۰۴**	۰/۵۸**	۶/۲۳**	۰/۰۸*	۱۰۷۷۴**	۱۸۰۱**	۵۱/۹**
شوری×سیلیسیوم	۹	۰/۴۶**	۰/۲۶**	۰/۶۰**	۰/۰۰۱*	۵۴۶۵**	۲۵۱۹**	۸۶/۶**
خطا	۴۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۵۹	۴۷۵/۷	۲۶۶/۸	۷۱/۱
ضریب تغییرات (٪)		۷/۶۵	۲۳/۱۷	۹/۱۶	۲۵/۷۱	۲۰/۲۸	۹/۰۳	۱۶/۸۳

ns بیان‌کنندهٔ معنی‌دارنبودن است. * و ** به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ معنی‌داری در سطح احتمال P≤۰/۰۵ و P≤۰/۰۱ هستند.

نتایج مقایسهٔ میانگین آثار متقابل تنش شوری و سیلیسیوم (جدول ۳) نشان می‌دهند بیشترین طول ریشه در تیمار سدیم کلرید ۷۵ میلی‌مولار با سیلیسیوم ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار و تیمار سدیم کلرید ۲۵ میلی‌مولار با سیلیسیوم ۲/۲۵ میلی‌مولار و کمترین طول ریشه در تیمار شوری شاهد و بدون سیلیسیوم و تیمار شوری شاهد با غلظت‌های کم سیلیسیوم به دست آمد. با افزایش تنش شوری، سطح برگ کاسته شد؛ به‌طوری‌که کمترین سطح برگ در تیمارهای ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید و بدون کاربرد سیلیسیوم به دست آمد. بیشترین سطح برگ که در تیمار شاهد و غلظت‌های ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار سیلیسیوم مشاهده شد نشان می‌دهد سیلیسیوم قادر به افزایش سطح برگ به‌ویژه در شرایط کشت هیدروپونیک است. همچنین با افزایش غلظت سیلیسیوم در تنش شوری، کاهش سطح برگ جبران شد.

جدول ۳- نتایج مقایسهٔ میانگین آثار متقابل تنش شوری و سیلیسیوم در شاخص‌های رشدی و مورفوفیزیولوژیک سرخارگل

تیمار	طول ریشه (سانتی‌متر)	سطح برگ (سانتی‌متر مربع در بوته)	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	آب نسبی برگ (درصد)
S_1L_1	۱۰/۸۲ ± ۱/۳ ^{g}	۱۰۷/۵۷ ± ۶/۲ ^{de}	۶/۱۱ ± ۰/۱ ^{cde}	۵۸/۷۳ ± ۵/۰ ^{defg}
S_1L_2	۱۱/۲۷ ± ۱/۱ ^{g}	۱۲۳/۶۷ ± ۳/۷ ^{b}	۴/۷۸ ± ۰/۲ ^{gh}	۵۲/۲ ± ۵/۴ ^{fgh}
S_1L_3	۱۴/۸۸ ± ۱/۴ ^{f}	۱۳۲/۷۶ ± ۶/۸ ^{a}	۶/۸۸ ± ۰/۲ ^{ab}	۵۵/۴۳ ± ۷/۷ ^{efgh}
S_1L_4	۱۸/۵۲ ± ۲/۸ ^{de}	۱۳۴/۶۷ ± ۴/۰ ^{a}	۶/۶۲ ± ۰/۳ ^{abc}	۷۱/۵۳ ± ۶/۶ ^{abc}
S_2L_1	۱۴/۹۴ ± ۲/۲ ^{f}	۱۰۰/۳۳ ± ۳/۰ ^{ef}	۴/۳۲ ± ۰/۲ ^{hi}	۸۱/۳۶ ± ۵/۹ ^{a}
S_2L_2	۱۹/۵۵ ± ۲/۲ ^{cde}	۱۱۳/۸۶ ± ۹/۴ ^{cd}	۶/۵۵ ± ۰/۳ ^{abc}	۶۱/۳۲ ± ۹/۴ ^{cdef}
S_2L_3	۱۹/۲۳ ± ۳/۸ ^{cde}	۱۱۹/۹۶ ± ۱/۵ ^{bc}	۵/۸۱ ± ۰/۷ ^{def}	۶۶/۳۳ ± ۸/۹ ^{bcd}
S_2L_4	۲۶/۱۲ ± ۲/۲ ^{a}	۱۲۴/۷۴ ± ۱/۱ ^{ab}	۷/۱۲ ± ۰/۵ ^{a}	۷۶/۲۲ ± ۹/۰ ^{ab}
S_3L_1	۱۵/۰۲ ± ۱/۹ ^{f}	۸۳/۳۳ ± ۲/۹ ^{hi}	۵/۳۷ ± ۰/۵ ^{fg}	۴۹/۵۹ ± ۱۳/۶ ^{ghi}
S_3L_2	۱۶/۶۱ ± ۲/۹ ^{ef}	۸۱/۷۱ ± ۳/۲ ^{i}	۵/۴۴ ± ۰/۸ ^{efg}	۴۸/۵۷ ± ۷/۷ ^{ghi}
S_3L_3	۱۳/۵۱ ± ۲/۰ ^{fg}	۱۱۰/۷۳ ± ۳/۶ ^{d}	۴/۹۱ ± ۰/۶ ^{gh}	۶۴/۶۱ ± ۶/۲ ^{cde}
S_3L_4	۲۰/۷۷ ± ۲/۹ ^{bcd}	۸۹/۹۶ ± ۹/۳ ^{gh}	۶/۱۸ ± ۰/۹ ^{bcd}	۴۵/۵۵ ± ۵/۹ ^{hi}
S_4L_1	۲۲/۱۱ ± ۰/۷ ^{bc}	۷۲/۸۸ ± ۹/۲ ^{j}	۳/۹۲ ± ۰/۵ ^{i}	۴۰/۶۲ ± ۶/۳ ^{ij}
S_4L_2	۱۵/۳۲ ± ۲/۱ ^{f}	۷۶/۹۰ ± ۵/۳ ^{ij}	۴/۵۸ ± ۰/۵ ^{hi}	۳۷/۶ ± ۴/۵ ^{j}
S_4L_3	۲۶/۴۲ ± ۱/۹ ^{a}	۹۵/۱۶ ± ۵/۵ ^{fg}	۵/۳۲ ± ۰/۴ ^{fg}	۴۰/۵۴ ± ۴/۷ ^{ij}
S_4L_4	۲۳/۵۱ ± ۱/۸ ^{ab}	۱۰۲/۶۰ ± ۵/۵ ^{ef}	۵/۷۴ ± ۰/۵ ^{def}	۴۱/۶۰ ± ۴/۲ ^{ij}

مقادیر، میانگین چهار تکرار ± انحراف معیار هستند. حروف متفاوت، بیان‌کنندهٔ تفاوت معنی‌دار در سطح $P\leq۰/۰۵$ براساس آزمون LSD هستند. S1، S2، S3 و S4 به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ غلظت‌های صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید هستند. L1، L2، L3 و L4 به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ غلظت‌های صفر، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار سیلیسوم هستند.

باتوجه‌به اثر متقابل سیلیسیوم و تنش شوری در وزن خشک ریشه، بیشترین وزن خشک ریشه در غلظت ۲/۲۵ میلی‌مولار سیلیسیوم و تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار ایجاد شد. این نتیجه با نتایج تیمار شوری شاهد و سیلیسیوم‌های ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار و تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار و سیلیسیوم ۰/۷۵ میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار نداشت؛ به‌طوری‌که کاهش رشد به ناتوانی گیاه در جذب آب و مواد غذایی ناشی از کاهش پتانسیل اسمزی در محیط‌کشت نسبت به ریشه مربوط است (Aziz *et al.*, 2008). همچنین بیشترین مقدار صفت آب نسبی برگ مربوط به تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار بدون محلول‌پاشی سیلیسیوم بود که با آب نسبی برگ در تیمار شوری شاهد با سیلیسیوم ۲/۲۵ میلی‌مولار و تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار با سیلیسیوم ۲/۲۵ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری نداشت.

مقایسهٔ میانگین‌های صفات فیتوشیمیایی (جدول ۴) نشان داد کلروفیل a در تیمار شوری شاهد و سیلیکون ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار و تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار با سیلیسیوم ۲/۲۵ میلی‌مولار افزایش یافت.

جدول ۴- نتایج مقایسهٔ میانگین آثار متقابل تنش شوری و سیلیسیوم در صفات بیوشیمیایی سرخارگل

تیمار	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	کلروفیل کل (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	فنل کل ریشه (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)	فلاونوئید کل ریشه (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)
S_1L_1	۳/۵۱ ± ۰/۳۸^{de}	۱/۳۹ ± ۰/۲^{bcde}	۴/۹۰ ± ۰/۴۳^{bcd}	۱/۱۴ ± ۰/۱۱^{bcd}	۱۵۷/۹۵ ± ۷/۸^{efg}	۵۶/۴۲ ± ۲۲/۸^{jkl}
S_1L_2	۳/۲۳ ± ۰/۱۶^{ef}	۱/۸۹ ± ۰/۳^{a}	۵/۱۲ ± ۰/۴۱^{b}	۱/۰۷ ± ۰/۱۶^{abcde}	۱۴۷/۷۴ ± ۱۷/۵^{efgh}	۱۳۹/۹۸ ± ۲۳/۴^{cde}
S_1L_3	۴/۴۳ ± ۰/۲۶^{a}	۱/۷۴ ± ۰/۲^{ab}	۶/۱۷ ± ۰/۳۴^{a}	۱/۰۰ ± ۰/۰۱^{bcde}	۱۴۰/۳۹ ± ۱۲/۲^{fgh}	۳۴/۳۰ ± ۲۵/۹^{l}
S_1L_4	۴/۱۸ ± ۰/۴۴^{ab}	۱/۱۸ ± ۰/۲^{defg}	۵/۳۶ ± ۰/۴۷^{b}	۰/۹۵ ± ۰/۰۶^{bcdef}	۱۶۲/۳۹ ± ۵/۷^{ef}	۸۲/۰۹ ± ۲۸/۵^{ghij}
S_2L_1	۳/۹۹ ± ۰/۳۵^{bc}	۰/۹۹ ± ۰/۳^{fghi}	۴/۹۹ ± ۰/۵۵^{bc}	۱/۳۱ ± ۰/۲۵^{a}	۱۲۸/۰۱ ± ۸/۲^{h}	۹۸/۳۹ ± ۲۶/۰^{fghi}
S_2L_2	۳/۰۴ ± ۰/۳۲^{fg}	۱/۵۱ ± ۰/۲^{bcd}	۴/۵۵ ± ۰/۳۹^{cd}	۱/۲۹ ± ۰/۱۳^{ab}	۱۳۷/۰۴ ± ۴/۳^{gh}	۱۱۰/۵۴ ± ۲۰/۴^{efg}
S_2L_3	۳/۷۸ ± ۰/۳۴^{cd}	۱/۴۷ ± ۰/۲^{bcd}	۵/۲۵ ± ۰/۱۲^{b}	۱/۲۱ ± ۰/۰۷^{abc}	۱۸۶/۳۰ ± ۱۹/۵^{cd}	۱۹۰/۰۵ ± ۱۸/۷^{a}
S_2L_4	۴/۳۳ ± ۰/۳۰^{a}	۱/۶۷ ± ۰/۳^{abc}	۶/۰۰ ± ۰/۶۱^{a}	۱/۱۶ ± ۰/۰۵^{bc}	۱۶۶/۵۶ ± ۱۱/۷^{de}	۱۷۸/۵۶ ± ۱۸/۸^{ab}
S_3L_1	۱/۷۳ ± ۰/۲۵^{j}	۰/۶۳ ± ۰/۲^{ijkl}	۲/۳۷ ± ۰/۴۵^{h}	۰/۹۳ ± ۰/۲۵^{cdf}	۲۱۴/۴۶ ± ۱۴/۷^{b}	۱۰۴/۵۵ ± ۲۲/۲^{fgh}
S_3L_2	۲/۲۱ ± ۰/۰۷^{i}	۰/۷۱ ± ۰/۲^{hijk}	۲/۹۲ ± ۰/۱۵^{g}	۰/۸۶ ± ۰/۱۳^{cdf}	۱۵۸/۸۱ ± ۴/۹^{efg}	۱۵۶/۳۹ ± ۱۶/۹^{bcd}
S_3L_3	۲/۳۹ ± ۰/۰۲^{hi}	۱/۳۱ ± ۰/۳^{cdef}	۳/۷۰ ± ۰/۳۱^{e}	۰/۸۱ ± ۰/۰۷^{def}	۲۰۸/۷۷ ± ۱۰/۵^{bc}	۹۰/۱۴ ± ۲۴/۱^{ghi}
S_3L_4	۳/۳۷ ± ۰/۰۷^{e}	۱/۰۵ ± ۰/۲^{efgh}	۴/۴۲ ± ۰/۲۴^{d}	۰/۷۷ ± ۰/۰۵^{efg}	۱۹۹/۰۷ ± ۱۷/۲^{bc}	۱۶۱/۸۹ ± ۲۱/۵^{abc}
S_4L_1	۱/۸۶ ± ۰/۰۹^{j}	۰/۳۱ ± ۰/۲^{l}	۲/۱۷ ± ۰/۲۶^{h}	۰/۷۳ ± ۰/۰۵^{efg}	۱۸۵/۸۳ ± ۱۷/۹^{cd}	۴۲/۳۴ ± ۱۸/۰^{kl}
S_4L_2	۱/۶۶ ± ۰/۲۳^{j}	۰/۴۳ ± ۰/۱^{kl}	۲/۰۹ ± ۰/۲۵^{h}	۰/۶۸ ± ۰/۱۱^{fg}	۲۴۹/۱۹ ± ۲۸/۷^{a}	۱۲۶/۴۶ ± ۱۲/۲^{def}
S_4L_3	۲/۵۸ ± ۰/۲۰^{h}	۰/۵۴ ± ۰/۲^{jkl}	۳/۱۲ ± ۰/۳۶^{fg}	۰/۶۶ ± ۰/۰۹^{fg}	۲۴۲/۲۰ ± ۲۴/۶^{a}	۷۸/۶۲ ± ۲۵/۲^{hij}
S_4L_4	۲/۷۱ ± ۰/۱۲^{gh}	۰/۸۶ ± ۰/۳^{ghij}	۳/۵۷ ± ۰/۴۲^{ef}	۰/۵۴ ± ۰/۰۳^{g}	۲۰۹/۳۹ ± ۲۶/۵^{bc}	۶۹/۲۲ ± ۱۷/۴^{ijk}

مقادیر، میانگین چهار تکرار ± انحراف معیار هستند. حروف متفاوت، بیان‌کنندهٔ تفاوت معنی‌دار در سطح P≤۰/۰۵ براساس آزمون LSD هستند. S1، S2، S3 و S4 به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ غلظت‌های صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید هستند. L1، L2، L3 و L4 به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ غلظت‌های صفر، ۰/۷۵، ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار سیلیسیوم هستند.

این نتایج شباهت بسیاری با نتایج کلروفیل b و کلروفیل کل دارد؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان این صفات در شرایط شوری شاهد و سیلیسیوم ۱/۵ میلی‌مولار و تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار با سیلیسیوم ۲/۲۵ میلی‌مولار ایجاد شد. نتایج مربوط به کارتنوئیدها بسیار متفاوت بودند؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان کارتنوئید در شوری ۲۵ میلی‌مولار به دست آمد. اعمال سیلیسیوم از صفر تا غلظت ۱/۵ میلی‌مولار این روند را حفظ کرد. این نتایج با نتیجهٔ اعمال سیلیسیوم با غلظت ۰/۷۵ میلی‌مولار در تیمار شوری شاهد یکسان است.

بیشترین مقدار فنل‌کل ریشه در تنش شوری شدید (۷۵ میلی‌مولار سدیم کلرید) هم‌زمان با کاربرد ۰/۷۵ و ۱/۵ میلی‌مولار سیلیسیوم ایجاد شد؛ درحالی‌که مقدار فلاونوئید کل در تیمار شوری ۲۵ میلی‌مولار و سیلیسیوم ۱/۵ میلی‌مولار افزایش یافت. این نتایج با نتیجهٔ اعمال سیلیسیوم با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار در شوری ۲/۲۵ میلی‌مولار یکسان هستند.

بحث

در بررسی اثر سیلیسیوم در شاخص‌های رشد سویا در شرایط تنش شوری مشخص شد ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه، مقدار کلروفیل و جیبرلین با غلظت ۲/۵ میلی‌مولار سیلیسیوم افزایش یافتند؛ درحالی‌که آبسزیک اسید (ABA) و پرولین در مقایسه با شاهد تغییری نداشتند (Lee *et al.*, 2010). به‌طورکلی کاهش رشد در تنش شوری از کاهش پتانسیل آب ناشی می‌شود. این پدیده، بسته‌شدن روزنه‌ها و محدودشدن جذب کربن دی اکسید را به دنبال دارد (Perez-Alfocea *et al.*, 1996). طول ریشه نیز در گیاهان مختلف پاسخ‌های متفاوتی به تنش شوری می‌دهد. یکی از این پاسخ‌ها حفظ یا حتی تحریک طویل‌شدن ریشه در پتانسیل آب کم است که نوعی سازگاری به تنش شوری و خشکی در نظر گرفته می‌شود (Mahdieh *et al.*, 2015). نتایج نشان دادند تنش شوری، زیست‌توده را در گیاهان تیمارشده کاهش داد. کاهش تولید زیست‌توده معمولاً در دو مرحله رخ می‌دهد. در مرحلهٔ اول یا اسمزی، دلیل اصلی کاهش زیست‌توده، کم‌شدن سطح برگ است؛ درحالی‌که در مرحلهٔ دوم، تجمع یون‌های سمی در برگ‌ها به پیری زودرس منجر می‌شود (Mancarella *et al.*, 2016).

همچنین، مشخص شد کاربرد سیلیسیوم آثار منفی تنش شوری را با افزایش طول و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه کاهش داد. این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگران همخوانی دارد (Mahdieh *et al.*, 2015). کاربرد سیلیسیوم در غلظت‌های ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار جذب و پراکنش سدیم را در آفتاب‌گردان کاهش داد. تولید زیست‌توده، مقدار پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم در گیاهان تیمارشده با سیلیسیوم نسبت به شاهد افزایش یافت و درنهایت، بهبود سازگاری گیاه آفتاب‌گردان به تنش شوری را موجب شد (Saqib *et al.*, 2011). در همین زمینه، بررسی اثر سیلیسیوم در تنش شوری و سفیدک پودری نشان داد اضافه‌کردن سیلیسیوم ۱ میلی‌مولار به محلول غذایی، با کاهش انتقال سدیم و کلر به قسمت هوایی گیاه اثر تنش شوری را در فتوسنتز کم می‌کند. همچنین، سیلیسیوم ۱ میلی‌مولار در محلول

غذایی از گسترش سفیدک پودری در غلظت‌های متفاوت شوری کاست (Savvas *et al*., 2009). بررسی اثر تنش شوری و سیلیسیوم در روابط آبی گیاه لوبیا نشان‌دهندهٔ کاهش چشمگیر آب نسبی برگ گیاهان لوبیا به‌دنبال افزایش غلظت سدیم کلرید در آب آبیاری است؛ اما سیلیسیوم درغلظت ۶۰ میلی‌مولار تا حدی این اثر را کاهش داد و در غلظت ۳۰ میلی‌مولار آن را کاملاً برطرف کرد (Zuccarini, 2008)؛ به‌طوری‌که سیلیسیوم با کاهش‌دادن تبخیر و تعرق یا تشکیل فیتولیت زیر سلول‌های اپیدرم برگ و ساقه بهبود وضعیت آب را در گیاه باعث می‌شود (Yaghubi *et al*., 2016).

کاربرد سیلیسیوم، سطح ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی را در گیاهان برنج در تنش آبی، در مقایسه با به‌کارنبردن آن افزایش می‌دهد (Rizwan *et al*., 2015). سیلیسیوم در غلظت ۳/۶ میلی‌مولار مقدار ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی را در زمان آلوده‌شدن درختان رز با *Podosphaera pannosa* افزایش داد (Shetty *et al*., 2011)؛ اما استفاده از سیلیسیوم مقدار فنل‌کل را در ریشه‌چه‌های گوجه‌فرنگی در تنش آبی کاهش داد (Shi *et al*., 2014).

اعمال تنش شوری بر گیاه گل‌گاوزبان نشان داد علائم پیری و نکروزه‌شدن برگ گیاهان در تنش شوری به‌دلیل سمی‌بودن عناصر سدیم و کلر است (Jaffel *et al*., 2011). همچنین تنش شوری، مقدار کلروفیل ژنوتیپ‌های مختلف گندم را به‌طور چشمگیری کاهش داد. این کاهش ناشی از تجزیهٔ کلروفیل، جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل و آسیب به ساختارهای فتوسنتزی (تنش اکسیداتیو) است (Ali *et al*., 2004)؛ ولی کاربرد سیلیسیوم مقدار کلروفیل a و b را افزایش داد.

علاوه‌براین، نتایج بررسی اثر سیلیسیوم در کاهش نابسامانی‌های فیزیولوژیک گیاه کلزا در تنش شوری نشان دادند سیلیسیوم تجمع یون‌هایسدیم و کلر را کاهش ولی تجمع عناصر ضروری مانند پتاسیم، فسفر و آهن را افزایش داد که درنهایت به کاهش تنش اکسیداتیو منجر شد (Farshidi *et al*., 2012). با تجمع گونه‌های فعال اکسیژن که به اکسیدشدن پروتئین و چربی منجر می‌شود، تنش اکسیداتیو اتفاق می‌افتد. دفاع گیاه دربرابر تنش اکسیداتیو شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مانند آسکوربات، گلوتاتیون و آلفاتوکوفرول است (Kafi *et al*., 2011). پژوهش‌ها نشان دادند سیلیسیوم، مقدار مالون دی آلدهید را که محصول نهایی پراکسیداسیون چربی است، در جو و ذرت کاهش می‌دهد. علاوه‌برآن، سیلیسیوم فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز را افزایش می‌دهد (Coskun *et al*., 2016).

سیلیسیوم با سازوکارهایی مانند تغییرات آناتومی در بافت‌های گیاهی که ناشی از تجمع فیتولیت‌ها (Phytolith) هستند، اثر تنش‌های غیرزیستی را کاهش و استحکام گیاه را افزایش می‌دهد و حرکت آب و مواد غذایی را تسهیل می‌کند. ازسوی دیگر، سیلیسیوم سیستم دفاعی گیاه را بهبود بخشید و با تشکیل کمپلکس با فلزهای سمی و رسوب‌دادن آنها نامتحرک شدنشان را در بافت‌های

گیاه یا خاک سبب می‌شود و بر بیان ژن‌ها و هورمون‌های گیاهی مؤثر است (Savvas and Ntatsi, 2015).

جمع‌بندی

باتوجه‌به نتایج حاصل از آزمایش حاضر، تنش شوری تأثیر معنی‌داری در ویژگی‌های رشدی، مورفوفیزیولوژیک و برخی ویژگی‌های فیتوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل دارد؛ به‌طوری‌که نسبت به غلظت‌های شوری متوسط و زیاد، حساس است؛ ولی کاربرد سیلیسیوم با غلظت‌های ۱/۵ و ۲/۲۵ میلی‌مولار، بیشتر صفات را متعادل می‌کند و آثار منفی ناشی از تنش شوری کم تا متوسط را کاهش می‌دهد.

سپاسگزاری

در اینجا از آقای مهندس آتشی، کارشناس محترم آزمایشگاه فیزیولوژی گروه علوم باغبانی به‌دلیل کمک‌های بی‌دریغشان سپاسگزاری می‌شود.

منابع

Ahmed, M., Asif, M. and Hassan, F. U. (2014) Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. Acta Physiologiae Plantarum 36: 473-483.

Al-aghabary, K., Zhu, Z. and 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: 2101-2115.

Ali, Y., Aslam, Z., Ashraf, M. Y. and Tahir, G. R. (2004) Effect of salinity on chlorophyll concentration, leaf area, yield and yield components of rice genotypes grown under saline environment. International Journal of Environmental Science and Technology 1: 221-225.

Alizade Ahmadabadi, A. and Khorasaninejad, S. (2016) The effect of humic acid pretreatment on germination of purple cornflower (*Echinacea purpurea*) plant under drought and salinity conditions. Arid Biome Scientific and Research Journal 6(2): 97-107 (in Persian).

Aziz, E. E., Al-Amier, H. and Craker, L. E. (2008) Influence of salt stress on growth and essential oil production in peppermint, pennyroyal and apple mint. Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants 14: 77-87.

Bannayan, M., Nadjafi, F., Azizi, M., Tabrizi, L. and Rastgoo, M. (2008) Yield and seed quality of *Plantago vate* and *Nigella sativa* under different irrigation treatments. Industrial Crops and Products 27: 11-16.

Barns, J. D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira, S. and Davidson, A. W. (1992) A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophyll a and b in lichens and higher plants. Environmental and Experimental Botany 32(2): 85-90.

Barrs, H. and Weatherley, P. (1962) A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Australian Journal of Biological Sciences 15: 413-428.

Brown, G. E. (2008) Research databases. Bibliography on salt tolerance. USDA-ARS, USA. https://www.usda.gov. On: 21 November 2016.

Chen, W., Yao, X., Cai, K. and 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: 67-76.

Coskun, D., Britto, D. T., Huynh, W. Q. and Kronzucker, H. J. (2016) The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. Frontiers in Plant

El-Wahab, A. (2006) The efficiency of using saline and fresh water irrigation as alternating methods of irrigation on the productivity of *Foeniculum vulgare* Mill subsp. Vulgare var. Vulgare under North Sinai conditions. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 2: 571-577.

Farshidi, M., Abdolzadeh, A. and Sadeghipour, H. R. (2012) Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. Acta Physiologiae Plantarum 34: 1779-1788.

García-Sánchez, F., Jifon, J. L., Carvajal, M. and Syvertsen, J. P. (2002) Gas exchange, chlorophyll and nutrient contents in relation to Na^+ and Cl^- accumulation in 'Sunburst' mandarin grafted on different rootstocks. Plant Science 162: 705-712.

Gengmao, Z., Yu, H., Xing, S., Shihui, L., Quanmei, S. and Changhai, W. (2015) Salinity stress increases secondary metabolites and enzyme activity in safflower. Industrial Crops and Products 64: 175-181.

Guo, Z., Tan, H., Zhu, Z., Lu, S. and Zhou, B. (2005) Effects of intermediates on ascorbic acid and oxalate. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences 1(3): 210-215.

Halevy, J., Hartzook, A. and Markovitz, T. (1987) Foliar fertilization of high-yielding peanuts during the pod-filling period. Fertilizer Research 14: 153-160.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K. and 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 (Eds. Smith, H. and Burns, M.) 25-87. Springer, Hyderabad.

Jaffel, K., Sai, S., Bouraoui, N., Ammar, R., Legendre, L., Lachâal, M. and Marzouk, B. (2011) Influence of salt stress on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in borage (*Borago officinalis* L.). Plant Biosystems-An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology 145: 362-369.

Kafi, M., Nabati, J., Masoumi, A. and Mehrjerdi, 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.

Khan, W. U. D., Aziz, T., Maqsood, M. A., Sabir, M., Ahmad, H. R., Ramzani, P. M. A. and Naseem, M. (2016) Silicon: a beneficial nutrient under salt stress, its uptake mechanism and mode of action. In: Soil science: agricultural and environmental prospective (Eds. Hakeem, K. R., Akhtar, J. and Sabir, M.) 287-301. Springer International Publishing, Cham.

Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, K. and Khalighi, A. (2010) The effect of salinity stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of peppermint (*Mentha piperita* L.). World Applied Sciences Journal 11(11): 1403-1407.

Khorasaninejad, S., Soltanloo, H., Hadian, J. and Atashi, S. (2016) The effect of salinity stress on the growth, quantity and quality of essential oil of lavender (*Lavandula angustifulia* Miller). Journal of Horticultural Science 30(2): 209-216.

Koocheki, A., Nassiri-Mahallati, M. and Azizi, G. (2008) Effect of drought, salinity, and defoliation on growth characteristics of some medicinal plants of Iran. Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants 14: 37-53.

Lee, S., Sohn, E., Hamayun, M., Yoon, J. and Lee, I. (2010) Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. Agroforestry Systems 80: 333-340.

Ma, C. C., Li, Q. F., Gao, Y. B. and Xin, T. R. (2004) Effects of silicon application on drought resistance of cucumber Science 7: 1-7.

plants. Soil Science and Plant Nutrition 50: 623-632.

Ma, J. and Yamaji, N. (2008) Functions and transport of silicon in plants. Cellular and Molecular Life Sciences 65: 3049-3057.

Mahajan, S. and Tuteja, N. (2005) Cold, salinity and drought stresses: an overview. Archives of Biochemistry and Biophysics 444: 139-158.

Mahdieh, M., Habibollahi, N., Amirjani, M., Abnosi, M. and Ghorbanpour, M. (2015) Exogenous silicon nutrition ameliorates salt-induced stress by improving growth and efficiency of PSII *in Oryza sativa* L. cultivars. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 15: 1050-1060.

Mancarella, S., Orsini, F., Van Oosten, M. J., Sanoubar, R., Stanghellini, C., Kondo, S., Gianquinto, G. and Maggio, A. (2016) Leaf sodium accumulation facilitates salt stress adaptation and preserves photosystem functionality in salt stressed *Ocimum basilicum*. Environmental and Experimental Botany 130: 162-173.

Mrozikiewicz, P. M., Bogacz, A., Karasiewicz, M., Mikolajcza, P. L., Ozarowski, K. M., Seremak-Mrozikiewicz, A., Czerny, B., Bobkiewicz-Kozlowska, T. and Grzeskowiak, E. (2010) The effect of standardized *Echinacea purpurea* extract on rat cytochrome P450 expression level. Phytomedicine 17: 830-833.

Munns, R. and Tester, M. (2008) Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology 59: 651-681.

Najafi, F., Khavari-Nejad, R. and Siah, A. M. (2010) The effects of salt stress on certain physiological parameters in summer savory (*Satureja hortensis* L.) plants. Journal of Stress Physiology and Biochemistry 6(1): 14-21.

Omidbaigi, R. (2002) Study of cultivation and adaptability of purple coneflower (*Echinaceae purpurea*) in the north of Tehran. Journal of Water and Soil Science 6(2): 231-41 (in Persian).

Perez-Alfocea, F., Balibrea, M., Santa Cruz, A. and Estan, M. (1996) Agronomical and physiological characterization of salinity tolerance in a commercial tomato hybrid. Plant and Soil 180: 251-257.

Pitman, M. G. and Läuchli, A. (2002) Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In: Salinity: environment plants molecules (Eds. Lauchli, A. and Luttge, U.) 3-20. Springer, Berlin.

Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S. A., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F. and 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.

Sabra, A. (2012) Physiological and biochemical responses of three *Echinacea* species to salinity stress. PhD thesis, The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

Sabra, A., Adam, L., Daayf, F. and Renault, S. (2012a) Salinity-induced changes in caffeic acid derivatives, alkamides and ketones in three *Echinacea* species. Environmental Expert Botany 77: 234-241.

Sabra, A., Daayf, F. and Renault, S. (2012b) Differential physiological and biochemical responses of three *Echinacea* species to salinity stress. Scientia Horticulturae 135: 23-31.

Saqib, R. M., Ashraf, M., Shahzad, S. M. and Imtiaz, M. (2011) Silicon nutrition for mitigation of salt toxicity in sunflower (*Helianthus annuus* L.). International Journal of Agriculture and Applied Sciences 3: 38-43.

Savvas, D., Giotis, D., Chatzieustratiou, E., Bakea, M. and Patakioutas, G. (2009) Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by

salinity and powdery mildew infections. Environmental and Experimental Botany 65: 11-17.

Savvas, D. and Ntatsi, G. (2015) Biostimulant activity of silicon in horticulture. Scientia Horticulturae 196: 66-81.

Shetty, R., Fretté, X., Jensen, B., Shetty, N. P., Jensen, J. D., Jørgensen, H. J. L., Newman, M. A. and Christensen, L. P. (2011) Silicon-induced changes in antifungal phenolic acids, flavonoids, and key phenylpropanoid pathway genes during the interaction between miniature Roses and the bio trophic pathogen *Podosphaera pannosa*. Plant Physiology 157: 2194-2205.

Shi, Y., Zhang, Y., Yao, H., Wu, J., Sun, H. and Gong, H. (2014) Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. Plant Physiology and Biochemistry 78: 27-36.

Sreenivasulu, N., Sopory, S. and Kishor, P. K. (2007) Deciphering the regulatory mechanisms of abiotic stress tolerance in plants by genomic approaches. Gene 388: 1-13.

Yaghubi, K., Ghaderi, N., Vafaee, Y. and Javadi, T. (2016) Potassium silicate alleviates deleterious effects of salinity on two strawberry cultivars grown under soilless pot culture. Scientia Horticulturae 213: 87-95.

Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q. and Yu, J. (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Science 167: 527-533.

Zuccarini, P. (2008) Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. Biologia Plantarum 52: 157-160.