

Silicon foliar feeding efficiency and its effect on yield of tomato

Mohammad Hasan Fallah Kiapey¹, Seyed Jalal Tabatabaei², Kamran Ghasemi^{3*}

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran
(hasanfallahkiapey59@gmail.com)

2- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran
(tabatabaei@shahed.ac.ir)

3- Corresponding Author, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Crop Sciences,
Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(k.ghasemi@sanru.ac.ir)

Received Date: 29/04/2022

Accepted Date: 24/10/2022

Abstract

Introduction: Although beneficial effects of silicon for plants were well documented (Liang et al., 2015), leaf uptake efficiency of this element in most of plants including tomato remains to be explored. So, this experiment aimed to evaluate penetration of silicon into the tomato leaf mesophyll.

Material and methods: This pot experiment was conducted hydroponically in a completely randomized design with 7 treatments, 3 replications and 2 samples in research greenhouse of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Treatments comprised potassium silicate (K_2SiO_3), sodium silicate (Na_2SiO_3), and orthosilicic acid (H_4O_4Si), each of them in two concentrations of 1 and 2 mM, along with a control. All treatments were applied weekly as foliar spray. Evaluated parameters included yield, photosynthetic pigments (Carter and Knapp, 2001), leaf silicon concentration (Elliott and Snyder, 1991), and silicon distribution among mesophyll profiles. The later parameter was determined in three different points of the transverse section of the leaf (near adaxial, middle of mesophyll, near abaxial) using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX).

Results and discussion: All of the silicon treatments resulted in an increase in leaf silicon concentration compared to the control. However, the application of potassium silicate at 2 mM led to the highest silicon concentration, which was not significantly different from potassium silicate at 1mM. Evaluation of the middle of mesophyll elemental profile showed that only two treatments, orthosilicic acid at 1 mM and sodium silicate at 2 mM, resulted in a higher silicon ratio than the control in the whole mesophyll and near abaxial point. The other treatments showed no significant differences from the control. The Silicon ratio at the near adaxial point was significantly higher under potassium silicate treatment compared to the control. The highest yield was recorded under orthosilicic acid at 2 mM, which was not significantly different from sodium silicate at 1 mM concentration.

Conclusions: Overall, the results of this research confirmed that silicon can infiltrate tomato leaves, indicating that silicon fertilizers can be safely applied via foliar spray. Furthermore, an important finding from this experiment was that there is no correlation between leaf silicon concentration and tomato yield in normal conditions.

Keywords: Silica, Mono silicic acid, Leaf penetration, Energy dispersive X-ray.

کارایی تغذیه برگی سیلیسیم و تاثیر آن بر عملکرد گیاه گوجه فرنگی

محمدحسن فلاح کیاپی^۱، سید جلال طباطبایی^۲، کامران قاسمی^{۳*}

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد
(hasanfallahkiapey59@gmail.com)

۲- استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد
(tabatabaei@shahed.ac.ir)

۳- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(k.ghasemi@sanru.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

چکیده

باوجود اثبات مفید بودن سیلیسیم برای گیاهان، هنوز کارایی جذب برگی این عنصر در گیاهانی مانند گوجه فرنگی مشخص نیست، لذا در این آزمایش محلولپاشی سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3)، اسید مونوسیلیسیک (H_4O_4Si) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3)، هر سه تیمار در دو غلظت ۱ و ۲ میلی مولار، در قالب طرح کاملاً تصادفی و در گلخانه پژوهشی دانشگاه کشاورزی ساری، مورد ارزیابی قرار گرفتند. صفات مورد ارزیابی در این آزمایش شامل عملکرد میوه، غلظت سیلیسیم برگ و درصد سیلیسیم در ترکیب عناصر سازنده مزوفیل (با استفاده از اسپکتوفتومتری پراکنده کننده انرژی اشعه ایکس) بود. نتایج به دست آمده نشان داد که تمامی تیمارهای استفاده شده برای محلولپاشی سیلیسیم موجب افزایش سیلیسیم برگ نسبت به شاهد شدند؛ با این حال سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار بیشترین افزایش سیلیسیم برگ را نشان داد، هرچند اختلاف آن با تیمار سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار معنی دار نبود. میزان عنصر سیلیسیم در میانه مزوفیل برگ نشان داد که اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار، بیشترین نفوذ را به داخل برگ گوجه فرنگی داشته است و بعد از آن سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار در رتبه بعدی قرار گرفت. از نظر عملکرد کل بوته، تنها دو تیمار سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار با عملکرد ۲۳۴۹ گرم و اسید مونوسیلیسیک ۲ میلی مولار با عملکرد ۲۲۲۲ گرم، نسبت به شاهد برتری معنی داری نشان دادند، ولی سایر تیمارهای بکارفته نسبت به شاهد اختلاف معنی داری نداشتند. با اینکه عملکرد گوجه فرنگی در بوته تحت تاثیر محلولپاشی سیلیسیم قرار گرفت، ولی این افزایش بر اثر افزایش تعداد میوه نبود بلکه به دلیل افزایش اندازه میوه بود، زیرا تعداد میوه تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده قرار نگرفت. از نظر افزایش اندازه میوه، تیمار اسید مونوسیلیسیک ۱ و ۲ میلی مولار و سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، وزن تک میوه بیشتری نسبت به شاهد داشتند. در مجموع می توان گفت که عنصر سیلیسیم می تواند نفوذ برگی در گیاه گوجه فرنگی داشته باشد، لذا محلولپاشی کودهای سیلیسمی در گیاه گوجه فرنگی امکان پذیر است.

کلمات کلیدی: اسید مونوسیلیسیک، پراکنده کننده انرژی اشعه ایکس، سیلیس، نفوذ برگی.

مقدمه

سیلیسیم یک شبه فلز چهار ظرفیتی می باشد که در همه جا حضور داشته و دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در خاک محسوب می گردد. با اینکه تقریباً ۲۸ درصد از پوسته خارجی زمین را سیلیسیم تشکیل می دهد، بیش تر سیلیسیم خاک به صورت آلومینیوم سیلیکات های متبلور است، که نامحلول بوده و به طور مستقیم قابل استفاده برای گیاه نیست. شکل قابل دسترس این عنصر برای گیاه اسید منوسیلیسیک (H_4SiO_4) است که در محلول خاک وجود داشته و ریشه های گیاه را با غلظت معمول ($0/1$ تا $0/6$ میلی مولار) تحت تاثیر قرار می دهد و مقدار آن تقریباً دو برابر بیش تر از غلظت فسفر در محلول خاک می باشد (Liang et al., 2015).

گوجه فرنگی زراعی *Solanum lycopersicom* از تیره بادمجانیان (Solanaceae) است، که جذب فعالی برای عنصر سیلیسیم نداشته و جزء گیاهان تجمع دهنده این عنصر محسوب نمی شود. با این حال، پژوهش های زیادی نقش عنصر سیلیسیم را در کاهش تنش های مختلف زنده و غیرزنده در گوجه فرنگی اثبات نموده اند. در یک پژوهش تاثیر سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر تحمل به شوری گیاه گوجه فرنگی گیلاسی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی سیلیسیم و نانوسیلیسیم، اثرات تقریباً یکسانی بر تحمل به شوری و فاکتورهای کیفی و کمی گوجه فرنگی داشتند و این نشان دهنده نقش معنی دار سیلیسیم در حفاظت از سامانه فتوسنتزی گیاه گوجه فرنگی در برابر اثرهای مخرب شوری است (Haghighi and Pessarakli, 2013).

افزون بر خواص ضد تنش سیلیسیم، این عنصر در شرایط بدون تنش نیز می تواند موجب افزایش رشد و عملکرد گوجه فرنگی گردد. مشاهده شده است که محلول پاشی هر دو شکل آلی و معدنی سیلیسیم توانست رشد نشای گوجه فرنگی را زیاد کرده و وزن تک میوه را افزایش دهد، ولی این افزایش رشد و عملکرد توسط سیلیسیم معدنی خیلی بیش تر بود (Xue et al, 2012).

پژوهشگران اثر سطوح مختلف سیلیسیم بر رشد و تبادلات آب و دی اکسید کربن گوجه فرنگی را در شرایط آب کشتی مطالعه کرده و دریافتند که تیمار $0/6$ و $1/2$ میلی مولار سیلیسیم به طور معنی داری ارتفاع گیاه و ماده خشک ریشه، ساقه و برگ را افزایش داد، همچنین میزان رنگیزه های فتوسنتزی نیز با تیمار سیلیسیم در این دو سطح افزایش یافت، اما غلظت های بالاتر سیلیسیم موجب افزایش رشد گیاه یا رنگیزه های فتوسنتزی نشد (Cao et al., 2013). طی آزمایشی اثر سه منبع سیلیسیم (سیلیکات کلسیم، سیلیکات پتاسیم، سیلیکات سدیم) روی عملکرد گوجه فرنگی بررسی شد و نتایج حاکی از آن بود که استفاده از دو منبع کلسیم سیلیکات و سیلیکات پتاسیم باعث افزایش غلظت سیلیسیم در برگ گیاه گوجه فرنگی شد، درحالی که با افزایش غلظت سیلیکات سدیم کاهش میزان سیلیسیم در برگ رخ داد (Marodin et al., 2014).

علی رغم وجود ترکیبات تجاری فراوان حاوی سیلیسیم در بازار، هنوز مشخص نیست که میزان جذب برگ گیاهان در گوجه فرنگی به چه میزان است. کمبود اطلاعات از چگونگی جذب برگ گیاه و انتقال این عنصر در گیاه گوجه فرنگی و تاثیر آن بر مقدار عملکرد این گیاه موجب شد تا این پژوهش با هدف بررسی جذب برگ گیاه کودهای مختلف سیلیسیم و تاثیر آن ها بر عملکرد گیاه گوجه فرنگی طرح ریزی و اجرا گردد.

مواد و روش ها

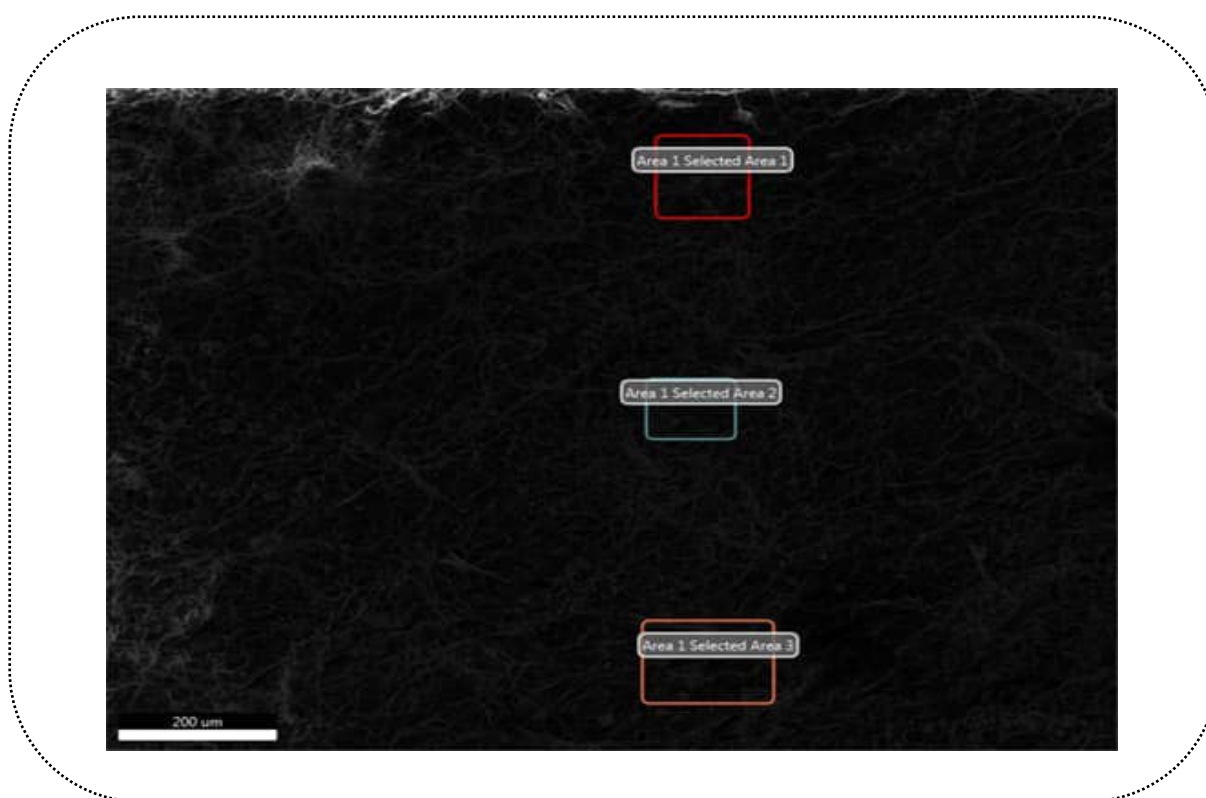
این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار، ۳ تکرار و ۲ نمونه در هر تکرار، به صورت گلدانی در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. تیمارهای محلول پاشی از منابع مختلف سیلیسیم شامل شاهد، سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3)، اسید منوسیلیسیک ($H_4O_4Si_1$) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) هر سه تیمار با دو غلظت ۱ و ۲ میلی مولار بودند. بذر گوجه فرنگی از نوع بذور F1، به نام سیرو از

گرفته شد (جدول ۱). حدود ۳۵ روز بعد از نشاکاری و پس از ورود گیاه به مرحله زایشی، انواع تیمارهای سیلیسیم، محلول پاشی شدند. به طور متوسط ۲۰۰ میلی لیتر محلول روی هر بوته اسپری شد و در طول دوره، هر هفت روز یک مرتبه و در کل ۱۰ مرتبه، محلول پاشی با تیمارهای مختلف سیلیسیم روی بوته ها انجام گرفت.

موسسه فلاند - ایتالیا در سینی نشا کاشته شده و بعد از آماده شدن نشا به بستر به گلدان هایی به ارتفاع ۱۹/۵ و قطر دهانه ۲۲ سانتی متر، با بستر کوکوپیت و پرلیت به نسبت ۶۰ به ۴۰، منتقل گردید. طی انجام آزمایش فضای گلخانه با رطوبت نسبی متوسط ۶۰ درصد و دمای حدود ۲۱ تا ۲۸ درجه سلسیوس بود و برای تمامی گلدان ها محلول غذایی گوجه فرنگی فلوریدا به عنوان برنامه کودی پایه در نظر

جدول ۱- غلظت عناصر موجود در محلول غذایی (میلی گرم بر لیتر)
Table 1. Concentration of elements in nutrient solution (mg / l)

Elements	N	P	K	Ca	S	Mg	B	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
(mg/kg)	150	50	200	150	60	50	0.7	2.8	0.8	0.3	0.2	0.05



شکل ۱- عکس برداری با اشعه ایکس از نقاط مختلف بالا، پایین و وسط برگ (برش عرضی برگ) گوجه فرنگی توسط دستگاه EDX

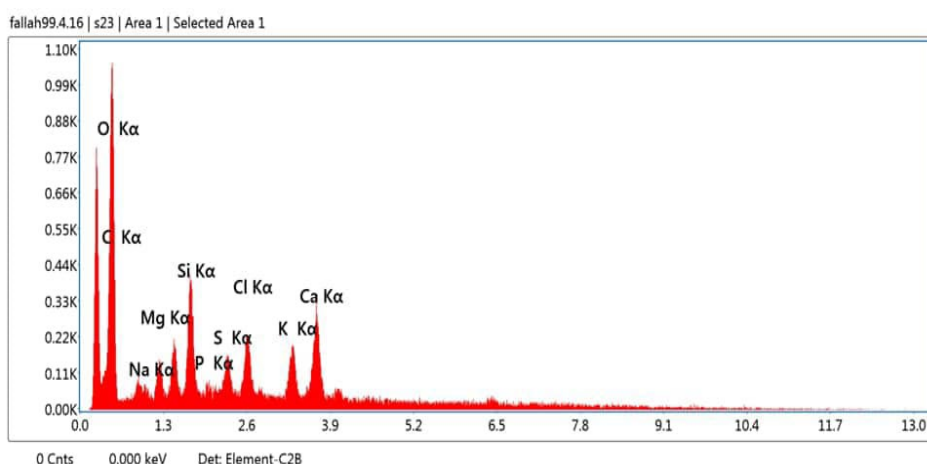
Figure 1. An X ray photo taken by EDX from adaxial, abaxial and middle of the cross section of tomato leaf

برگ، مقدار کل سیلیسیم برگ، پارامترهای فتوسنتزی، میزان رنگیزه های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و

در این آزمایش، وزن تر و خشک برگ و ساقه با ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد. همچنین، غلظت سیلیسیم

تعیین میزان سیلیسیم در برش عرضی برگ با دستگاه اسپکتروفتومتری پراکنده کننده انرژی اشعه ایکس EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) صورت گرفت. برای تهیه برش عرضی، از برگ‌های بالغ و کاملاً توسعه یافته، توسط تیغ تیز برش عرضی گرفته شد، سپس برش عرضی برگ به دستگاه EDX انتقال داده شد و عبور اشعه X از سه نقطه بالا، وسط و پایین برگ اندازه‌گیری انجام گرفت که میزان درصد عناصر مختلف از جمله سیلیسیم در بین عناصر اندازه‌گیری شده به صورت پیک مشخص گردید (شکل ۱ و ۲).

کارتونیدها)، میزان سیلیسیم در برش عرضی برگ، تعداد میوه، وزن هر میوه و عملکرد کل بوته اندازه‌گیری گردید. جهت اندازه‌گیری سیلیسیم، به طور خلاصه، ۱۰۰ میلی گرم از نمونه‌های گیاهی در لوله پلی اتیلن ۲۵۰ میلی لیتری قرار داده شد. سپس، ۲ میلی لیتر H_2O_2 پنجاه درصد و ۴/۵ میلی لیتر NaOH پنجاه درصد (وزنی/وزنی) به آن اضافه گردید. سوسپانسیون به دست آمده در اتوکلاودر در فشار ۱۳۸ (۲۰۰) کیلوپاسکال (دمای ۱۲۱ درجه سانتی گراد) به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده و در سپس فیلتر شد و در نهایت مقدار سیلیسیم از روش رنگ سنجی به دست آمد (Elliott and Snyder, 1991).



شکل ۲- نمودار تعیین میزان عناصر مختلف در برش عرضی برگ‌های گوجه فرنگی توسط دستگاه EDX
Figure 2. Percentage of elements in the cross section of tomato leaf measured by EDX device

در سطح احتمال یک درصد معنی دار شدند (جدول ۲). نتایج به دست آمده نشان داد که تمامی تیمارهای استفاده شده برای محلول پاشی سیلیسیم موجب افزایش سیلیسیم برگ نسبت به شاهد شدند (تا ۳/۳ برابر بیشتر از شاهد)؛ با این حال سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار بیشترین افزایش سیلیسیم برگ را نشان داد، هرچند اختلاف آن با تیمار سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار معنی دار نبود (شکل ۳).

نتایج و بحث

سیلیسیم برگ

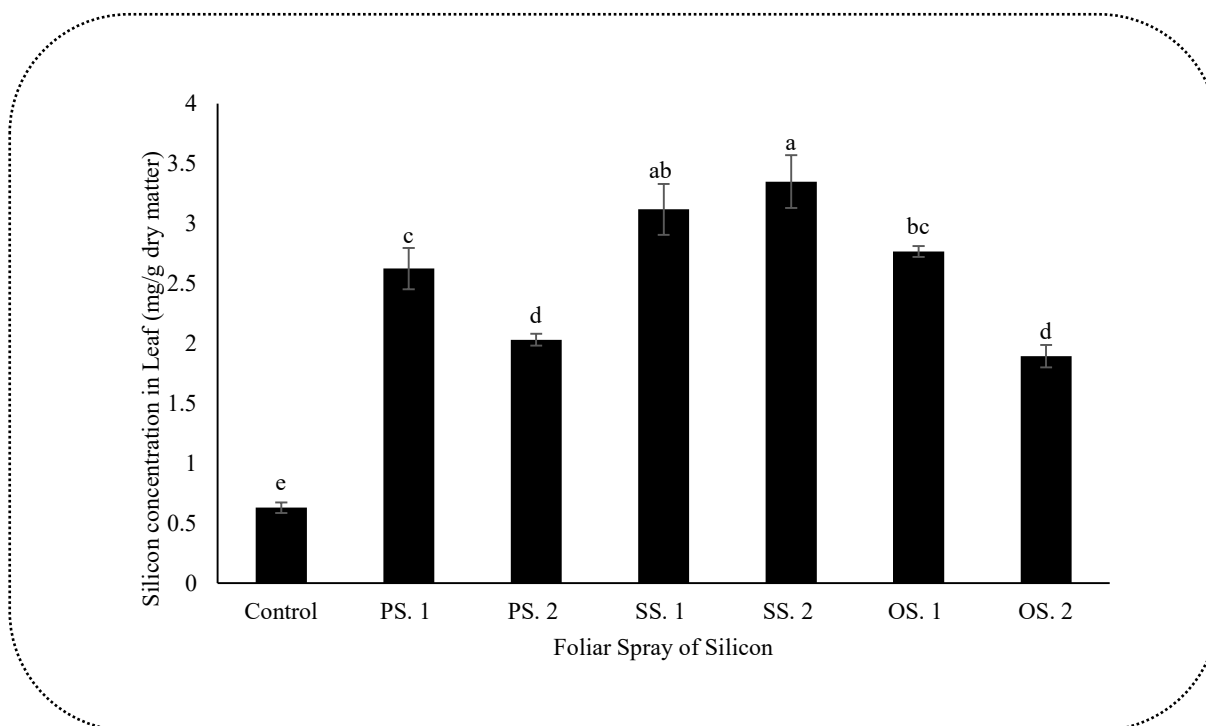
همانطور که جدول آنالیز واریانس نشان می دهد، تاثیر تیمارهای به کار رفته در این آزمایش بر تمامی صفات مرتبط با غلظت سیلیسیم برگ، از نظر آماری معنی دار بوده است (جدول ۲). بر این اساس، غلظت کل سیلیسیم برگ و درصد سیلیسیم در بخش های رویی، میانه و زیرین مزوفیل، همگی

جدول ۲- جدول آنالیز واریانس میزان سیلیسیم برگ تحت تاثیر محلول پاشی کودهای مختلف سیلیسیم

Table 2. Analysis of variance for leaf silicon as affected by various silicon sources spray

منابع تغییرات Source of Variation	درجه آزادی Degree of Freedom	غلظت سیلیسیم برگ Silicon leaf concentration	درصد سیلیسیم سطح رویی برگ Silicon percentage in the leaf adaxial	درصد سیلیسیم سطح زیری برگ Silicon percentage in the middle of leaf	درصد سیلیسیم سطح میانی برگ Silicon percentage in the leaf abaxial
سیلیسیم Silicon	6	**2.5512	**3.0515	**4.0615	**1.3473
خطا Error	14	0.05934	0.0558	0.0630	0.0353
ضریب تغییرات Coefficient of Variation	-	10.39	12.49	16.46	15.48

ns و * و ** به ترتیب، غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد
ns, *, and **: non-significant, significant at 0.05% and 0.01% probability level respectively



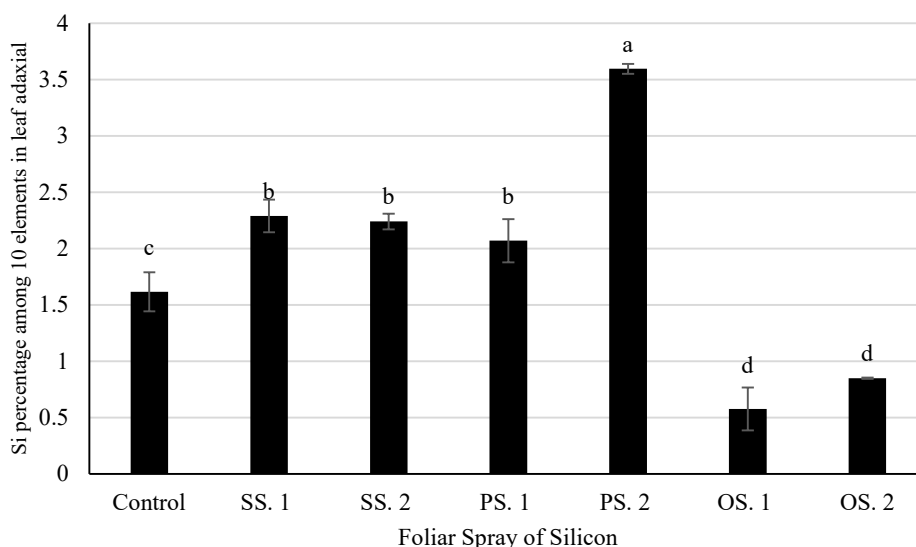
شکل ۳- اثر محلول پاشی سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم برگ گوجه فرنگی. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 3. Effect of silicon spray on the silicon concentration of tomato leaf. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM, SS1: Sodium silicate 1 mM, SS2: Sodium silicate 2 mM, OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)

میزان سیلیسیم در برش عرضی برگ با دستگاه EDX

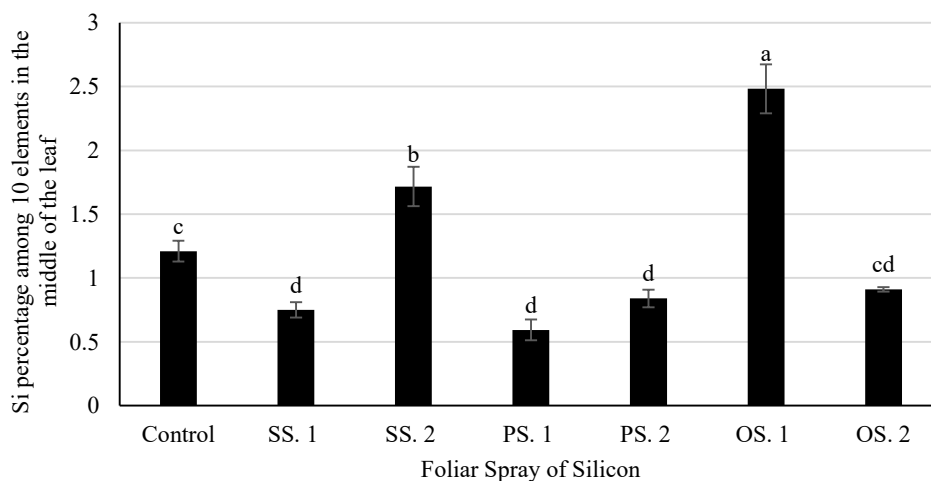
اندازه‌گیری کمی سیلیسیم برگ در سه نقطه مزوفیل توسط دستگاه EDX، در واقع درصد سیلیسیم را در بین ده عنصر (کربن، اکسیژن، فسفر، پتاسیم، سدیم، منیزیم، کلسیم، گوگرد، سیلیسیم و کلر) نشان داد (شکل ۱ و ۲). از آنجایی که، سه نقطه مزوفیل برگ شامل نزدیک سطح رویی برگ، نزدیک سطح زیرین برگ و همچنین وسط مزوفیل به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند، نتایج گویای آن بود که سیلیکات پتاسیم به راحتی از سطح رویی برگ وارد مزوفیل شده و ترکیب عناصر تشکیل دهنده مزوفیل در نزدیکی سطح رویی برگ را تغییر داده است (شکل ۴)، بالاین حال این نفوذ به داخل برگ چندان عمیق نبوده و

نتوانست در میانه مزوفیل برگ تفاوتی ایجاد نماید (شکل ۵). میزان عنصر سیلیسیم در میانه مزوفیل برگ نشان داد که اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار، بیشترین نفوذ را به داخل برگ گوجه فرنگی داشته است و بعد از آن سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار در رتبه بعدی قرار گرفت، این در حالی بود که سایر تیمارها نتوانستند میزان سیلیسیم میانه مزوفیل را نسبت به شاهد افزایش دهند (شکل ۵). در نفوذ از زیر سطح برگ، دو تیمار سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار به خوبی عمل کردند و نتوانستند به داخل برگ نفوذ بالایی داشته باشند، به طوری که، این دو تیمار تنها تیمارهایی بودند که نسبت به شاهد برتری معنی داری را نشان دادند (شکل ۶).



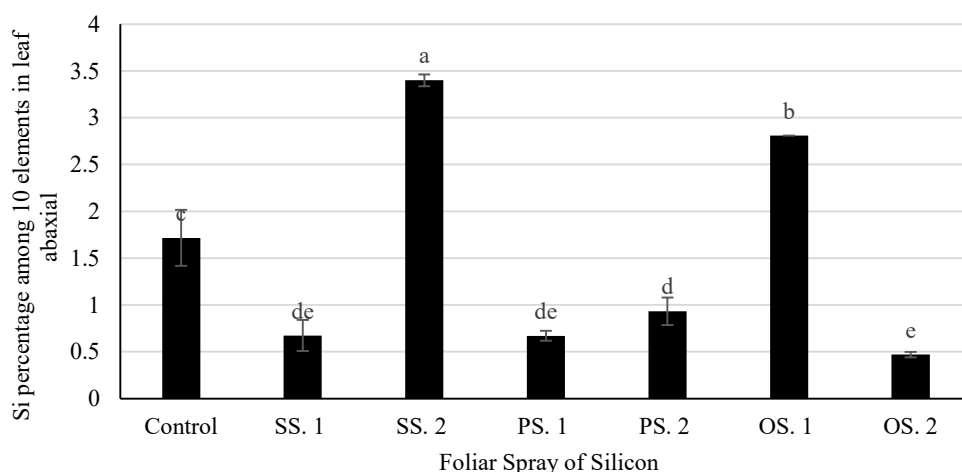
شکل ۴- تاثیر محلول پاشی سیلیسیم بر درصد سیلیسیم در نقطه نزدیک سطح رویی برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 4. Effect of silicon spray on silicon percentage among 10 evaluated elements in the adaxial of tomato leaf. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM. SS1: Sodium silicate 1 mM. SS2: Sodium silicate 1 mM. OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)



شکل ۵- مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای مختلف سیلیسیم بر درصد سیلیسیم در نقطه وسط مزوفیل برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 5. Effect of silicon spray on silicon percentage among 10 evaluated elements in the middle of tomato leaf. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM, SS1: Sodium silicate 1 mM, SS2: Sodium silicate 1 mM, OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)



شکل ۶- تاثیر محلول پاشی سیلیسیم بر درصد سیلیسیم در نقطه نزدیک سطح زیرین برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 6. Effect of silicon spray on silicon percentage among 10 evaluated elements in the abaxial of tomato leaf. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM, SS1: Sodium silicate 1 mM, SS2: Sodium silicate 1 mM, OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)

زیست توده و عملکرد

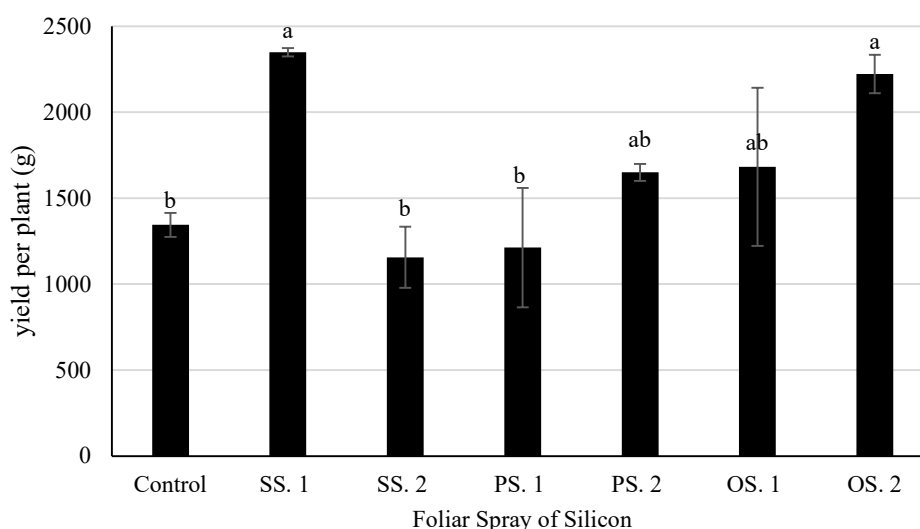
به شاهد اختلاف معنی داری نداشتند (شکل ۷). با اینکه عملکرد گوجه فرنگی در بوته تحت تاثیر محلول پاشی سیلیسیم قرار گرفت، ولی این افزایش بر اثر افزایش تعداد میوه نبود بلکه به دلیل افزایش اندازه میوه بود، زیرا تعداد میوه تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده قرار نگرفت. از نظر افزایش اندازه میوه، تیمار اسید مونوسیلیسیک ۱ و ۲ میلی مولار و سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، وزن تک میوه بیشتری نسبت به شاهد داشتند (شکل ۸).

آنالیز واریانس صفات مرتبط با عملکرد میوه نشان داد که اثر تیمارهای سیلیسیمی بر عملکرد کل بوته و تعداد میوه در بوته، به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد، معنی دار شد، این در حالی است که اثر آن بر صفت وزن تک میوه از نظر آماری معنی داری را نشان نداد (جدول ۳). از نظر عملکرد کل بوته، تنها دو تیمار سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار با عملکرد ۲۳۴۹ گرم و اسید مونوسیلیسیک ۲ میلی مولار با عملکرد ۲۲۲۲ گرم، نسبت به شاهد برتری معنی داری نشان دادند، ولی سایر تیمارهای بکارفته نسبت

جدول ۳- جدول آنالیز واریانس میزان عملکرد گوجه فرنگی تحت تاثیر محلول پاشی کودهای مختلف سیلیسیمی
Table 2. Analysis of variance for tomato yield as affected by various silicon sources spray

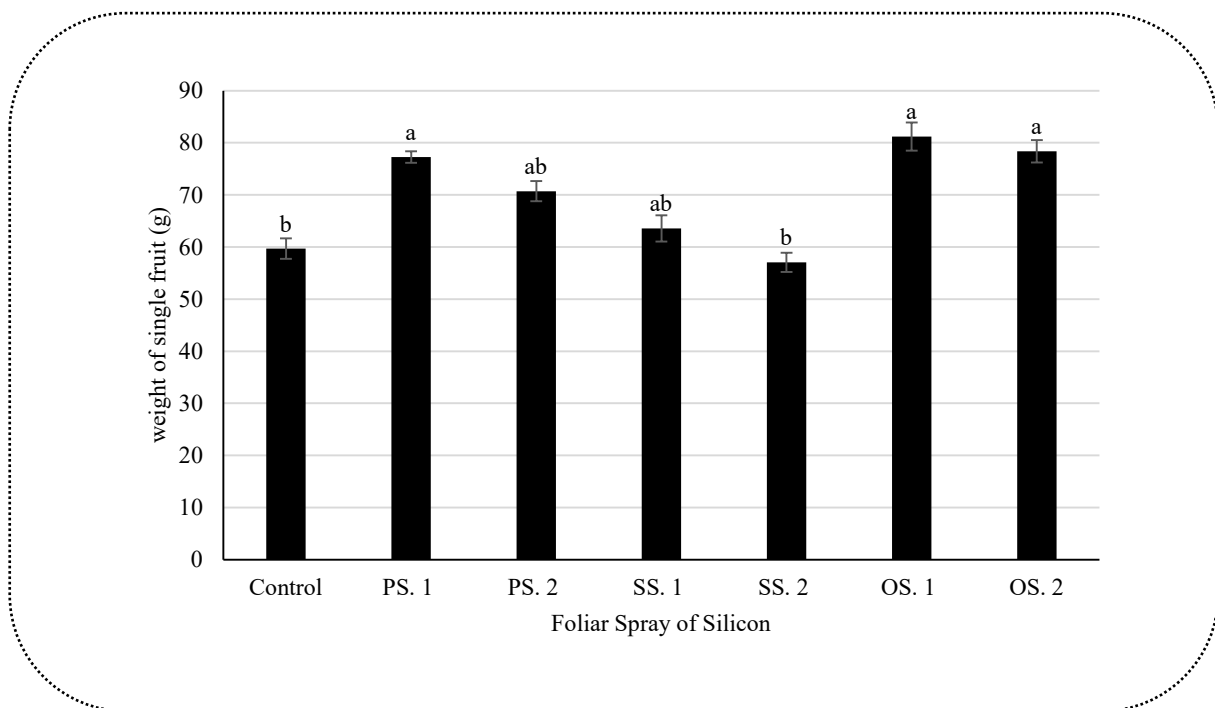
منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد میوه در بوته	تعداد میوه در بوته	وزن تک میوه
Source of Variation	Degree of Freedom	Yield per plant (g)	Fruit number per plant	Single fruit weight (g)
سیلیسیم	6	632195.492**	47.4048*	185.2762 ^{ns}
Silicon				
خطا	14	164804.000	43.0595	260.0846
Error				
ضریب تغییرات	-	24.26	21.95	25.85
Coefficient of Variation				

^{ns} و * و ** به ترتیب، غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد
^{ns}, *, and **: non-significant, significant at 0.05% and 0.01% probability level respectively



شکل ۷- تاثیر محلول پاشی سیلیسیم بر میزان عملکرد در بوته گوجه فرنگی. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 7. Effect of silicon spray on yield of tomato. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM, SS1: Sodium silicate 1 mM, SS2: Sodium silicate 2 mM, OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)



شکل ۸- تاثیر محلول پاشی سیلیسیم بر میزان وزن تک میوه گوجه فرنگی. PS1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، PS2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار، SS1: سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار، SS2: سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار، MA1: سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، MA2: سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار (ستون‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی داری باهم ندارند)

Figure 8. Effect of silicon spray on wight of single tomato fruit. PS1: Potassium silicate 1 mM, PS2: Potassium silicate 2 mM, SS1: Sodium silicate 1 mM, SS2: Sodium silicate 2 mM, OS1: Orthosilicic acid 1 mM, OS2: Orthosilicic acid 2 mM (all columns with the same letter are not significantly different from each other)

تنش کاسته و از این راه موجب افزایش نسبی عملکرد می‌گردد.

تفسیر نتایج به دست آمده از نفوذ سیلیسیم به داخل برگ نشان داد برخلاف برخی گزارشات، نفوذ برگ کودهای سیلیسمی صورت می‌گیرد، هرچند در میزان این نفوذ بین کودها و غلظت‌های مختلف تفاوت وجود داشت. نکته جالب اینکه، دو تیماری که نفوذ عمیق‌تر سیلیسیم را داشتند (سیلیکات سدیم ۲ و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار)، هردو در سطح زیرین برگ هم سیلیسم زیادی را نشان دادند، لذا این احتمال وجود دارد که این دو تیمار از سطح زیرین برگ، جذب بهتری داشته باشند، این درحالی است که جذب سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار از سطح رویی برگ بیشتر بود. شاید نفوذ بیشتر سیلیکات

هرچند غلظت سیلیسیم برگ در هر دو غلظت

سیلیکات پتاسیم ۱ و ۲ میلی مولار، به طور معنی داری نسبت به شاهد بیشتر بود، ولی این مسئله تاثیری بر عملکرد نداشت، به طوری که میزان عملکرد کل در بوته، در این دو تیمار، با شاهد اختلاف معنی داری نداشت. علت این مسئله احتمالا به ویژگی ضدتنشی سیلیسیم برمی گردد، که با فعال سازی سیستم دفاع آنتی اکسیدانی و مقاومتی گیاه موجب می شود تا آسمیلات ها به سمت تولید متابولیت های ثانویه بروند، لذا سیلیسیم در شرایط نرمال و بدون تنش نتوانست افزایش عملکرد را رقم بزند. در شرایط تنش، تاثیر سیلیسیم ممکن است متفاوت باشد، زیرا تنش موجب ضعف گیاه و اختلال در سیستم فتوسنتزی می گردد، در حالی که سیلیسیم با ایجاد مقاومت از اثر منفی

سدیم و اسید مونوسیلیسیک به نقطه نم‌پذیری بالای آنها مربوط باشد. از آنجایی که سطح زیرین برگ رطوبت نسبی بالاتر است و تعداد روزنه بیشتری نیز دارد، لذا امکان جذب کودهایی با نقطه نم‌پذیری بالا راحت‌تر صورت می‌گیرد. در پژوهشی روی برنج گزارش شد که تغذیه ریشه‌ای سیلیسیم موجب افزایش این عنصر در هر دو قسمت نزدیک سطح رویی و نزدیک سطح زیرین برگ گردید، ولی در محلول‌پاشی تنها سطح رویی برگ سیلیسیم بالایی را نشان داد (Puppe and Sommer, 2018)، که این نتایج با یافته‌های ما مطابقت ندارد. به هر شکل، اینکه چگونه سیلیکات سدیم ۱ و اسید مونو سیلیسیک ۲ میلی‌مولار توانستند بدون افزایش در غلظت سیلیسیم برگ، موجب افزایش عملکرد گوجه فرنگی شوند روشن نیست، ولی قطعاً این تأثیر مستقل از سیلیسیم بوده و شاید به تأثیرات فیزیکی این ترکیبات مربوط باشد.

اگرچه در مقایسه با برنج که یک انباشت‌کننده سیلیسیم است، گوجه فرنگی گونه گیاهی سیلیسیم‌دوست محسوب نمی‌شود (Nikolic et al., 2007)، ولی گزارش شده است که تغذیه سیلیسمی رشد و عملکرد آن را افزایش می‌دهد (Liang et al., 1993; Liu et al., 2011). گزارش شده است که افزودن ۵۰ میکروگرم سیلیسیم در لیتر به محلول غذایی، عملکرد گوجه فرنگی را تا ۶۲ درصد افزایش داد. افزون بر این، آزمایشات مزرعه‌ای بیانگر آن است که تغذیه سیلیسیم، عملکرد گوجه فرنگی را ۱۵ تا ۳۰ درصد زیاد کرد، که این افزایش ناشی از افزایش تعداد و اندازه میوه بود (Liang et al., 1993). میوه‌های گوجه فرنگی بر اثر تغذیه سیلیسمی، در مقایسه با شاهد، چهار روز زودتر و با عملکرد تجاری بالاتری رسیدند (Liang et al., 1993).

در پژوهش‌های چندین آزمایش مزرعه‌ای برای ارزیابی اثر سیلیسیم و کلسیم بر رشد، عملکرد و کیفیت گوجه فرنگی انجام گرفت. نتایج نشان داد که مصرف سیلیسیم به طور معنی‌داری مقاومت گوجه فرنگی به بیماری‌ها، اندازه میوه و در نتیجه عملکرد را افزایش داد (Liu, 1997). همه این گزارشات با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارند، هرچند این افزایش عملکرد وابسته به نوع منبع و غلظت سیلیسیم مورد استفاده بود. مشاهده شده است که محلول‌پاشی هر دو شکل آلی و معدنی سیلیسیم توانست رشد نشای گوجه فرنگی را زیاد کرده و وزن تک میوه را افزایش دهد، ولی این افزایش در مصرف سیلیسیم معدنی خیلی بیشتر بود (Xue et al., 2012)، بنابراین منبع تامین سیلیسیم می‌تواند بسیار مهم باشد، که نتایج پژوهش ما نیز همین مسئله را تایید می‌کند.

در خصوص جذب برگی سیلیسیم در گیاه گوجه فرنگی باید گفت که نفوذ برگی این عنصر، هرچند به میزان ناچیز، صورت می‌گیرد، ولی نفوذ عمیق که بتواند غلظت عنصر سیلیسیم در میانه مزوفیل برگ را تغییر دهد، رخ نداده است. در مواردی که غلظت سیلیسیم برگ بالا بوده، ولی EDX نفوذ را نشان نمی‌دهد، باید گفت دو احتمال وجود دارد: اول آنکه، سیلیسیم بدون هیچگونه نفوذی، تنها روی سطح برگ رسوب داشته و در آنالیز برگ خود را نشان داد و احتمال دوم آنکه، نفوذ به شدت سطحی بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

مهمترین نتیجه این پژوهش این است که عنصر سیلیسیم می‌تواند نفوذ برگی در گیاه گوجه فرنگی داشته

نسبت با شاهد ایجاد نماید. حتی نفوذ سیلیسیم به داخل مزوفیل نیز ارتباط مثبتی با عملکرد گوجه فرنگی نداشت. با این حال، این نتایج در شرایط نرمال و بدون تنش به دست آمده و در شرایط وجود تنش زنده یا غیرزنده، ممکن است نتایج متفاوتی حاصل شود.

باشد، لذا استفاده از روش محلول پاشی برای کودهای سیلیسمی در گیاه گوجه فرنگی امکان پذیر است. با این حال، میزان نفوذ برگ سیلیسیم تحت تاثیر غلظت و منبع سیلیسیم مورد استفاده قرار می گیرد. نتیجه مهم دیگر این بود که غلظت بالای سیلیسیم برگ که در تیمار سیلیکات پتاسیم حاصل شد، نتوانست افزایش عملکرد معنی داری

منابع

- Liang, Y., M., Nikolic, R., Bélanger, H., Gong, and A., Song. 2015. *Silicon in Agriculture*. Dordrecht: Springer.
- Lichtenthaler, H.K., and C., Buschmann. 2001. Current Protocols in Food Analytical Chemistry. Unit F4.3.1-F4.3.8.
- Liu, H.Y. 1997. Preliminary report on effect of Si fertilizer on tomato growth. Journal of Guizhou Agricultural Collage. 16:76-7.
- Marodin, J.C., J.T., Resende, R.G., Morales, M.L., Silva, A.G., Galvão, and D.S., Zanin. 2014. Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. Horticultura Brasileira. 32, 220-224
- Nikolic, M., N., Nikolic, Y., Liang, E.A. Kirkby, and V., Römhild. 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
- Puppe, D. and Sommer, M. 2018. Chapter One - Experiments, Uptake Mechanisms, and Functioning of Silicon Foliar Fertilization-A Review Focusing on Maize, Rice, and Wheat, Editor(s): Donald L. Sparks, Advances in Agronomy, Academic Press, 152: 1-49.
- Xue, G., G., Zhang, Y., Sun, S. Liao, and Y., Chen. 2012. Influences of spraying two different forms of silicon on plant growth and quality of tomato in solar greenhouse. Chinese Agricultural Sciences Bulletin. 28(16): 272-276.
- Cao, B.L., K., Xu, J., Shi, G.F., Xin, C.Y., Liu, and X., Li. 2013. Effects of silicon on growth, photosynthesis and transpiration of tomato. Plant Nutrition and Fertilizer Science. 19:354-60.
- Carter, G.A., and A.K., Knapp. 2001. Leaf optical properties in highest plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. American Journal of Botany. 88(4): 677-684.
- Elliott, C.L. and G.H., Snyder. 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., and K., Ghasemi. 2018. Silicon in Agriculture. Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources Publications.
- Haghighi, M., and M. Pessarakli. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia horticulture. 161C 111-117.
- Lee S.K., E.Y., Sohn, M., Hamayun, J.Y., Yoon, and I.J., Lee. 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. Agroforestry Systems. 80:333-40.
- Liang, Y.C., X.H., Chen, T.S., Ma, Z.J., Qian, and L.R., Liu. 1993. Effect of Si on the growth, yield and quality of tomato. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences. 4:48-50.