مقاله پژوهشی

پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه توت‌فرنگی به کاربرد تغذیه‌ای میکرو و نانوذرات سیلیسیم

رحمان یوسفی[1*] و محمود اثنی‌عشری[2]

[1] پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

[2] گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

(تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۰۵/۱۰، تاریخ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۶/۰۸)

چکیده

سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید برای اکثر گیاهان محسوب می‌شود. سیلیسیم باعث افزایش تولید و کیفیت محصول شده و نقش مهمی در مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی دارد. با پیشرفت علم و تولید عناصر در مقیاس نانو، کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف و از جمله کشاورزی مطرح شده است. این پژوهش به صورت یک آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و چهار گیاه در هر تکرار اجرا گردید. ذرات دی‌اکسید سیلیسیم در دو مقیاس میکرو و نانو در غلظت‌های صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و به دو روش محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای در دو مرحله (مرحله اول در زمان ۵-۴ برگی و مرحله دوم دو هفته پس از پایان اعمال تیمار مرحله اول) روی گیاهان توت‌فرنگی اعمال شدند. محتوای رطوبت نسبی برگ، کربوهیدرات برگ و میوه، نیترات برگ و میوه، کلروفیل (a، b، کل)، کاروتنوئیدها و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که تیمارها اثر معنی‌داری بر محتوای رطوبت نسبی برگ و نیترات میوه نداشتند، ولی کاربرد سیلیسیم کربوهیدرات محلول برگ و میوه و نیز نیترات کل برگ را به طور معنی‌داری افزایش داد. سیلیسیم به خصوص در مقیاس نانو سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل‌های a، b و کل گردید، ولی بر میزان کاروتنوئیدها تأثیر معنی‌داری نداشت. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز گردید، ولی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز تأثیر معنی‌دار نداشت. در کل کاربرد نانوسیلیسیم در مقایسه با میکروسیلیسیم و شاهد اثرات مثبت بهتری روی صفات فیزیولوژیکی گیاه توت‌فرنگی داشت. به‌طورکلی جهت تولید گلخانه‌ای توت‌فرنگی در بستر کشت بدون خاک، غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به‌صورت محلول‌دهی ریشه‌ای قابل توصیه است.

کلمات کلیدی: محتوای نسبی آب، کلروفیل، کاروتنوئید، کاتالاز، پراکسیداز

مقدمه

توت‌فرنگی با نام علمی *Fragaria ananassa* Duch. متعلق به تیره Rosaceae، گیاهی دولپه‌ای و چندساله علفی بوده که به طور متوسط ۳ تا ۵ سال عمر می‌کند و یکی از بی‌نظیرترین ریزمیوه‌های مناطق معتدله است که در دهه‌های اخیر در زمره تولیدات مهم و تجاری قرار گرفته است (جلیلی‌مرندی، ۱۳۸۶). توت‌فرنگی آناناسی که یک هیبرید بین توت‌فرنگی ویرجینیایی (*Fragria virginiana* Duch.) و توت‌فرنگی شیلیایی (*Fragaria chiloensis* Duch.) است، در سرتاسر جهان دارای اهمیت زیادی است (Gerdakaneh *et al.*, 2009;

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: r.yousefi66@areeo.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

Debnath *et al.*, 2007). این محصول به دلیل داشتن عطر، طعم و محتویات سرشار از ویتامین و نیز منبع خوبی از آنتی‌اکسیدان‌ها کاملاً شناخته شده است و جایگاه خود را در رژیم غذایی میلیون‌ها نفر در جهان پیدا کرده، به لحاظ اقتصادی و تجاری مهم است و به طور وسیعی به اشکال تازه‌خوری و فرآوری‌شده مانند مربا، آبمیوه و ژله به مصرف می‌رسد (Giampieri *et al.*, 2012). یکی از عوامل مؤثر در رشد و عملکرد توت‌فرنگی تغذیه بهینه آن با عناصر مختلف طی مراحل رشد و نمو آن است. یکی از این عناصر غذایی تأثیرگذار سیلیسیم است. سیلیسیم دومین عنصر فراوان پوسته زمین (۳۱٪) بعد از اکسیژن (۴۹٪) می‌باشد که نقش آن در زیست‌شناسی سلول کمتر درک شده و تلاش برای درک ارتباط سیلیسیم با متابولیسم و فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه در حال انجام است (Corrales *et al.*, 1997; Marschner, 1995). با وجود فراوانی سیلیسیم در پوسته زمین اکثر ترکیبات آن قابل جذب برای گیاه نیست و در تولیدات گلخانه‌ای با محیط‌های کشت بدون خاک و یا آبکشت و محلول‌های غذایی متداول نیز سیلیسیم اضافه نمی‌شود و بدین‌ترتیب کاربرد سیلیسیم در این گونه کشت‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Talgar *et al.*, 2011). از منابع سیلیسیمی که در تولید محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به منابع سیلیکاتی همچون سیلیکات سدیم و پتاسیم و منابع اکسیدی همچون اکسید سیلیسیم (SiO_2) و نیز دیگر منابع مانند اسید سیلیسیک اشاره کرد. مطالعات متعدد نشان داده است که این عنصر اثرات مثبتی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد (Liang, 1999; Ma *et al.*, 2002; Ma, 2004). سیلیسیم در افزایش کارآیی مصرف آب نیز بسیار مؤثر است و یکی از عناصر غذایی مفید است که بر رشد و سلامت گیاه تأثیر دارد. بسیاری از گیاهان قادر به جذب سیلیسیم بوده و مقدار جذب براساس گونه گیاهی بین ۱۰-۰/۱ درصد زیست‌توده گیاهی متغیر است (Cherif and Belanger, 1992). این عنصر می‌تواند باعث افزایش تولید و کیفیت محصول، کاهش تبخیر و تعرق، افزایش مقاومت به تنش‌هایی مانند خشکی و سمیت فلزات سنگین، افزایش تحریک تولید برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش حساسیت به بعضی بیماری‌های قارچی در گیاهی همانند خیار شود (خوش گفتارمنش، ۱۳۸۶). تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه ممکن است به دلیل رسوب آن در پهنای برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و نیز افزایش میزان کلروفیل در واحد سطح برگ باشد که از این طریق توانایی گیاه برای استفاده مؤثر از نور را بالا می‌برد. همچنین کاربرد سیلیسیم محلول جهت تولید غلظت‌های بالاتر آنزیم روبیسکو در برگ لازم است. این آنزیم سوخت و ساز دی‌اکسید کربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارآیی تثبیت دی‌اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (محقق و همکاران، ۱۳۸۹). تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که سیلیسیم اثرات مفیدی بر روی متابولیسم توت‌فرنگی دارد. کاربرد سیلیسیم به صورت محلول‌پاشی روی شاخ و برگ توت‌فرنگی، محتوای کلروفیل، رشد گیاه و میزان اسیدهای آلی را افزایش داده است (Wang and Galletta, 1998). Miyake و Takahash (۱۹۸۶) گزارش دادند که وزن خشک اندام‌های هوایی، تعداد کل میوه و عملکرد کل میوه بازارپسند (براساس وزن) توت‌فرنگی رقم هوکوویس (Hokowase) با کاربرد سیلیسیم افزایش یافت و بدین ترتیب اثر مفید آن بر روی رشد گیاه و تولید میوه نشان داده شده است. Jian-peng و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم در محلول غذایی گیاه خیار باعث افزایش فتوسنتز و حداکثر کارآیی فتوسیستم II (Fv/Fm) می‌شود. تاکنون اطلاعات دقیقی که رابطه بین سیلیسیم و کارآیی فتوسیستم II را نشان دهد در دسترس نیست ولی احتمالاً سیلیسیم از طریق افزایش جذب برخی عناصر غذایی مانند آهن که در ایجاد تبادل بین PSI و PSII نقش دارد باعث افزایش حداکثر کارآیی فتوسیستم II می‌شود. در آزمایشی که توسط Miao و همکاران (۲۰۱۰) انجام شد، گزارش گردید که کاربرد سیلیسیم در دانهال‌های سویای رشد کرده در محیط با کمبود پتاسیم، کارآیی مصرف پتاسیم را افزایش داد. غلظت پتاسیم ریشه، ساقه و برگ با افزایش سیلیسیم در محیط رشد دانهال‌های دارای کمبود پتاسیم افزایش پیدا کرد. تحت کمبود

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

پتاسیم، هیدروژن پراکسید و غلظت مالون دی‌آلدهید افزایش پیدا کرد، اما با کاربرد سیلیسیم به اندازه سطح بدون تنش کاهش پیدا کرد. Shen و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که محتوای رطوبت نسبی برگ دانهال سویا که یک فاکتور اصلی تأثیرگذار بر رشد تحت شرایط تنش خشکی است. با کاربرد سیلیسیم به مقدار ۱۹ درصد بالا رفت و تحت تنش‌های ترکیبی خشکی و اشعه UV-B به مقدار ۳۰ درصد افزایش یافت. در آزمایشی که Kaya و همکاران (۲۰۰۶) روی گیاه ذرت انجام دادند نتیجه گرفتند که تحت شرایط تنش خشکی مقدار کلسیم، پتاسیم، وزن تر، وزن خشک، محتوای کلروفیل و میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد و کاربرد سیلیسیم در این شرایط منجر به افزایش این پارامترهای فیزیولوژیکی شده، رشد گیاه را بهبود و مقدار تولید را افزایش می‌دهد. Zhu و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که کاربرد سیلیکات پتاسیم در محلول غذایی گیاه خیار که در معرض تنش شوری قرار گرفتند باعث افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، دهیدرو آسکوربات ردااکتاز و گلوتاتیون ردااکتاز شد و سطوح هیدروژن پراکسید و نشت الکترولیت را در برگ‌ها کاهش داد.

تأمین مواد غذایی و محصولات کشاورزی سالم و مغذی برای ادامه زندگی همواره یکی از چالش‌های جوامع بشری بوده است. استفاده از فناوری‌های نوین با هدف افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی می‌تواند راهبرد مناسبی برای مقابله با این چالش‌ها به شمار آید. در این بین فناوری نانو به عنوان یک فناوری بین‌رشته‌ای توانایی خود را در رفع کمبودها در بسیاری از عرصه‌های علمی و صنعتی به ویژه در علوم کشاورزی و صنایع غذایی به اثبات رسانده است و در دهه‌های اخیر توانسته تحولات وسیعی در تمام زمینه‌های علوم ایجاد نماید (خیام‌نکویی و همکاران، ۱۳۸۹). عناصر در حد نانو دارای سطح ویژه زیادی هستند و همین سطح ویژه کارکردهای آنان را افزایش می‌دهد. استفاده از نانوذرات منجر به افزایش کارآیی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن اثرات منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد عنصر می‌شود (پیوندی و همکاران، ۱۳۹۰). در سال‌های اخیر، اثرات اکسید سیلیسیم در مقیاس نانو بر گیاهان مورد توجه قرار گرفته است که البته پژوهش‌های محدودی در این رابطه وجود دارد. Avestan و همکاران (۲۰۲۱) طی تحقیقی بیان نمودند که کاربرد نانوذرات سیلیسیم با بهبود ضخامت دیواره سلولی، فراهمی میزان آب کافی و افزایش میزان کلروفیل، می‌تواند اثرات منفی تنش شوری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و آناتومیکی گیاه توت‌فرنگی را کاهش دهد. یوسفی و همکاران (۱۳۹۹) گزارش نمودند که کاربرد نانوذرات سیلیسیم باعث بهبود ویژگی‌های رشدی و عملکردی گیاه توت‌فرنگی در شرایط کشت هیدروپونیک گردید. Yuvakkumar و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه روی بذور و گیاهچه ذرت نشان داد که اعمال نانو اکسید سیلیسیم به صورت پودر مخلوط با بستر گلدان‌ها باعث افزایش درصد جوانه‌زنی (۲ تا ۱۱ درصد)، ضریب بهره‌وری آب (بیشتر از ۵۳ درصد) و میزان کلروفیل (۱۳ تا ۱۷ درصد) شد. همچنین تمامی پارامترهای کمی گیاه نسبت به شاهد و تیمار اکسید سیلیسیم درشت دانه افزایش نشان داد. Haghighi و همکاران (۲۰۱۲) با اعمال نانو اکسید سیلیسیم بر بذر و گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری به این نتیجه رسیدند که نانو اکسید سیلیسیم می‌تواند اثرات منفی و مخرب شوری بر درصد جوانه‌زنی و طول و وزن ریشه گیاه را بهبود بخشد. Bao-shan و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که تیمارهای نانوذرات اکسید سیلیسیم تا حد زیادی بر افزایش رشد و کیفیت نهال‌های یک ساله لاریکس (*Larix olgensis*) اثر می‌گذارد. هدف از این بررسی، ارزیابی تأثیر عنصر سیلیسیم به فرم نانویی (نانومقیاس) و معمول آن (میکرومقیاس) در غلظت‌های متفاوت و با روش‌های کاربرد مختلف بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه توت‌فرنگی بوده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت یک آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و در هر تکرار چهار گیاه در گلخانه و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان اجرا گردید. ذرات دی‌اکسید سیلیسیم در دو مقیاس میکرو و نانو در غلظت‌های صفر (به عنوان شاهد)، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و به دو روش محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای در دو مرحله مجزا روی گیاهان توت‌فرنگی رقم کاماروزا اعمال شدند (یعنی هر کدام از روش‌های محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای به طور مجزا در طول دو مرحله اعمال شدند). نشاهای گلدانی توت‌فرنگی رقم کاماروزا از شرکت آشیان سبز عماد در شهرستان هشتگرد استان البرز تهیه و در محیط‌کشت کوکوپیت و پرلایت (نسبت حجمی ۱:۱) کشت شدند. دو هفته پس از استقرار نشاها و در مرحله ۵-۴ برگی اعمال تیمارها شروع گردید. اعمال هر کدام از تیمارهای محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه در دو مرحله مجزا صورت گرفت؛ مرحله اول در زمان ۵-۴ برگی و مرحله دوم دو هفته پس از پایان اعمال تیمار مرحله اول بود. هر یک از مراحل اعمال تیمار نیز یک هفته به طول انجامید، بدین صورت که در طی یک هفته سه مرتبه تیمارها با فاصله یک روز در میان به شکل محلول‌پاشی برگی و یا محلول‌دهی ریشه‌ای اعمال شدند. تیمارهای شاهد به صورت محلول‌پاشی برگی با آب‌مقطر و محلول‌دهی ریشه‌ای فاقد سیلیسیم اعمال شدند. از محلول غذایی هوگلند کامل به ازای هر گلدان ۷۵۰ میلی‌لیتر در هفته برای تغذیه گیاهان استفاده شد که این میزان محلول غذایی به صورت سه بار در هفته توزیع گردید. تغذیه معمول گیاهان تا پایان دوره آزمایش (۵ ماه) ادامه داشت. در طی دوره رشد دمای حداکثر گلخانه ۲۵-۲۴ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل ۱۶-۱۴ درجه سانتی‌گراد بود و گیاهان تحت شرایط دوره نوری طبیعی روزانه قرار داشتند. قطر ذرات میکروسیلیسیم ($Micro\text{-}SiO_2$) و نانوسیلیسیم ($Nano\text{-}SiO_2$) به ترتیب معادل ۱۰- ۰/۵ میکرومتر و ۲۰-۱۰ نانومتر بود که هر دو از شرکت Sigma-Aldrich تهیه گردیدند. به منظور پراکنده شدن ذرات و تهیه سوسپانسیون همگن و یکنواخت از میکرو و نانوذرات سیلیسیم، سوسپانسیون اولیه این ترکیبات قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه داخل دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک (باندلین، یو وی ۳۱۰۰) قرار داده شد تا سوسپانسیون یکنواختی از آن‌ها به دست آمد که بلافاصله برای اعمال تیمارها استفاده شد. در پایان دوره آزمایش (۵ ماه) صفات فیزیولوژیکی گیاهان شامل محتوای رطوبت نسبی برگ، کربوهیدرات برگ و میوه، نیترات برگ و میوه، کلروفیل (a، b، کل)، کاروتنوئیدها و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز مورد سنجش قرار گرفتند.

محتوای رطوبت نسبی برگ براساس روش Yamasaki و Dillenburg (۱۹۹۹) اندازه‌گیری شد. طبق این روش از هر تکرار، چهار برگ کاملاً توسعه‌یافته انتخاب و پس از تمیز کردن سطح آنان از هر برگ شش دیسک برگی یک سانتی‌متری تهیه، سپس وزن تر (FW) آن اندازه‌گیری و درون لوله آزمایش قرار داده شد و به هر لوله آزمایش ۱۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر اضافه گردید. پس از گذشت چهار ساعت و در مکانی تاریک، نمونه‌ها از لوله آزمایش خارج و پس از خشک کردن سطح برگ، وزن تورژسانس (TW) اندازه‌گیری و بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد دوباره توزین و وزن خشک (DW) آنها به دست آمد. در پایان محتوای رطوبت نسبی برگ (LRWC) از طریق فرمول زیر محاسبه گردید.

$$LRWC\ (\%) = [(FW-DW)/(TW-DW)] \times 100$$

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل (a، b و کل) و نیز کاروتنوئیدها از روش گزارش‌شده توسط Yang و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد. بدین ترتیب که ۰/۲۵ گرم نمونه برگ تازه در هاون چینی با استفاده از ازت مایع پودر گردید و با ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ ٪ کاملاً ساییده شد. سپس عصاره حاصله برای مدت ۵ دقیقه با دور ۱۵۰۰ سانتریفیوژ شد، محلول رویی نگه داشته و رسوب آن دور ریخته شد. حجم نهایی عصاره گیاه با استون ۸۰ ٪ به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد و میزان جذب در طول‌موج‌های ۶۶۳، ۶۴۶ و ۴۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل کری ۱۰۰، واریان) خوانده شد که به ترتیب پیک‌های جذب اصلی کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها هستند. میزان رنگیزه‌های برگ با استفاده از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

فرمول‌های زیر محاسبه و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر (mg/gr FW) گزارش گردید.

$$Chl\ a = 12.25\ A_{663} - 2.55\ A_{646} \times V/W$$
$$Chl\ b = 20.31\ A_{646} - 4.91\ A_{663} \times V/W$$
$$Chl\ a+b = 17.76\ A_{646} + 7.34\ A_{663} \times V/W$$
$$Car = 4.69\ A_{440} - 0.267\ Chl\ a+b \times V/W$$

که در رابطه‌های فوق: V حجم نهایی عصاره گیاهی بر حسب میلی‌لیتر، W وزن تر بافت برگ بر حسب میلی‌گرم، Chl a میزان کلروفیل a، Chl b میزان کلروفیل b، Chl a+b میزان کلروفیل کل، Car میزان کاروتنوئیدها، A_{663} میزان جذب نور در طول‌موج ۶۶۳ نانومتر، A_{646} میزان جذب در طول‌موج ۶۴۶ نانومتر و A_{440} میزان جذب نور در طول‌موج ۴۴۰ نانومتر هستند.

برای اندازه‌گیری کربوهیدرات محلول کل در برگ و میوه، عصاره الکلی ۰/۵ گرم از نمونه برگ و میوه تازه با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۶ درصد و ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد پس از سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه در ۳۵۰۰ دور استخراج شد. سپس ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره الکلی با ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون (۱۵۰ میلی‌گرم آنترون در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲٪) مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. از واکنش آنترون با قندها در محیط اسیدی رنگ سبز مایل به آبی تولید می‌شود. پس از خارج نمودن و خنک کردن نمونه‌ها، میزان جذب نور با اسپکتروفتومتر (واریان، مدل کری ۱۰۰) در طول‌موج ۶۲۵ نانومتر خوانده شد. از غلظت‌های مختلف گلوکز (صفر تا ۶۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) نیز به عنوان محلول‌های استاندارد استفاده شد و براساس منحنی استاندارد به دست آمده میزان کربوهیدرات‌های محلول محاسبه و براساس میلی‌گرم کربوهیدرات در گرم وزن تر گزارش گردید (Paquin and Lechasseur, 1979).

نیترات کل موجود در برگ و میوه به روش کالریمتری با استفاده از اسید سالیسیلیک (Cataldo *et al.*, 1975) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بدین ترتیب که نمونه‌های گیاهی (برگ و میوه) به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس آسیاب و پودر شدند. مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌های پودرشده با استفاده از ترازوی دیجتال با دقت ۰/۰۰۱ توزین و درون لوله‌های آزمایشی ریخته شد. به هر کدام از نمونه‌ها مقدار ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه اضافه گردید. نمونه‌ها برای مدت یک ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد داخل حمام آب گرم قرار گرفتند. بعد از مخلوط کردن کامل، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در ۵۰۰۰ دور سانتریفیوژ شدند تا باقیمانده‌های گیاهی رسوب کند. محلول روشناور نمونه‌ها برداشت و برای آنالیز نیترات نگه داشته شد. مقدار ۰/۲ میلی لیتر از عصاره‌های به دست آمده به لوله‌های آزمایشی منتقل گردید و با ۰/۸ میلی‌لیتر محلول اسید سالیسیلیک ۵٪ (w/v) در اسید سولفوریک غلیظ ($SA\text{-}H_2SO_4$) مخلوط گردید. بعد از ۲۰ دقیقه در دمای اتاق، ۱۹ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۲ نرمال (NaOH) به آرامی با استفاده از پیپت ۲۰ میلی‌لیتری به هرکدام از نمونه‌ها اضافه شد تا pH به بالای ۱۲ برسد. نمونه‌ها تا دمای اتاق خنک شدند و میزان جذب در طول‌موج ۴۱۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل کری ۱۰۰، واریان) خوانده شد. مقدار نیترات بر حسب میلی‌گرم نیترات در گرم وزن خشک با کمک منحنی استاندارد به دست آمده با غلظت‌های مختلف نیترات (صفر تا ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر) موجود در نیترات پتاسیم (KNO_3) محاسبه گردید.

فعالیت آنزیم کاتالاز به روش اسپکتروفتومتری (Aebi, 1984) اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۰/۱ گرم بافت تازه برگ (نگه‌داشته شده در فریزر ۸۰- درجه سانتی‌گراد) در یک میلی‌لیتر بافر استخراج ریخته و به هم زده شد. عصاره حاصله گرفته شد و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. محلول شفاف بالایی (عصاره آنزیم) برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور ۱۴۰ میکرولیتر عصاره آنزیم و ۲۰ میکرولیتر از محلول ۳ درصد H_2O_2 به ۱/۸۴ میلی‌لیتر محلول واکنش اضافه شد (واکنش آنزیم کاتالاز با اضافه نمودن عصاره آنزیم آغاز می‌شود. ثبت تغییرات جذب نور نمونه‌ها در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر که بیانگر میزان کاهش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

غلظت H_2O_2 است، هر ۱۰ ثانیه و به مدت ۱۸۰ ثانیه انجام شد. هر یک واحد از فعالیت به عنوان مقداری از آنزیم در نظر گرفته شد که موجب کاهش یک میکرومول H_2O_2 در هر دقیقه می‌شود. میزان فعالیت آنزیم بر حسب واحد در گرم وزن تر برگ گزارش گردید.

فعالیت آنزیم پراکسیداز به روش اسپکتروفتومتری (Herzog and Fahimi, 1973) مورد سنجش قرار گرفت. بدین منظور ۰/۱ گرم بافت تازه برگ (نگه‌داشته شده در فریزر ۸۰- درجه سانتی‌گراد) در یک میلی‌لیتر بافر استخراج ریخته و به هم زده شد. عصاره حاصله گرفته شد و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول شفاف بالایی (عصاره آنزیم) برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم مورد استفاده قرار گرفت. برای شروع واکنش آنزیم پراکسیداز، ۳۰ میکرولیتر از محلول ۰/۶ درصد H_2O_2 (از قبل تهیه‌شده) به همراه ۱۳۰ میکرولیتر عصاره آنزیم به ۱/۸۴ میلی‌لیتر محلول واکنش اضافه شد. ثبت تغییرات جذب نور نمونه‌ها در طول‌موج ۴۶۵ نانومتر بیانگر میزان تخریب H_2O_2 هر ۱۰ ثانیه و به مدت ۱۸۰ ثانیه انجام شد. هر یک واحد از فعالیت آنزیم به عنوان مقداری از آنزیم در نظر گرفته شد که در هر دقیقه موجب کاهش یک میکرومول H_2O_2 در هر میلی‌لیتر می‌شود. میزان فعالیت آنزیم بر حسب واحد در گرم وزن تر برگ گزارش گردید.

داده‌های به دست آمده با استفاده از برنامه آماری SAS تجزیه و تحلیل آماری شدند و میانگین‌های به دست آمده با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس‌داده‌ها برای صفات محتوای رطوبت نسبی برگ، کربوهیدرات برگ و میوه و نیترات برگ و میوه در جدول ۱ نشان داده شده است.

محتوای رطوبت نسبی برگ: براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) اثرات جداگانه و متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر محتوای رطوبت نسبی برگ در هیچ کدام از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نگردید. البته لازم به ذکر است که تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم باعث افزایش ۹/۱۶ درصدی محتوای رطوبت نسبی برگ نسبت به تیمار شاهد محلول‌پاشی و افزایش ۷/۴۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد محلول‌دهی شد ولی این افزایش معنی‌دار نبود. در این تحقیق کاربرد سیلیسیم اثر معنی‌داری بر محتوای رطوبت نسبی برگ نداشت که نتیجه به دست آمده در این خصوص با نتایج فاطمی و همکاران (۱۳۸۸ب) در توت‌فرنگی، سعادتیان و کافی (۱۳۹۴) در سیب‌زمینی، Shen و همکاران (۲۰۱۰) در سویا و Haghighi و Pessarakli (۲۰۱۳) در گوجه‌فرنگی مطابقت دارد.

کربوهیدرات برگ و میوه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثرات جداگانه سیلیسیم و روش کاربرد و همچنین اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و غلظت بر میزان کربوهیدرات برگ غیرمعنی‌دار بود. اثر جداگانه غلظت، اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و روش کاربرد و اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۱٪ بر میزان کربوهیدرات برگ معنی‌دار گردید. اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد نیز در سطح ۵٪ معنی‌دار شد. مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۲) نشان داد که بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌دار وجود داشت، به‌طوریکه کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار کربوهیدرات برگ نسبت به شاهد شد، در این رابطه میزان کربوهیدرات برگ از کمترین مقدار مشاهده‌شده یعنی ۸۳/۳۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر در تیمار شاهد محلول‌پاشی به ۱۰۷/۹۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم رسید که بیشترین مقدار به دست آمده بود (جدول ۲). بین تیمارهای میکروسیلیسیم نیز بیشترین مقدار ۱۰۲/۰۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر متعلق به تیمار محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر بود که با بیشترین مقدار ذکر شده در بین تمامی تیمارها تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۲). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثرات جداگانه سیلیسیم و غلظت در سطح ۱٪ و اثر متقابل آن دو در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر غلظت، روش کاربرد و نوع سیلیسیم بر محتوای رطوبت نسبی برگ، غلظت کربوهیدرات و غلظت نیترات برگ و میوه توت‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		محتوای رطوبت نسبی برگ	کربوهیدرات برگ	کربوهیدرات میوه	نیترات برگ	نیترات میوه
سیلیسیم	۱	۴۶/۲۷۷^{ns}	۱۰۲/۷۶^{ns}	۱۹۹۸۱/۹**	۲/۸۰۸۱**	۰/۰۳۰۵^{ns}
غلظت	۳	۲۵/۰۸۱^{ns}	۷۸۱/۵۱**	۵۱۵۰/۵**	۰/۳۵۷۹**	۰/۰۰۷۰^{ns}
سیلیسیم × غلظت	۳	۴۸/۸۹۷^{ns}	۱۴۰/۲۵^{ns}	۵۸۷/۱۹*	۰/۳۰۰۶**	۰/۰۳۱۹^{ns}
روش کاربرد	۱	۰/۱۹۹۰^{ns}	۵۱/۸۸۳^{ns}	۴۴۸/۰۸^{ns}	۰/۱۵۵۲*	۰/۰۰۲۱^{ns}
سیلیسیم × روش کاربرد	۱	۱/۳۹۲۴^{ns}	۸۲۴/۶۶**	۳۰۸/۵۵^{ns}	۰/۱۹۶۳*	۰/۰۰۰۰۸^{ns}
غلظت × روش کاربرد	۳	۵۰/۷۲۸^{ns}	۱۷۱/۰۴*	۳۸/۲۳۲^{ns}	۰/۰۵۲۳^{ns}	۰/۰۰۰۶^{ns}
سیلیسیم×غلظت×روش کاربرد	۳	۲۸/۲۴۶^{ns}	۲۶۲/۶۶**	۱۴۲۵/۶**	۰/۳۳۰۶**	۰/۰۰۰۸^{ns}
خطا	۳۲	۳۱/۳۳۸	۵۵/۲۹۴	۱۶۰/۲۷	۰/۰۳۷۱	۰/۰۱۰۲
ضریب تغییر (٪)	–	۶/۹۲	۸/۴۵	۵/۶۸	۸/۶۵	۷/۶۸

****، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار**

جدول ۲- اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر کربوهیدرات برگ و میوه و نیترات برگ توت‌فرنگی

تیمار	غلظت (mg/l)	کربوهیدرات برگ (میلی‌گرم در گرم وزن تر)		کربوهیدرات میوه (میلی‌گرم در گرم وزن تر)		نیترات برگ (میلی‌گرم در گرم وزن خشک)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۸۳/۳۴$^{c-f}$	۸۹/۶۱$^{b-e}$	۲۰۰/۵۰^{gf}	۲۱۰/۶۰^{def}	۱/۶۱۸^{jk}	۱/۷۹۳^{ijk}
میکروسیلیسیم	۲۰	۸۶/۹۸$^{b-f}$	۷۶/۴۲^{ef}	۱۸۶/۸۳^{g}	۲۱۵/۸۴^{def}	۱/۵۸۶^{k}	۱/۸۸۶$^{g-k}$
	۴۰	۸۱/۱۴^{def}	۷۶/۸۱^{ef}	۲۰۸/۹۶^{ef}	۲۱۷/۵۲^{def}	۲/۰۹۳$^{f-i}$	۱/۹۶۰$^{g-j}$
	۶۰	۱۰۲/۰۷^{ab}	۸۶/۵۱$^{b-f}$	۲۳۳/۵۰^{cd}	۲۱۷/۳۵^{def}	۱/۸۴۳$^{h-k}$	۱/۸۹۳$^{g-k}$
	۸۰	۹۶/۶۰$^{a-d}$	۸۵/۵۷$^{b-f}$	۱۸۱/۶۸^{g}	۱۵۶/۰۹^{h}	۲/۴۵۳$^{b-e}$	۲/۱۸۰$^{e-h}$
نانوسیلیسیم	۲۰	۸۶/۳۵$^{b-f}$	۸۱/۱۶^{def}	۲۴۹/۳۹^{bc}	۲۱۶/۷۴^{def}	۲/۴۲۶$^{c-f}$	۲/۰۱۳^{ghi}
	۴۰	۸۷/۶۱$^{b-f}$	۸۱/۵۲^{def}	۲۵۰/۶۸^{bc}	۲۳۱/۴۱^{cde}	۲/۲۲۶$^{d-g}$	۲/۷۶۶^{ab}
	۶۰	۱۰۰/۸۷^{ab}	۱۰۷/۹۴^{a}	۲۷۲/۸۴^{a}	۲۶۸/۱۱^{ab}	۲/۵۴۰^{bcd}	۲/۹۵۳^{a}
	۸۰	۷۰/۵۰^{f}	۹۹/۵۵^{abc}	۲۲۱/۵۶^{def}	۲۳۳/۴۸^{cd}	۲/۲۰۶$^{d-g}$	۲/۶۳۳^{abc}

میانگین‌های با حروف مشابه برای هر صفت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

سطح ۵٪ بر میزان کربوهیدرات میوه معنی‌دار بود. اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی نیز در سطح ۱٪ بر این شاخص معنی‌دار گردید. سایر اثرات جداگانه و متقابل دوگانه فاکتورها بر میزان کربوهیدرات میوه غیرمعنی‌دار شد. براساس نتایج مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۲) بین میانگین تیمارهای به‌کار رفته تفاوت معنی‌دار وجود داشت و کاربرد سیلیسیم منجر به افزایش میزان کربوهیدرات میوه شد. میزان کربوهیدرات میوه از ۲۰۰/۵۰ و ۲۱۰/۶۰ میلی‌گرم در گرم وزن

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

تر به ترتیب در تیمارهای شاهد محلول‌پاشی و محلول‌دهی به ۲۷۲/۸۴ و ۲۶۸/۱۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر به ترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی و محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم رسید. با افزایش غلظت از ۶۰ به ۸۰ میلی‌گرم در لیتر در هر دوی میکرو و نانوسیلیسیم کربوهیدرات میوه شروع به کاهش کرد (جدول ۲) و این بیانگر آن است که سیلیسیم تا غلظت معینی باعث بهبود میزان کربوهیدرات میوه می‌شود.

کاربرد سیلیسیم در این تحقیق سبب افزایش میزان کربوهیدرات برگ و میوه شد. نتایج به دست آمده در این خصوص با نتایج Lee و همکاران (۲۰۰۲) که بیان داشتند کاربرد سیلسیم باعث افزایش میزان کربوهیدرات میوه در گوجه‌فرنگی شد مطابقت دارد. افزایش کربوهیدرات‌ها در نتیجه کاربرد سیلیسیم به افزایش رشدونمو گیاه در حضور سیلیسیم بر می‌گردد. سیلیسیم باعث بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌گردد که نتیجه آن تولید کربوهیدرات بیشتر در گیاه و در نتیجه افزایش منابع کربوهیدراتی در دسترس میوه برای رشد و نمو می‌شود (محقق و همکاران، ۱۳۸۹). افزایش میزان فتوسنتز گیاه در نتیجه کاربرد سیلیسیم در تحقیقات مختلفی گزارش شده است (Moussa, 2006; Lee *et al*., 2000). حقیقی و مظفریان (۱۳۹۳) نیز گزارش دادند که کاربرد سیلیسیم به شکل فلزی یا نانو با اندازه ذرات ۳۰-۲۰ نانومتر در شرایط بهینه رشد گوجه‌فرنگی و بدون تنش باعث افزایش فتوسنتز در کشت هیدروپونیک شد. افزایش مقدار پتاسیم به دنبال کاربرد سیلیسیم نیز در افزایش میزان کربوهیدرات گیاه دخیل است. وقتی غلظت پتاسیم بیشتر شود منجر به بهبود فتوسنتز گیاه و در نتیجه افزایش میزان کربوهیدارت‌ها می‌شود. بین مقدار پتاسیم بافت‌ها و میزان کربوهیدرات آن‌ها رابطه مستقیم وجود دارد (Hansen, 1980).

نیترات برگ و میوه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که به غیر از اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد، سایر اثرات جداگانه و متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر میزان نیترات برگ معنی‌دار شد. بدین ترتیب که اثر جداگانه سیلیسیم و غلظت و اثر متقابل آن دو و نیز اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۱٪ و اثر جداگانه روش کاربرد و اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و روش کاربرد در سطح ۵٪ بر میزان نیترات برگ معنی‌دار گردید. نتایج حاصل از مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۲) نشان داد که بین تیمارهای مختلف به لحاظ نیترات برگ تفاوت معنی‌دار وجود داشت و کاربرد سیلیسیم منجر به افزایش نیترات برگ شد. بیشترین میزان نیترات برگ در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به میزان ۲/۹۵۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک و کمترین مقدار نیز در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر میکروسیلیسیم و نیز تیمارهای شاهد محلول‌پاشی و محلول‌دهی به ترتیب به مقادیر ۱/۵۸۶، ۱/۶۱۸ و ۱/۷۹۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک مشاهده گردید که بین این سه تیمار تفاوت معنی‌دار وجود نداشت، ولی با بیشترین مقدار ذکر شده تفاوت معنی‌دار نشان دادند (جدول ۲). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که هیچ یک از اثرات جداگانه و متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی بر میزان نیترات میوه تأثیر معنی‌داری در هیچ کدام از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ نداشت. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش میزان نیترات برگ در این تحقیق شد. فاطمی و همکاران (۱۳۸۸ الف) گزارش دادند که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار نیترات برگ توت‌فرنگی در شرایط بدون تنش گردید به گونه‌ای که میزان نیترات در تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم دو برابر میزان نیترات در تیمار شاهد بود. همچنین Neocleous (۲۰۱۵) نیز گزارش داد که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار نیترات در پیکره رویشی گیاه خربزه رشد کرده در محیط هیدروپونیک گردید. نتایج این پژوهش در این خصوص با نتایج آنان مطابقت دارد. علت افزایش نیترات برگ در اثر کاربرد سیلیسیم نامعلوم است و مطالعات زیادی در این زمینه وجود ندارد. شاید یکی از دلایل اصلی افزایش میزان نیترات برگ به افزایش رشد ریشه در نتیجه کاربرد سیلیسیم برگردد که باعث افزایش سطح مورد نیاز برای جذب نیترات می‌شود. در خصوص میزان نیترات میوه توت‌فرنگی در این تحقیق بین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر غلظت، روش کاربرد و نوع سیلیسیم بر غلظت رنگیزه‌های برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برگ توت‌فرنگی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها	کاتالاز	پراکسیداز
سیلیسیم	۱	۰/۰۰۱۷^{ns}	۰/۰۹۷۹**	۰/۱۲۵۹**	۰/۰۰۰۰۸۸^{ns}	۰/۰۵۴۸**	۰/۰۰۰۳۶^{ns}
غلظت	۳	۰/۱۸۸۷**	۰/۰۷۹۵**	۰/۵۰۹۸**	۰/۰۰۳۷۸۷**	۰/۰۹۶۹**	۰/۰۰۰۲۷^{ns}
سیلیسیم × غلظت	۳	۰/۰۶۸۲**	۰/۰۳۰۶**	۰/۰۴۱۶**	۰/۰۰۰۴۶۷^{ns}	۰/۱۶۸۱**	۰/۰۰۳۹۸^{ns}
روش کاربرد	۱	۰/۰۰۴۷^{ns}	۰/۰۰۱۵^{ns}	۰/۰۱۱۷^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۸^{ns}	۰/۰۰۲۲۳^{ns}
سیلیسیم × روش کاربرد	۱	۰/۰۲۹۱^{ns}	۰/۰۱۲۷^{ns}	۰/۰۰۳۳^{ns}	۰/۰۰۲۰۰۵^{ns}	۰/۰۰۰۵^{ns}	۰/۰۰۰۰۳^{ns}
غلظت × روش کاربرد	۳	۰/۰۰۲۵^{ns}	۰/۰۰۲۹^{ns}	۰/۰۰۹۶^{ns}	۰/۰۰۰۲۳۵^{ns}	۰/۰۰۰۹^{ns}	۰/۰۰۴۴۳^{ns}
سیلیسیم×غلظت×روش کاربرد	۳	۰/۰۶۲۱**	۰/۰۲۲۷*	۰/۰۴۲۷**	۰/۰۰۰۲۶۶^{ns}	۰/۰۱۲۳*	۰/۰۰۲۷۹^{ns}
خطا	۳۲	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۰۹۷۴	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۱۳
ضریب تغییر (٪)	–	۷/۶۹	۱۴/۴۹	۴/۹۴	۱۳/۱۲	۱۲/۳۸	۱۳/۹۸

****، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، ۵٪ و غیر معنی‌دار**

تیمارها با شاهد تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید و کاربرد سیلیسیم تأثیری بر میزان نیترات میوه نداشت.

غلظت کلروفیل (a، b، کل) و کاروتنوئیدها: طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) اثر جداگانه غلظت و اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و غلظت و نیز اثر متقابل سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح ۱٪ بر میزان کلروفیل a اثر معنی‌دار داشت. سایر اثرات جداگانه و متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر این شاخص غیر معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) نشان داد که بین میانگین تیمارها تفاوت معنی‌دار وجود داشت و کاربرد سیلیسیم باعث افزایش میزان کلروفیل a شد به‌طوریکه در تیمار شاهد محلول‌پاشی و محلول‌دهی به ترتیب مقادیر ۱/۳۵۵ و ۱/۴۲۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ ثبت گردید که این میزان در کاربرد غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به بیشترین مقدار رسید و با شاهد تفاوت معنی‌دار داشت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر جداگانه سیلیسیم و غلظت و اثر متقابل آن دو در سطح ۱٪ و اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۵٪ بر میزان کلروفیل b معنی‌دار بود. سایر اثرات جداگانه و متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر این شاخص اثر معنی‌داری نداشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) برای کلروفیل b نشان داد که بین میانگین تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده گردید و کاربرد سیلیسیم باعث افزایش میزان کلروفیل b نسبت به شاهد شد. کمترین میزان کلروفیل b از تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر میکروسیلیسیم به مقدار ۰/۳۱۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ به دست آمد که البته اختلاف آن با تیمارهای شاهد محلول‌پاشی و محلول‌دهی معنی‌دار نبود. به‌طورکلی کمترین مقادیر کلروفیل b در تیمارهای شاهد و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر میکروسیلیسیم به هر دو صورت محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای مشاهده شد. بیشترین مقدار کلروفیل b از تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به مقدار ۰/۶۹۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ به دست آمد که نسبت به تیمارهای شاهد و اکثر دیگر تیمارها دارای اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۴).

طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) اثرات جداگانه سیلیسیم و غلظت و اثر متقابل آنان و نیز اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۱٪ بر میزان کلروفیل کل معنی‌دار گردید، ولی سایر اثرات جداگانه و متقابل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

جدول ۴- اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر غلظت کلروفیل‌های a، b و کل در برگ توت‌فرنگی

تیمار	غلظت (mg/l)	کلرفیل a (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)		کلروفیل b (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)		کلروفیل کل (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۱/۳۵۵$^{c-f}$	۱/۴۲۶$^{b-f}$	۰/۳۶۹^{f}	۰/۳۵۸^{f}	۱/۷۲۵^{j}	۱/۷۸۵^{ij}
میکروسیلیسیم	۲۰	۱/۴۲۶$^{b-f}$	۱/۵۳۲$^{a-e}$	۰/۳۱۵^{f}	۰/۳۸۸^{ef}	۱/۷۴۲^{ij}	۱/۹۲۰$^{f-i}$
	۴۰	۱/۵۱۲$^{a-e}$	۱/۳۱۸^{ef}	۰/۴۱۱^{def}	۰/۵۷۱^{abc}	۱/۹۲۳$^{f-i}$	۱/۸۹۰$^{g-j}$
	۶۰	۱/۵۶۴^{abc}	۱/۵۵۷^{abc}	۰/۵۴۰^{bcd}	۰/۵۹۱^{abc}	۲/۱۰۵$^{c-f}$	۲/۱۴۸$^{b-e}$
	۸۰	۱/۵۶۳^{abc}	۱/۵۳۹$^{a-d}$	۰/۶۲۱^{abc}	۰/۵۱۴^{cde}	۲/۱۸۵^{bcd}	۲/۰۵۴$^{d-g}$
نانوسیلیسیم	۲۰	۱/۳۲۹^{def}	۱/۲۲۵^{f}	۰/۵۸۲^{abc}	۰/۵۵۱^{bcd}	۱/۹۱۱$^{g-j}$	۱/۷۷۷^{ij}
	۴۰	۱/۲۸۵^{f}	۱/۵۷۳^{abc}	۰/۵۲۹^{cd}	۰/۴۱۶^{cde}	۱/۸۱۴$^{h-j}$	۱/۹۹۰$^{e-h}$
	۶۰	۱/۶۳۱^{ab}	۱/۷۲۲^{a}	۰/۶۷۸^{ab}	۰/۶۹۸^{a}	۲/۳۰۹^{ab}	۲/۴۲۰^{a}
	۸۰	۱/۶۷۱^{a}	۱/۶۷۲^{a}	۰/۵۹۱^{abc}	۰/۶۳۰^{abc}	۲/۲۶۲^{abc}	۲/۳۰۳^{ab}

میانگین‌های با حروف مشابه برای هر صفت در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

فاکتورهای مورد بررسی بر این شاخص تأثیر معنی‌دار نداشتند. بین میانگین تیمارهای مختلف از نظر میزان کلروفیل کل تفاوت معنی‌دار مشاهده گردید (جدول ۴). کمترین میزان کلروفیل کل در تیمار شاهد محلول‌پاشی با ۱/۷۲۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ و بیشترین مقدار آن در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم با ۲/۴۲۰ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ وجود داشت که اختلاف بین بیشترین مقدار به دست آمده با شاهدها و دیگر تیمارها معنی‌دار بود (جدول ۴). بین محلول‌دهی و محلول‌پاشی غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم تفاوت معنی‌دار دیده نشد (جدول ۴). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که به غیر از اثر جداگانه غلظت که در سطح ۱٪ معنی‌دار شد، باقی اثرات جداگانه و متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی بر میزان کاروتنوئیدهای برگ تأثیر معنی‌داری در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ نداشتند. مقایسه میانگین اثرات جداگانه غلظت (جدول ۵) نشان داد که در بین غلظت‌ها، غلظت ۴۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به دیگر غلظت‌ها باعث تجمع بیشترین میزان کاروتنوئیدها شد که با غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر دارای اختلاف معنی‌دار بود.

نتایجی که در خصوص تأثیر سیلیسیم بر غلظت رنگیزه‌های برگ توت‌فرنگی به دست آمد نشانگر آن بود که کاربرد این عنصر باعث افزایش میزان کلروفیل a، b و کل برگ گردید، ولی روی کاروتنوئیدهای برگ اثر معنی‌داری نداشت. کلروفیل یکی از ترکیبات اصلی کلروپلاست است که در فرایند فتوسنتز دخیل است. اثر مثبت سیلیسیم بر محتوای کلروفیل برگ به اثبات رسیده است (Haghighi and Pessarakli, 2013; Shen *et al.*, 2010). افزایش میزان کلروفیل در نتیجه کاربرد سیلیسیم در گیاهان مختلفی گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به چغندر لبویی (بهتاش و همکاران، ۱۳۸۹)، طالبی (نظافتی و همکاران، ۱۳۹۲)، گاوزبان دارویی (ترابی و همکاران، ۱۳۹۲) و برنج (Agarie *et al.*, 1993) اشاره کرد که نتایج این تحقیق با نتایج گزارشات ذکر شده مطابقت دارد. در تحقیق حاضر مشاهده گردید که سیلیسیم به فرم نانوذرات دارای تأثیرگذاری بیشتر و با اختلاف معنی‌داری نسبت به سیلیسیم به فرم میکروذرات بود که این نتیجه با نتایج Suriyaprabha و همکاران (۲۰۱۲) در ذرت و Haghighi و Pessarakli (۲۰۱۳) در گوجه‌فرنگی که گزارش دادند کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل a، b و کل گردید و نانوسیلیسیم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات جداگانه غلظت سیلیسیم بر میزان کاروتنوئیدهای برگ توت‌فرنگی

غلظت (mg/l)	کاروتنوئیدها (میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)
۲۰	۰/۲۴۲^{ab}
۴۰	۰/۲۵۹^{a}
۶۰	۰/۲۳۱^{b}
۸۰	۰/۲۱۷^{b}

میانگین‌های با حروف مشابه در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

نسبت به فرم معمول آن دارای تأثیر بهتر و با اختلاف معنی‌دار بود، مطابقت دارد. تأثیر سیلیسیم بر افزایش مقدار کلروفیل برگ از طریق تأثیر بر فعالیت آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز (Adatia and Besford, 1986) و جلوگیری از تخریب کلروفیل توسط سیلیسیم است (حقیقی و مظفریان، ۱۳۹۳). افزایش فعالیت چرخه کلوین در اثر افزایش آنزیم روبیسکو، کمبود سوبسترای لازم برای چرخه را به دنبال داشته که در پی آن ساخت رنگدانه‌های فتوسنتزی و در رأس آن‌ها محتوای کلروفیل در واحد سطح برگ برای تأمین انرژی لازم افزایش می‌یابد (سعادتیان و کافی، ۱۳۹۴). از جمله دلایل افزایش میزان کلروفیل در تیمار سیلیسیم می‌توان به تأثیر سیلیسیم در افزایش کارآیی فتوسیستم ۲ اشاره کرد که توسط Al-aghabary و همکاران (۲۰۰۵) در گیاه گوجه‌فرنگی گزارش شده است. Avestan و همکاران (۲۰۱۹) گزارش نمودند کاربرد نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیم در شرایط تنش شوری با بهبود محتوای کلروفیل و حفظ آب نسبی باعث بهبود تولید توت‌فرنگی هم در شرایط شور و هم در شرایط نرمال گردید و کاربرد ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیسیم منجر به افزایش رشد ریشه، بهبود رشد گیاه و تولید محصول توت‌فرنگی شد.

پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی به کاربرد سیلیسیم در بین گونه‌های مختلف گیاهی و حتی ارقام مختلف متغیر است (Song *et al*., 2009; Wang *et al*., 2010; Shi *et al*., 2010). مطالعاتی که براساس آنالیزهای ترانسکریپتومی صورت گرفته نشان داده است که وقتی گیاهان در شرایط غیرتنشی در معرض سیلیسیم قرار می‌گیرند تعدادی ژن (R gene, GST24) به طرز متفاوتی بیان می‌شوند (Moldes *et al*., 2013). همچنین Fauteux و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای که بر روی آرابیدوپسیس داشتند دریافتند که در گیاهان سالمی که در شرایط غیرتنشی در معرض سیلیسیم قرار گرفتند دو ژن به طرز متفاوتی بیان شدند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که کاربرد سیلیسیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز تأثیر معنی‌دار داشت و باعث افزایش آن نسبت به شاهد و دیگر تیمارها گردید. کاربرد نانوسیلیسیم نسبت به میکروسیلیسیم تأثیرگذاری بهتری نشان داد. افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در نتیجه کاربرد سیلیسیم توسط Liu و همکاران (۲۰۰۹) در خیار، Shi و همکاران (۲۰۱۰) در بادام‌زمینی و Tale Ahmad و Haddad (۲۰۱۱) در گندم گزارش گردید که نتایج این تحقیق با آن یافته‌ها مطابقت دارد. در مجموع در تحقیق حاضر کاربرد سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه توت‌فرنگی گردید، ولی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز تأثیر معنی‌دار نداشت. با استناد به توضیحات و گزارشات فوق می‌توان گفت که در گیاه توت‌فرنگی در شرایط بدون تنش نیز فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همچون کاتالاز می‌تواند دستخوش تغییر قرار بگیرد.

در این تحقیق نانوسیلیسیم مؤثر از میکروسیلیسیم بود که احتمالاً به خاطر داشتن سطح مخصوص زیاد و جذب آسان‌تر آن است که در نتیجه مؤثرتر از کودهای شیمیایی مرسوم عمل کردند (Anonymous, 2009). گیاهان جهت تولید بیشتر و با کیفیت و ارزش غذایی بالاتر نیازمند جذب بهینه و کافی آب و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

جدول ۶- اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر فعالیت آنزیم کاتالاز برگ توت‌فرنگی

تیمار	غلظت (mg/l)	کاتالاز (واحد در گرم وزن تر برگ)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۰/۳۴۲^{c}	۰/۳۲۴^{c}
میکروسیلیسیم	۲۰	۰/۳۵۳^{c}	۰/۳۰۹^{c}
	۴۰	۰/۳۴۱^{c}	۰/۴۰۴^{bc}
	۶۰	۰/۴۱۰^{bc}	۰/۴۰۶^{bc}
	۸۰	۰/۶۴۸^{a}	۰/۶۹۳^{a}
نانوسیلیسیم	۲۰	۰/۴۱۲^{bc}	۰/۴۹۴^{b}
	۴۰	۰/۵۰۲^{b}	۰/۴۰۶^{bc}
	۶۰	۰/۷۰۴^{a}	۰/۷۵۱^{a}
	۸۰	۰/۴۳۴^{bc}	۰/۴۰۵^{bc}

میانگین‌های با حروف مشابه در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

عناصر غذایی توسط ریشه‌ها هستند. احتمالاً نانوذرات با داشتن اندازه کوچک‌تر و اثرگذاری و نفوذپذیری بیشتر، با افزایش توانایی گیاه در جذب آب، قدرت سیستم ریشه را در جذب آب و مواد غذایی بالا می‌برد. این پدیده در مورد اثر نانو ذراتی مثل تیتانیوم در توت‌فرنگی نیز گزارش گردیده است (هاشمی دهکردی، ۱۳۹۱). Elawad و همکاران (۱۹۸۲) نیز بیان کردند که کاربرد سیلیسیم در محیط کشت هیدروپونیک سبب بهبود رشد ریشه گیاه می‌شود. آنان این افزایش طول را به افزایش تعداد و اندازه سلول در نتیجه کاربرد سیلیسیم نسبت دادند. مقایسه روش کاربردها نیز بیانگر آن بود که اگر چه تفاوت بین روش محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای در برخی موارد غیر معنی‌دار بود، اما در مجموع روش محلول‌دهی ریشه‌ای بهتر از روش محلول‌پاشی برگی عمل کرد. سیلیسیم در گیاه از طریق آوند چوبی و به دنبال جریان تعرق از ریشه به اندام‌های هوایی منتقل می‌شود، بنابراین توزیع آن در شاخه و برگ‌ها و اندام‌های هوایی به وسیله میزان تعرق در اندام‌ها تعیین می‌شود (Ma *et al.*, 2011). در واقع بیشترین غلظت سیلیسیم در گیاه در محل‌هایی مشاهده می‌شود که بیشترین تبخیر را دارند (Henriet *et al.*, 2006). Miyake و Takahash (۱۹۸۶) اظهار داشتند که جذب سیلیسیم در توت‌فرنگی شبیه سویا است و گیاه توت‌فرنگی سیلیسیم را آزادانه از ریشه به اندام‌های هوایی انتقال می‌دهد. دلیل مؤثرتر واقع شدن روش محلول‌دهی ریشه‌ای نسبت به روش محلول‌پاشی برگی در این تحقیق نیز به سهولت جذب و انتقال سیلیسیم از ریشه به اندام های‌هوایی برمی‌گردد.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و پراکسیداز): نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثرات جداگانه سیلیسیم و غلظت و اثر متقابل آن‌ها در سطح ۱٪ و اثر متقابل سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی در سطح ۵٪ بر فعالیت آنزیم کاتالاز تأثیر معنی‌دار داشت. سایر اثرات جداگانه و متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر روی این شاخص معنی‌دار نگردید. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۶) حاکی از آن بود که بین میانگین تیمارهای مختلف در میزان فعالیت آنزیم کاتالاز اندام‌های هوایی تفاوت معنی‌دار وجود داشت و بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در تیمارهای محلول‌دهی و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به ترتیب به میزان‌های ۰/۷۵۱ و ۰/۷۰۴ واحد در گرم وزن تر برگ مشاهده گردید، اما بین خود این دو تیمار تفاوت معنی‌دار دیده نشد. در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

بین تیمارهای میکرو نیز محلول‌دهی و محلول‌پاشی ۸۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم دارای بیشترین مقادیر فعالیت آنزیمی بودند که با بیشترین مقادیر مشاهده شده تفاوت معنی‌دار نداشتند. چنانکه نتایج نشان می‌دهند بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر میکرو و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانو به دست آمده است و این نشانگر آن است که نانوسیلیسیم در غلظت کمتر نسبت به مقیاس میکرو آن تأثیر بیشتری روی فعالیت آنزیم داشت (جدول ۶). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که هیچ کدام از اثرات جداگانه، متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورهای مورد بررسی بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار نگردید.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مشاهده گردید که محتوای رطوبت نسبی برگ و نیترات میوه تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفتند، ولی کاربرد سیلیسیم منجر به افزایش کربوهیدرات برگ و میوه و نیز نیترات برگ توت‌فرنگی شد. نتایجی که از تأثیر سیلیسیم بر رنگیزه‌های برگ به دست آمد نشان داد که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش میزان کلروفیل a، b و کل برگ گردید، ولی روی کاروتنوئیدهای برگ اثر معنی‌داری نداشت. سیلیسیم به فرم نانوذرات اثرگذاری بیشتر و با اختلاف معنی‌داری نسبت به سیلیسیم به فرم میکروذرات داشت. غلظت‌های بالاتر سیلیسیم یعنی ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر هم به شکل میکرو و هم نانو نسبت به غلظت‌های پایین‌تر یعنی ۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر اثرات بهتری بر رنگیزه‌های برگ داشت. بین دو روش محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای اختلاف معنی‌داری به لحاظ تأثیر روی رنگیزه‌های برگ مشاهده نگردید ولی با در نظر گرفتن تمامی صفات، روش محلول‌دهی ریشه‌ای بهتر از روش محلول‌پاشی برگی عمل کرد. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد ولی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز اثر معنی‌دار نداشت. به‌طورکلی جهت تولید گلخانه‌ای توت‌فرنگی در بستر کشت بدون خاک، غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به صورت محلول‌دهی ریشه‌ای قابل توصیه است.

منابع

بهتاش، ف.، طباطبایی، س ج.، ملکوتی، م ج.، سرورالدین، م ح. و اوستان، ش. (۱۳۸۹) اثر کادمیم و سیلیسیم بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی چغندر لبویی. مجله دانش کشاورزی پایدار ۲۰: ۶۷-۵۳.

پیوندی، م.، پرنده، ه. و میرزا، م. (۱۳۹۰) مقایسه تأثیر نانوکلات آهن با کلات آهن بر پارامترهای رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ریحان *Ocimum basilicum*. مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی- ملکولی ۱: ۹۹-۸۹.

ترابی، ف.، مجد، ا.، انتشاری، ش. و آیریان، س. (۱۳۹۲) بررسی تأثیر سیلیکون بر برخی پارامترهای آناتومیکی و فیزیولوژیکی گیاه گاوزبان دارویی (*Borago officinalis* L.) در شرایط کشت هیدروپونیک. مجله سلول و بافت ۴: ۲۸۵-۲۷۵.

جلیلی مرندی، ر. (۱۳۸۶) میوه‌های ریز. چاپ دوم. انتشارات جهاد دانشگاهی ارومیه.

حقیقی، م. و مظفریان، م. (۱۳۹۳) بررسی تغییرات رویشی، مورفولوژیک و فتوسنتزی گوجه‌فرنگی در اثر سیلیسیم و نانوسیلیسیم افزوده شده به محلول غذایی. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۱۹: ۴۷-۳۷.

خوش‌گفتارمنش، ا. ح. (۱۳۸۶) مبانی تغذیه گیاهی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

خیام‌نکویی، س. م.، بی‌آزار، ا. و صالحی‌جوزانی، غ. (۱۳۸۹) فناوری نانو در علوم کشاورزی. چاپ اول، انتشارات پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی.

سعادتیان، ب. و کافی، م. (۱۳۹۴) بررسی نقش تغذیه‌ای نانوذرات سیلیسیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و تولید ریزغده سیب‌زمینی. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی ۲۲: ۱۹۰-۱۷۳.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

فاطمی، ل. س.، طباطبایی، س. ج. و فلاحی، ا. (۱۳۸۸ ب) اثر سیلیسیم بر رشد و عملکرد گیاه توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری. مجله علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳: ۹۵-۸۸.

فاطمی، ل. س.، طباطبایی، س. ج. و فلاحی، ا. (۱۳۸۸ الف) تأثیر سیلیسیم بر شدت فتوسنتز و غلظت عناصر غذایی گیاه توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری. مجله دانش کشاورزی پایدار ۱۹: ۱۱۸-۱۰۷.

محقق، پ.، شیروانی، م. و قاسمی، س. (۱۳۸۹) تأثیر کاربرد سیلیسیم بر رشد و عملکرد دو رقم خیار در سیستم هیدروپونیک. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱: ۳۹-۳۵.

نظافتی، ز. و آروین، م. ج. (۱۳۹۲) تأثیر کاربرد برگی سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم بر ویژگی‌های رشد و عملکرد محصول گیاهان طالبی. اولین همایش ملی الکترونیکی مباحث نوین در علوم باغبانی. دانشگاه جهرم، انجمن علمی مهندسی علوم باغبانی.

هاشمی دهکردی، ا. (۱۳۹۱) تأثیر کاربرد نانو ذرات آناتاز (TiO_2) بر برخی از خصوصیات مؤثر در کمیت و کیفیت میوه گیاه توت‌فرنگی در شرایط کشت هیدروپونیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه علوم باغبانی. دانشگاه شهید چمران اهواز.

یوسفی، ر. و اثنی‌عشری، م. (۱۳۹۹) تأثیر میکرو و نانوذرات سیلیسیم بر رشد و عملکرد توت‌فرنگی در کشت هیدروپونیک. مجله علوم باغبانی ایران ۵۱: ۶۰۷-۵۹۷.

Adatia, M. H. and Besford, R. T. (1986) The effects of silicon on Cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. Annals of Botany 58: 343-351.

Aebi, H. (1984) Catalase in vitro. Methods in Enzymology 105: 121-126.

Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota, F. and Kaufman, P. B. (1993) Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice plant (*Oryza stiva*). Crop Production and Improvement Technology 34: 225-234.

Al-aghabary, K., Zhu, Z. and Shi, Q. (2005) Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. Journal of Plant Nutrition 27: 2101-2115.

Anonymous. (2009) Nano technology in agriculture. Journal of Agriculture and Technology 114: 54-65.

Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M. and Barker, A. V. (2021) Effects of nanosilicon dioxide on leaf anatomy, chlorophyll fluorescence, and mineral element composition of strawberry under salinity stress, Journal of Plant Nutrition 44: 3005-3019.

Avestan, S., Ghasemnezhad, M., Esfahani, M. and Byrt, C. S. (2019) Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. Agronomy 246: 1-17.

Bao-shan, L., Shao-qi, D., Chun-hui, L., Li-jun, F., Shu-chun, Q. and Min, Y. (2004) Effects of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of *Changbai larch* seedlings. Journal of Forestry research 15: 138-140.

Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L. E. and Youngs, V. L. (1975) Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. Communications in Soil Science and Plant Analysis 6: 71-80.

Cherif, M. and Belanger, R. R. (1992) Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress *Pythium ultimum* on long English cucumber. Journal of Plant Diseases 76: 1008-1011.

Corrales, I., Poschenrieder, C. and Barcello, J. (1997) Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. Plant and Soil 199: 203-209.

Debnath, S. C. and Teixeira da Silva, J. A. (2007) Strawberry culture in vitro: Applications in genetic transformation and biotechnology. Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology 1: 1-12.

Elawad, S. H., Gascho, G. J. and Street, J. J. (1982) Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. Agronomy Journal 74: 481-484.

Fauteux, F., Chain, F., Belzile, F., Menzies, J. G. and Belanger, R. R. (2006) The protective role of silicon in the Arabidopsis-powdery mildew pathosystem. Proceedings of the National Academy of Sciences 103: 17554-17559.

Gerdakaneh, M., Mozafarin, A. A., Khalighi, A. and Sioseh-mardah, A. (2009) The effects of carbohydrate source and concentration on somatic embryogenesis of strawberry (*Fragaria* × *ananasa* Duch.). American-Eurasian Jornal of Agriculture Environmental Science 6: 76-80.

Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J. M., Quiles, J. L., Mezzetti, B. and Battino, M. (2012) The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. Nutrition 28: 9-19.

Haghighi, M. and Pessarakli, M. (2013) Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulturae 161: 111-117.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

Haghighi, M., Afifipour, Z. and Mozafarian, M. (2012) The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. Journal of Biological and Environmental Sciences 6: 87-90.
Hansen, P. (1980) Mineral Nutrition of Fruit Trees. Butterworths, London.
Henriet, C., Draye, X., Oppitz, I., Swenn, R. and Delvaux, B. (2006) Effects, distribution and uptake of silicon in banana under controlled condition. Plant and Soil 287: 359-374.
Herzog, V. and Fahimi, H. (1973) Determination of the activity of peroxidase. Annual Review of Biochemistry 55: 554-562.
Jian-peng, F., Qing-hua, S. and Xiu-feng, W. (2009) Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese. Agricultural Science in China 8: 40-50.
Kaya, C., Tuna, L. and Higgs, D. (2006) Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress condition. Journal of Plant Nutrition 29: 1469-1480.
Lee, J., Jong, P. and Kyeong, S. U. (2000) Effect of potassium silicate on growth, photosynthesis, and inorganic ion absorbtion in cucumber hydroponics. Journal of Korean Society for Horticultural Science 41: 480-484.
Lee, J. W., Kim, Y. C., Kim, K. Y., Yun, H. K. and Seo, T. C. (2002) Influence of silicate application on the sucrose synthetic enzyme activity of tomato in perlite media culture. Acta Horticulturae 633: 259-262.
Liang, Y. C. (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barely under salt stress. Plant Physiology 29: 217-224.
Liu, H. X., Guo, Z. G., Guo, X. H., Zhou, X. R., Hui, W. S. and Wang, K. Y. (2009) Effect of addition of silicon on water use efficiency and yield components of alfalfa under the different soil moisture. Acta Ecologica Sinica 29: 3075-3080.
Ma, C. C., Li, Q. F., Gao, Y. B. and Xin, T. R. (2004) Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. Soil Science and Plant Nutrition 50: 623-632.
Ma, J. F. and Takahashi, E. (2002) Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier, The Netherlands.
Ma, J. F., Yamaji, N. and Mitani-Ueno, N. (2011) Review: Transport of silicon from roots to panicles in plants. Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences 87: 377-85.
Marschner, H. (1995) Mineral nutrition of higher plant. Academic Press, London.
Miao, B. H., Han, X. G. and Zhang, W. H. (2010) The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium deficient medium. Annals of Botany 105: 967-973.
Miyake, Y. and Takahashi, E. (1986) Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition 32: 321-326.
Moldes, C. A., de Lima Filho, O. F., Camina, J. M., Kiriachek, S. G., Molas, M. L. and Tsai, S. M. (2013) Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. Journal of Agricultal and Food Chemistry 61: 11243-11249.
Moussa, H. R. (2006) Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). International Journal of Agriculture and Biology 8: 293-297.
Neocleous, D. (2015) Grafting and silicon improve photosynthesis and nitrate absorption in melon (*Cucumis melo* L.) plants. Journal of Agricultural Science and Technology 17: 1815-1824.
Paquin, R. and Lechasseur, P. (1979) Observation sur une method de dosage de la praline liber danles extraits de plants. Canadian Journal of Botany 57: 1851-1854.
Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E. and Li, J. (2010) Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. Journal of Plant Physiology 167: 1248-1252.
Shi, G., Cai, Q., Liu, C. and Wu, L. (2010) Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. Plant Growth Regulators 61: 45-52.
Song, A., Zhaojun, L., Zhang, J., Xue, G., Fan, F. and Liang, Y. (2009) Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity. Journal of Hazard Materials 172: 74-83.
Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V. and Kannan, N. (2012) Growth and physiological responses of maize *(Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. Journal of Nanoparticle Research 1294: 1-14.
Tale Ahmad, S. and Haddad, R. (2011) Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding 47: 17-27.
Talgar, S., Gu, J. X., Xu, C. S., Yang, Z., Zhao, Q., Liu, Y. X. and Liu, Y. C. (2011) Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study. Nanotoxicology 1: 1-8.
Wang, S. Y. and Galletta, G. J. (1998) Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. Journal of Plant Nutrition 21: 157-167.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

Wang, X. D., Chao, O. Y., Fan, Z. R., Gao, S., Chen, F. and Tang, L. (2010) Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. Journal of Animal and Plant Sciences 6: 700-708.

Yamasaki, S. and Dillenburg, L. C. (1999) Measurements of leaf relative water content in araucaria angustifolia. Brazilian Journal of Plant Physiology 11: 69-75.

Yang, Ch., Chang, M., Yin, K. W., Hung, M. H. (1998) Methods for the determination of the chlorophylls and their derivatives. Taiwania 43: 116-122.

Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N. S. and Prabu, P. (2011) Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). International Journal of Green Nanotechnology 3: 180-190.

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

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]

Physiological responses of strawberry plant to the nutritional application of silicon micro- and nanoparticles

Rahman Yousefi[1*] and Mahmood Esna-ashari[2]

[1] Member of Academic Staff in Date Palm and Tropical Fruits Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran

[2] Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

(Received: 01/08/2022, Accepted: 30/08/2022)

Abstract

Silicon (Si) is regarded as one of the beneficial nutrient elements for most plants. Si increases the yield and crop quality and plays an important role in plant resistance against the environmental stresses. With science development and nanoparticle production, their application in different industry such as agriculture has gained much atlention. This research was conducted in a factorial experiment based on a completely randomized design with 3 replications and 4 plants in each replicate. Foliar spray and root application were carried out using 20, 40, 60 and 80 mg L^{-1} micro- and nano-SiO_2 at two growth stages (the first stage in 4-5 leaves of plants and second stage two weeks after first stage). Physiological characteristics including leaf relative water content, leaf and fruit carbohydrate, leaf and fruit nitrate, chlorophyll (a, b, total) and carotenoied and activity of catalase and peroxidase were measured. The results showed that applied treatments did not have any significant effect on leaf relative water content and fruit nitrate, but application of silicon increased significantly leaf and fruit carbohydrate as well as leaf nitrate. Silicon, particularly at the nanoscale, led to a significant increase of chlorophyll a, b and total, but had no significant effect on the amount of carotenoid. Application of silicon led to a significant increase of catalase activity, but had no significant effect on the activity of peroxidase. Totally, application of nano-silicon in comparison with the control and mico-silicon had the positive effects on physiological characteristics of strawberry plants. Overall, in hydroponic culture and greenhouse production of strawberries, according to the results of this research, the application of 60 mg L^{-1} nano-SiO_2 through the root apply method is recommended.

Keywords: Relative water content, Chlorophyll, Carotenoid, Catalase, Peroxidase

Corresponding author, Email: r.yousefi66@areeo.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1402.12.53.23.1]