

تأثیر منابع و غلظت سیلیسیم بر عملکرد و جذب آن در گیاه گوجه فرنگی

محمد حسن فلاح^۱، سید جلال طباطبایی^۲، کامران قاسمی^۳

^۱ کارشناسی ارشد علوم باغبانی، دانشگاه شاهد، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ مهندسی علوم باغبانی، دانشگاه ساری، ایران

^۳ مهندسی علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی ساری، ایران

چکیده

سیلیسیوم دومین عنصر فراوان در خاک است که تقریباً ۲۸ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد، اما بیشتر منابع آن در خاک به صورت نامحلول است و به‌طور مستقیم قابل استفاده برای گیاه نمی‌باشد. سیلیسیوم نقش مهمی در افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی ایفا می‌کند. با این حال، میزان جذب و انتقال این عنصر در گیاهانی مانند گوجه فرنگی هنوز به‌طور دقیق مشخص نیست. هدف از این پژوهش ارزیابی میزان نفوذ سیلیسیم در برگ گیاه گوجه فرنگی و بررسی تأثیر آن بر عملکرد گیاه بود. در این تحقیق آزمایشی به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. تیمارها شامل شاهد، سیلیکات پتاسیم، اسید منوسیلیسیک و سیلیکات سدیم با غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار بودند. پارامترهای مختلفی از جمله زیست توده، غلظت سیلیسیم در برگ، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، تعداد میوه، وزن هر میوه و عملکرد کل بوته اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که تمامی تیمارها موجب افزایش میزان سیلیسیم در برگ نسبت به شاهد شدند. بالاترین میزان سیلیسیم در برگ از تیمار سیلیکات پتاسیم ۲ میلی‌مولار بدست آمد، اگرچه تفاوت آن با تیمار سیلیکات پتاسیم ۱ میلی‌مولار معنی‌دار نبود. بررسی درصد سیلیسیم در برش عرضی برگ با استفاده از دستگاه EDX نشان داد که سیلیکات سدیم ۲ میلی‌مولار و اسید منوسیلیسیک ۱ میلی‌مولار درصد سیلیسیم بالاتری در مزوفیل برگ داشتند، که این میزان به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاهد بود. همچنین، سیلیکات سدیم از سطح رویی برگ به راحتی وارد مزوفیل شد، اما نفوذ آن به داخل برگ محدود بود. عملکرد بالاترین تیمار مربوط به اسید منوسیلیسیک ۱ میلی‌مولار بود که عملکرد ۳۴۵۱ گرم را تولید کرد. نتایج نشان داد که نفوذ سیلیسیم به داخل برگ می‌تواند تأثیر بیشتری بر عملکرد گیاه داشته باشد، زیرا تیمارهایی که سیلیسیم به داخل برگ نفوذ داشتند (مانند سیلیکات سدیم و اسید منوسیلیسیک ۱ میلی‌مولار) موجب افزایش وزن تک میوه و عملکرد کلی گیاه شدند.

واژه‌های کلیدی: سیلیکات، سیلیس، اسید منوسیلیسیک، نفوذ برگی

مقدمه

در دهه های اخیر، افزایش آگاهی عمومی نسبت به تغذیه سالم، موجب توجه بیشتر به ارزش غذایی محصولات کشاورزی به ویژه گوجه فرنگی شده است. گوجه فرنگی از جمله میوه هایی است که به دلیل دارا بودن ترکیباتی همچون لیکوپن، ویتامین های A و C و سایر آنتی اکسیدان ها، جایگاه ویژه ای در تغذیه انسان دارد. (صدیقی و هکاران: ۱۴۰۴) لیکوپن به عنوان یکی از قوی ترین آنتی اکسیدان های طبیعی، نقش مؤثری در پیشگیری از بیماری های مزمن ایفا می کند و همین عامل موجب شده که تقاضا برای گوجه فرنگی با ارزش غذایی بالاتر افزایش یابد (عمادی و قاسمی، ۱۳۹۷). در این میان، سیلیسیوم (Si) به عنوان یک شبه فلز چهار ظرفیتی و دومین عنصر فراوان در پوسته زمین پس از اکسیژن، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با وجود فراوانی آن در خاک، بیشتر سیلیسیوم به شکل آلومینیوم سیلیکات های متبلور و نامحلول وجود دارد (بایوی، هیدری، زواری، حجی، فالوتی، بوناوآرا، اسلما، ۲۰۲۵). و تنها فرم قابل جذب آن برای گیاه، اسید منوسیلیسیک (H_4SiO_4) است که در محلول خاک یافت می شود. این عنصر در گیاهان خاکزی بین ۱/۰ تا ۱۰ درصد وزن خشک اندام های هوایی را تشکیل می دهد و در عملکردهای فیزیولوژیکی نقش مهمی دارد (عمادی و قاسمی، ۱۳۹۷). مطالعات متعدد نشان داده اند که سیلیسیوم نقشی اساسی در افزایش مقاومت گیاهان به تنش های زنده و غیرزنده ایفا می کند. (ژانگ، ژائو، ژانگ، شی، هو، خان، ژانگ، ۲۰۲۴). این عنصر ضمن حرکت در آوندهای چوبی، موجب تقویت بافت های گیاه، افزایش جذب مواد معدنی و بالا بردن مقاومت در برابر بیماری های قارچی می شود. اثرات مفید سیلیسیوم در شرایط تنش مانند خشکی، شوری، سرما، یخبندان، غرقابی، فلزات سنگین و تابش فرابنفش آشکارتر است (خوشگفتارمنش، ۱۳۸۶). همچنین کاربرد ترکیبات حاوی سیلیسیوم، پتاسیم و آمینواسیدها به عنوان آنتی استرس های مؤثر در شرایط نامساعد محیطی توصیه می شود. (او، وی، وانگ، ژونگ، فن، گونگ، لی، ۲۰۲۵). از منظر فیزیولوژیکی، سیلیسیوم با نفوذ در بافت های برگ، افزایش استحکام، غلظت کلروفیل و کارایی فتوسنتزی گیاه را موجب می شود (چریف و همکاران، ۱۹۹۲). افزون بر آن، بهبود رشد، افزایش عملکرد، ارتقای کیفیت میوه، کاهش تعرق، بهبود کارایی مصرف آب و تقویت مقاومت در برابر بیماری ها و آفات از جمله اثرات شناخته شده آن است (عمادی و قاسمی، ۱۳۹۷). مطالعات تاریخی نشان می دهد که کاربرد ترکیبات سیلیسیومی در کشاورزی قدمتی طولانی دارد. (تایاد، قیمیر، خان، لای، آتیپو، کیم، ۲۰۲۲). در قرون وسطی، کشاورزان اروپایی از سرباره های غنی از سیلیسیوم و فسفر حاصل از کوره های ذوب آهن به عنوان کود استفاده می کردند که موجب بهبود عملکرد محصول و اصلاح pH خاک می شد (دی سوسور، ۱۸۰۴؛ دیوی، ۱۸۱۹). از آن زمان تا کنون، پژوهش های متعددی در مورد نقش سیلیسیوم در ساختار و مقاومت گیاهان انجام شده است (استراو، ۱۸۳۵؛ کراگر، ۱۸۵۷؛ ویسنر، ۱۸۶۷). نخستین پژوهشگران قرن نوزدهم، از جمله لیپگ (۱۸۴۰)، سیلیکات سدیم را به عنوان کود مؤثر در بهبود باروری خاک معرفی کردند. با پیشرفت روش های کشت محلول در دهه ۱۸۶۰، ساچس (۱۸۶۵) سیلیسیوم را جزو عناصر غیرضروری اما مؤثر در توزیع مواد معدنی در گیاهان دانست. از آن زمان تاکنون، مطالعات مدرن، نقش این عنصر را در افزایش عملکرد محصولات مختلفی چون برنج، نیشکر، سبزیجات و میوه ها تأیید کرده اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ شانگ و همکاران، ۲۰۰۹). در پژوهش های جدید، افزودن سیلیسیوم به محلول های غذایی موجب افزایش سفتی میوه، مواد جامد محلول و ویتامین C در گوجه فرنگی شده است (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۳؛ زو و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین تغذیه توت فرنگی با سیلیسیوم منجر به افزایش ماندگاری میوه پس از برداشت و افزایش کیفیت بافت گردیده است (بابینی و همکاران، ۲۰۱۲). در سیب، مصرف سیلیسیوم موجب افزایش مواد جامد محلول و کاهش اسید قابل تیترا میوه شد (سو و همکاران، ۲۰۱۱)، و در انگور نیز افزایش قند و مواد جامد محلول و کاهش نیترا ت گزارش گردید (شی و همکاران، ۲۰۱۱).

۲۰۱۰). در خیار نیز افزایش عملکرد و کیفیت میوه در دامنه ۱/۵ تا ۲/۱۰ درصد و بهبود میزان قند و ویتامین C مشاهده شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۴). این یافته‌ها نشان می‌دهند که سیلیسیوم از طریق بهبود فتوسنتز و افزایش کارایی مصرف نیتروژن می‌تواند کیفیت میوه را ارتقا دهد (لی و ما، ۲۰۰۲؛ دتمان و همکاران، ۲۰۱۲). از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان نفوذ و جذب برگی سیلیسیوم در گیاه گوجه‌فرنگی و تأثیر آن بر عملکرد گیاه طراحی شده است. پرسش‌های اصلی تحقیق شامل موارد زیر است:

۱. میزان نفوذ سیلیس در برگ گوجه‌فرنگی چقدر است؟
۲. بیشترین غلظت سیلیسیوم در کدام بخش برگ مشاهده می‌شود؟
۳. بهترین غلظت و منبع سیلیکاتی برای استفاده چیست و چه تأثیری بر رشد و کیفیت گیاه دارد؟

ضرورت انجام این پژوهش در این نکته نهفته است که با وجود اثبات نقش ضدتنشی و بهبوددهنده سیلیسیوم در گیاهان، میزان جذب برگی آن در گوجه‌فرنگی هنوز مشخص نیست. شناسایی دقیق این میزان می‌تواند منجر به بهینه‌سازی مصرف کودهای سیلیسیومی، افزایش کیفیت محصولات و بهبود سلامت تغذیه‌ای انسان شود. در شرایطی که بازار جهانی به سمت مصرف محصولات سالم و ارگانیک حرکت می‌کند، نتایج این تحقیق می‌تواند در ارتقای جایگاه گوجه‌فرنگی ایرانی و توسعه کشاورزی پایدار نقش مؤثری ایفا کند.

روش پژوهش

این تحقیق به منظور بررسی میزان جذب و انتقال سیلیسیم در گیاه گوجه‌فرنگی، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار در گلخانه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری طراحی شد. تیمارها شامل شاهد و سه ماده سیلیسیمی (سیلیکات پتاسیم، اسید منوسیلیسیک و سیلیکات سدیم) با دو غلظت ۱ و ۲ میلی‌مولار بودند. در این تحقیق، گوجه‌فرنگی‌ها در گلدان‌های حاوی بستر کشت کوکوپیت و پرلیت (به نسبت ۶۰ به ۴۰) کاشته شدند و شرایط گلخانه‌ای نظیر نور، دما، رطوبت و آبیاری برای همه بوته‌ها یکسان بود. بوته‌ها با استفاده از روش محلول‌پاشی با تیمارهای مختلف سیلیسیم درمان شدند. در طول دوره رشد، بوته‌ها تحت آبیاری با محلول غذایی پایه قرار گرفتند و در مراحل مختلف رشدی، تیمارهای سیلیسیمی به صورت هفتگی و به مقدار ۱۵۰ تا ۲۰۰ سی‌سی روی هر بوته اسپری شدند. پس از پایان دوره رشد، وزن تر و خشک برگ و ساقه، غلظت سیلیسیم برگ، پارامترهای فتوسنتزی و میزان سیلیسیم در برش عرضی برگ با استفاده از دستگاه EDX اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد میوه‌ها، وزن میوه‌ها و عملکرد کل بوته نیز اندازه‌گیری شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با روش LSD انجام گرفت و نمودارها با نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

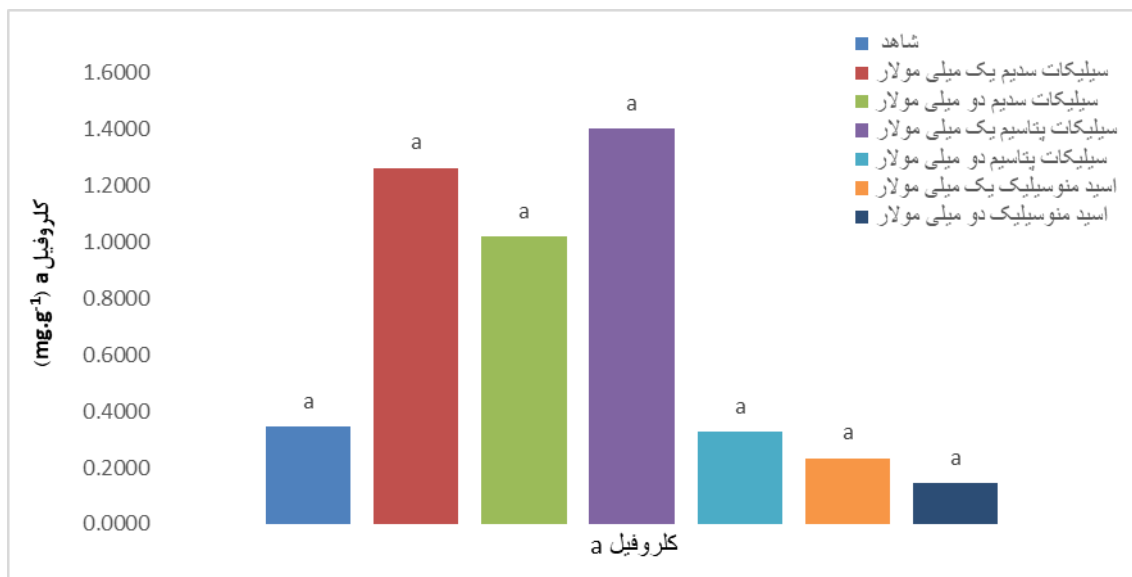
یافته های پژوهش

با وجود گزارش‌های زیاد علمی در مورد اهمیت عنصر سیلیسیوم (Si) در کشاورزی، مطالعات جدی و استفاده عملی از این عنصر به عنوان ماده اصلاحی در ایران به جز موارد بسیار محدود انجام نشده است. باید خاطر نشان کرد استفاده از سیلیسیوم در کشور به جز در مزارع برنج و آن هم به صورت بسیار محدود، سابقه چندانی نداشته و با توجه به عدم اطلاعات کافی در مور بکارگیری این عنصر مهم و حیاتی، کاربرد آن در کشاورزی ایران مغفول مانده است.

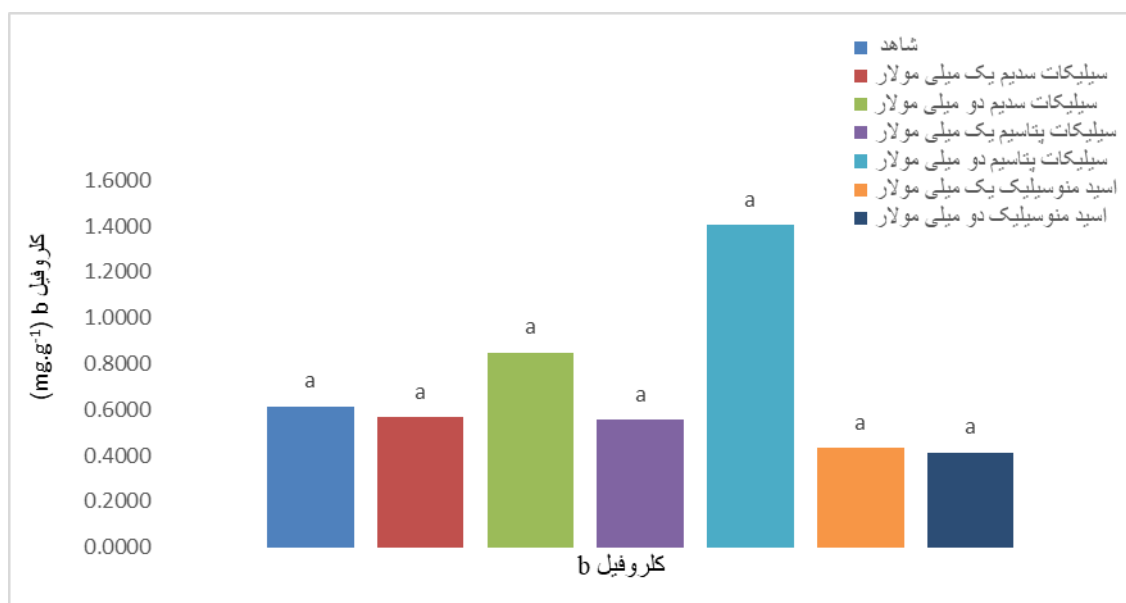
رنگیزه‌های فتوسنتزی

همانطور که شکل شماره ۱ و ۲ نشان می‌دهند تأثیر تیمارهای مختلف سیلیسیمی بر میزان کلروفیل a و b معنی دار نبود. همچنین طبق شکل شماره ۳ کلروفیل کل نیز تحت تأثیر تیمارهای سیلیسیمی قرار نگرفت.

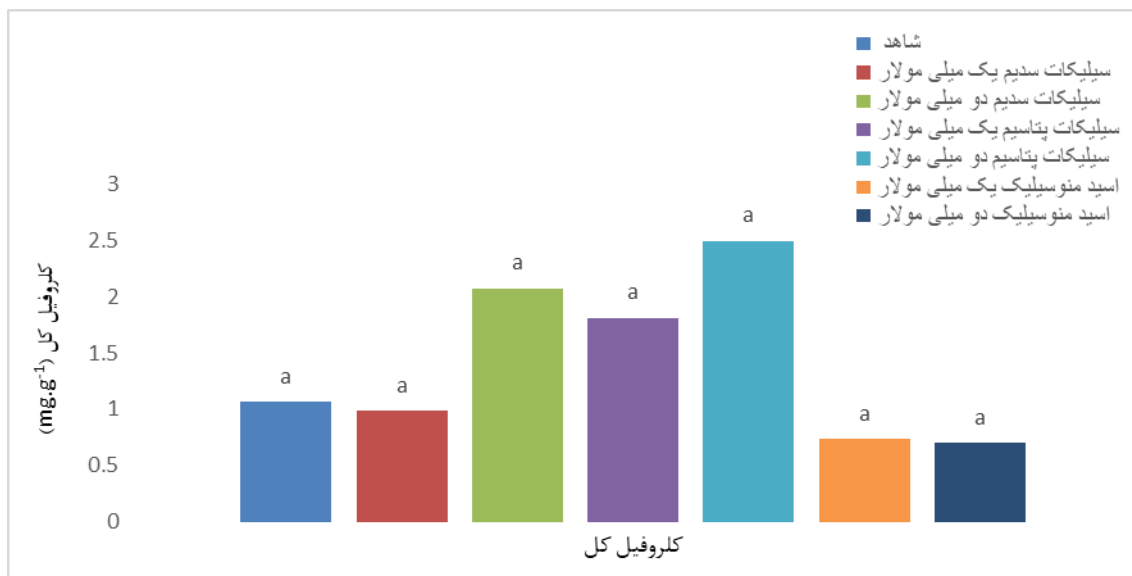
میزان غلظت کارتنوئید کل در برگ گیاه گوجه فرنگی به طور معنی داری تحت تاثیر تیمارهای سیلیسیم قرار گرفت بطوریکه هر دو غلظت ۱ و ۲ میلی مولار اسید مونوسیلیسیک موجب افزایش معنی دار این رنگیزه نسبت به شاهد گردید؛ این در حالی بود که سایر تیمارهای مورد استفاده تفاوت معنی داری با شاهد نشان ندادند.



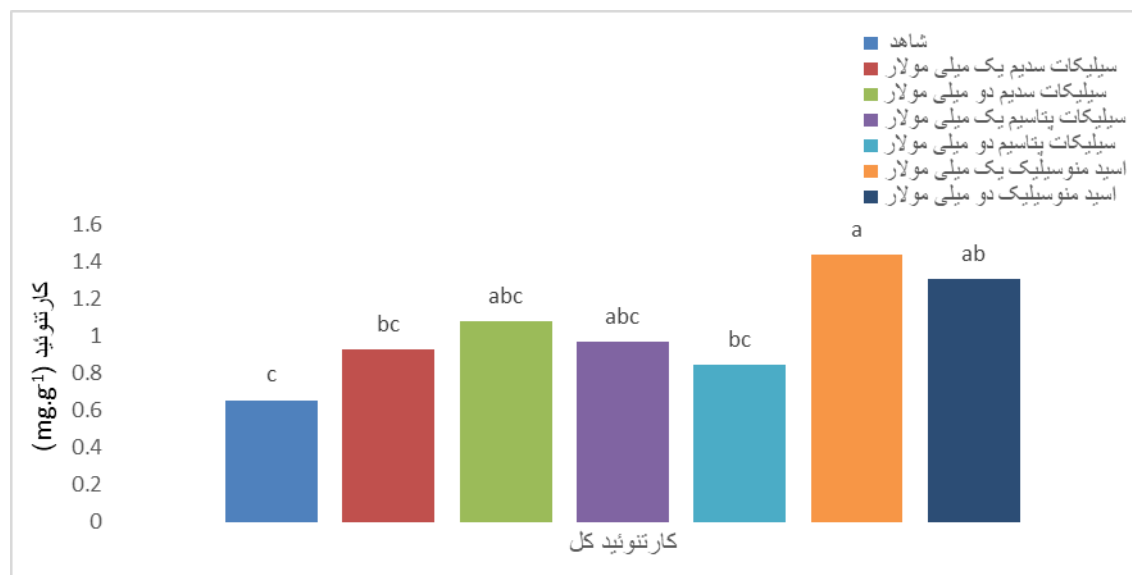
نمودار ۱ مقایسه میانگین کلروفیل a بر تیمارهای مختلفی از سیلیسیم روی گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۲ مقایسه میانگین کلروفیل b بر تیمارهای مختلفی از سیلیسیم روی گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۳ مقایسه میانگین کلروفیل کل در تیمارهای مختلفی از سیلیسیم روی گیاه گوجه فرنگی

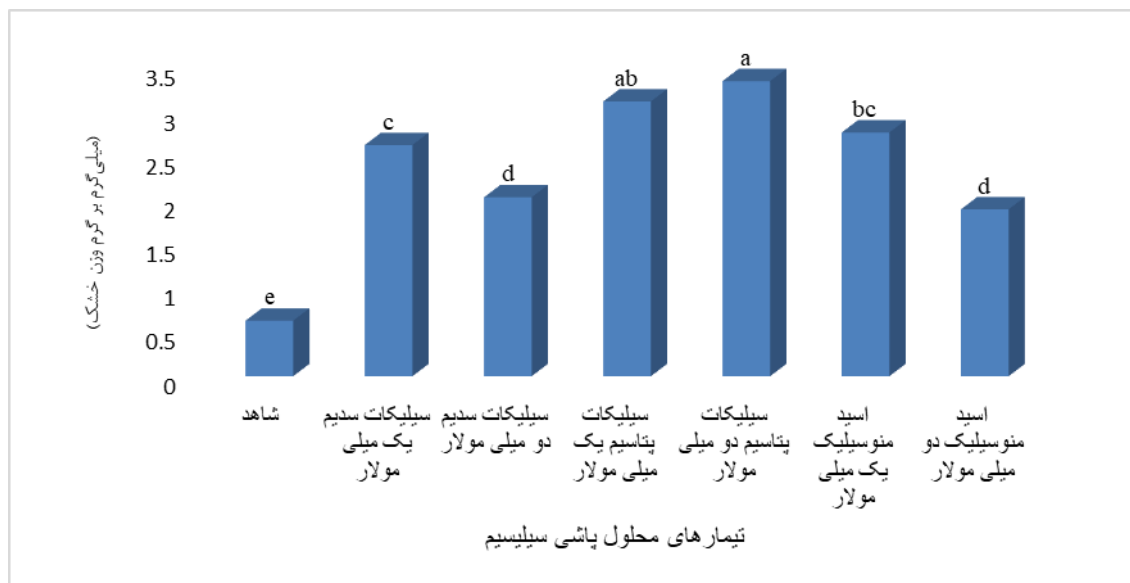


نمودار ۴ مقایسه میانگین کارتونوئید کل بر تیمارهای مختلفی از سیلیسیم روی گیاه گوجه فرنگی

اندازه گیری سیلیسیم برگ

سیلیسیم برگ

نتایج نشان داد که تمامی تیمارهای استفاده شده جهت محلولپاشی سیسیلیسیم موجب افزایش سیلیسیم برگ نسبت به شاهد شدند؛ با این حال سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار بیشترین افزایش سیلیسیم برگ را موجب شد هرچند اختلاف آن با تیمار سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار معنی دار نبود.



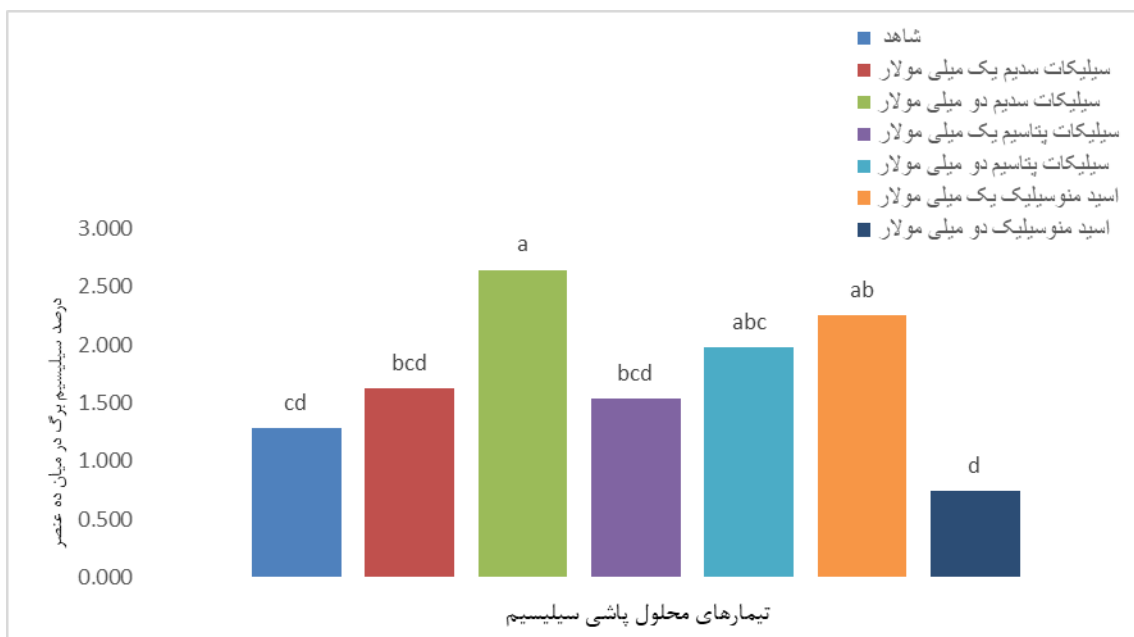
نمودار ۵ تاثیر محلول پاشی منابع مختلف سیلیسیم بر غلظت سیلیسیم برگ گوجه فرنگی

میزان سیلیسیم در برش عرضی برگ با دستگاه EDX

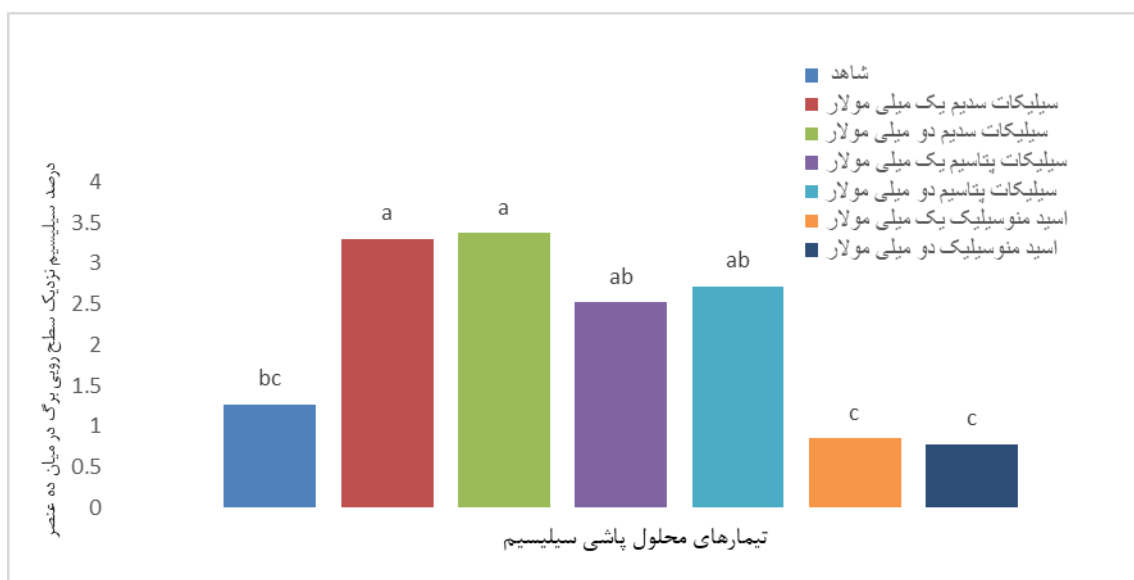
اندازه گیری کمی سیلیسیم برگ در سه نقطه از برگ توسط دستگاه EDX، درصد سیلیسیم را در بین ده عنصر مهم در برگ (شامل، کربن، اکسیژن، فسفر، پتاسیم، سدیم، منیزیم، کلسیم، گوگرد، سیلیسیم و کلر) نشان می دهد که به نوعی اهمیت هر عنصر در ترکیب برگ را مشخص می کند. به طور کلی دو تیمار سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار درصد سیلیسیم بالاتری را در ترکیب مزوفیل برگ داشتند که به طور معنی داری بیشتر از شاهد بود ولی سایر تیمارها تفاوت معنی داری را با شاهد نشان ندادند (شکل ۶ سیلیسیم کل EDX). از آنجایی که سه نقطه مزوفیل برگ شامل نزدیک سطح رویی برگ، نزدیک سطح زیرین برگ و همچنین وسط مزوفیل بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت نتایج گویای آن بود که سیلیکات سدیم براحتی از سطح رویی برگ وارد مزوفیل شده لذا ترکیب عناصر تشکیل دهنده مزوفیل در نزدیکی سطح رویی برگ را تغییر داده است. ولی این نفوذ به داخل برگ چندان عمیق نبوده و نتوانسته در وسط برش عرضی و میانه مزوفیل برگ تفاوتی ایجاد نماید لذا نه سیلیکات پتاسیم و نه هیچ یک از تیمارهای مورد استفاده تفاوتی در میزان سیلیسیم در این نقطه با شاهد نداشتند (شکل ۸ وسط EDX). در نفوذ از زیر سطح برگ دو تیمار سیلیکات سدیم ۲ و اسید مونوسیلیسیک به خوبی عمل کردند و توانستند به داخل برگ نفوذ داشته باشند (شکل ۹ زیر برگ EDX)، هرچند نفوذ آنها نیز عمیق نبوده و در وسط مزوفیل ترکیب عناصر را تغییر نداده است.

یکی از ویژگی های مهم خاک، شوری آن است که شدیداً رشد محصول و توسعه کشاورزی پایدار در مناطق ساحلی و غیرساحلی جهان را محدود می کند (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۶؛ ژو و گانگ، ۲۰۱۴). برآورد شده است که تقریباً هفت درصد از کل خشکی ها و ۲۰ درصد از زمین های قابل کشت روی کره زمین تحت تأثیر شوری باشند (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۶؛ رسول و همکاران، ۲۰۱۳). روش اصلی در اصلاح خاک های شور، آب شویی نمک به سمت پایین نیم رخ خاک از طریق آبیاری سنگین - باشد. با این حال به علت کمبود آب شیرین یا شور شدن رودخانه ها، این شیوه در مناطق خشک، نیمه خشک و ساحلی با محدودیت جدی روبروست (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۶). تجمع زیاد املاح در شرایط شور ممکن است به طور معنی داری رشد و نمو گیاه و عمل کرد محصول را کاهش دهد، زیرا این املاح مانع از تولیدات فتوسنتزی می شوند. کاهش میزان آسیمیلاسیون خالص به علت محدودیت در تأمین دی اکسید کربن ناشی از بسته شدن روزنه های هوایی یا اختلال در سازوکارهای بیوشیمیایی در تثبیت دی اکسید کربن یا هر دو است. تنش شوری همچنین ممکن است انتقال الکترون، فوتوسفریلاسیون و

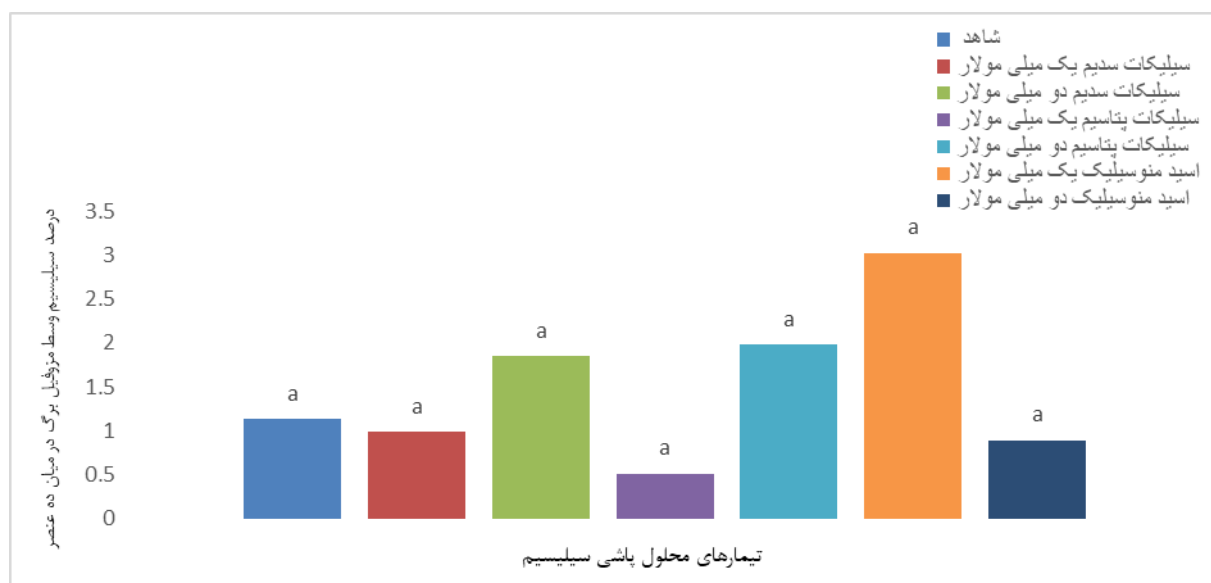
فعالیت آنزیمی را تحت تأثیر قرار دهد (لیانگ، ۱۹۹۹؛ فادزیلا و همکاران، ۱۹۹۷؛ استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۰). گزارش های زیادی وجود دارد که اثبات می کند وجود سیلیسیوم به طور معنی داری، موجب افزایش رشد بسیاری از گونه های گیاهی از طریق افزایش در فعالیت فتوسنتزی، افزایش سطح برگ و میزان کلروفیل و همچنین بهبود ساختار کلروپلاست در گیاهان تحت تنش شوری می گردد (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۶؛ لیانگ، ۱۹۹۸؛ یئو و همکاران، ۱۹۹۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ طاهر و همکاران، ۲۰۱۲؛ ساندوراجان و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج پژوهش لیانگ و همکاران (۱۹۹۶) نشان داد که اضافه کردن سیلیسیوم در شرایط تنش شوری می تواند به طور معنی داری وزن خشک عمل کرد جو (*Hordeum vulgare*) را در هر دو رقم حساس به شوری (cv. Kepin No. ۷) و مقاوم به شوری (cv. Jian No. ۴) افزایش دهد. آنها اثبات کردند که سیلیسیوم، سطح ویژه برگ و میزان آسیمیلاسیون دی اکسید کربن را که در شرایط تنش شوری کاهش یافته بود، بهبود بخشید (شکل ۶-۱). در پژوهش بعدی لیانگ (۱۹۹۸) نشان داد که اگرچه میزان کلروفیل برگ همواره در رقم متحمل به شوری بیش تر، از رقم حساس به شوری بود ولی میزان آسیمیلاسیون خالص دی اکسید کربن برگ در هر دو رقم مورد آزمایش، در شرایط تنش شوری زمانی که سیلیسیوم مورد استفاده قرار گرفت افزایش معنی داری داشت. هم چنین مشخص شد که افزودن سیلیسیوم به تیمار شوری موجب بهبود زیرساخت های سلول های برگ می شود. تحت شرایط تنش شوری، غشای دولایه کلروپلاست تجزیه می شود؛ اما یکپارچگی غشا به طور معنی داری با کاربرد سیلیسیوم بهبود می یابد. یئو و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند زمانی که گیاه برنج (*Oryza sativa*) در محلول غذایی حاوی ۵۰ میلی مولار نمک طعام (NaCl) رشد داده شد، افزودن سیلیسیوم به طور معنی داری کاهش رشد ناشی از تنش شوری را از طریق افزایش میزان آسیمیلاسیون دی اکسید کربن و هدایت روزنه ای مهار کرد. تونا و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که میزان کلروفیل در هر دو رقم حساس و مقاوم به شوری گندم (*Triticum aestivum*) که در تنش شوری بالا (۱۰۰ میلی مولار نمک طعام) کشت شدند، به طور قابل توجهی کاهش یافت ولی افزودن سیلیسیوم به طور کامل میزان کلروفیل برگ را به سطح گیاهان بدون تنش برگرداند. هم چنین گزارش شد که اضافه کردن سیلیسیوم به طور معنی داری غلظت کلروفیل a و b را در گندم کشت شده در سیستم آب کشتی با میزان ۱۰۰ میلی مولار املاح افزایش داد (طاهیر و همکاران، ۲۰۱۲). با این که استفاده از سیلیسیوم در شرایط عدم شوری تأثیری روی نرخ فتوسنتز خالص، هدایت روزنه ای و میزان تعرق در گیاهچه های سورگوم (*Sorghum bicolor*) رشد یافته در محیط آب کشت نداشت ولی افزودن سیلیسیوم، زمانی که گیاهان در معرض تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار نمک قرار داشتند، موجب افزایش معنی دار این پارامترها شد (بین و همکاران، ۲۰۱۳). اشرف و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که عمل کرد و اجزای عمل کرد نیشکر (*Saccharum officinarum*) تحت تنش شوری با حضور سیلیسیوم به طور معنی داری بیش تر از زمانی بود که سیلیسیوم وجود نداشت. خصوصیات کیفی شیره نیشکر به طور معنی داری با به کار بردن سیلیسیوم در ژنوتیپ های حساس و متحمل به شوری بهبود یافت. بائی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که افزودن سیلیسیوم به طور معنی داری میزان کلروفیل و کارتنوئید را در چمن مرتعی (*Poa pratensis*) تحت تنش شوری افزایش داد. سیلیسیوم نه تنها می تواند پارامترهای فتوسنتزی و رشد را در گیاهان تک لپه در شرایط تنش شوری بهبود بخشد بلکه روی برخی گیاهان دولپه ای نیز مؤثر است. به عنوان نمونه لی و همکاران (۲۰۱۰) اثبات کردند که میزان کلروفیل برگ و کل زیست توده ی تر و خشک در گیاه سویا (*Glycine max*) تحت تنش شوری ۸۰ میلی مولار نمک به طور معنی داری با افزودن سیلیسیوم افزایش یافت. زوکارنی (۲۰۰۸) هم چنین گزارش کرد که وجود سیلیسیوم به میزان ۱/۵ میلی مولار در محلول غذایی که حاوی ۳۰ یا ۶۰ میلی مولار نمک طعام بود، به طور معنی داری هدایت روزنه ای، نرخ فتوسنتز خالص وزن خشک شاخه و سطح برگ را در لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) به مدت ۶۰ روز در محیط آب کشتی افزایش داد. در مواردی که غلظت سیلیسیوم برگ بالا بوده ولی EDX نفوذ را نشان نمی دهد باید گفت دو احتمال وجود دارد یکی آنکه سیلیسیوم 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.



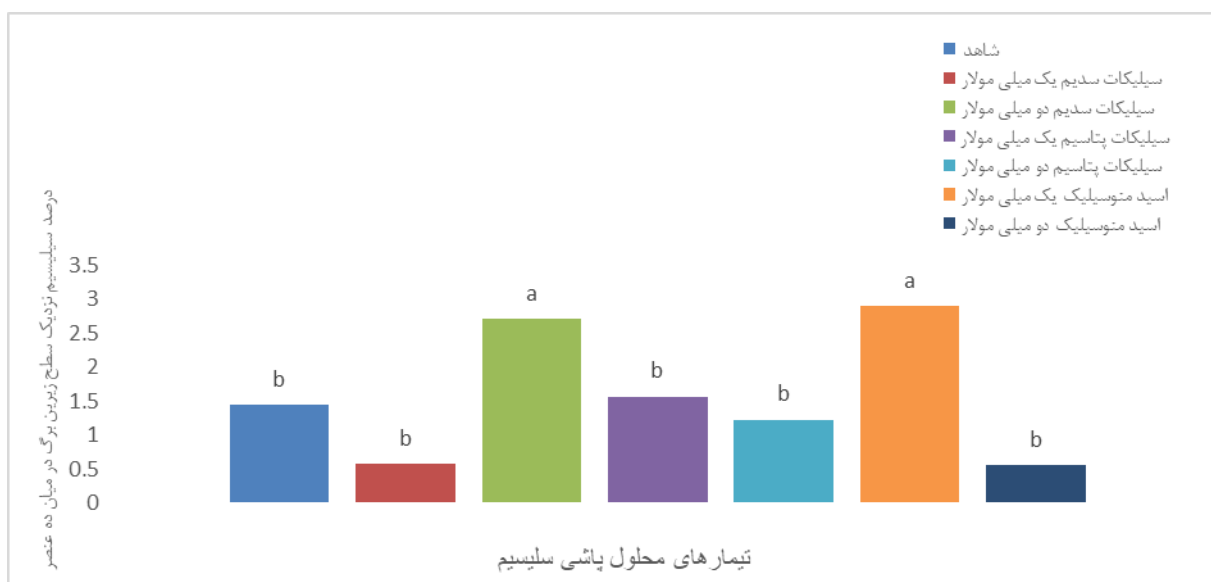
نمودار ۶ تاثیر تیمارهای مختلف سیلسیسیم بر درصد سیلسیسیم برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه



نمودار ۷ تاثیر تیمارهای مختلف سیلسیسیم بر درصد سیلسیسیم در نقطه نزدیک سطح رویی برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه



نمودار ۸ مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای مختلف سیلیسیم بر درصد سیلیسیم در نقطه وسط مزوفیل برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه

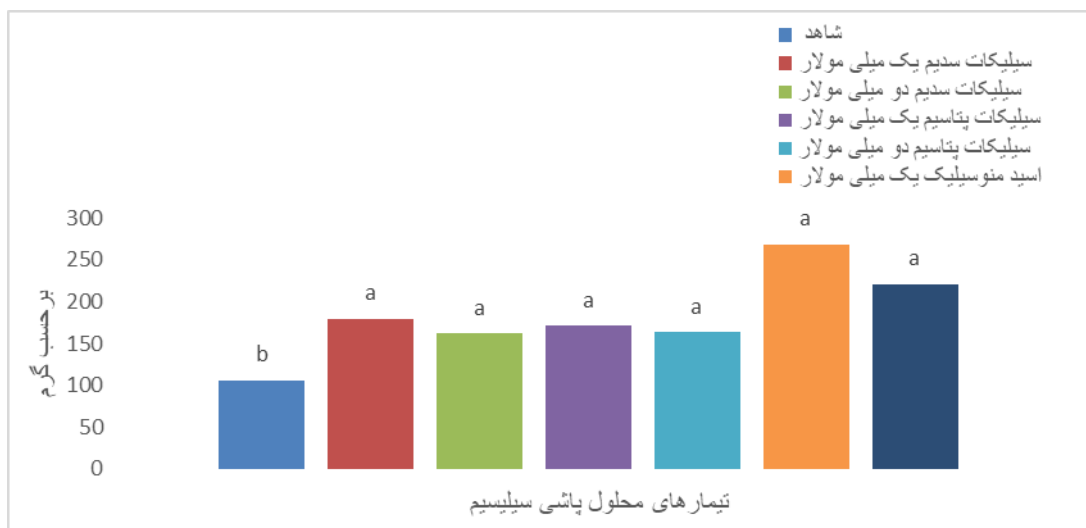


نمودار ۹ تاثیر تیمارهای مختلف سیلیسیم بر درصد سیلیسیم در نقطه نزدیک سطح زیرین برگ در میان ده عنصر مورد مطالعه

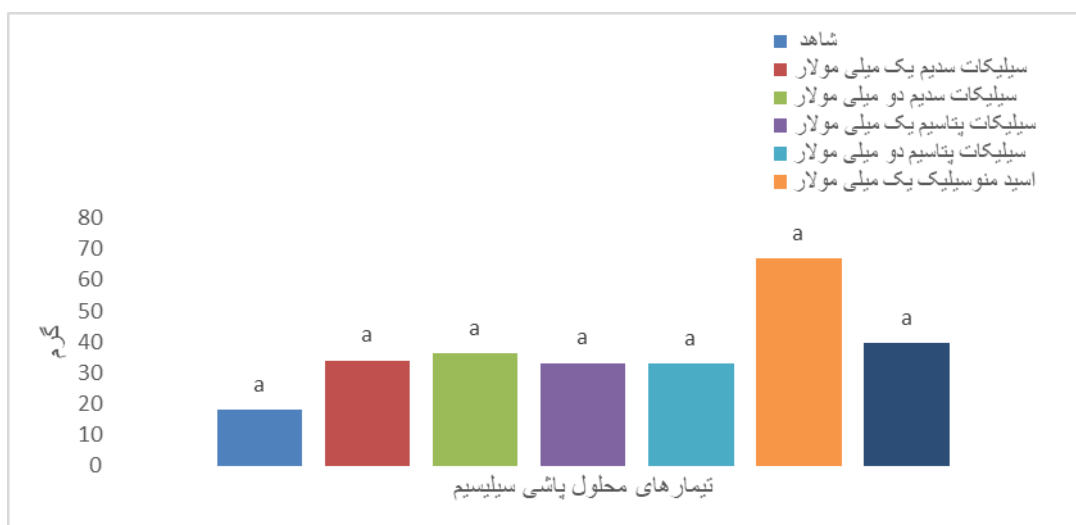
بیوماس

زیست توده گیاه گوجه فرنگی:

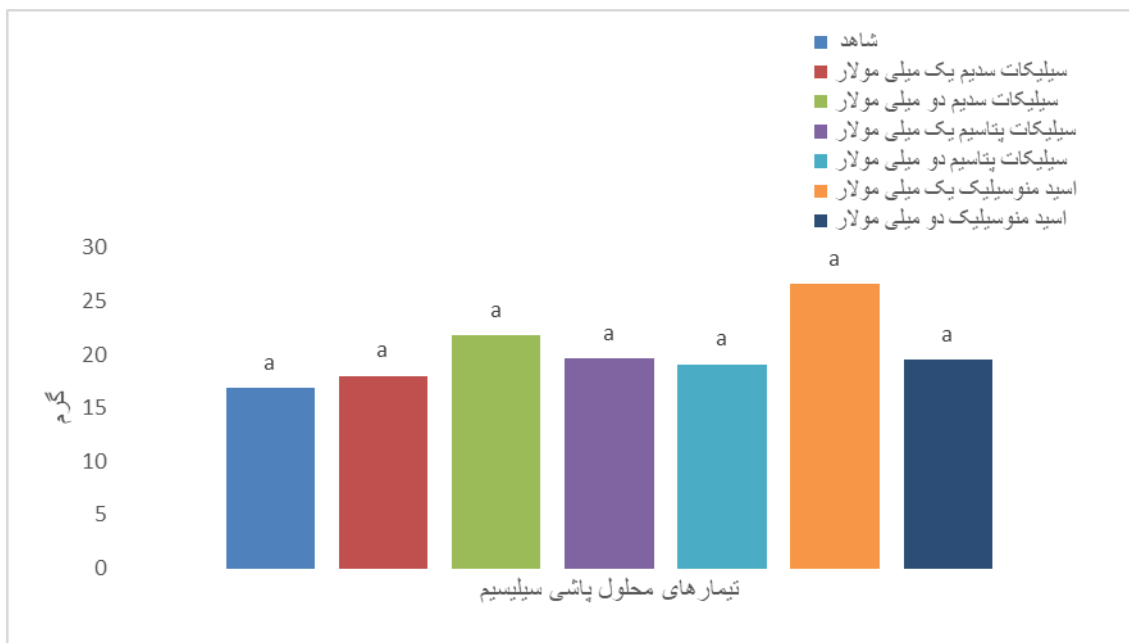
از میان صفات مختلف مرتبط با زیست توده گیاه شامل وزن تر و خشک برگ، درصد ماده خشک برگ، وزن تر و خشک ساقه و درصد ماده خشک ساقه تنها یک صفت وزن خشک ساقه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد (شکل ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵). سه تیمار سیلیکات پتاسیم ۱ میلی مولار، سیلیکات پتاسیم ۲ میلی مولار و اسید مونو سیلیسیک ۱ میلی مولار تنها تیمارهایی بودند که از نظر درصد ماده خشک ساقه مقدار کمتری را نسبت به شاهد نشان دادند.



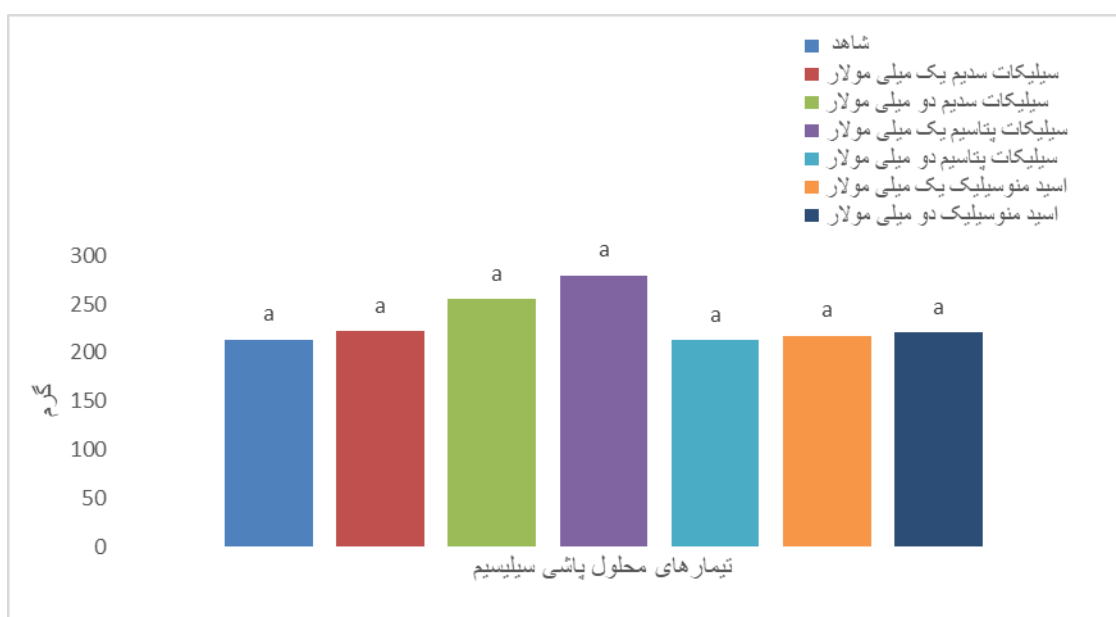
نمودار ۱۰ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان وزن تر برگ گیاه گوجه فرنگی



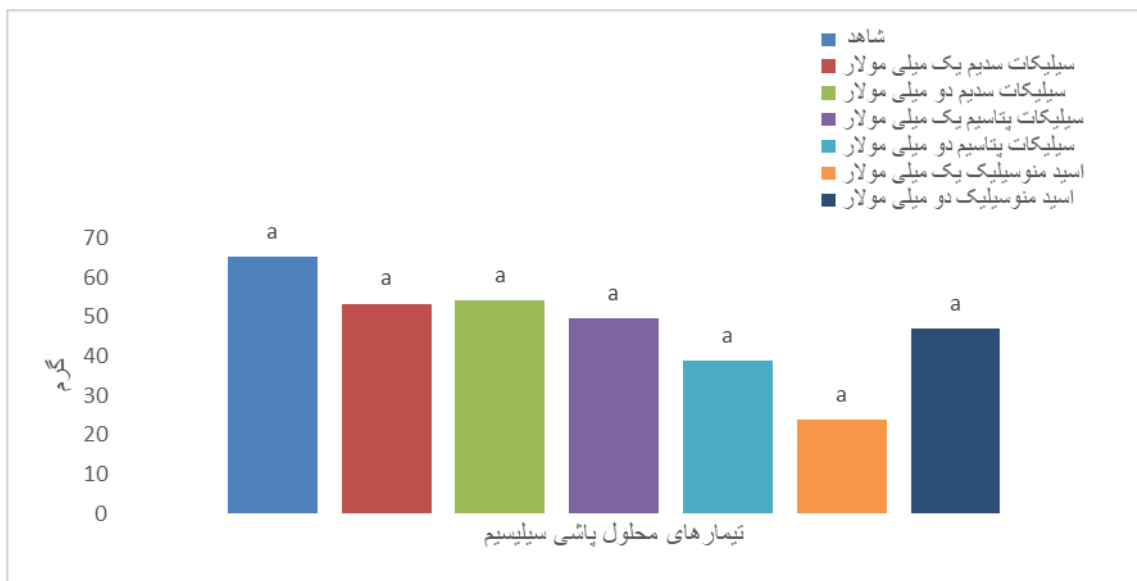
نمودار ۱۱ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان وزن خشک برگ گیاه گوجه فرنگی



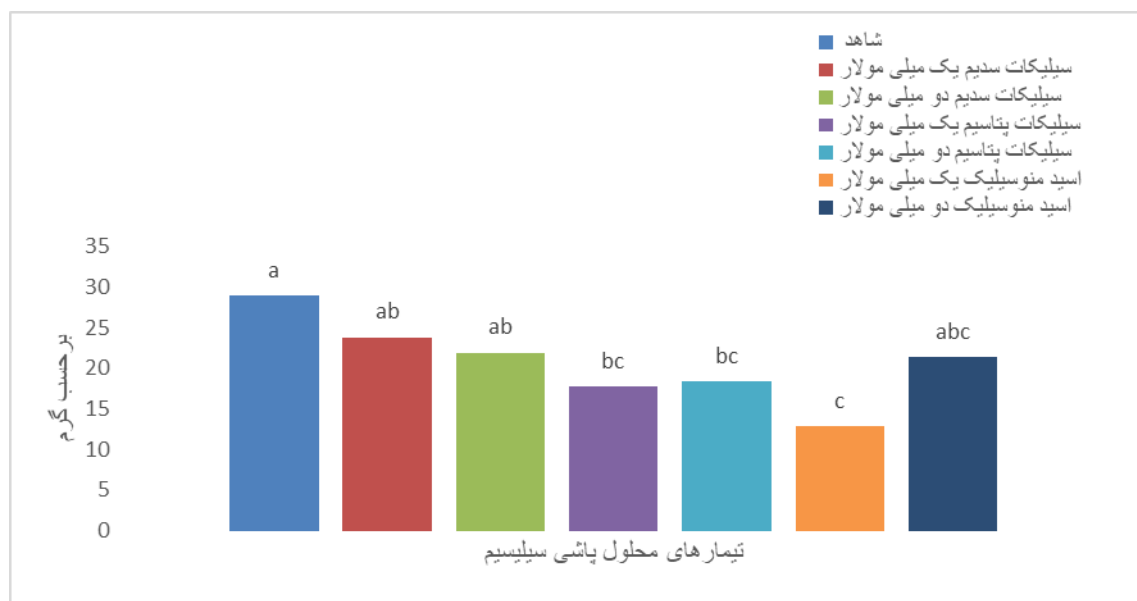
نمودار ۱۲ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان درصد وزن خشک برگ گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۱۳ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان وزن تر ساقه گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۱۴ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان وزن خشک ساقه گیاه گوجه فرنگی



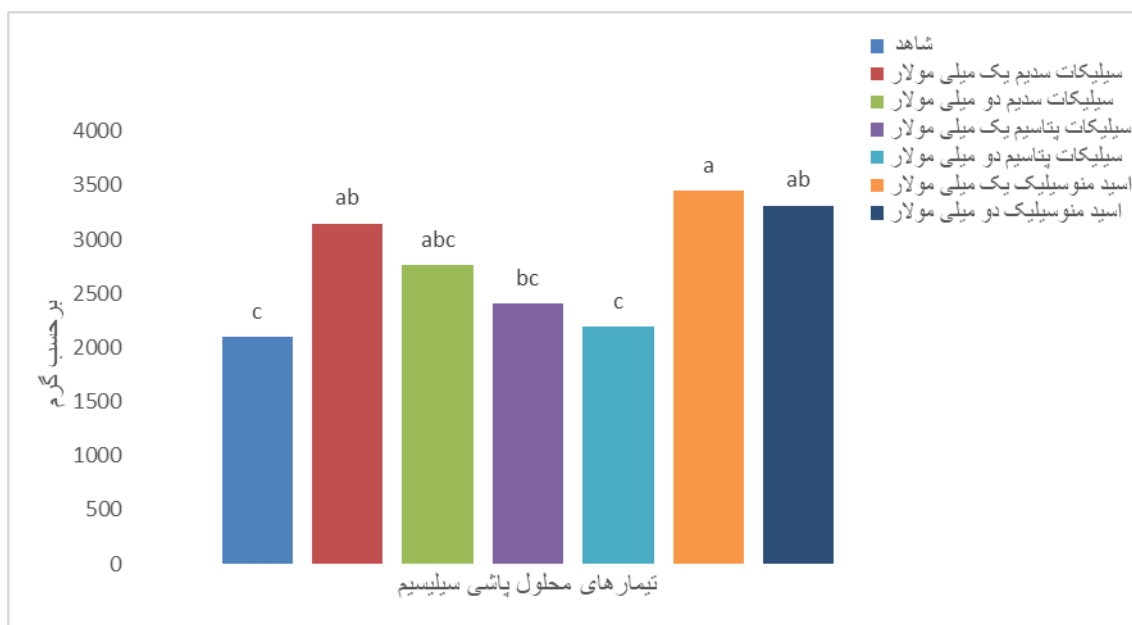
نمودار ۱۵ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان درصد وزن خشک ساقه گیاه گوجه فرنگی

عملکرد گوجه فرنگی

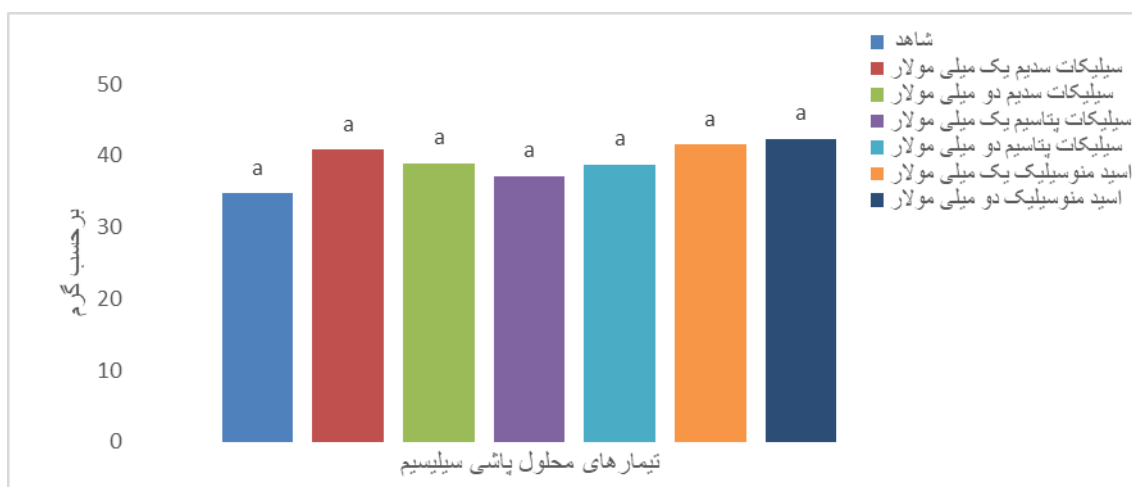
بیشترین عملکرد بوته متعلق به تیمار اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار بود که عملکرد ۳۴۵۱ گرم را تولید کرد که این میزان از نظر آماری با تیمارهای اسید مونوسیلیسیک ۲ میلی مولار، سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار و سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار تفاوت معنی داری نداشت. با اینکه عملکرد گوجه فرنگی در بوته تحت تاثیر محلولپاشی سیلیسیم قرار گرفت ولی این افزایش

بر اثر افزایش تعداد میوه نبود بلکه بدلیل افزایش اندازه میوه بود زیرا تعداد میوه تحت تاثیر تیمارهای اعمال شده قرار نگرفت. از نظر افزایش اندازه میوه، تیمار اسید مونو سیلیسیک ۱ و ۲ میلی مولار به همراه سیلیکات سدیم ۱ میلی مولار هر سه وزن تک میوه بیشتری نسبت به شاهد داشتند. اگرچه در مقایسه با برنج که یک انباشت کننده سیلیسیوم است، گوجه فرنگی گونه گیاهی سیلیسیوم گریز محسوب می شود (نیکولیک و همکاران، ۲۰۰۷) ولی گزارش شده است که تغذیه سیلیسیومی رشد و عمل کرد آن را افزایش می دهد (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۳؛ لیو، ۱۹۹۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۱). لیانگ و همکاران (۱۹۹۳) نشان دادند که افزودن ۵۰ میکروگرم سیلیسیوم در لیتر به محلول غذایی عمل کرد گوجه فرنگی را تا ۶۲ درصد افزایش می دهد. علاوه بر این، آزمایشات مزرعای نشان داد که تغذیه سیلیسیوم عمل کرد گوجه فرنگی را ۱۵ تا ۳۰ درصد زیاد کرد که این افزایش ناشی از افزایش تعداد و اندازه میوه بود (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۳). میوه های گوجه فرنگی بر اثر تغذیه سیلیسیومی، در مقایسه با شاهد، چهار روز زودتر و با عملکرد تجاری بالاتری رسیدند (لیانگ و همکاران، ۱۹۹۳). لیو (۱۹۹۷) چندین آزمایش مزرعای برای ارزیابی اثر سیلیسیوم و کلسیم بر رشد، عم کرد و کیفیت گوجه فرنگی انجام داد. نتایج نشان داد که مصرف سیلیسیوم به طور معنی داری مقاومت گوجه فرنگی به بیماری ها، اندازه میوه و در نتیجه عمل کرد را افزایش داد. به علاوه، تیمار توام سیلیسیم و کلسیم مژه میوه گوجه فرنگی را به دلیل افزایش میزان قند بهبود داد در حالی که در تیمار کلسیم تنها و بدون سیلیسیوم چنین اثری مشاهده نشد. کائو و همکاران (۲۰۱۳) اثر سطوح مختلف سیلیسیم بر رشد و تبادلات آب و دی-اکسید کربن گوجه فرنگی کشت شده در شرایط آب کشتی را مطالعه کرده و دریافتند که تیمار ۱ (۰/۶ میلی مولار سیلیسیم) و تیمار ۲ (۱/۲ میلی مولار سیلیسیم) به طور معنی داری ارتفاع گیاه و ماده خشک ریشه، ساقه و برگ را افزایش داد. میزان رنگیزه های فتوسنتزی (مانند کلروفیل a, b و کارتنوئید) نیز با تیمار سیلیسیم در این دو سطح افزایش یافت. به هر حال غلظت های بالاتر سیلیسیم یعنی تیمار ۳ (۱/۸ میلی مولار سیلیسیم) موجب افزایش رشد گیاه یا رنگیزه های فتوسنتزی نشد. در مقایسه با شاهد، میزان فتوسنتز خالص برگ نیز در تیمار ۱ و ۲ سیلیسیم افزایش یافت اما در تیمار ۳ مقداری کاهش دیده شد. نرخ تعرق در هر سه سطح تیمار سیلیسیوم کاهش یافت. مصرف سیلیسیوم هم چنین کارایی مصرف آب را افزایش داد. شکل سیلیسیوم بر نحوه تاثیر آن روی رشد گوجه فرنگی اثر می گذارد. ژو و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که محلول پاشی هر دو شکل آلی و معدنی سیلیسیوم توانست رشد نشای گوجه فرنگی را زیاد کرده و وزن تک میوه را افزایش دهد ولی این افزایش در مصرف سیلیسیوم معدنی خیلی بیش تر بود.

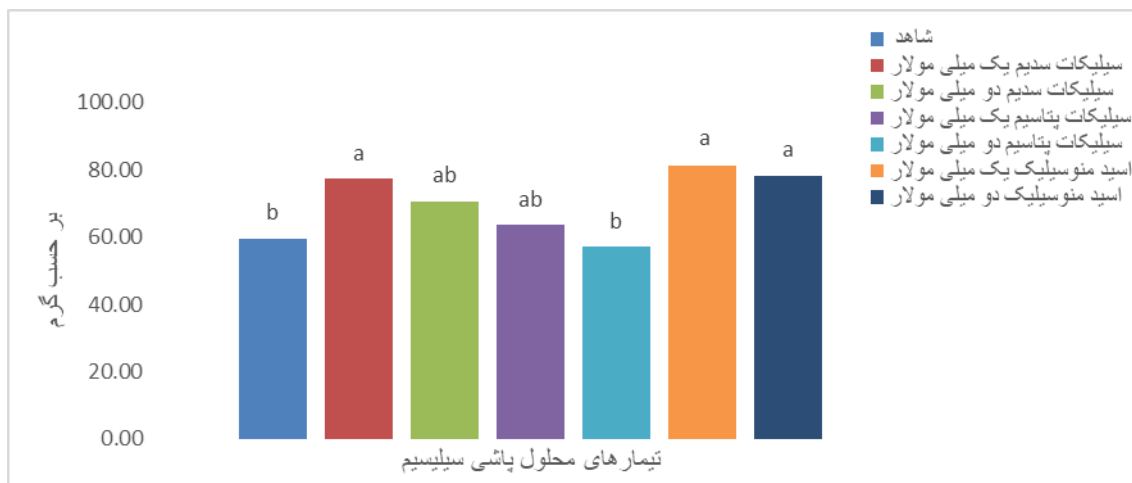
سیدلر فاطمی و همکاران در پژوهشی شاخص های عملکرد و خصوصیات کیفی میوه در طول آزمایش اندازه گیری کردند. همچنین خصوصیات فیزیولوژیکی از جمله شاخص کلروفیل و محتوای رطوبت نسبی برگ نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در پایان آزمایش کل گیاهان از بستر خارج شده و خصوصیات رویشی شامل سطح برگ و وزن تر و خشک اندام های هوایی و ریشه اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که شوری اثر کاهنده معنی داری بر روی شاخص های رشد و نمو گیاه داشت. به طوریکه تعداد برگ، سطح برگ و وزن تر و خشک برگ و ریشه با افزایش غلظت کلرید سدیم کاهش و با افزودن سیلیسیوم به محلول غذایی در شرایط شوری، افزایش یافت. شاخص های عملکرد در شرایط شوری کاهش و با کاربرد سیلیسیوم، به طور معنی داری افزایش یافت. شاخص کلروفیل تحت تاثیر تیمارها قرار نگرفت، ولی محتوای رطوبت نسبی برگ در شرایط شوری کاهش و با تیمار سیلیسیوم افزایش یافت. افزایش غلظت سیلیسیوم و کلرید سدیم در محلول غذایی، اسیدیته قابل تیتراسیون را افزایش داد، ولی دیگر خصوصیات کیفی میوه، تحت تاثیر تیمارها قرار نگرفتند. بر اساس نتایج حاصل می توان استفاده از سیلیسیوم را در شرایط شوری، توصیه نمود.



نمودار ۱۶ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان عملکرد گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۱۷ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان عملکرد (تعداد میوه) گیاه گوجه فرنگی



نمودار ۱۸ مقایسه میانگین تیمارهای مختلف سیلیسیم بر میزان وزن تک میوه گوجه فرنگی

بحث و نتایج

نتایج پژوهش نشان می دهد میزان نفوذ سیلیسیم به داخل برگ گوجه فرنگی بسته به منبع و غلظت استفاده شده تفاوت قابل توجهی داشت. نتایج نشان داد که سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار توانستند نفوذ بیشتری را در بافت برگ ایجاد کنند. این نفوذ بیشتر در نزدیکی سطوح رویی و زیرین برگ مشاهده شد، ولی در میانه مزوفیل برگ این نفوذ به طور قابل توجهی کاهش یافت. سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار نفوذ برگی قابل توجهی داشتند و موجب افزایش عملکرد مطلوب در گیاه گوجه فرنگی شدند، بنابراین می توان آنها را به عنوان ترکیبات مناسب برای محلول پاشی گوجه فرنگی توصیه کرد. با این حال، تیمار سیلیکات پتاسیم با غلظت بالا، هرچند غلظت سیلیسیم بالاتری در برگ ها ایجاد کرد، اما نتایج عملکرد آن چندان رضایت بخش نبود. این یافته ها نشان می دهند که صرفاً بالا بودن میزان سیلیسیم در برگ نمی تواند به عنوان یک معیار قطعی برای عملکرد مطلوب در نظر گرفته شود. به نظر می رسد نفوذ سیلیسیم به داخل مزوفیل برگ، که به طور مؤثر موجب تاثیرگذاری بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه می شود، اهمیت بیشتری دارد. در تیمارهایی که سیلیسیم به طور مؤثری به داخل برگ نفوذ کرد، مانند سیلیکات سدیم و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار، افزایش قابل توجهی در عملکرد گیاه مشاهده شد. در این تیمارها، این افزایش عملکرد ناشی از افزایش وزن تک میوه بود، نه تعداد میوه ها. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که نفوذ سیلیسیم به بافت گیاهی نه تنها می تواند به بهبود رشد و سلامت گیاه کمک کند، بلکه بر کیفیت و کمیت محصول نیز تأثیر گذار است. این نتایج به ویژه در شرایطی که گیاه به طور مداوم با تنش های محیطی مانند خشکی، شوری و بیماری ها مواجه است، می تواند کاربردی باشد. سیلیسیم به عنوان یک عنصر مفید به ویژه در بهبود مقاومت گیاه به تنش های زنده و غیرزنده شناخته شده است. از آنجا که گوجه فرنگی در شرایط مختلف کشاورزی و در محیط های مختلف رشد می کند، استفاده از منابع سیلیسیوم مانند سیلیکات سدیم و اسید مونوسیلیسیک می تواند به طور مؤثری عملکرد گیاه را بهبود بخشد. نتایج پژوهش های مشابه نیز تأثیر مثبت سیلیسیم در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت محصول را تأیید کرده است. به عنوان مثال، در تحقیقاتی که بر روی دیگر گیاهان انجام شده، نشان داده شد که سیلیسیم به ویژه در شرایط تنش شوری یا خشکی، موجب افزایش کارایی فتوسنتزی، بهبود کیفیت میوه ها و افزایش عملکرد کلی گیاه می شود. این نتایج با یافته های این تحقیق همخوانی دارد و به نظر می رسد که استفاده از سیلیسیم به ویژه در شرایط محیطی نامساعد می تواند به طور مؤثری موجب بهبود تولیدات کشاورزی شود. در پایان، این تحقیق نشان می دهد که استفاده از منابع سیلیسیومی که موجب نفوذ سیلیسیم به داخل بافت گیاهی می شود، می تواند تأثیرات مثبتی بر عملکرد گوجه فرنگی داشته باشد. در نتیجه، توصیه می شود که سیلیکات سدیم ۲ میلی مولار و اسید مونوسیلیسیک ۱ میلی مولار برای محلول پاشی در کشت گوجه فرنگی به ویژه در شرایط گلخانه ای مورد استفاده قرار گیرند تا به حداکثر افزایش عملکرد دست یابیم.

منابع

- جعفرنیا س. و همایی م. (۱۳۸۸). راهنمای جامع و مصور کشت گلخانه ای خیار، گوجه فرنگی، فلفل و توت فرنگی. مجتمع آموزش کشاورزی سبز ایران، نشر مشهد. ۴۸۰ ص.
- خوشگفتارمنش، ا. ج. ۱۳۸۶. مبانی تغذیه گیاهی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- قادری ر. و رضایی ر. (۱۳۸۹). راهنمای جامع و مصور کشت و پرورش گوجه فرنگی (کشت خاکی. هیدروپونیک) (جی. ینتون جونز). انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران. ۴۱۰ ص.
- قسم ر. و کافی م. (۱۳۷۸). گوجه فرنگی صنعتی، از کاشت تا برداشت. جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد. ۸۰ ص.
- اوحدی، وحیدرضا. (۱۳۸۶). معیارهای رتبه بندی دانشگاهها. ره یافت، ۳۹، ۴۰-۵۹.
- حافظنیا، محمدرضا. (۱۳۷۷). مقدمه ای بر روش تحقیق در علوم انسانی. تهران. سمت.
- سیدلر فاطمی، ل.، طباطبایی، س. ج.، و فلاحتی، ا. ۱۳۸۸. اثر سیلیسیوم بر رشد و عملکرد گیاه توت فرنگی در شرایط تنش شوری، مجله علوم باغبانی، شماره ۲۳، ص ۹۵
- سامانه اطلاع رسانی وزارت علوم: اخبار علمی، تحقیقاتی و فناوری (۱۳۸۶). رتبه بندی دانشگاه ها و موسسات پژوهشی کشور. دسترسی از طریق: <http://www.msrt.ir/sites/ravabetomomi/msrtnews/lists/jsj/dispForm.sp>
- منظوری، داود. (۱۳۸۹). مطالعه شاخص های جهانی رتبه بندی دانشگاه ها و مقایسه آن با ارزیابی آموزش عالی در ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد آموزش و پرورش تطبیقی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه علامه طباطبایی
- نوروزی چاکلی، عبدالرضا؛ محمد حسن زاده، و حمزه علی نورمحمدی. (۱۳۸۸). سنجش علم و فناوری و نوآوری (مفاهیم و شاخص های بین المللی). تهران. مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور.
- Allen, B.L. (۱۹۹۱). Cognitive research in information science: implications for design. In M.E. Williams (Ed.), *Annual Review of Information Science and Technology* (Vol. ۲۶, pp. ۳-۳۷). Medford, NJ: Learned Information.
- Ashraf M, Rahmatullah AM, Ahmed R, Mujeeb F, Sarwar A, Ali L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum offi cinarum* L.). *Plant Soil*. ۲۰۱۰;۳۲۶:۳۸۱-۹۱.
- Bae EJ, Lee KS, Huh MR, Lim CS. Silicon significantly alleviates the growth inhibitory effects of NaCl in salt-sensitive 'Perfection' and 'Midnight' Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L). *Hortic Environ Biotech*. ۲۰۱۲;۵۳:۴۷۷-۸۳.
- Baioui, R., Hidri, R., Zouari, S., Hajji, M., Falouti, M., Bounaouara, F., ... & Slama, I. (۲۰۲۵). Foliar Application of Silicon: An Innovative and Effective Strategy for Enhancing Tomato Yield in Hydroponic Systems. *Agronomy*, 15(۷), ۱۵۵۳.
- Buela-Casal, G., Gutiérrez-Martínez, O., Bermúdez-Sánchez, M. P., & Vadillo-Munoz, O. (۲۰۰۷). Comparative study of international academic rankings of universities. *Scientometrics*, ۷۱(۳): ۳۴۹-۳۶۵.
- Cao BL, Xu K, Shi J, Xin GF, Liu CY, Li X. Effects of silicon on growth, photosynthesis and transpiration of tomato. *Plant Nutr Fertil Sci*. ۲۰۱۳;۱۹:۳۵۴-۶۰ (in Chinese with English abstract).
- Cherif, M., N. Benhamou, J.G. Menzies and R.R. Bélanger. ۱۹۹۲. Silicon-induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. *Physiol. Mol. Plant Pathol*. ۴۱: ۴۱۱-۴۲۵.
- Fadzilla NM, Finch RP, Burdon RH. Salinity, oxidative stress and antioxidant responses in shoot cultures of rice. *J Exp Bot*. ۱۹۹۷;۴۸:۳۲۵-۳۱.
- He, B., Wei, Y., Wang, Y., Zhong, Y., Fan, M., Gong, Q., ... & Li, X. (۲۰۲۵). Silicon application improves tomato yield and nutritional quality. *BMC Plant Biology*, 25(۱), ۱-۱۰.
- International Colleges & Universities. (۲۰۱۱). International Colleges & Universities. About Us: Your gateway to World Universities and Colleges. Retrieved August ۱۵, available via: <http://www.iciu.org/menu/about.htm>

- Joel, k. (۲۰۰۵). Extent of congruence between student perception and media representation of quality of higher institution. *The University of Oklahoma*: ۱۷۳.
- Lee SK, Sohn EY, Hamayun M, Yoon JY, Lee IJ. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agrofor Syst.* ۲۰۱۰;۸۰:۳۳۳-۴۰.
- Li, Z., Jin, N., Jin, L., Wang, S., Li, Y., Sun, M., ... & Yu, J. (۲۰۲۵). Use of silicon to protect tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings from low-calcium stress-derived oxidative damage. *Scientia Horticulturae*, 349, ۱۱۴۲۳۱.
- Lian S. Silica fertilization of rice. In: The fertility of paddy soils and fertilizer applications for rice. Taipei: Food Fertilizer Technology Center; ۱۹۷۶. p. ۱۹۷-۲۲۰.
- Liang YC, Chen XH, Ma TS, Qian ZJ, Liu LR. Effect of Si on the growth, yield and quality of tomato. *Jiangsu Agric Sci.* ۱۹۹۳;۴:۴۸-۵۰ (in Chinese).
- Liang YC, Ding RX, Liu Q. Effects of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism. *Sci Agric Sin.* ۱۹۹۹;۳۲(۶):۷۵-۸۳ (In Chinese with English abstract).
- Liang YC, Shen QR, Shen ZG, Ma TS. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *J Plant Nutr.* ۱۹۹۶;۱۹:۱۷۳-۸۳.
- Liang YC. Effects of Si on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. *Pedosphere.* ۱۹۹۸;۸:۲۸۹-۹۶.
- Liang YC. Effects of silicon on enzyme activity, and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant Soil.* ۱۹۹۹;۲۰۹:۲۱۷-۲۴.
- Liu HY. Preliminary report on effect of Si fertilizer on tomato growth. *J Guizhou Agric Coll.* ۱۹۹۷;۱۶:۷۶-۷ (In Chinese).
- Nesterov A.V. (۲۰۱۱). The Influence of Rankings on the Development of Universities. *Scientific and Technical Information Processing*, ۳۸(۱): ۱۳-۱۶
- Nikolic M, Nikolic N, Liang Y, Kirkby EA, Römhild V. Germanium-۶۸ as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. *Plant Physiol.* ۲۰۰۷;۱۴۳:۴۹۵-۵۰۳.
- Rasool S, Hameed A, Azooz MM, Muneeb-u-Rehman STO, Parvaiz Ahmad P. Salt stress: causes, types and responses of plants. In: Ahmad P, Azooz MM, Prasad MNV, editors. *Ecophysiology and responses of plants under salt stress*. New York: Springer; ۲۰۱۳. p. ۱-۲۴.
- Siddiqi, K. S., Husen, A., Zahra, N., & Moheman, A. (۲۰۲۵). Harnessing silicon nanoparticles and various forms of silicon for enhanced plant growth performance under salinity stress: application and mechanism. *Discover Nano*, 20(۱), ۸۹.
- Soundararajan P, Sivanesan I, Jo EH, Jeong BR. Silicon promotes shoot proliferation and shoot growth of *Salvia splendens* under salt stress in vitro. *Hortic Environ Biotechnol.*
- Tahir MA, Aziz T, Farooq M, Sarwar G. Silicon-induced changes in growth, ionic composition, water relations, chlorophyll contents and membrane permeability in two salt-stressed wheat genotypes. *Arch Agron Soil Sci.* ۲۰۱۲;۵۸:۲۴۷-۵۶.
- Tayade, R., Ghimire, A., Khan, W., Lay, L., Attipoe, J. Q., & Kim, Y. (۲۰۲۲). *Silicon as a smart fertilizer for sustainability and crop improvement*. *Biomolecules*. 2022; 12: 1027.
- Tuna AL, Kaya C, Higgs D, Murillo-Amador B, Aydemir S, Girgin AR. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environ Exp Bot.* ۲۰۰۸;۶۲:۱۰-۶.
- Xue G, Zhang G, Sun Y, Liao S, Chen Y. Influences of spraying two different forms of silicon on plant growth and quality of tomato in solar greenhouse. *Chine Agric Sci Bull.* ۲۰۱۲;۲۸(۱۶):۲۷۲-۶.
- Yeo AR, Flowers SA, Rao G, Welfare K, Senanayake N, Flowers TJ. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. *Plant Cell Environ.* ۱۹۹۹;۲۲:۵۵۹-۶۵.

- Yin LN, Wang SW, Li JY, Tanaka K, Oka M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol Plant*. ۲۰۱۳;۳۵:۳۰۹۹-۱۰۷.
- Zhang, F., Zhao, Y., Zhang, Y., Shi, Y., Hou, L., Khan, A., ... & Zhang, Y. (۲۰۲۴). Mechanism of Exogenous Silicon in Enhancing Cold Stress Tolerance in *Solanum lycopersicum* L. Seedlings: Insights from Resistance and Quality Indicators. *Horticulturae*, ۱۱(۱), ۴.
- Zhou, X., Xia, R., Zhong, J., Liu, X., Xia, T., Tang, Y., ... & He, Z. (۲۰۲۵). Silicon and iron co-application modulates cadmium accumulation and cell wall composition in tomato seedlings. *BMC Plant Biology*, 25(۱), ۱-۱۷.
- Zhu YX, Gong HJ. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron Sustain Dev*. ۲۰۱۴;۳۴:۴۵۵-۷۲.