Journal of Vegetables Sciences, Spring & Summer 2022, Vol 6, No 11(1), Pages 33-46

doi: 10.22034/IUVS.2022.543981.1187 Article Type: Research Online ISSN: 2676-4822

Effect of Various Concentrations of Potassium Silicate on Biomass, Yield and Silicon Distribution in Tomato Plants

Mohammad Shokri Fomeshkenari[1], Kamran Ghasemi[2*] and Seyed Mostafa Emadi[3]

1- Former MSc. Student, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Department of Soil Sciences, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

***Corresponding author:** kamranghasemi63@gmail.com

(**Received:** 30 November 2021 **Revise:** 16 February 2022 **Accepted:** 27 February 2022)

Extended Abstract

1-Introduction: Silicon (Si) is considered as a beneficial nutrient in most plants which can contribute to various positive physiological impacts. It is well documented that Si can alleviate a broad range of biotic and abiotic stresses, so this element is an effective inorganic antistress. As tomato is usually attacked by different pathogens like fungi, in addition it is vulnerable against a vast range of abiotic stresses including water stress, chilling, freezing and so forth, Si treatment can be a good strategy for strengthening the plant defense system. It is so obvious that Si treatment should be applied before stress; because of this, comprehension of this element behavior in normal conditions can be important. However, most experiments about Si have been conducted in stressful conditions, but evaluation of the Si effect in normal conditions, its behavior in plants, and its distribution in different organs need to be explored. Recently, the active gene of *S1Lsi1* which is responsible for Si influx, was detected in tomato, but efflux gene named *S1Lsi2* was inactive, therefor translocation of Si from root to above parts of plant might be seriously restricted. Evaluation of tomato potential for Si root absorption and after that transporting of the element to the aerial parts can shed light on the efficiency of Si fertilization. So, this research was outlined to monitor the Si uptake by root, its distribution in different plant organs, and its effects on biomass and yield in tomatoes treated by different concentrations of Si.

2-Material and methods: In this research, Si uptake and translocation in tomato plant was evaluated in completely randomized design experiment with 11 treatments (0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, and 1000 mg Si/l from K_2SiO_3), and four replications in an open field soil pot experiment. Potassium silicate treatments were applied every 10 days up to 8 times during the experiment conduction. Each pot was fertigated 200 ml of Si contained solution. Fresh and dry weight of fruits, fresh and dry weight of old leaves, fresh and dry weight of young leaves, fresh and dry weight of stem, fresh and dry weight of root, and Si content of different parts of plant were determined in this experiment. Analysis of variation was carried out by SAS 9.1 software and the Duncan test was used for mean comparison.

3-Results and discussions: PCR Based on obtained results, treatments of 300 and 600 mg/l caused an increase in fresh weight of old leaves and stem. A huge amount of Si settles down on the cell wall; as a result, the stronger stem of plants in these treatments can be expected. Also, Si in 600, 700, 800, and 900 mg/l led to more fruit dry biomass. Two treatments of 500 and 600 mg/l produced the highest yield per plant, but the highest fruit number was observed just in 600 mg/l treatment. According to regression analysis the highest fruit yield per plant will be obtained in 548mg/l of Si. Positive effect of Si on the yield of different crops was frequently reported which is in harmony with our results. Si fertigation in 600mg/l concentration significantly contributed to more Si content in old leaves and total plant. Recently, it was reported that Si accumulation in old leaves is more than young once which can be related to the immobility mode of this element in plants. Distribution model of Si in tomato plants showed 73.09% of absorbed Si accumulated in fruits and after that stem, leaves and root placed in lower levels with 11.49, 13.81 and 1.61% respectively. So, the hypothesis of low Si translocation from root to aerial parts in tomato was contradicted by the present results. Accumulation of Si in fruits is a promising indication, because positive influences of Si can be observed in fruits especially in postharvest phase.

4-Conclusion: It can be definitely said that Si applied through the fertigation was absorbed by tomato root and the large percentage of the element was transported to other organs especially fruits which received a large extent of absorbed Si. Overall, treatment of tomato plants with 600 mg/l of Si improved vegetative growth, stem strength, yield, and fruit number per plant, so this concentration can be recommended for growing tomato; in contrast, low or high concentrations were not efficient enough.

Key words: Silica, Nutrition, Translocation, Element accmulation.

Citation: Shokri Fomeshkenari, M., Ghasemi, K. & Emadi, S. M. (2022). Effect of various concentration of potassium silicate on biomass, yield and silicone distribution in tomato plants. *Journal of Vegetables Sciences*, 11(1), 33-46. doi: 10.22034/ iuvs.2022.543981.1187

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

دوفصلنامه علمی علوم سبزی‌ها، سال ۶، دوره ۱۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صفحات (۴۶-۳۳)

شاپا الکترونیکی: ۴۸۲۲-۲۶۷۶ نوع مقاله: پژوهشی doi: 10.22034/ iuvs.2022.543981.1187

تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیکات پتاسیم بر زیست توده، عملکرد و توزیع سیلیسیم در گوجه‌فرنگی

محمد شکری فومشکناری[۱]، کامران قاسمی[۲*]، سید مصطفی عمادی[۳]

۱- دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

[*]**نویسنده مسئول:** kamranghasemi63@gmail.com

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۰/۰۹/۰۹ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۰/۱۲/۰۸)

چکیده

در بسیاری از گیاهان، سیلیسیم یک عنصر مفید محسوب می‌شود که تأثیرات فیزیولوژیکی مثبتی را رقم می‌زند. از آنجایی‌که ژن مسئول جریان داخل سیلیسیم در گیاه گوجه‌فرنگی فعال، ولی در مقابل ژن جریان به خارج سیلیسیم غیرفعال است، لذا کارایی انتقال این عنصر به بخش‌های هوایی و نحوه توزیع آن در اندام‌های مختلف هنوز محل بحث است. در این پژوهش میزان جذب و انتقال سیلیسیم در گوجه‌فرنگی با آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۰ تیمار (شامل صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم از منبع K_2SiO_3 و در چهار تکرار، به‌صورت گلدانی ارزیابی شد. بعد از ظاهر شدن اولین گل، تیمار کودآبیاری سیلیکات پتاسیم به فاصله هر ۱۰ روز یکبار به تعداد هشت دفعه اعمال گردید. براساس نتایج به‌دست آمده تیمار ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش وزن تر برگ‌های پیر و وزن تر ساقه شد. همچنین تیمارهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش درصد ماده خشک و بیوماس خشک میوه گردید. از نظر عملکرد بوته، دو غلظت ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر حداکثر مقدار را داشتند (۱۳۳/۷۹ درصد افزایش نسبت به شاهد) و بیشترین تعداد میوه در بوته نیز در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمد (۱۸۸/۸۹ درصد افزایش نسبت به شاهد). کودآبیاری سیلیسیم با غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌طور معنی‌داری سبب افزایش میزان سیلیسیم کل گیاه و سیلیسیم موجود در برگ‌های پیر شد. نحوه توزیع سیلیسیم در گوجه‌فرنگی نیز نشان داد که ۷۳/۰۹ درصد از سیلیسیم جذب شده توسط گیاه گوجه فرنگی در میوه آن تجمع یافت و بعد از آن ساقه گیاه، برگ‌ها و ریشه به ترتیب با ۱۱/۴۹، ۱۳/۸۱ و ۱/۶۱ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. به‌طورکلی و از آنجایی‌که تیمار کودآبیاری سیلیسیم با غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش جذب سیلیسیم، رشد رویشی، عملکرد و تعداد میوه شد، لذا می‌تواند تیمار قابل‌توصیه‌ای برای گوجه‌فرنگی باشد. همچنین آنالیز رگرسیون میزان ۵۴۸ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم را برای دستیابی به حداکثر عملکرد تازه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: سیلیسیم، عنصر غذایی، انتقال راه دور، تجمع عنصر.

استناد: شکری فومشکناری, م.، قاسمی, ک. و عمادی, س.م. (۱۴۰۱). تاثیر غلظت‌های مختلف سیلیکات پتاسیم بر زیست توده، عملکرد و توزیع سیلیسیم در گوجه‌فرنگی. *علوم سبزی ها*, ۱۱(۱)، ۴۶-۳۳.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به‌صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

عنصر سیلیسیم، دومین عنصر فراوان در سطح کره زمین و یکی از عناصر غذایی مفید در رشد و مقاومت گیاهان می‌باشد. اگرچه سیلیسیم به‌صورت کلی به‌عنوان عنصری مفید تلقی می‌شود، اما در برخی از گیاهان یک عنصر ضروری محسوب می‌گردد (Doshi *et al.*, 2008). مهم‌ترین نقش سیلیسیم ایجاد مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده می‌باشد. سیلیسیم در داخل گیاه درون بافت چوبی حرکت می‌کند و نقش مهمی در رشد، جذب مواد معدنی، حمایت مکانیکی و مقاومت گیاه به بیماری‌های قارچی دارد (Liang *et al.*, 1993). سیلیسیم تنها عنصر معدنی شناخته شده است که می‌تواند به‌طور مؤثری دامنه وسیعی از تنش‌های غیرزیستی از قبیل شوری، خشکی، غرقاب شدن، یخزدگی، دمای بالا، تابش فرابنفش و سمیت/کمبود عناصر غذایی معدنی را تعدیل کند (Emadi & Ghasemi, 2018).

این عنصر در فرآیندهای متابولیک، فیزیولوژیک و ساختمانی گیاهان، به‌ویژه در شرایط تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش مهمی دارد، به‌طوری‌که Samuels و همکاران (۱۹۹۳) گزارش کردند که سیلیسیم توانسته سطح فعالیت آنزیم‌های کیتیناز و پراکسیداز را در حضور بیماری پیتیوم در خیار به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. یکی دیگر از سازوکارهای سیلیسیم برای تحمل در برابر تنش‌های زنده، ایجاد مانع فیزیکی در برابر سلول‌های اپیدرمی در مقابل نفوذ هیف قارچ یا حشراتی نظیر کنه می‌باشد (Liang *et al.*, 2005). مطالعات حاکی از آن است که علاوه بر اینکه سیلیسیم در استحکام دیواره سلولی جهت ممانعت در برابر نفوذ عوامل بیماری‌زا نقش دارد، با تحریک دفاع بیوشیمیایی شامل تجمع لیگنین، ترکیبات فنلی و پروتئین‌های مرتبط از گیاهان حفاظت می‌نماید (Fauteux *et al.*, 2006). پیش‌تیمار نشاءهای گوجه‌فرنگی با سیلیکات پتاسیم ۵ میلی‌مولار موجب شد تا مقاومت گیاه به تنش خشکی بعد از انتقال نشاء افزایش معنی‌داری پیدا کند (Karimi *et al.*, 2021). در پژوهشی که به‌تازگی منتشر شده است نقش سیلیسیم در به تأخیر انداختن پیری گوجه‌فرنگی ناشی از تنش شوری مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این عنصر معدنی می‌تواند موجب تحریک تولید هورمون سیتوکینین شده و از این طریق می‌تواند تنش شوری و پیری ناشی از آن را به تعویق بیاندازد (Guo *et al.*, 2022).

در آزمایشی تأثیر کاربرد سیلیسیم بر رشد و عملکرد دو رقم خیار را در محیط هیدروپونیک با سه سطح سیلیسیم (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم از منبع سیلیکات سدیم) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از آن بود که کاربرد سیلیسیم سبب افزایش غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی خیار شد و وزن خشک ریشه و شاخساره و همچنین طول ریشه و ارتفاع شاخساره در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم در مقایسه با گیاهان رشد کرده در محلول‌های فاقد سیلیسیم افزایش معنی‌داری نشان داد (Mohaghgh *et al.*, 2011). چندین آزمایش مزرعه‌ای برای ارزیابی اثر سیلیسیم و کلسیم بر رشد، عملکرد و کیفیت گوجه فرنگی انجام گرفت و نتایج نشان داد که مصرف سیلیسیم به‌طور معنی‌داری مقاومت گوجه‌فرنگی به بیماری‌ها، اندازه میوه و درنتیجه عملکرد را افزایش داد. به‌علاوه، تیمار توأم سیلیسیم و کلسیم مزه میوه گوجه فرنگی را به‌دلیل افزایش میزان قند بهبود داد در حالی که در تیمار کلسیم تنها و بدون سیلیسیم چنین اثری مشاهده نشد (Liu, 1997). در آزمایشی دیگر مشاهده شد که محلول‌پاشی هر دو شکل آلی و معدنی سیلیسیم توانست رشد نشای گوجه‌فرنگی را زیاد کرده و وزن تک-میوه را افزایش دهد، ولی این افزایش در مصرف سیلیسیم معدنی خیلی بیشتر بود (Xue *et al.*, 2012). به‌تازگی گزارش شده است که گیاه گوجه‌فرنگی دارای ژن فعال *SlLsi1* می‌باشد که مسئول جریان داخل سیلیسیم می‌باشد، ولی در مقابل ژن *SlLsi2* که جریان به خارج سیلیسیم را کنترل می‌کند به‌صورت غیرفعال می‌باشد، لذا جذب ریشه‌ای این عنصر نمی‌تواند

همواره با انتقال مناسب به بخش‌های هوایی همراه باشد (Sun *et al.*, 2020).

با توجه به افزایش تنش‌های مختلف به‌ویژه در سال های اخیر، نیاز به استفاده از ضدتنش‌ها بیشتر شده است، لذا این پژوهش به عنصر سیلیسیم به‌عنوان یک ضدتنش بسیار مهم معدنی پرداخته و میزان جذب و انتقال آن را در گیاه گوجه‌فرنگی مورد بررسی قرار می دهد تا از این رهگذر میزان اثرگذاری آن روشن گردد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۱ تیمار و در ۴ تکرار به‌صورت گلدانی و در فضای باز انجام شد. جهت انجام تیمارها، عنصر سیلیسیم در غلظت‌های صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر از منبع سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3) مورد استفاده قرار گرفت. جهت انجام آزمایش نشاء گوجه‌فرنگی رقم ردکلود به گلدان های پلاستیکی با قطر ۲۵ و طول ۳۵ سانتی‌متر منتقل شد. بستر خاک گلدان از ترکیب خاک و کود حیوانی پوسیده با نسبت ۲ به ۱ پر شد که مشخصات خاک در جدول ۱ و پارامترهای هواشناسی در جدول ۲ آمده است. کلیه عملیات داشت شامل تغذیه با کود فاقد سیلیسیم، آبیاری و مبارزه با آفات و بیماری‌ها به‌صورت یکسان برای همه گیاهان انجام شد. بعد از ظاهر شدن اولین گل، تیمار کودآبیاری سیلیکات پتاسیم به فاصله هر ۱۰ روز یکبار به تعداد هشت دفعه، به‌میزان ۲۰۰ میلی‌لیتر برای هر بوته اعمال گردید. علاوه بر تیمارهای ذکرشده، آبیاری دستی هر پنج روز یکبار به‌صورت منظم انجام شد.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکوشیمیایی خاک بستر مورد آزمایش

Table 1- Physio-chemical analysis of the soil used in this experiment

پتاسیم قابل‌جذب Absorbable K (mg/kg)	فسفر قابل‌جذب Absorbable P (mg/kg)	نیتروژن کل Total N (mg/kg)	درصد مواد خنثی‌شونده TNV (%)	هدایت الکتریکی EC (µs/cm)	pH	درصد ماده آلی OM٪	درصد کربن آلی OC٪	بافت خاک Soil texture	درصد رس Clay%	درصد لای Silt%	درصد شن Sand%
298	13	1.9	1	0.81	7.23	3.39	1.96	C.L	39	39	22

TNV: Total Neutralizing Value, EC: Electrical Conductivity, OM: Organic Matter, OC: Organic Carbon.

جدول ۲- پارامترهای هواشناسی در دوره آزمایش

Table 2- Meteorology parameters during carrying out the experiment

ماه (سال ۱۳۹۸) Month (2019)	میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) Mean Temperature (°C)	میانگین رطوبت نسبی (درصد) Mean Relative Humidity (%)	میانگین بارندگی (میلی‌متر) Total Monthly Rainfall (mm)	میانگین ساعات آفتابی در روز Mean Sunny Hours in a Day
خرداد Jun	25.8	72	1.2	10.1
تیر July	27.6	76	65.5	7.4
مرداد August	27.4	74	24.1	6.9
شهریور September	24.8	78	175.1	5.9

اندازه‌گیری صفات

وزن تر و خشک میوه، وزن تر و خشک برگ‌های نیمه پایین بوته (برگ‌های پیر)، وزن تر و خشک برگ‌های نیمه بالا بوته (برگ‌های جوان)، وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک ریشه از طریق ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد. جهت اندازه‌گیری سیلیسیم برگ‌های پیر، برگ‌های جوان، ساقه و میوه، عصاره‌گیری از نمونه گیاهی با روش اتوکلاو صورت گرفت (Elliott & Snyder, 1991). به‌طور خلاصه، ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه (آسیاب و عبور داده شده از الک) را در لوله

پلی‌اتیلن ۲۵۰ میلی لیتری قرار داده و ۲ میلی‌لیتر H_2O_2 پنجاه درصد و ۴/۵ میلی‌لیتر NaOH پنجاه درصد به آن اضافه شد. سوسپانسیون به دست آمده در اتوکلاو در فشار ۱۳۸ (۲۰۰) کیلو پاسکال (دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد) به‌مدت ۲۰ دقیقه هضم و در نهایت فیلتر شد و نمونه هضم شده با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسید. مرحله دوم کار قرائت بود که برای قرائت نمونه عصاره‌گیری شده بدین ترتیب عمل شد که یک میلی‌لیتر از محلول نمونه عصاره‌گیری شده در مرحله اول به بالن ۵۰ میلی‌لیتر انتقال داده و ۳۰ میلی‌لیتر اسید استیک ۲۰ درصد به آن اضافه شد. آنگاه ۱۰ میلی لیتر محلول آمونیوم مولیبدات ریخته شد. برای مخلوط شدن کامل محلول، خوب بهم زده و برای ۵ دقیقه در حالت سکون قرار داده شد. در ادامه ۵ میلی‌لیتر اسید تارتاریک ۲۰ درصد و ۱ میلی‌لیتر محلول احیاءکننده (شامل ۸ گرم بر لیتر Na_2SO_3، ۱/۶ گرم بر لیتر ۱-آمینو -۲-نفتول- ۴-سولفوریک اسید و ۱۰۰ گرم بر لیتر $NaHSO_3$ اضافه شد. از اسید استیک ۲۰ درصد برای به حجم رساندن محلول استفاده شد؛ سپس محلول برای ۳۰ دقیقه به حال خود رها و در نهایت با کووت ۳ میلی‌لیتر، با دستگاه اسپکتوفتومتر Cary UV-Vis 4000 ساخت شرکت Agilent ایالات متحده آمریکا، در طول موج ۶۵۰ قرائت گردید (Hallmark *et al.*, 1982).

تجزیه و تحلیل آماری

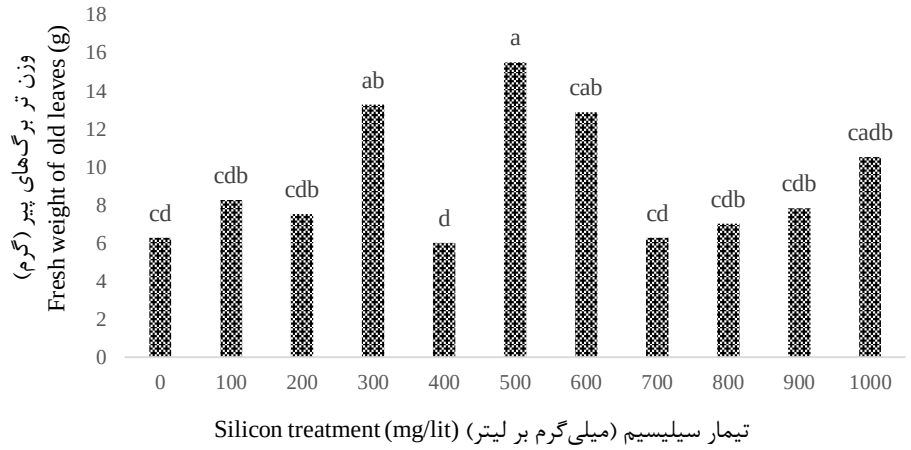
آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS. 9.1 و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام شد. در صفاتی که آنالیز واریانس معنی‌داری را نشان داد، مقایسه میانگین صورت گرفت و نمودار ستونی آن توسط نرم افزار Excel رسم گردید. همچنین با توجه به کمی بودن تیمارها، آنالیز رگرسیون درجه یک و درجه دو توسط نرم‌افزار SAS. 9.1 صورت گرفت و در مواردی که معادله درجه یک $(y = a + bx)$، درجه دو $(y = a + bx + cx^2)$ و یا هر دو معنی‌دار شدند، در نرم افزار Excel خط یا منحنی آن‌ها رسم شد، معادله آن‌ها نوشته شد و در نهایت پیک منحنی با استفاده از رابطه (-b/2c) محاسبه گردید.

نتایج و بحث

رشد رویشی

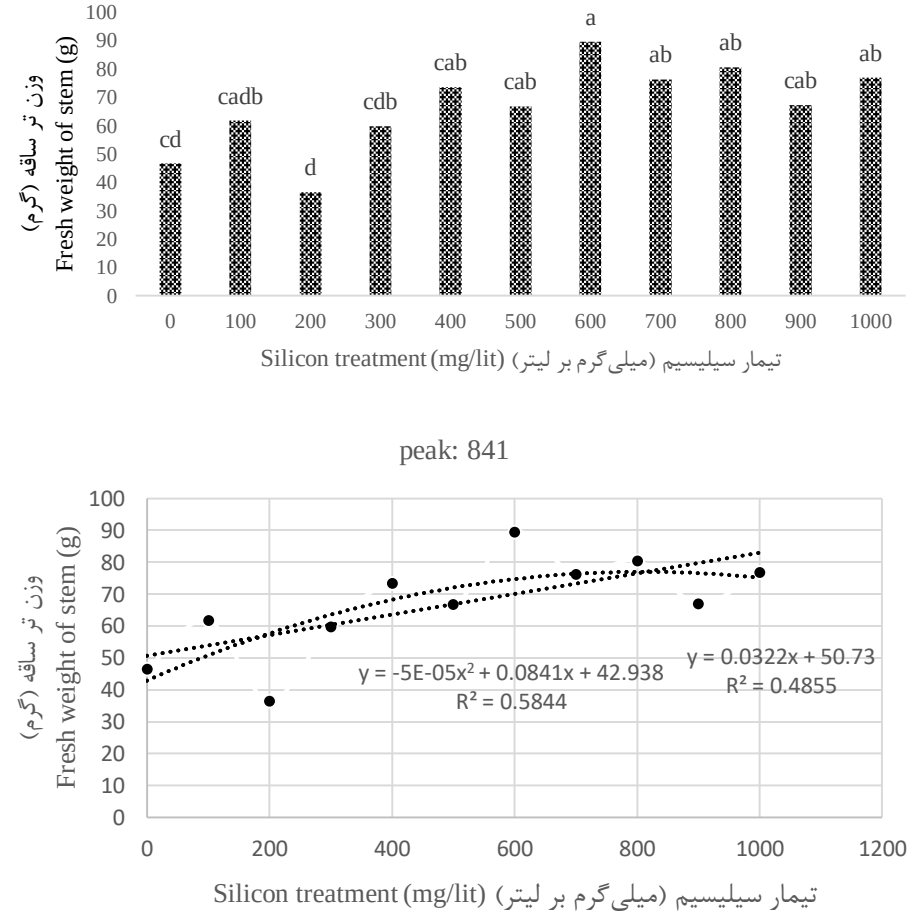
در میان صفات مختلف اندازه‌گیری شده مرتبط با رشد رویشی و زیست توده گیاهی، تنها وزن ساقه گیاه و وزن تر برگ‌های پیر (برگ‌های نیمه پایینی گیاه) تحت تأثیر تیمار سیلیسیمی قرار گرفتند. براساس نتایج بدست آمده بیشترین وزن تر برگ‌های پیر در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بدست آمد که اختلاف معنی‌داری از نظر آماری با تیمارهای ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نداشت (شکل ۱). از نظر وزن‌تر ساقه نیز تیمار کودآبیاری ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بیشترین وزن تر ساقه گوجه‌فرنگی را موجب شد که اختلاف معنی‌داری با تیمارهایی با غلظت کمتر از ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نشان‌داد (شکل ۲). همچنین غلظت‌های ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به شاهد تفاوت مثبت و معنی‌داری داشتند (شکل ۲).

آنالیز رگرسیون در صفت وزن تر برگ‌های پیر معنی‌دار نشد، ولی معادله درجه اول و درجه دوم برای صفت وزن تر ساقه معنی‌دار گشت که براساس نقطه پیک منحنی درجه دو بدست آمده، بیشترین وزن تر ساقه در غلظت ۸۴۱ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بدست آمد (شکل ۲).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر سیلیسیم بر وزن تر برگ‌های پیر (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

Figure 1- Mean comparison of silicon effect on fresh weight of old leaves (columns with the same letters are not significantly different)



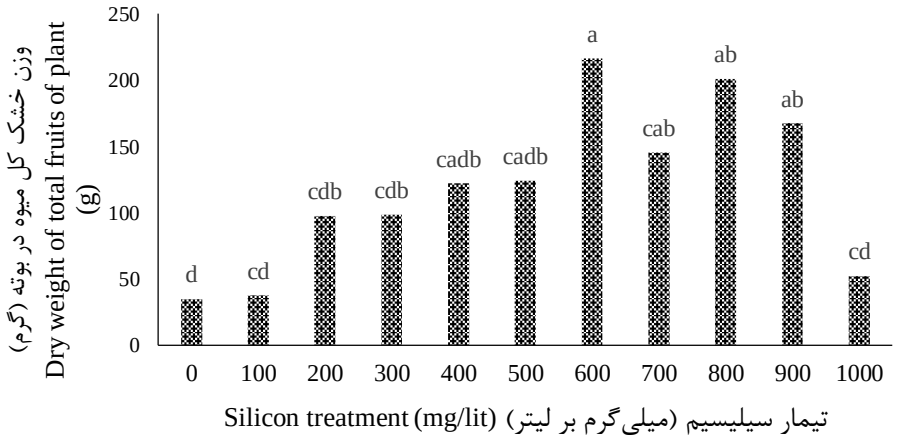
شکل ۲- مقایسه میانگین (بالا) و آنالیز رگرسیون (پایین) اثر سیلیسیم بر وزن تر ساقه (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

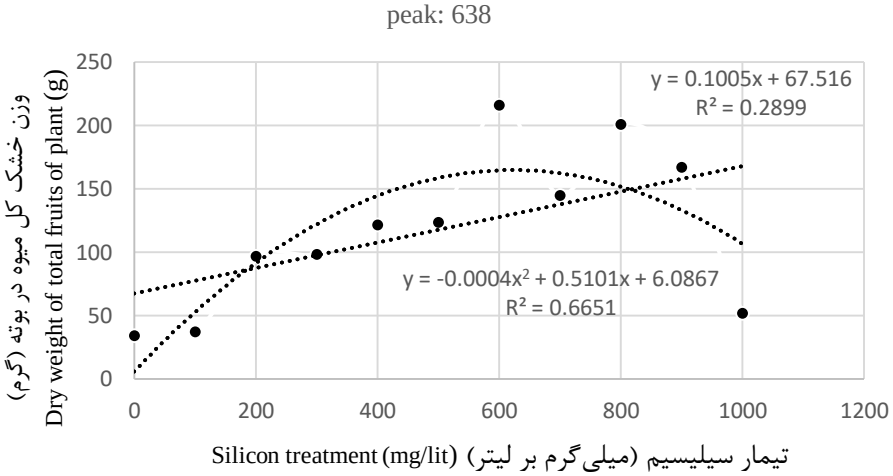
Figure 2- Mean comparison (above) and regression analysis (below) of silicon effect on fresh weight of stem (columns with the same letters are not significantly different)

اگرچه در مقایسه با برنج که یک انباشت‌کننده سیلیسیم است، گوجه‌فرنگی گونه گیاهی سیلیسیم‌گریز محسوب می‌شود (Nikolic *et al*., 2007)، ولی گزارش شده است که تغذیه سیلیسیمی رشد و عملکرد آن را افزایش می‌دهد (Liu *et al*., 2011). از آنجایی‌که کودآبیاری ۸۴۱ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین مقدار وزن تر ساقه را موجب می‌گردد، لذا می‌توان این غلظت را جهت مقاومت ساقه گیاه به شکستگی و صدمات مکانیکی در نظر گرفت. در آزمایشی که اثر سطوح مختلف سیلیسیم بر رشد و تبادلات آب و دی اکسید کربن گوجه‌فرنگی کشت‌شده در شرایط آب‌کشتی را مطالعه شد و نتایج نشان داد که تیمار ۰/۶ میلی‌مولار سیلیسیم و تیمار ۱/۲ میلی‌مولار سیلیسیم به‌طور معنی‌داری ارتفاع گیاه و ماده خشک ریشه، ساقه و برگ را افزایش داد (Cao *et al*., 2013).

رشد زایشی

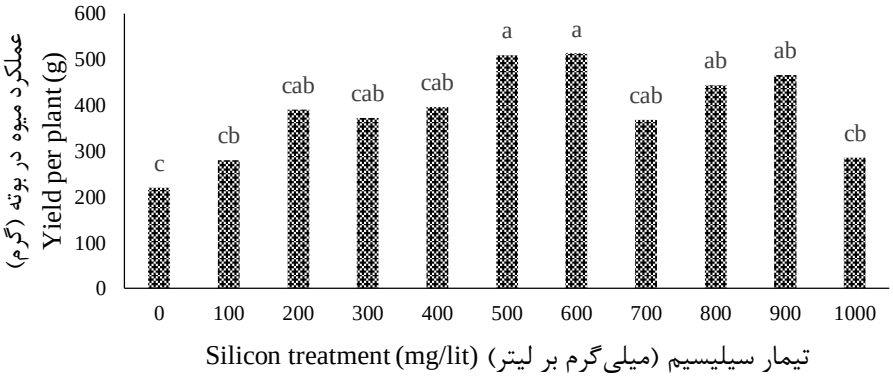
تیمارهای ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، از لحاظ بیوماس خشک میوه تفاوت مثبت و معنی‌داری با شاهد داشتند (شکل ۳). آنالیز رگرسیون بیوماس خشک میوه نیز معنی‌دار بوده و پیک منحنی درجه دو نشان داد که بیشترین وزن خشک میوه تولیدی در غلظت ۶۳۸ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم حاصل می‌گردد (شکل ۳). اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم بر عملکرد میوه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد؛ به‌طوری‌که دو غلظت ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر حداکثر عملکرد میوه در بوته را نشان دادند که از نظر آماری برتری معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند (شکل ۴). اثر غلظت های مختلف سیلیسیم بر تعداد میوه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد که بیشترین تعداد میوه در بوته در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بدست آمد، که به همراه غلظت‌های ۷۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم، همگی نسبت به شاهد برتری معنی‌داری داشتند (شکل ۵). آنالیز رگرسیون برای صفت تعداد میوه معنی‌دار نشد، ولی در عملکرد میوه در بوته معنی‌دار شد. به‌طوری‌که معادله خط و منحنی درجه یک و دو آن در شکل ۴ نشان داده شده است، بیشترین مقدار عملکرد میوه در بوته در غلظت ۵۴۸ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بدست می‌آید.

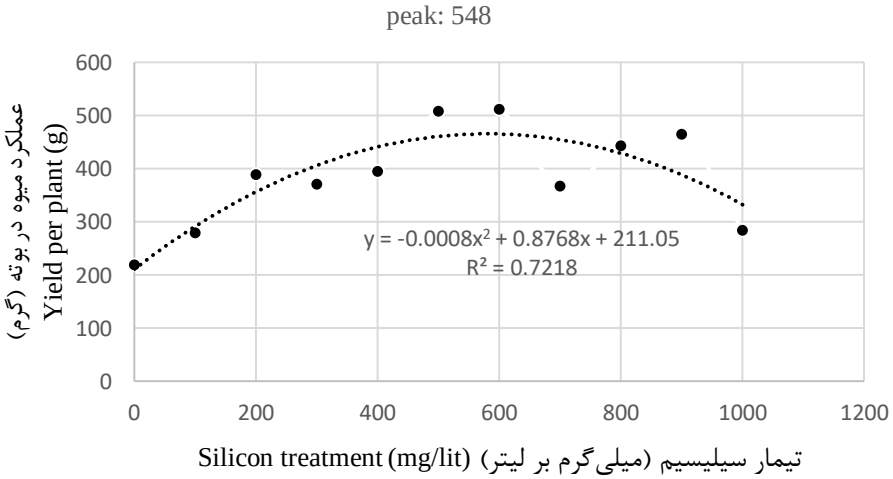




شکل ۳- مقایسه میانگین (بالا) و آنالیز رگرسیون (پایین) اثر سیلیسیم بر وزن خشک کل میوه یک بوته (ستون های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

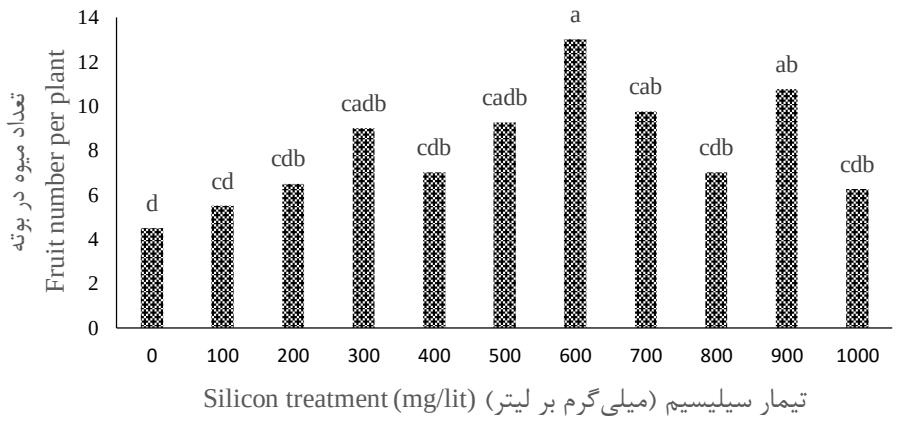
Figure 3- Mean comparison (above) and regression analysis (below) of silicon effect on dry matter of total fruits per plant (columns with the same letters are not significantly different)





شکل ۴- مقایسه میانگین (بالا) و آنالیز رگرسیون (پایین) اثر سیلیسیم بر وزن تر کل میوه یک بوته (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

Figure 4- Mean comparison (above) and regression analysis (below) of silicon effect on fresh weight of total fruits per plant (columns with the same letters are not significantly different)



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر سیلیسیم بر تعداد میوه در بوته (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

Figure 5- Mean comparison of silicon effect on fruit number per plant (columns with the same letters are not significantly different)

تیمار ۶۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم که در صفات مختلف زایشی شامل تعداد میوه در بوته، عملکرد کل بوته و همچنین درصد ماده خشک مطلوب بوده است و نسبت به تیمارهایی با غلظت‌های بالاتر از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی ترجیح دارد، می‌تواند به‌عنوان میزان مطلوب سلیسیم جهت کودآبیاری گوجه‌فرنگی پیشنهاد گردد. همچنین غلظت مذکور تقریباً مابین نتایج رگرسیونی در دو صفت وزن خشک میوه و عملکرد میوه در بوته می‌باشد. هم راستا بودن افزایش عملکرد گوجه فرنگی و درصد ماده خشک میوه گویای آن است که افزایش وزن مرتبط با جذب آب نبوده و ماده خشک میوه نیز با تیمار سیلیسیمی افزایشی یافته است. در پژوهشی که روی گوجه‌فرنگی در فضای باز صورت گرفت استفاده از سیلیسیم علاوه بر کاهش ترکیدگی، آزمایشات مزرعه‌ای نشان داد که تغذیه سیلیسیم عملکرد گوجه‌فرنگی را ۱۵ تا ۳۰ درصد زیاد کرد که این افزایش ناشی از افزایش تعداد و اندازه میوه بود (Liang *et al.*, 1993). موجب افزایش عملکرد و افزایش ماده خشک گوجه‌فرنگی گردید (Marodin *et al.*, 2014). افزایش ماده خشک میوه علاوه بر ایجاد مقاومت به اختلالاتی نظیر ترکیدگی می‌تواند عمرانباری این محصول را نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

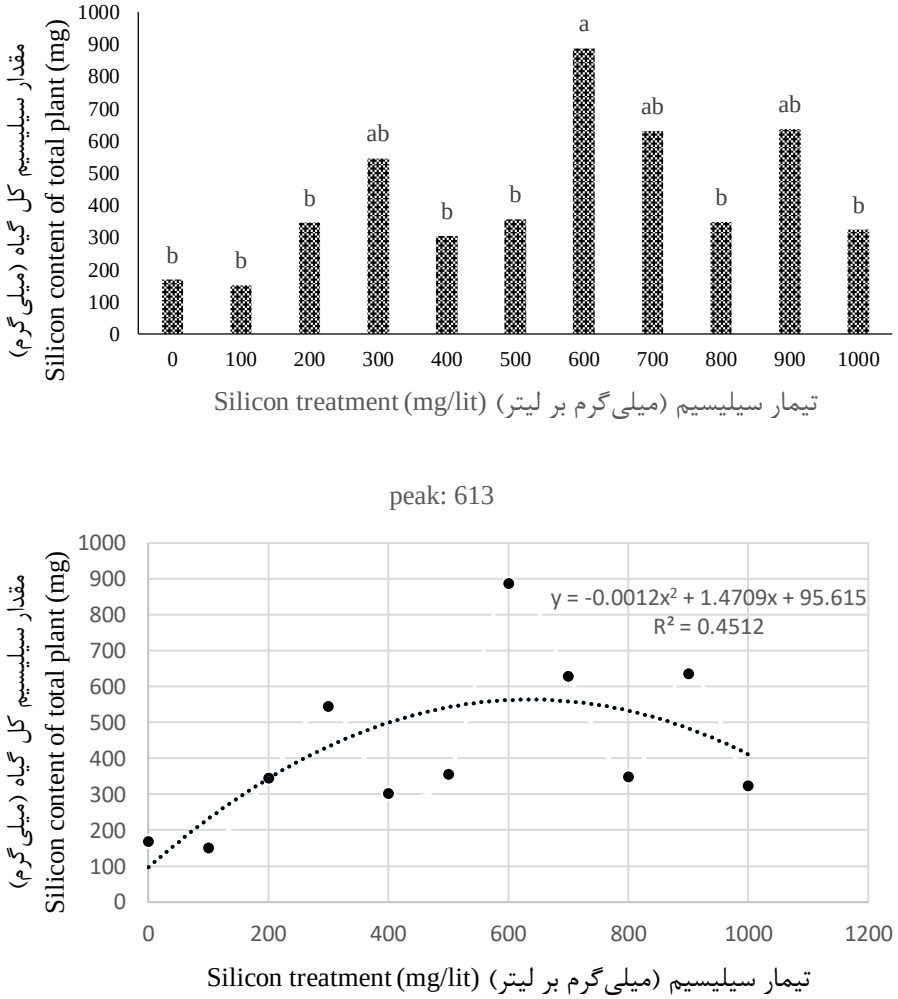
جذب و انتقال سیلیسیم

از نظر صفات مرتبط با جذب سیلیسیم، میزان سیلیسیم کل گیاه و همچنین میزان سیلیسیم برگ‌های پیر پایینی گیاه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار سیلیسیمی اِعمال شده قرار گرفتند. در همین راستا، تنها تیمار کودآبیاری ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم به‌طور معنی‌داری دارای سیلیسیم کل بیشتری نسبت به شاهد بود و سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند (شکل ۶). اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم بر تعداد میوه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و استفاده از تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم موجب بیشترین تجمع سیلیسیم در برگ‌های پیر گوجه‌فرنگی گردید که به‌طور معنی‌داری از شاهد بیشتر بود، ولی سایر تیمارهای سیلیسیمی نتوانستند تجمع بیشتری از سیلیسیم در برگ‌های پیر نسبت به شاهد ایجاد کنند (شکل ۷). از آنجایی‌که سیلیسیم عنصری غیرمتحرک در گیاه محسوب می‌شود (Emadi & Ghasemi, 2018)، لذا تجمع آن در برگ‌های پیر قابل انتظار است و تأثیرگذاری سیلیسیم بر زیست‌توده برگ‌های پیر واضح‌تر از بقیه اندام‌ها خود را نشان داده و از نظر آماری نیز معنی‌دار گردید. به‌تازگی نتایج یک پژوهش نشان داد که مقدار سیلیسیم در برگ‌های بالغ و پیر بیشتر از برگ‌های جوان می باشد (Mvondo-She *et al.*,

2019). دلیل عدم تجمع سیلیسیم بیشتر در غلظت‌های بالاتر کودی می‌تواند به اثرات تخریبی احتمالی این عنصر بر ساختار ریشه و حتی کانال‌های جذبی مربوط باشد.

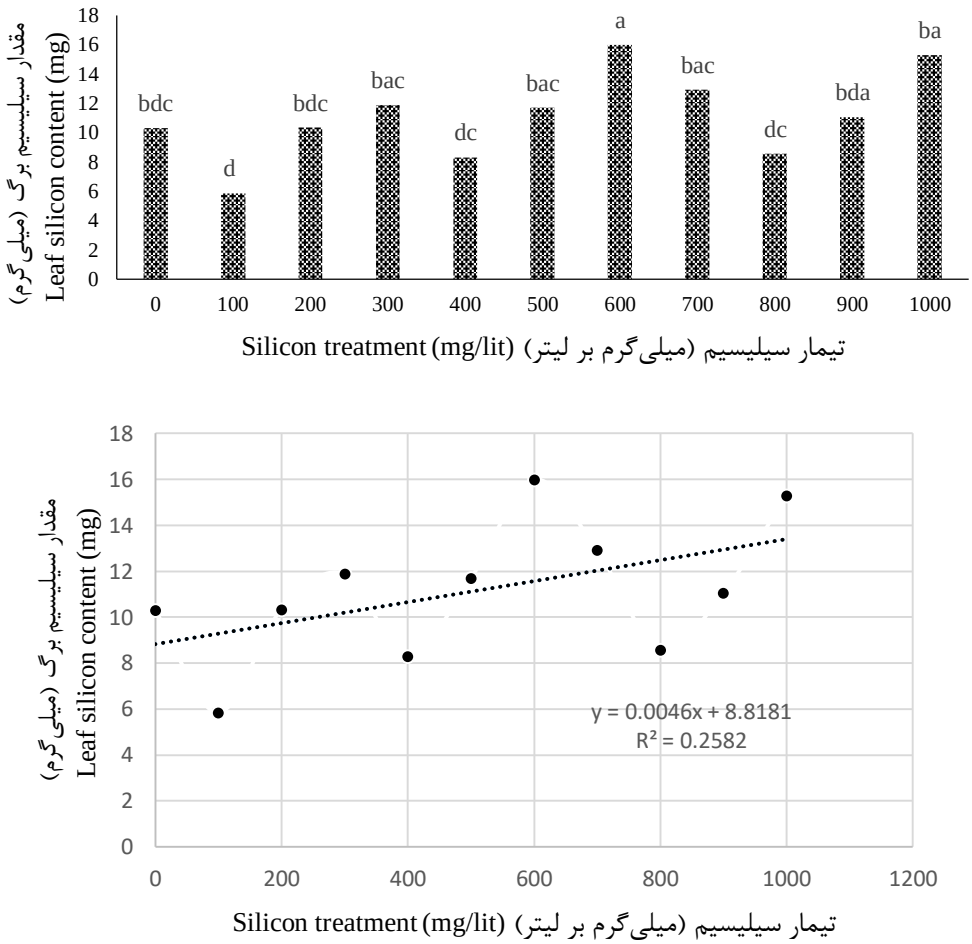
آنالیز رگرسیونی در صفت سیلیسیم کل گیاه، بیانگر معنی‌داری معادله درجه دو بود که منحنی آن در شکل ۶ آورده شده است و بیشترین مقدار سیلیسیم جذب شده در غلظت ۶۱۳ میلی‌گرم بر لیتر این عنصر به‌دست آمد. براساس شکل ۷، آنالیز رگرسیون خطی برای صفت سیلیسیم برگ‌های پیر معنی‌دار شد که البته دارای ضریب تبیین پایینی بود.

نحوه توزیع سیلیسیم در گوجه‌فرنگی می‌تواند نقاط تجمع و سینک این عنصر را در گیاه مشخص نماید. همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، ۷۳/۰۹ درصد از سیلیسیم جذب شده توسط گیاه گوجه‌فرنگی در میوه آن قرار داشت و بعد از آن ساقه گیاه، برگ‌ها و ریشه به ترتیب با ۱۱/۴۹، ۱۳/۸۱ و ۱/۶۱ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.



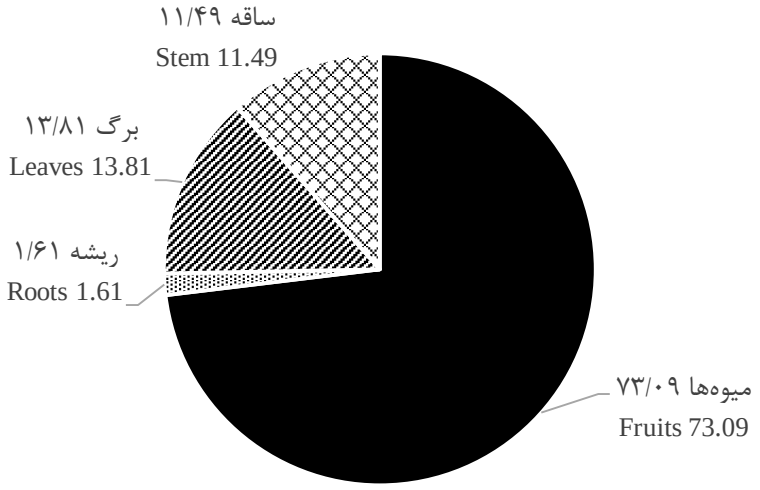
شکل ۶- مقایسه میانگین (بالا) و آنالیز رگرسیون (پایین) اثر سیلیسیم بر جذب کل سیلیسیم (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

Figure 6. Mean comparison (above) and regression analysis (below) of silicon effect on total silicone uptake (columns with the same letters are not significantly different)



شکل ۷- مقایسه میانگین (بالا) و آنالیز رگرسیون (پایین) میزان تجمع سیلیسیم در برگ‌های پیر (ستون‌های دارای حروف مشترک اختلاف معنی‌دار با هم ندارند)

Figure 7- Mean comparison (above) and regression analysis (below) of silicon effect on silicone accumulation in old leaves (columns with the same letters are not significantly different)



شکل ۸- نحوه توزیع سیلیسیم (درصد) در اندام‌های مختلف گیاه گوجه فرنگی

Figure 8- Silicon distribution (percentage) in different organs of tomato plant

برخلاف انتظار که به نظر می‌رسید برگ‌ها با توجه به تعرق بالا مقصد اصلی برای انتقال سیلیسیم باشند، بیشترین درصد سیلیسیم جذب شده در میوه‌ها تجمع یافت. از آنجایی‌که بعد از مستقر شدن سیلیسیم در یک مکان انتقال آن به سایر بافت‌ها و اندام‌ها انجام نمی‌شود و این عنصر از این جهت کاملاً غیرمتحرک است، بنابراین سیلیسیم منتقل شده از ریشه مستقیماً به میوه‌ها رفته است. گزارش شده است که که کاربرد سیلیسیم در دو سطح ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی خیار گردید و همچنین طول ریشه و ارتفاع شاخساره در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم در مقایسه با گیاهان رشدکرده در محلول‌های فاقد سیلیسیم افزایش معنی‌داری نشان داد، ولی در مورد بیشتر صفات مورد بررسی تفاوت معنی‌داری بین این دو سطح دیده نشد (Mohaghgh *et al*., 2011). نتایج یک پژوهش نشان داد که در خیارهای گلخانه‌ای که با محلول‌های غذایی حاوی سیلیسیم تغذیه شده بودند تجمع سیلیسیم در اندام هوایی حداقل ۲/۹ درصد بود و با افزایش غلظت این عنصر در محلول‌های غذایی غلظت آن در میوه خیار نیز افزایش معنی‌داری داشت (Miyake & Takahashi, 1983).

کودآبیاری ۶۱۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌تواند میزان سیلیسیم جذب شده توسط گیاه را افزایش دهد، ولی جالب آنکه غلظت‌های بیشتر این تأثیر را نداشتند به دیگر سخن استفاده تا غلظت خاصی موجب افزایش جذب می‌شود و غلظت‌های خیلی زیاد نمی‌تواند جذب بیشتر را رقم بزند. دلیل این مسئله که غلظت‌های بالای سیلیسیم نمی‌تواند موجب جذب بیشتر این عنصر گردد را میتوان به این فرضیه مربوط دانست که گیاه فقط در حد توان خود می‌تواند این عنصر را جذب و ذخیره کند و استفاده از غلظت‌های بالاتر هیچ تأثیر مثبتی روی عملکرد گیاه ندارد. گزارش شده است که زمانی‌که از مقادیر بالای سیلیکات سدیم به عنوان منبع سیلیسیمی در گیاه گوجه‌فرنگی استفاده شد، نسبت به مقادیر کمتر، غلظت عنصر سیلیسیم در برگ بالا نرفت که می‌تواند به علت تأثیر منفی غلظت‌های بسیار زیاد بر فعالیت ریشه‌های موئین باشد. گزارش‌ها نشان داده است که در برنج گونه‌ی ژاپونیکا، اگر مقدار سیلیس کم‌تر از ۱۱ درصد باشد، گیاه به کاربرد سیلیکات‌های کلسیم حاصل از سرباره پاسخ مثبت نشان می‌دهد (Savant, 1997)، در حالی که در مناطق حاره مثل سریلانکا و هند در برنج گونه ایندیکا، اگر مقدار سیلیس کم‌تر از هشت درصد باشد، به کاربرد سیلیسیم، پاسخ مثبت نشان می‌دهد (Nair & Aiyer, 1968, Takijim *et al*., 1970). عوامل مختلفی در جذب عناصر برای گیاه دخالت دارند از جمله می‌توان تفاوت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، اثرات جوی نظیر رطوبت، دما، سرعت باد و میزان تابش آفتاب و تداخل فلزات مختلف برای جذب یا رقابت آن‌ها را می‌توان نام برد، به همین جهت نمی‌توان انتظار داشت که همیشه در غلظت‌های بالا جذب عناصر نیز افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

جمع‌بندی نتایج این پژوهش گویای آن استکه علی‌رغم سیلیسیم‌گریز بودن گیاه گوجه‌فرنگی، قطعاً سیلیسیم تغذیه شده به روش کودآبیاری، توسط ریشه این گیاه جذب شده و انتقال آن به بخش‌های هوایی نیز صورت گرفته است؛ بنابراین تغذیه ریشه‌ای سیلیسیم می‌تواند انجام شود. نتیجه مهم دیگر اینکه غلظت‌های کم و زیاد سیلیسیم نمی‌توانند تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های زراعی و تجاری محصول بگذارند به‌طوری‌که تیمار کودآبیاری سیلیسیم با غلظت متوسط (۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) سبب افزایش رشد رویشی، عملکرد و تعداد میوه شده است که می‌تواند تیمار مناسبی برای گوجه‌فرنگی باشد. نتیجه شایان ذکر دیگر تجمع بیش از ۷۰ درصد سیلیسیم جذب‌شده در میوه گوجه‌فرنگی است که عدد قابل ملاحظه‌ای بوده و احتمالا تأثیرات فیزیکوشیمیایی خاصی هم روی کیفیت میوه داشته باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مایلند تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به عمل آورند. همچنین تلاش‌های آقایان مهدی محمدی ازنی و مجتبی اسماعیل‌زاده در اجرای این پروژه بسیار سازنده و تأثیرگذار بوده است، لذا از این عزیزان نیز کمال قدردانی به‌عمل می‌آید.

References

- Cao, B.L., Xu, K., Shi, J., Xin, G.F., Liu, C.Y. & Li, X. (2013). Effects of silicon on growth, photosynthesis and transpiration of tomato. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19, 354-60.
- Doshi, R., Braida, W., Christodoulatos, C., Wazne, M., & Oconnor, G. (2008). Nano aluminum: Transport through sand columns and environmental effects on plant and soil communities. *Environmental Research*, 106, 296-3.
- Fauteux, F., Rémus-Borel, W., Menzies, J.G., & Belanger, R.R. (2006). Silicon and plant disease resistance against pathogeni fungi. *FEMS Microbiology Letters*, 249:1-6.
- Elliott C.L. & Snyder G.H. (1991). Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 39, 1118-9.
- Emadi S.M. & Ghasemi K. (2018). Silicon in Agriculture. Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources Press.
- Gou, T., Su, Y., Han, R., Jia, J., Zhu, Y., Huo, H., Liu, H & Gong, H. (2022). Silicon delays salt stress-induced senescence by increasing cytokinin synthesis in tomato. *Scientia Horticulturae*, 293.
- Hallmark, C.T., Wilding, L.P., & Smeck, N.E. (1982). Silicon. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, editors. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties, Agronomy onograph no. 9. 2nd ed. Madison: The America Society of Agronomy and Soil Science Society of America. p. 263-73.
- Karimi, S., Torki, Z., Nazok-kar Maher M. & Yegane N. (2021) Pre-transplant silicon priming improved drought tolerance and biomass partitioning in young tomato plants, *International Journal of Vegetable Science*, 28, 349-365.
- Liang, Y.C., Chen, X.H., Ma, T.S., Qian, Z.J., & Liu, L.R. 1993. Effect of Si on the growth, yield and quality of tomato. *Jiangsu Agricultural Science*, 4, 48-50.
- Liang, Y.C., Jin, S., & Romheld. V. (2005). Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. *Phytopathology*, 167, 797-804.
- Liang, Y. C., Sun, W.C., Zhu, Y.G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon- mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147, 422-8.
- Liang, Y. C., Sun, W.C., Zhu, Y.G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon- mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147, 422-8.
- Liang, Y. C., Sun, W.C., Zhu, Y.G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon- mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. *Environmental Pollution*, 147, 422-8.
- Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., & Song A. (2015). Silicon in Agriculture. Dordrecht: Springer.
- Liu, J. M., Han, C., Sheng, X.B., Liu, S.K., & Qi, X. (2011). Potassium-containing silicate fertilizer: its manufacturing technology and agronomic effects. In: Proceedings of *5th International Conference on Silicon in Agriculture*; 13-18 Sep., Bejing, China, pp 13-18.
- Liu, H.Y. (1997). Preliminary report on effect of Si fertilizer on tomato growth. *Journal of Guizhou Agricultural College*, 16, 76-77.

- Marodin, J.C., Resende, J.T.V., Morales, R.G.F., Silva, M.L.S., Galvão, A.G. & Zanin, D.S. (2014). Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. *Horticultura Brasileira*, 32, 220-224.
- Miyake, Y. & Takahashi, E. (1983). Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *Soil Science Plant Nutrition*, 29, 71-83.
- Mohaghgh, P., Shervani, M. & Ghasemi, S. (2011). The effect of silicon application on growth and yield of two cucumber cultivars in hydroponic system. *Science and Technology of Greenhouse Cultivation*, 1, 40-35.
- Mvondo-She, M.A., & Marais, D. 2019. The investigation of silicon localization and accumulation in citrus. *Plants*, 8, 1-12.
- Nair, P.K., & Aiyer, R.S. (1968). Status of available silica in the rice soils of Kerala State (India). II. Silicon uptake by different varieties of rice in relation to available silica contributed by soil and irrigation water. *Agricultural Research Journal of Kerala*, 6, 88-94.
- Nikolic, M., Nikolic, N., Liang, Y., Kirkby, E. A., & Römheld, V. (2007). Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. *Plant Physiology*, 143, 495-503.
- Samuels, A. L., Glass, A. D. M., Ehret, D. L., & Menzies, J. G. (1993). The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: Changes in surface characteristics. Annals of Botany, 72, 433-440.
- Savant, N. K., Snyder, G.H., & Datnoff, L.E. (1996). Silicon management and sustainable rice production. *Advances in Agronomy*, 58, 151-199.
- Sun, H., Duan, Y., Mitani-Ueno, N., Che, J., jia, J., Liu, J., Guo, J. Ma, J.F. & Gong, H. (2020) Tomato roots have a functional silicon influx transporter but not a functional silicon efflux transporter. *Plant, Cell & Environment*, 43, 732-744.
- Takijima, Y., Wijayaratna, H.M.S., & Seneviratne, C.J. (1970). Nutrient deficiency and physiological disease of lowland rice in Ceylon. III. Effect of silicate fertilizers and dolomite for increasing rice yields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 16, 11-16.
- Xue, G., Zhang, G., Sun, Y., Liao, S., & Chen, Y. (2012). Influences of spraying two different forms of silicon on plant growth and quality of tomato in solar greenhouse. *Chinese Agricultural Sciences Bulletin*, 28, 272-276.