Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

Improvement of salinity tolerance in hot pepper plants by silicon foliar application

Nahid Jamali[1], Fardin Ghanbari[*2], Ali Asghar Hatamnia[3]

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: amaeee255@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: f.ghanbari@ilam.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Biology, Faculty of Science, Ilam University, Ilam, Iran. E-mail: hatamniya60@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.26.2023
Revised: 03.19.2023
Accepted: 04.17.2023

Keywords:
Chlorophyll,
Malondialdehyde,
Osmotic regulation,
Osmotic stress,
Sodium chloride

ABSTRACT

Background and Objectives: Salinity is one of the abiotic stress factors that causes great damage to the production of agricultural products around the world. Various strategies have been adopted to reduce the negative effect of salinity on plants and to improve the growth and development of plants under salinity stress conditions. In the present study, the effect of silicon foliar application on decreasing the effects of salinity stress and its related physiological mechanisms in hot pepper plants has been investigated.

Materials and Methods: The research was conducted as a factorial experiment based on completely randomized design with three replications in the greenhouse of Ilam University. The treatments tested in this research included three levels of salinity stress (control, 75 and 150 mM NaCl) and four levels of silicon (control, 0.5, 1 and 2 mM). In the stage of four expanded leaves, silicon treatment was applied as a foliar spray in the mentioned concentrations until the surface of the leaves was completely wet, and it was repeated two more times after one month. Salinity treatment was done by preparing NaCl solution and i the plants with fertilizer solution every three days. The treatments were continued until fruiting and complete fruit harvesting.

Results: In the final results obtained from this research, it was found that salinity caused a significant decrease in growth and performance parameters (root and shoot dry weight, plant height, number of fruits per plant and crop yield) as well as a decrease in relative water content and chlorophyll and caused increase in the content of proline, malondialdehyde and ion leakage in pepper plants. The results showed that the application of silicon reduced the effects of salinity stress on pepper plants. The highest total yield was obtained in 1 and 2 mM silicon application under non-saline irrigation. At all salinity levels, the application of silicon increased the growth and yield of pepper plants. These results were related to the increase in relative water content and chlorophyll, and decreases in proline, malondialdehyde accumulaion and electrolyte leakage.

Conclusion: In general, the results of this research indicated that the application of silicon, especially in concentrations of 1 and 2 mM, improved the growth and performance of hot pepper plants under stress and non-stress conditions. The exogenous application of silicon alleviated the

negative effects of salinity on the plant by increasing the amount of chlorophyll and relative water content and decrease proline and malondialdehyde. Although the application of silicon in non-saline conditions had positive effects on plant growth and performance, it was more effective in saline conditions. Therefore, silicon foliar spraying is recommended to decrease the effects of salinity on the growth and performance of hot pepper plants.

Cite this article: Jamali, Nahid, Ghanbari, Fardin, Hatamnia, Ali Asghar. 2024. Improvement of salinity tolerance in hot pepper plants by silicon foliar application. *Journal of Plant Production Research,* 30 (4), 103-120.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2023.21109.3021
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

بهبود تحمل به شوری در گیاه فلفل تند با محلول‌پاشی برگی سیلیسیوم

ناهید جمالی[۱]، فردین قنبری*[۲]، علی‌اصغر حاتم‌نیا[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: amaeee255@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: f.ghanbari@ilam.ac.ir
۳. استادیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: hatamniya60@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

واژه‌های کلیدی:
تنش اسمزی،
تنظیم اسمزی،
کلروفیل،
کلرید سدیم،
مالون دی آلدهید

چکیده

سابقه و هدف: شوری یکی از عوامل تنش‌زای غیرزیستی است که خسارات زیادی به تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان وارد می‌کند. راهبردهای مختلفی برای کاهش تأثیر منفی شوری بر گیاهان و تداوم رشد و نمو گیاهان در شرایط تنش شوری اتخاذ شده است. در مطالعه حاضر، اثر محلول‌پاشی سیلیسیوم بر کاهش آثار تنش شوری و مکانیسم‌های فیزیولوژیکی وابسته به آن در گیاه فلفل تند بررسی شده است.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه ایلام انجام شد. تیمارهای مورد آزمایش در این پژوهش شامل سه سطح تنش شوری (شامل شاهد، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار نمک NaCl) و چهار سطح سیلیسیوم (شاهد، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار) بود. در مرحله چهار برگ حقیقی تیمار سیلیسیوم به صورت محلول‌پاشی برگی در غلظت‌های ذکر شده تا خیس شدن کامل سطح برگ‌ها اعمال شد و به فاصله یک ماه دو مرتبه دیگر تکرار شد. تیمار شوری نیز به صورت تهیه محلول NaCl و آبیاری گیاهان همراه با محلول کودی با فواصل سه روز یکبار انجام گرفت. تیمارها تا زمان میوه‌دهی و برداشت کامل میوه‌ها ادامه یافت.

یافته‌ها: در نتایج نهایی به‌دست آمده از این پژوهش مشخص شد که شوری موجب کاهش معنی‌دار صفات رشدی و عملکردی (وزن خشک ریشه و شاخساره، ارتفاع گیاه، تعداد میوه در بوته و عملکرد محصول) و هم‌چنین کاهش محتوای رطوبت نسبی و کلروفیل شده و باعث افزایش محتوای پرولین، مالون دی آلدهید و نشت یونی در گیاه فلفل شد. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیوم باعث کاهش آثار تنش شوری بر گیاه فلفل شد. بیش‌ترین عملکرد کل مربوط به تیمار بدون شوری با کاربرد سیلیسیوم (۱ و ۲ میلی‌مولار) بود. در همه سطوح شوری کاربرد سیلیسیوم سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه فلفل شد. این نتایج در ارتباط با افزایش

محتوای رطوبت نسبی و کلروفیل، کاهش میزان پرولین، محتوای مالون دی آلدهید و نشت الکترولیت بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سیلیسیوم به‌خصوص در غلظت‌های یک و دو میلی مولار موجب بهبود رشد و افزایش عملکرد گیاه فلفل تند در شرایط تنش و غیرتنش شد. کاربرد خارجی سیلیسیوم، اثرات منفی شوری بر گیاه را از طریق افزایش مقدار کلروفیل و محتوای رطوبت نسبی و کاهش پرولین و مالون دی آلدهید کاهش داد. اگرچه کاربرد سیلیسیوم در شرایط بدون شوری اثرات مثبتی بر رشد و عملکرد گیاه داشت ولی در شرایط شوری اثربخشی بیش‌تری داشت. بنابراین برای کاهش اثرات شوری بر رشد و عملکرد گیاه فلفل تند محلول‌پاشی سیلیسیوم توصیه می‌شود.

استناد: جمالی، ناهید، قنبری، فردین، حاتم‌نیا، علی‌اصغر (۱۴۰۲). بهبود تحمل به شوری در گیاه فلفل تند با محلول‌پاشی برگی سیلیسیوم. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰ (۴)، ۱۲۰-۱۰۳.
DOI: 10.22069/JOPP.2023.21109.3021

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

تنش‌های غیرزیستی مهم‌ترین محدودیت برای عملکرد و بهره‌وری گیاهان هستند. در میان آن‌ها، شوری خاک و آب با خسارت سالیانه بین ١٤ تا ١٩ میلیون دلار یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش عملکرد گیاهان بیان شده است (١). غلظت بالای نمک در محیط رشد گیاه اثرات منفی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه گذاشته و منجر به اختلال در جذب عناصر غذایی، تخریب واکنش‌های بیوشیمیایی فتوسیستم‌ها و تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن (ROS) شده که در نهایت منجر به رشد ضعیف و عملکرد پایین گیاه می‌شود (٢). به علاوه ROSهای تولید شده در شرایط تنش شوری منجر به تخریب غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و لیپیدها شده و در موارد شدید منجر به مرگ سلولی می‌شوند (٣). گزارش شده است که ٢٠ درصد از کل زمین‌های تحت کشت و ٣٣ درصد از زمین‌های آبی در معرض تنش شوری بالا بوده و سالیانه زمین‌های شور افزایش می‌یابد. در ایران نیز سطح اراضی شور حدود ١/٤ میلیون هکتار از اراضی آبی برآورد شده است (٤). با توجه به روند توسعه اراضی شور و کمبود اراضی مطلوب برای کشاورزی در دنیا استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم به شوری و یا کاربرد ترکیباتی که باعث کاهش آثار مخرب تنش شوری و القای تحمل تنش در گیاهان شود، دارای اهمیت می‌باشد.

گزارش شده است که تغذیه متعادل گیاه یک عامل تأثیرگذار بر بهبود تحمل تنش در گیاهان می‌باشد (٥). بهینه‌سازی وضعیت مواد معدنی می‌تواند اثرات سمی تنش‌ها را از طریق در دسترس قرار دادن مواد مغذی در محل انتقال و بافت گیاه، به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد و در نهایت بر کارایی فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر بگذارد (٦). سیلیسیوم دومین عنصر فراوان موجود در پوسته زمین است و نقش‌های مفید متعددی در بیولوژی گیاهان دارد به همین دلیل در چند دهه گذشته مطالعات گسترده‌ای برای شناخت ماهیت، ساختار و فواید آن در گیاهان انجام شده است. در قرن نوزدهم، دانشمندان وجود سیلیسیوم قابل‌توجه را در قسمت‌های مختلف گیاهان نشان دادند و بنابراین، نقش حیاتی آن در کشاورزی و گیاهان مورد توجه قرار گرفت (٥). اثرات سودمند سیلیسیوم برای بسیاری از گونه‌های گیاهی به ویژه زمانی که گیاهان در معرض برخی از تنش‌های زنده و غیرزنده باشند نشان داده شده است (٧). لیانگ و همکاران (٢٠٠٧) پیشنهاد کردند که سیلیسیوم ممکن است در فعالیت‌های متابولیکی، فیزیولوژیکی و ساختاری در گیاهان عالی که در معرض تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار دارند، دخیل باشد (٨). گزارش شده است که کاربرد سیلیسیوم در گیاه ذرت تحت تنش شوری با افزایش محتوای کلروفیل و بهبود پارامترهای فتوسنتزی سبب افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش شوری شد (٩). پژوهش‌های دیگر نشان داده است که کاربرد خارجی سیلیسیوم در گیاهان مختلف با تغییر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی منجر به تحمل بالاتر گیاهان نسبت به تنش شوری شده است (١٠، ١١، ١٢، ١٣). با توجه به مطالب شرح داده شده و لزوم مقابله با آثار سوء تنش شوری در گیاهان، در پژوهش حاضر اثرات محلول پاشی برگی سلنیوم بر رشد، عملکرد و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی فلفل تند تحت تنش شوری بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های ١٤٠١-١٤٠٠ در گلخانه و آزمایشگاه گروه علوم باغبانی دانشگاه ایلام به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد آزمایش در این پژوهش شامل سه سطح تنش شوری

(شامل شاهد (عدم کاربرد نمک)، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار نمک NaCl و چهار سطح سیلیسیوم (شاهد، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار) بود. بذر فلفل سوزنی (تند) از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شده و در سینی‌های کشت نشا ٤٨ حفره‌ای با محیط کشت کوکوپیت و پرلایت با نسبت مساوی کشت شدند تا نشاهای مورد نیاز برای انجام آزمایش تولید شود. در مرحله دو برگ حقیقی توسعه یافته نشاها به گلدان‌های اصلی حاوی محیط کشت بدون خاک (کوکوپیت و پرلایت به نسبت مساوی) کشت شدند. تغذیه گیاهان با استفاده از محلول کودی کامل با هدایت الکتریکی ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و pH برابر ٦/٥ انجام گرفت (١٤). گلدان‌ها در گلخانه با پوشش شیشه و نور طبیعی و دمای روزانه ۲±۲۵ و شبانه ۲±۱۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از استقرار کامل گیاهان در مرحله ٤ برگی تیمارها شروع شدند. تیمار سیلیسیوم به صورت محلول‌پاشی برگی در غلظت‌های ذکر شده تا خیس شدن کامل سطح برگ‌ها اعمال شد و به فاصله یک ماه دو مرتبه دیگر تکرار شد. برای اعمال تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. تیمار تنش شوری نیز به صورت تهیه محلول NaCl و آبیاری گیاهان همراه با محلول کودی با فواصل سه روز یکبار انجام شد. برای جلوگیری از تجمع نمک در محیط گلدان، آبیاری گیاهان همراه با زه آب بوده و در زمان آبیاری بخشی از محلول آبیاری از زهکش گلدان خارج می‌شد. سایر مراقبت‌ها بر حسب ضرورت در مورد همه گیاهان به صورت یکسان انجام شدند. تیمارها تا زمان میوه دهی و برداشت کامل میوه‌ها ادامه یافت.

برای اندازه‌گیری عملکرد فلفل از هر واحد آزمایشی (شامل سه گلدان) میوه‌ها برداشت شده و پس از شمارش تعداد میوه در بوته، میانگین تعداد میوه در هر واحد آزمایشی محاسبه و گزارش گردید. اندازه‌گیری وزن تمام میوه‌های برداشت شده با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتال با دقت یک صدم گرم انجام شد و میانگین وزن میوه به عنوان میزان عملکرد آن واحد آزمایشی در نظر گرفته شد.

در پایان آزمایش، بوته‌های موجود به همراه ریشه از خاک خارج گردید. برای تعیین خشک شاخساره و ریشه ابتدا قسمت هوایی گیاه از سطح خاک قطع‌شده و ریشه‌ها برای حذف مواد بستر کاشت به‌دقت با آب جاری شسته شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک نمونه‌ها در پاکت گذاشته شد و به مدت ٤٨ ساعت در آون الکتریکی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از خشک شدن وزن شدند.

جهت تعیین پایداری غشاء سلول‌های برگی شاخص نشت یونی اندازه‌گیری شد. در این روش ابتدا قطعات برگی به اندازه یک سانتی‌متر تهیه شد. این قطعات پس از شستشو همراه با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر در لوله‌های آزمایش قرار گرفت و سپس لوله‌ها به مدت ۲۰ ساعت به‌وسیله شیکر تکان داده شد. در این مرحله هدایت الکتریکی اول (EC_1) به‌وسیله دستگاه هدایت‌سنج، اندازه‌گیری شد. سپس لوله‌های آزمایش به اتوکلاو با دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه انتقال داده شدند و برای بار دوم هدایت الکتریکی (EC_2) نیز پس از سرد شدن محتویات داخل لوله‌های آزمایش اندازه‌گیری شد. در نهایت از تقسیم EC_1/EC_2 درصد نشت یونی هر تکرار محاسبه و گزارش شد (۱۵).

جهت اندازه‌گیری محتوای آب نسبی از روش خان و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شد (١٦). ابتدا تعداد مساوی برگ رسیده و جوان از هر نمونه انتخاب شده و جدا گردید. سپس بلافاصله در محیط آزمایشگاهی به‌وسیله ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) توزین گردیدند (FW). پس از آن نمونه‌ها به مدت ٦ ساعت در آب مقطر برای آب‌گیری کامل در محیط آزمایشگاهی با

دمای تقریبی ۲۲ درجه سانتی‌گراد گذاشته شدند. بعد از خشک شدن آب سطحی، برگ‌ها مجدداً توزین شدند (TW). بعد از آن برگ‌ها به مدت ٤٨ ساعت و در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در درون آون الکتریکی قرار گرفتند. پس از گذشت این مدت نمونه‌ها توزین شدند تا وزن خشک به دست آید (DW). سپس با رابطه زیر محتوای آب نسبی برگ محاسبه شد:

$$RWC= (FW – DW) / (TW – DW) *100$$

اندازه‌گیری کلروفیل با روش آرنون (۱۹٤۹) انجام گردید (۱۷). بدین ترتیب ابتدا ۰/۵ گرم از بافت تر نمونه گیاهی در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ساییده شد. مخلوط حاصل به لوله‌های فالکون منتقل شد و سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ٦۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از سانتریفیوژ محلول رویی لوله‌ها به داخل بالون ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری انتقال یافت. بر روی مواد ته‌نشین شده لوله‌ها دوباره ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد ریخته و با همان دور سانتریفیوژ شد. مقدار جذب نمونه‌ها در طول موج ٦٤٥ و ٦٦٣ نانومتر خوانده شد و در نهایت مقادیر کلروفیل بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر محاسبه و گزارش گردید.

استخراج و اندازه‌گیری پرولین بر اساس روش بیتس و همکاران (۱۹۷۳) انجام گرفت (۱۸). برای این کار جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر با استفاده از تولوئن به‌عنوان شاهد دستگاه قرائت شد و میزان پرولین بر حسب میکرومول در گرم وزن‌تر برگ محاسبه و گزارش گردید.

اندازه‌گیری محتوای مالون دی آلدهید که بیانگر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء سلولی است، بر اساس پروتکل ارائه شده توسط استیوارت و بیولی (۱۹۸۰) انجام گرفت (۱۹). در این روش ابتدا ۰/۲ گرم از نمونه تازه گیاهی با استفاده از دو میلی‌لیتر اسیدتری کلرو استیک ۰/۱ درصد کوبیده شد. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. یک میلی‌لیتر از عصاره رویی را به یک تیوب جدید منتقل کرده و به آن یک میلی‌لیتر محلول ۰/۵ درصد اسید تیو باربیتیوریک حاوی ۲۰ درصد اسیدتری کلرواستیک اضافه شد. پس از آن تیوب‌ها در حمام آب گرم ۹۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت و پس از آن بلافاصله در آب یخ قرار گرفتند تا واکنش متوقف شود. پس از تکان دادن نمونه‌ها میزان جذب آن‌ها در دو طول موج ۵۳۲ و ٦۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر قرائت شد. در نهایت مقدار مالون دی آلدهید هر نمونه با در نظر گرفتن فاکتور رقت (۲۰)، قطر کووت (یک سانتی‌متر) و ضریب خاموشی ۱۵۵ میلی‌مول بر سانتی‌متر محاسبه و گزارش شد.

جهت انجام محاسبات آماری از نرم‌افزار SAS استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها نرم‌افزار Excel به‌کار رفت.

نتایج و بحث

پارامترهای رشدی و عملکرد: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی شوری، سیلیسیوم و هم‌چنین اثر متقابل شوری و سیلیسیوم بر عملکرد کل، تعداد میوه در بوته و وزن خشک ریشه و شاخساره معنی‌دار شد. هم‌چنین اثرات اصلی شوری و سیلیسیوم در سطح یک درصد بر ارتفاع گیاه معنی‌دار شد (جدول ۱). با افزایش سطح شوری و بدون کاربرد سیلیسیوم، عملکرد کل فلفل نسبت به تیمار بدون شوری کاهش ٤۰ درصدی داشت. استفاده از سیلیسیوم در تمام سطوح شوری، عملکرد کل فلفل را

نسبت به شاهد افزایش داد. در تیمار با شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، کاربرد سیلیسیوم در همه سطوح باعث افزایش معنی‌دار عملکرد کل نسبت به شاهد شد، که در این بین بیش‌ترین تأثیر بر عملکرد کل مربوط به تیمار با سیلیسیوم یک میلی‌مولار بود. کم‌ترین میزان عملکرد کل در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، بدون کاربرد سیلیسیوم به‌دست آمد (شکل ۱). کم‌ترین وزن خشک ریشه و شاخساره، ارتفاع گیاه، تعداد میوه در بوته و عملکرد کل، تحت تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولارو و عدم کاربرد سیلیسیوم به‌دست آمد (شکل‌های ۱ تا ٤). پژوهش‌گران گزارش کردند که کاهش رشد سریع‌ترین پاسخ گیاه به تنش شوری است (۲۰). کاهش رشد و عملکرد سبزی‌ها در شرایط تنش شوری در پژوهش‌های دیگر گزارش شده است (۱۱، ۱۳) که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. به‌طورکلی کاهش رشد در اثر تنش شوری از کاهش پتانسیل آب ناشی می‌شود. زیرا که تنش شوری منجر به کاهش پتانسیل آب در خاک شده و نوعی خشکی فیزیولوژیک ایجاد می‌کند (۲۱). از طرف دیگر تنش شوری منجر به اختلال در جذب عناصر غذایی ضروری شده و یون‌های سدیم و کلر در غلظت بالا در اندام‌های گیاهی تجمع می یابند (۲۲). فلفل گیاهی نسبتاً حساس به تنش شوری شناخته می‌شود و تنش شوری در سطوح ٤/٤ دسی‌زیمنس بر متر منجر به کاهش ۲۵ درصدی عملکرد قابل فروش آن نسبت به شرایط بدون تنش می‌شود (۲۳). در پژوهشی دیگر تنش شوری در سطح ۸ دسی‌زیمنس بر متر منجر به کاهش ٦۰ درصدی عملکرد کل فلفل نسبت به شاهد شد (۲٤). این نتایج ممکن است تحت‌تأثیر شرایط کشت قرار گیرد به‌طوری‌که حتی در سال‌های مختلف نیز ممکن است ارقام فلفل کاهش عملکرد متفاوتی در شرایط تنش شوری نشان دهند (۲۵).

نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیوم منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاه فلفل در شرایط تنش شوری و بدون شوری شد. شواهد فراوان در دست است که نشان می‌دهد زمانی که سیلیسیوم در اختیار گیاهان قرار گیرد نقش چشمگیری در بهبود رشد، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر تنش‌های گوناگون دارد (۵). در این راستا گزارش شده است که سیلیسیوم به‌علت کاهش جذب و انتقال سدیم از ریشه به اندام هوایی آثار مضر کلرید سدیم را کاهش داده و رشد گیاه در شرایط تنش شوری را بهبود می‌بخشد (۲٦). در پژوهشی دیگر، ساواس و همکاران (۲۰۰۹) افزایش عملکرد و تعداد میوه در هر بوته گیاه کدو در شرایط تنش شوری با کاربرد ۱ میلی‌مولار سیلیسیوم را گزارش کردند (۲۷). بخشی از اثر سیلیسیوم بر رشد گیاهان تحت تنش شوری ممکن است مربوط به تأثیر سیلیسیوم بر فتوسنتز باشد. تعامل بین یون‌های سدیم و سیلیسیوم آزاد ترکیبی را ممکن است ایجاد کند که انتقال سدیم را به قسمت‌های هوایی گیاه کاهش می‌دهد (۸). ممکن است سیلیسیوم باعث افزایش جذب پتاسیم و کاهش جذب سدیم شده، بنابراین سمیت شوری را در گیاه کاهش داده و باعث بهبود رشد گیاه در شرایط شوری می‌شود (۲۸).

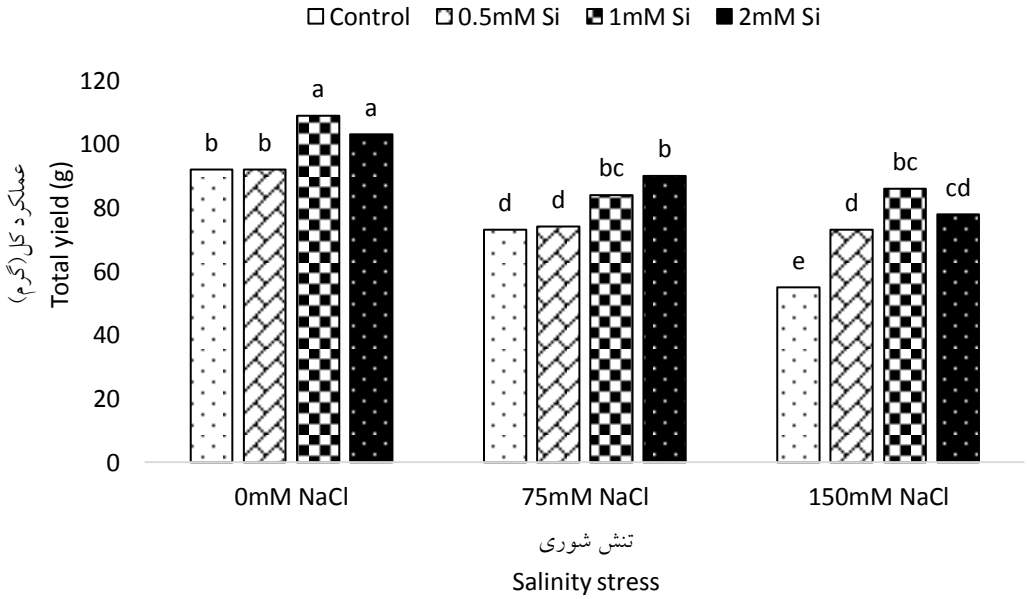
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس صفات رشدی و عملکرد گیاه فلفل تحت تنش شوری و کاربرد سیلیسیوم.

Table 1. The analysis variance results of growth and yield traits of pepper plant under salinity stress and silicon application.

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square				
		عملکرد کل Total yield	تعداد میوه در بوته Number of fruits per plant	ارتفاع گیاه Plant height	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight
شوری Salinity	2	2149.45**	924.67**	2088.22**	167.21**	109.86**
سیلیسیوم Silicon	3	760.49**	987.54**	696.23**	178.61**	38.56**
شوری × سیلیسیوم Salinity × Silicon	6	86.63**	19.38**	23.95ns	17.70**	2.56**
خطای آزمایش Experimental error	24	20.90	7.56	10.73	2.82	0.56
ضریب تغییرات (درصد) CV%	-	5.40	4.30	4.63	5.16	13.88

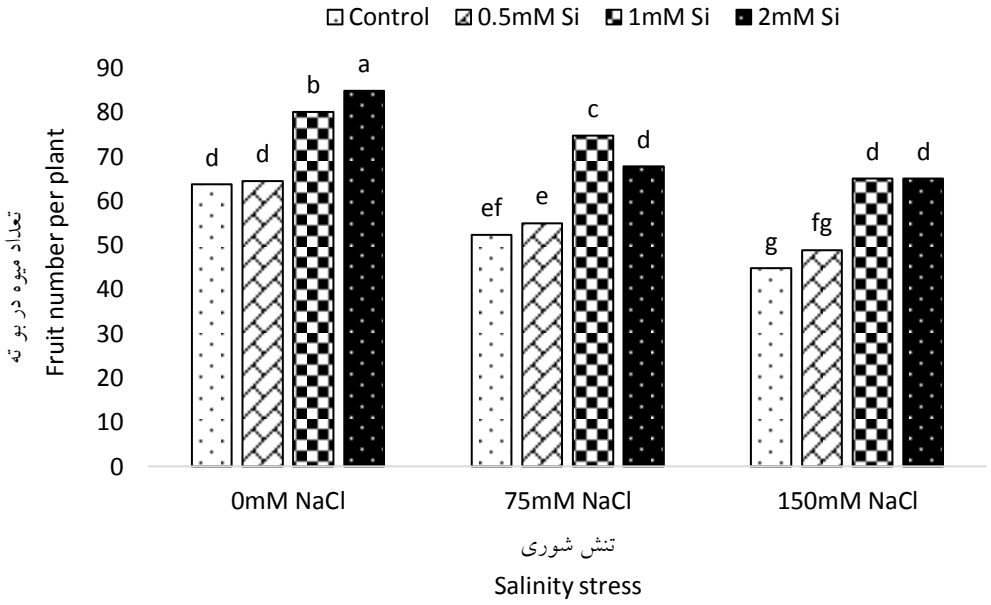
** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns عدم معنی‌داری

** Significant at the 1% probability level, * Significant at the 5% probability level, ns non-significance



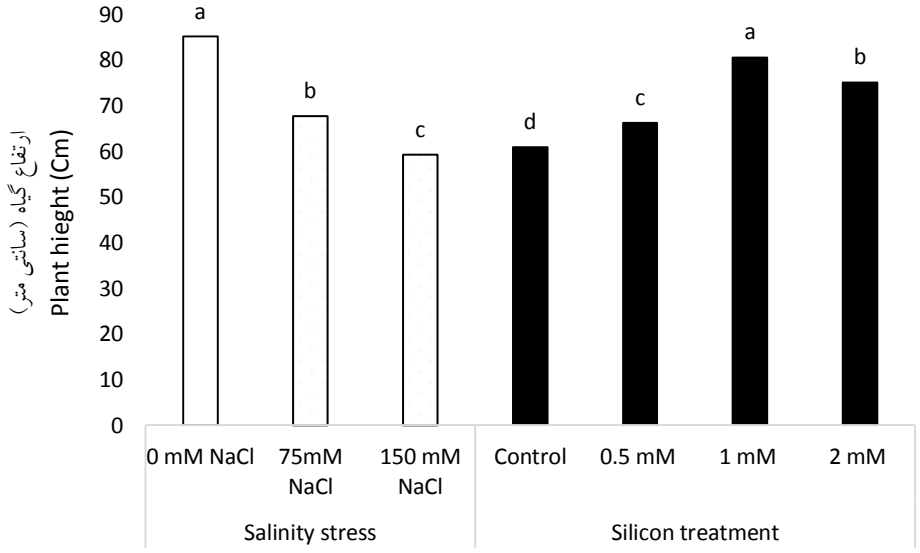
شکل ۱- اثر سیلیسیوم (Si) بر عملکرد کل در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 1. The effect of silicon (Si) on total yield in hot pepper plants under salt stress.



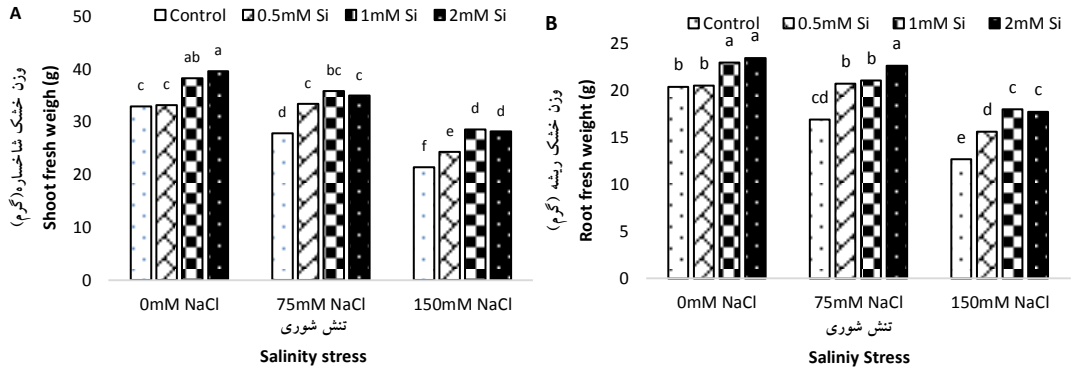
شکل ۲- اثر سیلیسیوم (Si) بر تعداد میوه در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 2. The effect of silicon (Si) on number of fruits in hot pepper plants under salt stress.



شکل ۳- اثر سیلیسیوم (Si) بر ارتفاع بوته در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 3. The effect of silicon (Si) on plant hieght in hot pepper plants under salt stress.



شکل ٤- اثر سیلیسیوم (Si) بر وزن خشک شاخساره (A) و ریشه (B) در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 4. The effect of silicon (Si) on shoot (A) and root (B) dry weight in hot pepper plants under salt stress.

محتوای رطوبت نسبی: محتوای رطوبت نسبی تحت تأثیر اثرات اصلی شوری و سیلیسیوم و هم‌چنین اثرات متقابل شوری × سیلیسیوم قرار گرفت (جدول ۲). افزایش سطح شوری باعث کاهش ۲۹ درصدی محتوای رطوبت نسبی نسبت به شاهد (شوری صفر میلی‌مولار) شد. در تیمار شاهد (بدون شوری)، تأثیر کاربرد سیلیسیوم در هر سه سطح یکسان بوده و تأثیر معنی‌داری بر درصد محتوای رطوبت نسبی نداشت. در شوری ۷۵ میلی‌مولار، کاربرد سیلیسیوم در سطح ۰/۵ میلی‌مولار تأثیر معنی‌داری بر محتوای رطوبت نسبی نداشت اما کاربرد ۱ و ۲ میلی مولار سیلیسیوم در این سطح شوری محتوای رطوبت نسبی را نسبت به شاهد افزایش داد. هم‌چنین در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، کاربرد سلیسیوم در هر سه غلظت محتوای رطوبت نسبی را نسبت به شاهد افزایش داده و بیش‌ترین تأثیر در کاربرد سیلیسیوم یک میلی‌مولار مشاهده شد (شکل ۵). محتوای نسبی آب برگ معیار مناسبی جهت بررسی وضعیت آبی گیاه در شرایط تنش است. کاهش محتوای نسبی آب می‌تواند در نتیجه کاهش دسترسی به آب در اثر پتانسیل اسمزی ناشی از وجود نمک باشد (۲۱). نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری باعث کاهش ۲۹ درصدی محتوای رطوبت نسبی گیاه فلفل در مقایسه با شاهد (بدون شوری) شد. در شرایط بدون شوری کاربرد سیلیسیوم تأثیر معنی داری بر درصد محتوای رطوبت نسبی نداشت. اما در شوری متوسط و شدید، کاربرد سیلیسیوم ۱ و ۲ میلی‌مولار باعث افزایش معنی‌دار محتوای رطوبت نسبی نسبت به شاهد شده است. نتایج آزمایش‌های دیگر نیز نشان دادند که در شرایط تنش شوری، گیاه برای حفظ توان اسمزی جهت جذب آب به تجمع املاح یا سنتز ترکیبات آلی مثل قندها و اسیدهای آمینه می‌پردازد (۱، ۲). به همین علت در چنین شرایطی میزان نسبی آب برگ بر اثر افزایش غلظت نمک به شدت کاهش می‌یابد. بررسی اثر تنش شوری و سیلیسیوم بر روابط آبی گیاه سویا نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار محتوای آب نسبی برگ گیاه به دنبال افزایش غلظت سدیم کلرید در آب آبیاری بود، اما کاربرد خارجی سیلیسیوم سبب بهبود رطوبت نسبی گیاه در شرایط تنش شوری شد (۲۸). گزارش شده است که سیلیسیوم با کاهش دادن تبخیر و تعرق با تشکیل فیتولیت (Phytolith) زیر سلول‌های اپیدرم برگ و ساقه سبب بهبود وضعیت آب در گیاهان می‌شود (۱۲).

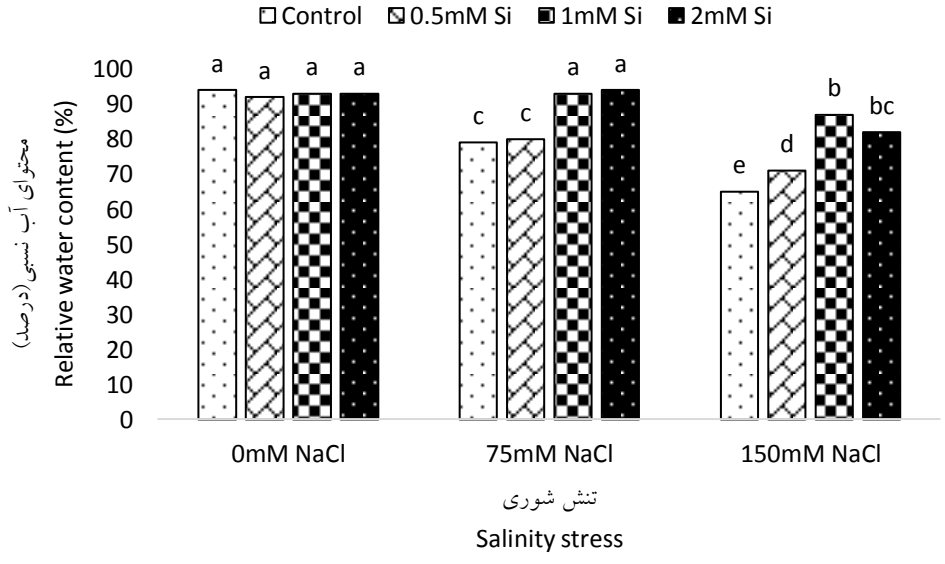
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی فلفل تحت تیمارهای شوری و سیلیسیوم.

Table 2. The analysis variance results of biochemical characteristics of pepper under salt and silicon treatments.

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square						
		محتوای آب نسبی Relative water content	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	پرولین Proline	نشت یونی Ion leakage	مالون دی آلدهید Malondialdehyde
شوری Salinity	2	870.11**	0.02*	0.057**	0.65**	134.13**	102.06**	3.61**
سیلیسیوم Silicon	3	300.54**	0.16**	0.065**	0.17**	52.40**	55.98**	9.63**
شوری × سیلیسیوم Salinity×Silicon	6	92.99**	0.01ns	0.005ns	0.01ns	13.28**	11.54*	1.33**
خطای آزمایش Experimental error	24	7.58	0.008	0.003	0.02	1.59	3.96	0.25
ضریب تغییرات (درصد) CV%	-	3.21	9.68	8.56	9.51	7.78	29	6.20

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns عدم معنی‌داری

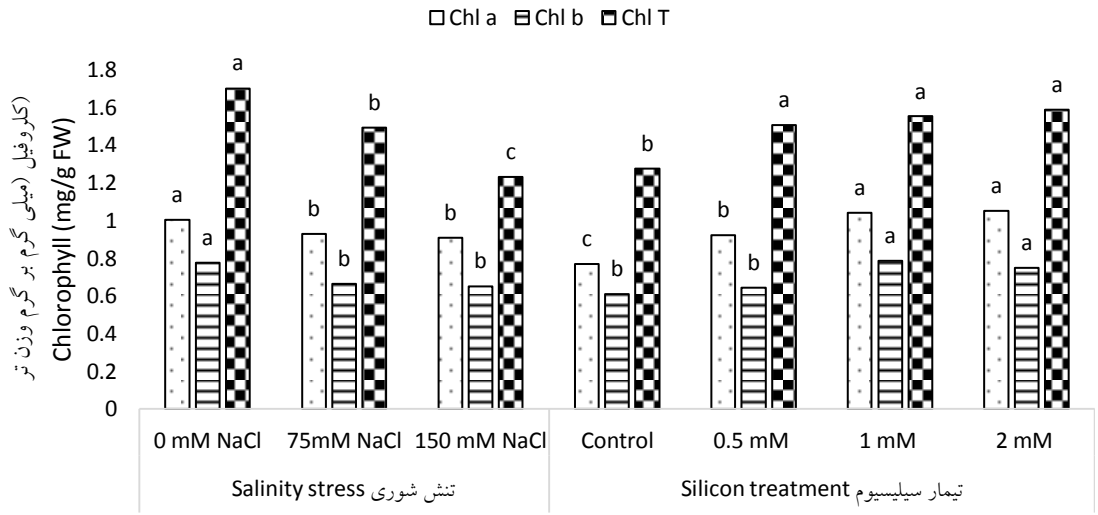
** Significant at the 1% probability level, * Significant at the 5% probability level, ns non-significance



شکل ۵- اثر سیلیسیوم (Si) بر محتوای آب نسبی در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 5. The effect of silicon (Si) on relative water content in hot pepper plants under salt stress.

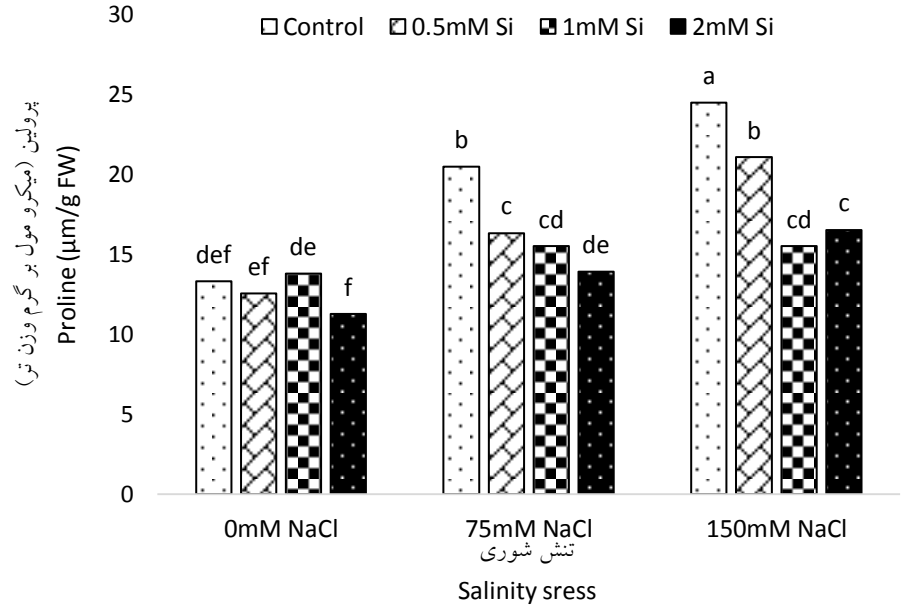
کلروفیل: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی شوری و سیلیسیوم بر کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل معنی‌دار شد. اثر متقابل شوری × سیلیسیوم بر رنگدانه‌های فتوسنتزی معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد که با افزایش سطح شوری میزان کلروفیل به طور معنی‌داری کاهش یافت به‌طوری‌که شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl به ترتیب ۷/۲۲ و ۹/۳۸ درصد کلروفیل a، ۱٤/۲۸ و ۱۵/۵۸ درصد کلروفیل b و ۱۲/۳۵ و ۲۷/٦٤ درصد کلروفیل کل را نسبت به شاهد کاهش دادند. کاربرد سیلیسیوم سبب افزایش ٦ تا ۲۵ درصدی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی شده و در مورد کلروفیل a و کلروفیل کل هر سه غلظت سیلیسیوم به‌کار رفته محتوای رنگیزه را نسبت به شاهد افزایش دادند (شکل ٦). گزارش شده است که در شرایط تنش شوری رنگدانه های فتوسنتزی تخریب شده و ظرفیت فتوسنتز و تولید گیاهی کاهش می‌یابد (۹). کاهش میزان کلروفیل در اثر تنش شوری ممکن است به‌علت کاهش بیوسنتز آن، افزایش اکسیداسیون وکاهش جذب نیتروژن به عنوان عنصر معدنی مهم در سنتز کلروفیل باشد (۱۱، ۲۹). بنابراین حفظ محتوای کلروفیل گیاهان در شرایط تنش شوری می‌تواند سبب تحمل بهتر گیاه نسبت به شرایط تنش شود. نتایج نشان داد که کاربرد سیلیسیوم در گیاه فلفل تحت تنش شوری سبب افزایش محتوای کلروفیل آن نسبت به شاهد شد. نتایج این آزمایش با یافته‌های پژوهش‌گران دیگر در گیاهان ذرت (۹) و ریحان (۲۹) و فلفل (۳۰) مطابقت دارد. گزارش شده است که کاربرد سیلیسیوم با سرکوب رادیکال‌های آزاد در سلول‌های گیاهی، کاهش سمیت یون سدیم، حفظ ساختار و عملکرد کلروپلاست منجر به حفظ رنگدانه‌های گیاهان در شرایط تنش می‌شود (۳۱). از طرف دیگر گزارش شده است که رسوب سیلیسیوم در دیواره‌های سلولی سفتی و قوام برگ‌ها را فراهم می‌کند و به آن‌ها اجازه می‌دهد نور بیش‌تری برای فعالیت‌های فتوسنتزی دریافت کنند و بیوسنتز رنگدانه‌های کلروفیل را بهبود می‌دهد (۳۰).



شکل ٦- اثر سیلیسیوم (Si) بر محتوای کلروفیل در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 6. The effect of silicon (Si) on chlorophyll content in hot pepper plants under salt stress.

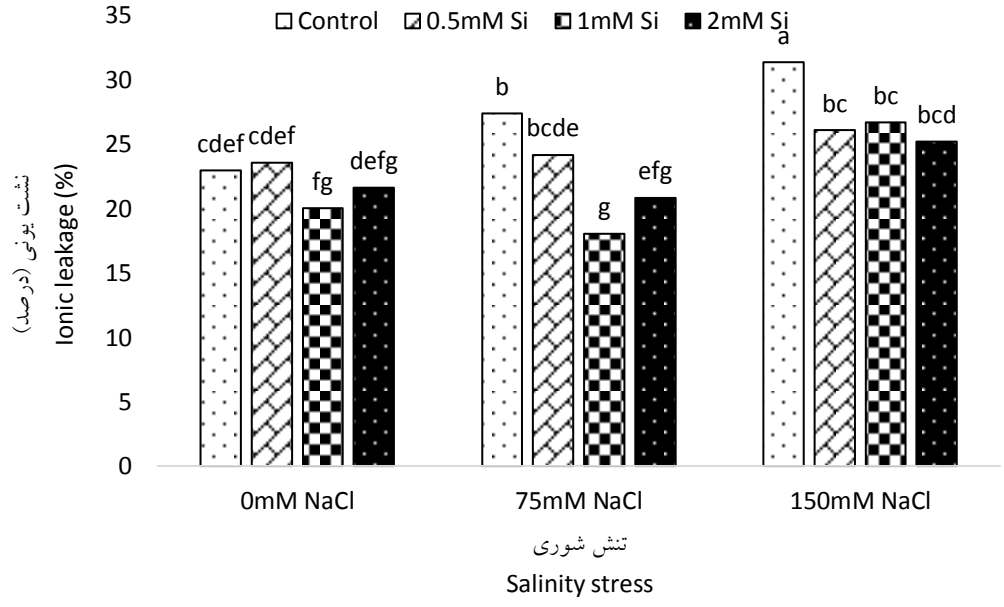
پرولین: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر اصلی شوری و سیلیسیوم و هم‌چنین اثر متقابل این دو تیمار بر محتوای پرولین در سطح یک درصد آماری معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در شرایط عدم کاربرد سیلیسیوم با افزایش سطح شوری محتوای پرولین به شدت افزایش یافته و به بالاترین میزان خود (۲٤/٤۷ میکرومول بر گرم وزن‌تر) در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار رسید. کاربرد سیلیسیوم در شرایط بدون شوری تأثیر معنی‌داری بر محتوای پرولین نداشت ولی در سطوح شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl همه سطوح سیلیسیوم به کار رفته محتوای پرولین را نسبت به شاهد کاهش دادند (شکل ۷). شور شدن خاک جذب آب توسط گیاهان را کاهش داده و منجر به سمیت یونی و تنش اسمزی می‌شود (۲). برای تحمل تنش شوری، گیاهان املاح سازگار مانند پرولین را انباشته می‌کنند که پتانسیل اسمزی سیتوپلاسمی را کاهش می‌دهد، جذب آب را تسهیل می‌کند و گونه‌های واکنشگر اکسیژن را از بین می‌برد (۱۲). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش سطح شوری باعث افزایش معنی‌دار میزان پرولین شد. بالاترین افزایش پرولین در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار به‌دست آمد. در تیمار شاهد (بدون شوری) کاربرد سیلیسیوم تأثیری بر میزان پرولین نداشت، اما در شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl، هر سه غلظت سیلیسیوم به‌کار رفته محتوای پرولین را نسبت به شاهد کاهش دادند. پژوهش‌های دیگر نشان دادند، میزان پرولین در برگ‌های گیاهان تحت تنش شوری افزایش داشته است، اما این افزایش با کاربرد سیلیسیوم کاهش یافت (۱۳). پرولین علاوه بر نقش اسمولیتی، می‌تواند به عنوان ذخیره کربن و نیتروژن برای مقابله با تنش مفید باشد. در این راستا گزارش شده است که، تأمین سیلیسیوم همراه با کاهش پرولین تحمل به تنش را بهبود می‌بخشد (۳۱). عنصر سیلیسیوم با کاهش جذب سدیم توسط ریشه و هم‌چنین کاهش انتقال آن به اندام هوایی، تنش شوری را تسکین می‌دهد، بنابراین پرولین نیز کاهش می‌یابد (۷). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که غلظت پرولین در شرایط شوری افزایش می‌یابد، پس می‌توان نتیجه گرفت که سیلیسیوم با کاهش اثر شوری بر روی گیاه فلفل تند، باعث کاهش میزان پرولین و کاهش تنش اسمزی شده و به بهبود رشد گیاه در شرایط شوری کمک می‌کند.



شکل ۷- اثر سیلیسیوم (Si) بر پرولین در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

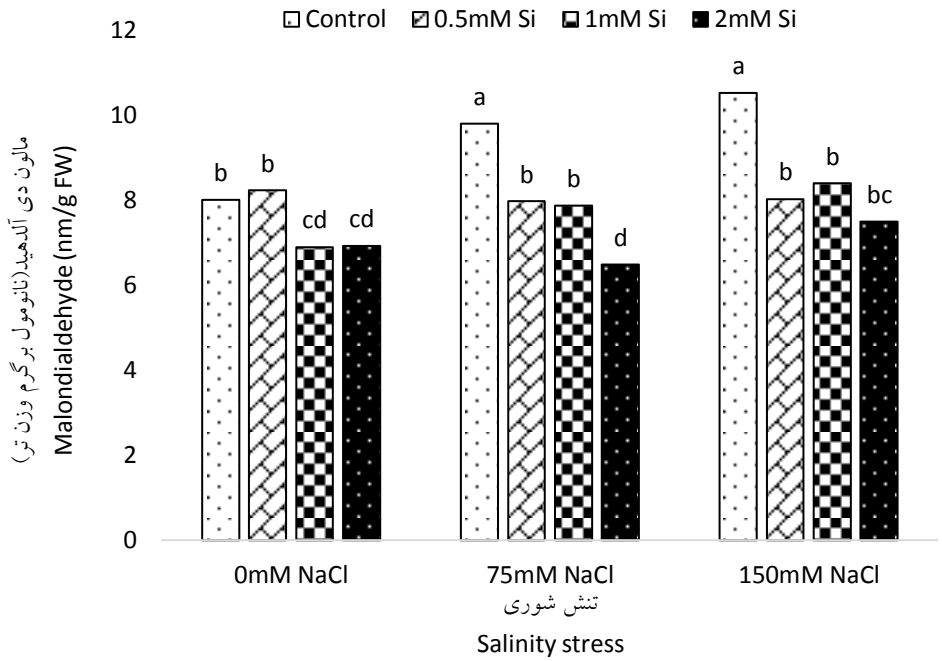
Fig. 7. The effect of silicon (Si) on proline in hot pepper plants under salt stress.

نشت یونی و مالون دی آلدهید: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی و متقابل شوری و سیلیسیوم برنشت یونی و مالون دی آلدهید در سطح یک درصد آماری معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح شوری میزان نشت یونی و مالون دی آلدهید روند افزایشی داشت (شکل‌های ۸ و ۹). در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار هر سه غلظت سیلیسیوم به‌کار رفته نشت یونی را نسبت به شاهد کاهش دادند (شکل ۸). هم‌چنین کاربرد سیلیسیوم در هر سه سطح شوری محتوای مالون دی آلدهید را نسبت به شاهد کاهش داده و بیش‌ترین تأثیر در شوری ۷۵ میلی‌مولار با کاربرد ۲ میلی‌مولار سیلیسیوم به‌دست آمد (شکل ۹). تنش‌های محیطی منجر به تولید رادیکال‌های آزاد و پراکسیده شدن لیپیدهای غشاء می‌شوند. در این شرایط غشاهای سلولی آسیب دیده و نشت یونی افزایش می‌یابد (۱۰). معمولاً پراکسیداسیون لیپیدی غشاء در گیاهان با اندازه‌گیری مالون دی آلدئید تشخیص داده می‌شود. مالون دی آلدهید یک نشانگر پرکاربرد آسیب اکسیداتیو لیپید ناشی از شرایط تنش در گیاهان است (۳۲). افزایش نشت یونی و محتوای مالون دی آلدهید در گیاهان تحت تنش شوری به کرات در پژوهش‌های گذشته گزارش شده است (۱۲، ۲۱). در پژوهش حاضر نیز گیاهان فلفل تحت تنش شوری میزان نشت یونی و مالون دی آلدهید بیش‌تری نسبت به گیاهان شاهد داشتند که نشان‌دهنده آسیب اکسیداتیو در این گیاه می‌باشد. کاربرد سیلیسیوم سبب کاهش نشت یونی و مالون دی آلدهید در گیاهان فلفل تحت تنش شوری شد. کاربرد سیلیسیوم، پراکسیداسیون لیپید را در سلول‌های گیاه تحت تنش شوری کاهش داده است (۲۷، ۲۸). گزارش شده است که عنصر سیلیسیوم در دیواره‌های سلول‌ها رسوب کرده و با ماکروملکول‌های آلی (شامل سلولز، پکتین) ترکیب شده و ترکیبات کلوئیدی بی‌شکل را با سطح جذب بالا تشکیل می‌دهد (۵). هم‌چنین گزارش شده است که تیمار سیلیسیوم با تأثیر مثبت بر آنزیم‌های آنتی اکسیدان و جلوگیری از تجمع رادیکال‌های آزاد منجر به کاهش تجمع مالون دی آلدهید در گیاهان تحت تنش می‌شود (۳۳). پس می‌توان بیان کرد که تیمار سیلیسیوم در گیاهان تحت تنش شوری نقش محافظتی داشته و با مکانیسم‌های مختلف سبب کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش در گیاهان می‌شود.



شکل ۸- اثر سیلیسیوم (Si) بر نشت یونی در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 8. The effect of silicon (Si) on ionic leakage in hot pepper plants under salt stress.



شکل ۹- اثر سیلیسیوم (Si) بر محتوای مالون دی آلدهید در گیاه فلفل تند تحت تنش شوری.

Fig. 9. The effect of silicon (Si) on malondialdehyde content in hot pepper plants under salt stress.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری موجب کاهش معنی‌دار پارامترهای رشد، عملکرد، محتوای رطوبت نسبی و کلروفیل شده و محتوای پرولین، مالون دی آلدهید و نشت یونی را در گیاه فلفل تند افزایش داد. در همه سطوح شوری کاربرد سیلیسیوم سبب افزایش رشد و عملکردگیاه فلفل شد و آثار منفی تنش شوری در این گیاه را تسکین داد. این نتایج در ارتباط با افزایش محتوای رطوبت نسبی و کلروفیل، و کاهش میزان پرولین، محتوای مالون دی آلدهید و نشت الکترولیت بود. در مجموع برای کاهش آثار تنش شوری در گیاه فلفل تند استفاده از غلظت‌های یک و دو میلی‌مولار سیلیسیوم به صورت محلول پاشی برگی توصیه می‌شود.

منابع

1. Munns, R. & Gilliham, M. (2015). Salinity tolerance of crops–what is the cost. *New phytologist*, 208 (3), 668-673.
2. Munns, R. & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review in Plant Biology*, 59, 651-681.
3. Miller, G. A. D., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S. U. L. T. A. N. & Mittler, R. O. N. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, cell & Environment*, 33 (4), 453-467.
4. Qadir, M., Qureshi, A. S. & Cheraghi, S. A. M. (2008). Extent and characterization of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation & Development*, 19 (2), 214-227.
5. Guntzer, F., Keller, C. & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 201-213.
6. Ahanger, M. A. & Ahmad, P. (2019). Role of mineral nutrients in abiotic stress

tolerance: revisiting the associated signaling mechanisms. *Plant signaling molecules*, 269-285.
7. Wang, M., Wang, R., Mur, L. A. J., Ruan, J., Shen, Q. & Guo, S. (2021). Functions of silicon in plant drought stress responses. *Horticulture Research*, 8, 1-13.
8. Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G. & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147 (2), 422-428.
9. Rizwan, A., Zia-ur-Rehman, M., Rizwan, M., Usman, M., Anayatullah, S., Alharby, H. F. & Ali, S. (2023). Effects of silicon nanoparticles and conventional Si amendments on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) grown in saline-sodic soil. *Environmental Research*, 227, 115740.
10. de Souza Junior, J. P., de Mello Prado, R., Campos, C. N. S., Junior, G. D. S. S., Costa, M. G., de Pádua Teixeira, S. & Gratão, P. L. (2023). Silicon modulate the non-enzymatic antioxidant defence system and oxidative stress in a similar way as boron in boron-deficient cotton flowers. *Plant Physiology and Biochemistry*, 197, 107594.
11. Li, H., Zhu, Y., Hu, Y., Han, W. & Gong, H. (2015). Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. *Acta Physiologiae Plantarum*, 37, 1-9.
12. Yaghubi, K., Ghaderi, N., Vafaee, Y. & Javadi, T. (2016). Potassium silicate alleviates deleterious effects of salinity on two strawberry cultivars grown under soilless pot culture. *Scientia Horticulturae*, 213, 87-95.
13. Zhu, Y., Jiang, X., Zhang, J., He, Y., Zhu, X., Zhou, X. & Liu, Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 156, 209-220.
14. López-Serrano, L., Calatayud, Á., López-Galarza, S., Serrano, R. & Bueso, E. (2021). Uncovering salt tolerance mechanisms in pepper plants: a physiological and transcriptomic approach. *BMC Plant Biology*, 21, 1-17.
15. Blum, A. & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*, 21 (1), 43-47.
16. Khan, M. A. H., Baset Mia, M. A., Quddus, M. A., Sarker, K. K., Rahman, M., Skalicky, M. & Hossain, A. (2022). Salinity-induced physiological changes in pea (*Pisum sativum* L.): Germination rate, biomass accumulation, relative water content, seedling vigor and salt tolerance index. *Plants*, 11 (24), 3493.
17. Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24 (1), 1-14.
18. Bates, L. S., Waldren, R. A. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
19. Stewart, R. R. & Bewley, J. D. (1980). Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65 (2), 245-248.
20. Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A. & Sarwar, M. I. (2019). A review: Impact of salinity on plant growth. *Nature and Sci*ence, 17 (1), 34-40.
21. Trabelsi, L., Gargouri, K., Hassena, A. B., Mbadra, C., Ghrab, M., Ncube, B. & Gargouri, R. (2019). Impact of drought and salinity on olive water status and physiological performance in an arid climate. *Agricultural water management*, 213, 749-759.
22. Khan, A., Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y. H., Al-Rawahi, A. & Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and salinity: Crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1429.
23. De Pascale, S., Ruggiero, C., Barbieri, G. & Maggio, A. (2003). Physiological responses of pepper to salinity and drought. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128 (1), 48-54.
24. Navarro, J. M., Garrido, C., Carvajal, M. & Martinez, V. (2002). Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77 (1), 52-57.

25. Villa-Castorena, M., Ulery, A. L., Catalán-Valencia, E. A. & Remmenga, M. D. (2003). Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants. *Soil Science Society of America Journal*, 67 (6), 1781-1789.
26. Hurtado, A. C., Chiconato, D. A., de Mello Prado, R., Junior, G. D. S. S. & Felisberto, G. (2019). Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 224-233.
27. Savvas, D., Giotis, D., Chatzieustratiou, E., Bakea, M. & Patakioutas, G. (2009). Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. *Environmental and Experimental Botany*, 65 (1), 11-17.
28. Peña-Calzada, K., Olivera-Viciedo, D., Calero-Hurtado, A., de Mello Prado, R., Habermann, E., Lata Tenesaca, L. F. & Lupino Gratão, P. (2023). Silicon mitigates the negative impacts of salt stress in soybean plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103, 4360-4370.
29. Heidari, M. (2012). Effects of salinity stress on growth, chlorophyll content and osmotic components of two basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes. *African Journal of Biotechnology*, 11 (2), 379-384.
30. Trejo-Téllez, L. I., García-Jiménez, A., Escobar-Sepúlveda, H. F., Ramírez-Olvera, S. M., Bello-Bello, J. J. & Gómez-Merino, F. C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ*, 8, e9224.
31. Singh, P., Kumar, V., Sharma, J., Saini, S., Sharma, P., Kumar, S. & Sharma, A. (2022). Silicon supplementation alleviates the salinity stress in wheat plants by enhancing the plant water status, photosynthetic pigments, proline content and antioxidant enzyme activities. *Plants*, 11 (19), 2525.
32. Kong, W., Liu, F., Zhang, C., Zhang, J. & Feng, H. (2016). Non-destructive determination of Malondialdehyde (MDA) distribution in oilseed rape leaves by laboratory scale NIR hyperspectral imaging. *Scientific Reports*, 6 (1), 35393.
33. Ma, D., Sun, D., Wang, C., Qin, H., Ding, H., Li, Y. & Guo, T. (2016). Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35, 1-10.