تأثیر میکرو و نانوذرات سیلیسیم بر غظت عناصر پُرمصرف، کم‌مصرف و میزان سیلیسیم گیاه توت‌فرنگی در شرایط کشت بدون خاک

رحمان یوسفی[۱] و محمود اثنی‌عشری[۱*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸)

چکیده

سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید برای اکثر گیاهان محسوب می‌شود. این عنصر، رشد و عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشد. هدف این مطالعه، بررسی تأثیر محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای میکرو و نانوذرات دی‌اکسید-سیلیسیم (SiO_2) بر غلظت عناصر پُرمصرف، کم‌مصرف و میزان سیلیسیم در اندام هوایی گیاه توت‌فرنگی بود. گیاهان توت‌فرنگی در مرحله ۴-۵ برگی و دو هفته پس از آن تحت تأثیر غلظت‌های مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) میکرو و نانوسیلیسیم قرار گرفتند. در پایان دوره رشد چهارماهه، غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی گیاه اندازه‌گیری و سپس تجزیه و تحلیل آماری شدند. نتایج نشان داد که میکرو و نانوسیلیسیم در غلظت‌های زیاد باعث کاهش غلظت نیتروژن و فسفر شدند. کاربرد میکرو و نانوسیلیسیم، غلظت پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و سیلیسیم اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد، اما بر میزان روی و مس تأثیر معنی‌داری نداشت. غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم در روش محلول‌دهی ریشه‌ای، نسبت به دیگر تیمارها و همچنین شاهد، در مورد بیشتر صفات مطالعه شده، نتایج بهتری نشان داد و می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کشت گلخانه‌ای توت‌فرنگی مطرح باشد. در مجموع، نانوسیلیسیم نسبت به میکروسیلیسیم و همچنین روش محلول‌دهی ریشه‌ای نسبت به محلول‌پاشی برگی، نتایج بهتری داشته‌اند.

کلمات کلیدی: عناصر غذایی، محلول‌پاشی برگی، محلول‌دهی ریشه‌ای، میکروذرات، نانوذرات

مقدمه

توت‌فرنگی، با نام علمی *Fragaria ananassa* Duch.، متعلق به تیره Rosaceae می‌باشد. توت‌فرنگی آناناسی به عنوان یک ریزمیوه، گونه‌ای اکتاپلوئید بوده و دارای اهمیت زیادی در سرتاسر جهان می‌باشد (۲۵). میوه توت‌فرنگی به دلیل داشتن عطر، طعم و محتویات سرشار از ویتامین و نیز برخورداری از آنتی‌اکسیدان‌ها، جایگاه بسیار خوبی در رژیم غذایی میلیون‌ها نفر در جهان پیدا کرده و به لحاظ اقتصادی و تجاری مهم می‌باشد (۲۷). یکی از عوامل مؤثر بر رشد و عملکرد توت‌فرنگی، تغذیه بهینه آن با عناصر غذایی مختلف می‌باشد.

سیلیسیم، دومین عنصر فراوان پوسته زمین (۳۱٪) بعد از اکسیژن (۴۹٪) است (۳۹ و ۱۸) که نقش آن در بیولوژی کمتر

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.esnaashari@basu.ac.ir

درک شده و تلاش برای درک ارتباط سیلیسیم با متابولیسم و فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه در حال انجام است. با وجود فراوانی سیلیسیم در پوسته زمین، اکثر فرم‌های آن قابل جذب برای گیاه نیست. در تولیدات گلخانه‌ای نیز که از محیط‌های کشت بدون خاک و محلول‌های غذایی متداول استفاده می‌شود، سیلیسیم موجود نمی‌باشد. بدین ترتیب، کاربرد سیلیسیم در این گونه کشت‌ها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (۴۷). این عنصر در افزایش کارآیی مصرف آب و همچنین بر رشد و عملکرد گیاه اثرهای مثبتی دارد (۲۴ و ۳۷) و 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 گیاه خیار می‌شود (۸). همچنین، وجود سیلیسیم جهت تولید آنزیم روبیسکو (Rubisco) در برگ لازم است. این آنزیم کارآیی تثبیت دی‌اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش داده و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (۱۴). فاطمی و همکاران (۱۲) اثر سیلیسیم را بر رشد و عملکرد گیاه توت‌فرنگی رقم سلوا در شرایط تنش شوری در یک دوره چهار ماهه از کاشت تا برداشت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که شاخص‌های عملکرد و محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش شوری کاهش و با کاربرد سیلیسیم به طور معنی‌داری افزایش یافت. میاکی و همکاران (۴۲) اثر سیلیسیم معمول (SiO_2) با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر را بر رشد و عملکرد توت‌فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که سیلیسیم نقش مهمی در گل‌دهی گیاه توت‌فرنگی ایفامی‌کند. وزن خشک گیاه، مقدار تولید میوه و عملکرد کلی میوه نیز در گیاهان دریافت‌کننده سیلیسیم، نسبت به شاهد، بیشتر بوده است. در برگ گیاهان دریافت‌کننده سیلیسیم، نسبت به شاهد، مقدار سیلیسیم و کلسیم بیشتر و مقدار فسفر و نیتروژن کمتری دیده شد. بر اساس نتایج آنها، سیلیسیم به طور قابل توجهی روی رشد و عملکرد میوه توت‌فرنگی اثر گذاشت. وانگ و همکاران (۴۸) اثر محلول‌پاشی برگی سیلیسیم را بر آلودگی کپک پودری و تغییرات متابولیک توت‌فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، شدت آلودگی کپک پودری در گیاهان تیمار شده با منابع سیلیسیمی کمتر بود و رشد گیاهان و میزان کلروفیل افزایش یافت. سطوح سیتریک اسید و مالیک اسید افزایش و میزان فروکتوز، گلوکز، ساکارز و میواینوزیتول کاهش یافت. در پژوهش بیات و همکاران (۴) محلول‌پاشی سیلیسیم باعث افزایش گل‌دهی، قطر گل، طول دمگل، سطح برگ و میزان فتوسنتز گیاه اطلسی شده است. صدیقی و ال- وهیبی (۴۶) در تحقیقی، تأثیر کاربرد نانو- دی‌اکسید سیلیسیم ($Nano\text{-}SiO_2$) را بر جوانه‌زنی بذرهای گوجه‌فرنگی مورد مطالعه قرار دادند. کاربرد نانو- دی‌اکسید سیلیسیم به طور معنی‌داری شاخص‌های جوانه‌زنی این بذرها را افزایش داد. حقیقی و پسرکلی (۲۹) اثر نانوسیلیس را بر جوانه‌زنی بذرهای گوجه‌فرنگی، تحت سطوح مختلف شوری، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها اثر بارز نانوسیلیس در برطرف کردن آثار تنش شوری بر جوانه‌زنی بذرهای گوجه‌فرنگی و بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی آنها در شرایط تنش شوری را نشان داد.

کاربرد نوظهور فناوری نانو در علوم گیاهی یکی از موضوعات روز دنیاست که تحقیقات در این حیطه در آغاز راه و رو به گسترش بوده و هنوز بسیاری از اثرها و کارکردهای نانومواد بر مکانیسم‌های فیزیولوژیک و متابولیک گیاهان ناشناخته می‌باشد. استفاده از فناوری نانو در دهه‌های اخیر توانسته است تحولات وسیعی در تمام زمینه‌های علوم ایجاد نماید (۶) و علم کشاورزی نیز از این قاعده مستثنی نیست (۱۹). یکی از مهمترین کاربردهای فناوری نانو در زمینه‌ها و گرایش‌های مختلف کشاورزی، استفاده از نانوذرات و نانوکودها برای تغذیه گیاهان، به خاطر نفوذ سریع و راحت آنان به درون غشای سلولی می‌باشد. استفاده از نانوذرات منجر به افزایش کارآیی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن آثار منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد عنصر می‌شود (۷). از آنجایی‌که اکثر فرایندهای رشد و نموی،

فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان تحت تأثیر غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و پیکره رویشی گیاه می‌باشد، لذا، هدف تحقیق حاضر، بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف عنصر سیلیسیم به دو فرم میکرو و نانو و با دو روش کاربرد محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای، بر غلظت عناصر پرمصرف، کم‌مصرف و نیز میزان سیلیسیم در اندام هوایی گیاه توت‌فرنگی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و آماده‌سازی تیمارها

این آزمایش در گلخانه و آزمایشگاه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، در سال ۱۳۹۳ اجرا گردید. نشاهای گلدانی توت‌فرنگی رقم کامارزا (Camarosa) از شرکت آشیان سبز عماد در شهر هشتگرد استان البرز تهیه و پس از انتقال به گلخانه تحقیقاتی دانشگاه در کیسه‌های کشت پلاستیکی (با ابعاد ۴۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۲۵ سانتی‌متر قطر دهانه) محتوی مخلوطی از کوکوپیت و پرلایت به نسبت ۱:۱ کشت شدند. گیاهان توت‌فرنگی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و تحت شرایط نور طبیعی پرورش یافتند. از محلول غذایی هوگلند کامل به میزان ۲۵۰ میلی‌لیتر در هر گلدان و ۳ بار در هفته برای آبیاری و تغذیه گیاهان تا پایان دوره آزمایش استفاده شد. قطر ذرات میکروسیلیسیم ($Micro\text{-}SiO_2$) و نانوسیلیسیم ($Nano\text{-}SiO_2$) به ترتیب معادل ۰/۵-۱۰ میکرومتر و ۱۰-۲۰ 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 نانوسیلیسیم، سوسپانسیون اولیه این ترکیبات قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه داخل دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک (باندلین، یووی ۳۱۰۰) قرار داده شد تا سوسپانسیون یکنواختی از آن‌ها به دست آمد که بلافاصله برای اعمال تیمارها استفاده شد.

طرح آزمایشی، اعمال تیمارها و نمونه‌برداری

این مطالعه به صورت یک آزمایش فاکتوریل، دارای سه فاکتور بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و در هر تکرار چهار گیاه، اجرا گردید. فاکتور اول نوع دی‌اکسید سیلیسیم (دو مقیاس میکرو و نانو) به شرحی که قبلاً گفته شد؛ فاکتور دوم غلظت به کاربرده شده دی‌اکسید سیلیسیم در چهار سطح (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) و فاکتور سوم روش کاربرد در دو سطح (محلول‌پاشی برگی و محلول‌دهی ریشه‌ای) بود. دو تیمار شاهد (محلول‌پاشی برگی آب مقطر و محلول‌دهی ریشه‌ای فاقد سیلیسیم) نیز برای مقایسه با سایر تیمارها در نظر گرفته شد. در مجموع، ۱۸ ترکیب تیماری، با احتساب شاهد، به کار رفت که هر ترکیب تیماری در سه تکرار و در هر تکرار ۴ گلدان (برای هر تیمار ۱۲ گیاه) بود. با این احتساب، تعداد کل گیاهان ۲۱۶ عدد گیاه بود که هر کدام در یک گلدان مستقر شد. اعمال تیمارها در دو مرحله صورت گرفت. مرحله اول در زمان ۴-۵ برگی و مرحله دوم دو هفته پس از پایان اعمال تیمار مرحله اول بود. هر کدام از مراحل اعمال تیمار یک هفته طول می‌کشید. بدین ترتیب که در طول یک هفته، تیمارها سه مرتبه، با فاصله یک روز در میان، به صورت محلول‌پاشی برگی و یا محلول‌دهی ریشه‌ای تکرار شدند. در مجموع، برای هر تیمار در دو مرحله شش مرتبه اعمال تیمار به صورت محلول‌پاشی برگی و یا محلول‌دهی ریشه‌ای صورت گرفت. در پایان دوره آزمایش (۴ ماه) میزان غلظت عناصر پرمصرف شامل نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، غلظت عناصر کم‌مصرف شامل آهن، روی، مس و منگنز و نیز غلظت سیلیسیم در اندام هوایی گیاهان (مجموعه کامل برگ، دمبرگ و طوقه گیاه) به شرح زیر اندازه‌گیری شد.

سنجش نیتروژن کل

بدین منظور، ۰/۳ گرم از پودر خشک‌شده گیاهی، با استفاده از اسید سولفوریک، اسید سالیسیلیک و آب‌اکسیژنه هضم گردید و عصاره گیاهی به دست آمد (۲). سپس، میزان نیتروژن کل در عناصره حاصله با استفاده از دستگاه کجلدال (گرهارد تمام اتوماتیک) اندازه‌گیری و در نهایت بر حسب درصد گزارش گردید.

سنجش فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز

به منظور اندازه‌گیری میزان عناصر ذکر شده، ابتدا هضم تر نمونه‌های گیاهی و عصاره‌گیری از آن‌ها با استفاده از اسید نیتریک غلیظ و پراکسید هیدروژن صورت گرفت (۱۶). بدین منظور، نمونه‌های گیاهی در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت خشک و سپس آسیاب و به طور کامل پودر شدند. یک گرم از پودر گیاهی به‌دست آمده با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین و به داخل لوله‌های آزمایشی منتقل گردید. سپس، مقدار ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ (۶۵٪) به هر کدام از نمونه‌ها اضافه گردید و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در بن‌ماری قرار گرفتند. بعد از خارج کردن نمونه‌ها و خنک شدن آنان تا دمای آزمایشگاه، ۲/۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۲۰٪ به هر کدام از نمونه‌ها اضافه شد. پس از انجام واکنش و سرد شدن، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شده و به حجم ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شدند. سپس، میزان فسفر در نمونه‌های گیاهی به روش تشکیل کمپلکس فسفووانادومولیبدات در طول موج ۴۳۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (واریان، کری ۱۰۰)، پتاسیم به روش نشر شعله‌ای با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر (۴۰۵ جی)، میزان کلسیم با استفاده از دستگاه اسپکترومتر جذب اتمی (پرکین ۴۰۰) و میزان منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز با استفاده از دستگاه اسپکترومتر جذب اتمی (واریان، اسپکترا ۲۲۰) اندازه‌گیری شدند.

سنجش سیلیسیم

میزان سیلیسیم اندام هوایی به روش هضم نمونه گیاهی توسط اتوکلاو و کالریمتری با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (واریان، کری ۱۰۰) در طول موج ۶۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۴۳).

آنالیز آماری

داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 تجزیه و تحلیل آماری شدند و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ استفاده گردید.

نتایج و بحث

نیتروژن کل

نیتروژن بخشی از پروتئین و جزء مهم پروتوپلاسم می‌باشد و بخش عمده‌ای از آنزیم‌ها و کاتالیزورهای افزایش‌دهنده سرعت فرایندهای متابولیسمی گیاه را نیتروژن تشکیل می‌دهد (۱۵). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثرهای جداگانه سیلیسیم، غلظت و اثر متقابل آنها و نیز اثر متقابل سیلیسیم و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۵٪ بر میزان نیتروژن اندام هوایی معنی‌دار گردید. اثر روش کاربرد و اثر متقابل غلظت و روش کاربرد در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نگردید.

بیشترین میزان نیتروژن اندام هوایی در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر میکروسیلیسیم به دست آمد که اختلاف آن با شاهد و دیگر تیمارها در سطح ۵٪ معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش سطح غلظت سیلیسیم در هر دو نوع میکرو و نانوسیلیسیم، کاهش میزان نیتروژن در اندام هوایی مشاهده گردید، به طوری که بیشترین میزان نیتروژن در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و کمترین آن در غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید (جدول ۳). با بررسی اثرهای جداگانه فاکتورها مشخص گردید که میزان نیتروژن در کاربرد میکروسیلیسیم بیشتر از نانوسیلیسیم بوده و این اختلاف به لحاظ آماری در سطح ۵٪ معنی‌دار می‌باشد. بین نوع روش کاربرد محلول‌پاشی و محلول‌دهی سیلیسیم اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۳). اعمال غلظت‌های بالای میکرو و نانوسیلیسیم (۸۰ میلی‌گرم در لیتر) باعث کاهش معنی‌دار میزان نیتروژن نسبت به سایر تیمارها و شاهد گردیده است و به لحاظ میزان نیتروژن اندام هوایی، اعمال غلظت زیاد سیلیسیم (۸۰

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر غلظت، روش کاربرد و نوع سیلیسیم بر برخی عناصر غذایی در اندام هوایی توت‌فرنگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم
سیلیسیم	۱	۰/۳۸۴**	۰/۲۴۰*	۲۱/۱۷**	۱۵/۲۴**	۱۱/۳۷**
غلظت	۳	۰/۸۳۵**	۲/۵۰۹**	۱۱/۰۴**	۲۸/۴۵**	۴/۶۵۴**
سیلیسیم×غلظت	۳	۰/۲۳۳**	۰/۲۰۳*	۱۵/۷۶**	۲/۳۱۴^{ns}	۰/۷۳۶**
روش کاربرد	۱	۰/۰۰۹^{ns}	۰/۳۶۷**	۱۸/۵۶**	۰/۴۳۸^{ns}	۴/۰۱۱**
سیلیسیم×روش کاربرد	۱	۰/۳۳۹**	۰/۰۴۰^{ns}	۸/۹۶۶**	۳/۵۶۸^{ns}	۱/۴۰۷**
غلظت×روش کاربرد	۳	۰/۰۱۶^{ns}	۰/۰۴۰^{ns}	۰/۱۳۳^{ns}	۳/۸۱۷*	۰/۴۶۸*
سیلیسیم×غلظت×روش کاربرد	۳	۰/۰۵۶*	۰/۲۴۳**	۴/۷۲۷**	۷/۷۳۱**	۰/۶۶۹*
خطا	۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۵۷	۰/۸۲۱	۱/۳۷۵	۰/۱۸۳
ضریب تغییرات (٪)	–	۶/۱۲۰	۹/۲۰۰	۱۰/۸۹	۱۲/۱۷	۶/۸۵۰

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول ۲. اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم اندام هوایی توت‌فرنگی

تیمار	mg/L	نیتروژن (٪)		فسفر (mg/g DW)		پتاسیم (mg/g DW)		کلسیم (mg/g DW)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۲/۰۸۰de	۲/۰۵۰de	۳/۰۶۰a–c	۲/۹۳۰a–c	۵/۵۲۰gh	۵/۳۵۰h	۸/۶۴۰de	۸/۷۶۰c–e
میکرو سیلیسیم	۲۰	۲/۶۸۰a	۲/۳۶۰b	۳/۰۰۰a–c	۲/۸۰۰b–d	۶/۵۳۰gh	۸/۳۸۰ed	۹/۶۶۰b-e	۸/۲۰۰de
	۴۰	۲/۲۵۰b–d	۲/۰۷۰de	۳/۱۳۰ab	۳/۰۶۰a–c	۸/۷۲۰cd	۹/۰۶۰b–d	۸/۲۶۰de	۸/۵۶۰de
	۶۰	۲/۳۹۰b	۲/۲۵۰b–d	۲/۲۶۰e-h	۲/۶۶۰c–e	۶/۳۶۰gh	۶/۸۷۰e-h	۹/۹۵۰b–d	۱۲/۰۵ab
	۸۰	۱/۶۸۰f	۱/۷۶۰f	۲/۰۶۰f–h	۲/۴۰۰d–f	۸/۲۲۰d–f	۷/۰۳۰e–g	۹/۸۵۰b-e	۵/۹۷۰f
نانوسیلیسیم	۲۰	۲/۱۱۰cd	۲/۳۲۰bc	۳/۰۰۰a–c	۳/۲۶۰a	۶/۱۹۰gh	۷/۰۳۰e–g	۱۱/۰۸a–c	۱۱/۴۴ab
	۴۰	۲/۰۲۰de	۲/۴۲۰b	۲/۴۶۰d–f	۳/۱۳۰ab	۸/۷۲۰cd	۱۰/۲۴bc	۹/۸۲۰b-e	۸/۶۷۰de
	۶۰	۱/۷۵۰f	۱/۸۶۰ef	۲/۲۶۰e-h	۲/۳۳۰e–g	۱۰/۰۷bc	۱۲/۲۶a	۱۱/۷۳ab	۱۲/۴۸a
	۸۰	۱/۷۳۰f	۱/۸۰۰f	۱/۹۳۰gh	۱/۸۶۰h	۶/۷۰۰f–h	۱۰/۵۸b	۷/۴۲۰ef	۸/۸۸۰c–e

حروف مشابه در هر دو ستون مربوط به هر صفت، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

میلی‌گرم در لیتر) توصیه نمی‌شود. در این مورد، کاربرد غلظت‌های کمتر (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) سیلیسیم دارای اثر بهتری نسبت به شاهد و سایر تیمارها بوده است (جدول ۲). در تحقیق پیوست و همکاران (۵)، سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر محتوای نیتروژن کاهو ندارد. لیو و همکاران (۳۵) گزارش دادند که کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر میزان نیتروژن در یونجه ندرد. میاکی و تاکاهاشی (۴۲) گزارش دادند که گیاهان توت‌فرنگی رشد کرده در محیط کشت فاقد سیلیسیم نسبت به گیاهانی که در محیط کشت دارای سیلیسیم رشد کردند دارای میزان نیتروژن کل بیشتری در برگ، طوقه و ریشه بودند و کاربرد سیلیسیم باعث کاهش میزان نیتروژن در این اندام‌ها گردید و علت آن نیز نامعلوم است.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرهای جداگانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر صفات مورد بررسی

فاکتور	سطح	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	آهن	روی	مس	منگنز	سیلیسیم
		(٪)	(mg/g DW)				(µg/g DW)				(٪)
سیلیسیم	میکرو	۲/۱۸۰a	۲/۶۷۰a	۷/۶۵۰b	۹/۰۶۰b	۵/۷۶۰b	۱۰۷/۲b	۳۴/۲۰b	۸/۳۲۰b	۱۴/۷۷b	۰/۳۱۰b
	نانو	۲/۰۰۰b	۲/۵۳۰b	۸/۹۷۰a	۱۰/۱۹a	۶/۷۴۰a	۱۱۲/۸a	۳۶/۸۳a	۹/۳۶۰a	۱۶/۲۲a	۰/۳۸۰a
غلظت (mg/L)	۲۰	۲/۳۷۰a	۳/۰۱۰a	۷/۰۳۰c	۱۰/۰۹b	۶/۱۱۰b	۱۰۰/۵b	۳۳/۱۵b	۸/۶۰۰a	۱۲/۲۹c	۰/۲۶۰c
	۴۰	۲/۱۹۰b	۲/۹۵۰a	۹/۱۹۰a	۸/۸۳۰c	۵/۷۸۰b	۹۶/۶۲b	۳۳/۸۸b	۸/۵۸۰a	۱۵/۲۷b	۰/۳۵۰b
	۶۰	۲/۰۶۰c	۲/۳۸۰b	۸/۸۹۰a	۱۱/۵۵a	۷/۱۶۰a	۱۲۴/۱a	۳۶/۹۹a	۹/۳۲۰a	۱۸/۰۳a	۰/۴۱۰a
	۸۰	۱/۷۴۰d	۲/۰۶۰c	۸/۱۳۰b	۸/۰۳۰c	۵/۹۴۰b	۱۱۸/۹a	۳۸/۰۶a	۸/۸۵۰a	۱۶/۴۰b	۰/۳۴۰b
روش کاربرد	محلول‌پاشی	۲/۰۸۰a	۲/۵۱۰b	۷/۶۹۰b	۹/۷۲۰a	۵/۹۶۰b	۱۱۱/۰a	۳۴/۸۰a	۸/۵۹۰a	۱۴/۹۰b	۰/۳۲۰b
	محلول‌دهی	۲/۱۰۰a	۲/۶۹۰a	۸/۹۳۰a	۹/۵۳۰a	۶/۵۴۰a	۱۰۹/۱a	۳۶/۲۴a	۹/۰۸۰a	۱۶/۰۹a	۰/۳۶۰a

در هر ستون، میانگین‌های با حروف مشابه، مربوط به هر فاکتور جداگانه، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

نتایج این آزمایش نیز با نتایج آنان مطابقت دارد. گویا یک ارتباط منفی بین اعمال سیلیسیم و غلظت نیتروژن و بالعکس اعمال نیتروژن و غلظت سیلیسیم در گیاهان وجود دارد. چنانکه این ارتباط منفی در مطالعه موروزوکا و همکاران (۴۴) در گیاه گندم مشاهد شد و آنها مشاهده کردند که با افزایش غلظت کاربرد نیتروژن، میزان سیلیسیم برگ کاهش پیدا کرد. آنها این ارتباط منفی را به ژن‌هایی که در جذب این عناصر از محیط ریشه فعال هستند ربط دادند و بیان کردند که نیتروژن باعث کاهش بیان ژن Lsi1، که یک ژن آکواپورین و مسئول جذب و انتقال سیلیسیم از ریشه به اندام هوایی است، می‌شود. در مجموع، یک ارتباط منفی بین کاربرد سیلیسیم و غلظت نیتروژن در این آزمایش نیز مشاهده گردید که شاید علت آن به بیان ژن‌های درگیر در جذب و انتقال این عناصر برگردد.

فسفر

فسفر، ماده ساختمانی DNA و RNA بوده و در غشاهای فسفولیپیدی به عنوان پل ملکولی عمل می‌نماید. از وظایف فسفر در گیاه می‌توان به ایجاد مکانیسم انتقال انرژی و نیز نقش تنظیم‌کنندگی در بسیاری از فرایندهای آنزیمی اشاره کرد (۱۱).

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) اثر سیلیسیم و اثر متقابل سیلیسیم و غلظت در سطح احتمال ۵٪ و اثر غلظت، روش کاربرد و اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ بر میزان فسفر اندام هوایی معنی‌دار گردید. سایر اثرهای متقابل فاکتورها در هیچیک از سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نشدند. بیشترین میزان فسفر اندام هوایی در تیمار محلول‌دهی ریشه‌ای ۲۰ و به دنبال آن ۴۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به دست آمد. ولی این افزایش با تیمار شاهد اختلاف معنی‌دار نداشته است (جدول ۲). اعمال غلظت‌های زیاد (۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) در هر دو نوع میکرو و نانوسیلیسیم باعث کاهش معنی‌دار فسفر اندام هوایی نسبت به شاهد و غلظت‌های کمتر (۲۰ و ۴۰ میلی‌گرم در لیتر) گردید. میزان فسفر در روش کاربرد محلول‌دهی بیشتر از محلول‌پاشی بوده و این اختلاف در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده است. بین نوع سیلیسیم نیز اختلاف معنی‌دار بود و میزان فسفر در نوع میکرو بیشتر از نانوسیلیسیم بوده است (جدول ۳). نتایج این آزمایش با نتایج میاکی و تاکاهاشی (۴۲) که گزارش دادند اعمال سیلیسیم باعث کاهش قابل توجه و معنی‌دار جذب فسفر در طوقه و برگ توت‌فرنگی نسبت به شاهد شد، مطابقت دارد.

در تحقیق پیوست و همکاران (۵)، سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر محتوای فسفر کاهو نداشته است، ولی در غلظت‌های زیاد (۱ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم) باعث کاهش میزان فسفر نسبت به شاهد (بدون سیلیسیم) شد، که با نتایج آزمایش حاضر در یک راستا می‌باشد. مشخص شده که سیلیسیم در بسیاری از گونه‌های گیاهی در سلول‌های آندودرمی ریشه‌ها رسوب کرده که این امر باعث تشکیل موانع آپوپلاستی در برابر حرکت شعاعی فسفر در عرض ریشه‌ها می‌شود (۳۶). رسوب سیلیسیم در سلول‌های آندودرمی ریشه‌ها و یا کاهش تعرق ناشی از سیلیسیم می‌توانند از عوامل کاهش جذب فسفر توسط گیاهان از محیط کشت باشند (۳۷). کاهش جذب فسفر ناشی از رسوب سیلیسیم در ریشه، در گیاهانی مثل گوجه‌فرنگی، سویا، توت‌فرنگی و خیار مشاهده گردیده است (۳۸).

پتاسیم

پتاسیم یکی از عناصر غذایی اصلی در گیاه و فراوان‌ترین کاتیون موجود در سیتوپلاسم می‌باشد. پتاسیم مهمترین عنصر در محلول‌های غیرآلی گیاه است و نقش مهمی در کاهش پتانسیل اسمزی در مغز ریشه دارد که لازمه فشار تورگر برای سلول، انتقال شیره خام در آوند چوبی و متعادل ساختن آب گیاه است (۳۴). نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل غلظت و روش کاربرد بر میزان پتاسیم اندام هوایی معنی‌دار نشد. سایر اثرهای جداگانه و متقابل دوگانه و سه‌گانه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شدند. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار پتاسیم اندام هوایی نسبت به شاهد گردید، به طوری که بیشترین میزان پتاسیم در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم به دست آمد (جدول ۲). میزان پتاسیم در تیمار نانوسیلیسیم بیشتر از میکروسیلیسیم بوده و این اختلاف در سطح ۵٪ معنی‌دار می‌باشد (جدول ۳). بین روش کاربرد محلول‌پاشی و محلول‌دهی نیز اختلاف در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده و میزان پتاسیم در روش محلول‌دهی بیشتر بوده است (جدول ۳). در بین غلظت‌ها نیز اختلاف معنی‌دار بوده و بیشترین میزان پتاسیم در غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید (جدول ۳). به طور کلی، در خصوص میزان پتاسیم اندام هوایی، اعمال غلظت‌های بیشتر نانوسیلیسیم به روش محلول‌دهی نتایج بهتری داشته است. در این آزمایش، کاربرد سیلیسیم، به ویژه در مقیاس نانو، باعث افزایش معنی‌دار پتاسیم اندام هوایی نسبت به شاهد شد. نتایج این آزمایش مطابق با نتایج پیوست و همکاران (۵) می‌باشد که در نتایج آن‌ها کاربرد سیلیسیم همسو با افزایش محتوای پتاسیم در کاهو بود. فاطمی و همکاران (۱۳) نیز افزایش غلظت پتاسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی را در نتیجه اعمال سیلیسیم مشاهده کردند. به گونه‌ای که با افزایش غلظت سیلیسیم میزان پتاسیم اندام هوایی نیز افزایش پیدا کرد، که با نتایج این آزمایش نیز مطابقت دارد. دهقانی‌پوده (۹) نیز گزارش کردد که کاربرد سیلیسیم در شرایط بدون تنش سبب افزایش معنی‌دار جذب پتاسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی نسبت به شاهد شد. در گزارش رحیمی و کافی (۱۰) نیز افزایش معنی‌دار پتاسیم در برگ گیاه خرفه در نتیجه اعمال سیلیسیم (غلظت یک میلی‌مولار) مشاهده گردید. لیو و همکاران (۳۵) افزایش میزان پتاسیم در اندام هوایی یونجه را در نتیجه کاربرد سیلیسیم گزارش دادند. میائو و همکاران (۴۰) بیان کردند که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش غلظت پتاسیم در برگ، ساقه و ریشه گیاه سویا شده است. جذب و انتقال پتاسیم یک انتقال فعال است که در ارتباط با پمپ H^+ ATP-driven در غشای پلاسمایی می‌باشد. لیانگ (۳۱) بیان کرد که احتمالاً افزایش فعالیت پمپ H^+-ATPase غشای پلاسمایی ریشه در اثر کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه می‌شود. نتایج تحقیقات نشان داده که ارتباط نزدیکی بین سیالیت غشا و فعالیت H^+-ATPas غشای سلولی وجود دارد و سیلیسیم باعث افزایش سیالیت غشا شده و در نتیجه فعالیت H^+-ATPase افزایش می‌یابد که این اثر احتمالاً به صورت غیرمستقیم یا ثانویه است (۳۰).

کلسیم

کلسیم در حفظ ساختار و عمل غشای سلولی، استحکام دیواره سلولی، تنظیم انتخابی انتقال یون و کنترل تبادل یونی آنزیم‌های دیواره سلولی نقش مهم و ضروری ایفا می‌کند (۳۱). بر طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) مشاهده گردید که اثرهای جداگانه سیلیسیم و غلظت و نیز اثر متقابل سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۵٪ بر میزان کلسیم اندام هوایی معنی‌دار گردید. سایر اثرهای جداگانه و متقابل تیمارها در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نگردید. در خصوص میزان کلسیم اندام هوایی بین میانگین تیمارها اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ مشاهده گردید، به طوری که بیشترین میزان کلسیم در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم ملاحظه گردید (جدول ۲). کاربرد میکرو و نانوسیلیسیم با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر، به روش محلول‌دهی ریشه‌ای، نتایج بهتری به دست داد. با افزایش غلظت از ۶۰ به ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، در هر دو نوع میکرو و نانوسیلیسیم، میزان کلسیم کاهش پیدا کرد و استفاده از غلظت‌های بیشتر از ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در این خصوص توصیه نمی‌شود. افزایش مقدار کلسیم در نتیجه استفاده از سیلیسیم توسط لیانگ و همکاران (۳۲) و پیوست و همکاران (۵) گزارش شده است. میاکی و تاکاهاشی (۴۲) نیز گزارش کردند که اعمال سیلیسیم باعث افزایش میزان کلسیم در برگ، طوقه و ریشه توت‌فرنگی شده است. دهقانی‌پوده (۹) نیز گزارش کرد که سیلیسیم در شرایط بدون تنش باعث افزایش معنی‌دار کلسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی نسبت به شاهد شد. مکانیسم فیزیولوژیک اثر سیلیسیم بر جذب و انتقال کلسیم به وسیله گیاه واضح نیست. تفاوت در مدل‌های دیواره سلولزی در نتیجه ته‌نشست سیلیسیم (۲۱ و ۲۶) ممکن است عدم پراکنش محلول‌های آنیونی که کلسیم را جذب می‌کنند افزایش دهد. در نتیجه، به نظر می‌رسد که باید میزان کلسیم در بافت گیاهی افزایش یابد (۵). ارتباط بین کلسیم و سیلیسیم نیازمند مطالعه و بررسی بیشتری می‌باشد.

منیزیم

بر طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) مشاهده گردید که اثرهای جداگانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد و نیز اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و غلظت و همچنین سیلیسیم و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ و نیز اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد و سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۵٪ بر میزان منیزیم اندام هوایی معنی‌دار شد. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار منیزیم اندام هوایی نسبت به شاهد گردید. بیشترین میزان منیزیم اندام هوایی در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم ملاحظه گردید که این اختلاف به لحاظ آماری در سطح ۵٪ دارای تفاوت معنی‌دار بوده است (جدول ۴). در هر دو نوع میکرو و نانوسیلیسیم، بیشترین میزان منیزیم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر با روش محلول‌دهی ریشه‌ای مشاهده شده است (جدول ۴). با بررسی اثرهای جداگانه فاکتورها مشخص گردید که بین نوع سیلیسیم به لحاظ میکرو و نانو و همچنین بین روش کاربرد، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ وجود داشته است و در این بین نانوسیلیسیم بهتر از میکروسیلیسیم و محلول‌دهی ریشه‌ای بهتر از محلول‌پاشی برگی عمل کرده است. در بین غلظت‌های به کاربرده شده نیز بیشترین میزان منیزیم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد که اختلاف آن با دیگر غلظت‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده ولی بین خود سه غلظت دیگر تفاوت معنی‌دار نبوده است (جدول ۳). منیزیم در تنظیم ساخت پروتئین‌ها شرکت دارد (۲۱). افزایش جذب منیزیم، همراه با افزایش محتوای کلروفیل، و به دنبال آن افزایش میزان فتوسنتز در گیاه است. پیوست و همکاران (۵) گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم، افزایش منیزیم در کاهو را به دنبال داشت که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. به نظر می‌رسد که مقدار جذب منیزیم به عوامل ژنی مربوط باشد. لیانگ و همکاران (۳۳) نشان دادند که تغذیه بهینه سیلیسیم سبب افزایش رشد و

جدول ۴. اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر میزان منیزیم، آهن، روی و مس در اندام هوایی توت‌فرنگی

تیمار	mg/L	منیزیم (mg/g DW)		آهن (µg/g DW)		روی (µg/g DW)		مس (µg/g DW)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۴/۹۶۰h	۵/۷۹۰e–h	۱۰۷/۳b–e	۱۰۵/۱b–e	۳۳/۲۷a	۳۱/۲۷a	۷/۸۵۰a	۷/۸۸۰a
میکروسیلیسیم	۲۰	۴/۹۶۰h	۶/۱۹۰c–g	۱۰۹/۰b–d	۱۱۵/۶bc	۳۲/۰۵a	۳۱/۳۹a	۷/۸۶۰a	۷/۹۱۰a
	۴۰	۵/۲۸۰gh	۵/۰۰۰۸h	۱۰۰/۶b–e	۱۰۲/۴b–e	۳۱/۲۵a	۳۲/۵۶a	۷/۸۶۰a	۷/۹۰۰a
	۶۰	۶/۲۷۰c–f	۶/۷۰۰b–e	۱۰۲/۱b–e	۸۶/۲۱de	۳۴/۲۲a	۳۶/۶۰a	۸/۲۱۰a	۹/۳۰۰a
	۸۰	۶/۰۷۰d–g	۵/۵۶۰f–h	۱۱۸/۵b	۱۲۲/۹b	۳۷/۲۰a	۳۸/۳۶a	۸/۳۶۰a	۹/۱۳۰a
نانوسیلیسیم	۲۰	۶/۲۸۰c–f	۷/۰۱۰b–d	۹۲/۸۱c–e	۸۴/۵۵e	۳۳/۴۴a	۳۵/۷۰a	۸/۹۸۰a	۹/۶۳۰a
	۴۰	۵/۶۴۰f–h	۷/۱۴۰bc	۹۴/۸۳c–e	۸۸/۵۵de	۳۴/۶۹a	۳۷/۰۱a	۸/۷۳۰a	۹/۸۵۰a
	۶۰	۷/۴۰۰b	۸/۲۸۰a	۱۵۰/۰۵a	۱۵۸/۰a	۳۷/۹۱a	۳۹/۲۲a	۹/۸۸۰a	۹/۹۰۰a
	۸۰	۵/۷۸۰e–h	۶/۳۶۰c–f	۱۱۹/۸b	۱۱۴/۴bc	۳۷/۶۴a	۳۹/۰۵a	۸/۸۵۰a	۹/۰۸۰a

در هر دو ستون مربوط به هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه، بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌شود که در نهایت سطح کل جذب‌کننده عناصر افزایش می‌یابد. شاید یکی از دلایل افزایش جذب منیزیم در نتیجه کاربرد سیلیسیم نیز به این مسئله برگردد.

آهن

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که اثر جداگانه سیلیسیم و اثر متقابل سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۵٪ و اثر جداگانه غلظت و اثر متقابل سیلیسیم و غلظت در سطح ۵٪ بر میزان آهن اندام هوایی معنی‌دار شد. سایر اثرهای جداگانه و متقابل تیمارها در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نشدند. در خصوص میزان آهن اندام هوایی بین تیمارها در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری مشاهده گردید. بیشترین میزان آهن در تیمار محلول‌دهی ریشه‌ای نانوسیلیسیم با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر و پس از آن تیمار محلول‌پاشی نانوسیلیسیم با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که اختلاف آن با تیمارهای شاهد و سایر تیمارها در سطح ۵٪ معنی‌دار بوده است (جدول ۴). بین میکرو و نانوسیلیسیم نیز در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار بوده و نانوسیلیسیم بهتر از میکروسیلیسیم عمل کرده است (جدول ۳). آهن اندام هوایی با اعمال سیلیسیم افزایش پیدا کرد و در این مورد تأثیر سیلیسیم در مقیاس نانو نسبت به میکرو بیشتر بوده است. در این راستا، پاولویچ و همکاران (۴۵) بیان کردند که افزودن سیلیسیم به محلول غذایی خیار با تنظیم سطوح بیان ژن پروتئین‌ها و در نتیجه آن افزایش میزان تحرک آهن، باعث افزایش جذب آهن در گیاه خیار گردید. گوتاردی و همکاران (۲۸) با مطالعه اثر سیلیسیم بر ذرت کشت شده در محیط هیدروپونیک، افزایش آهن در نتیجه کاربرد سیلیسیم را گزارش کردند و با بررسی بیان ژن، به این نتیجه رسیدند که جذب زیاد آهن در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم مربوط به افزایش فعالیت و فراوانی رونوشت ژن FRO (Fe(III)-chelate reductase) در ریشه می‌باشد. افزایش میزان جذب آهن در اندام هوایی توت‌فرنگی در نتیجه کاربرد سیلیسیم نیز احتمالاً به همین دلیل باشد.

روی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که اثرهای جداگانه سیلیسیم و غلظت در سطح احتمال ۱٪ بر میزان روی در اندام هوایی معنی‌دار گردید. اثر جداگانه روش کاربرد و سایر اثرهای متقابل دوگانه و سه‌گانه در هیچیک از

سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نشدند. بین تمامی تیمارهای به کاربرده شده به لحاظ آماری در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار مشاهده نگردید (جدول ۴). ولی اعمال سیلیسیم، به‌خصوص در غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، باعث افزایش غیرمعنی‌دار روی در اندام هوایی شد، به طوری که در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم، میزان روی در اندام هوایی ۳۹/۲۲ میکروگرم در گرم وزن خشک بوده، که هر چند نسبت به سایر تیمارها بیشترین مقدار است؛ ولی غیرمعنی‌دار بوده است. در مقایسه میانگین اثرهای جداگانه فاکتورها (جدول ۳) مشخص است که میانگین میزان روی در اندام هوایی در نانوسیلیسیم بیشتر از میکروسیلیسیم، و در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار بوده است. بین غلظت‌ها نیز بیشترین مقدار روی در غلظت‌های ۶۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر است که اختلاف بین این دو غلظت غیر معنی‌دار ولی با دیگر غلظت‌ها در سطح ۵٪ دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند (جدول ۳).

مس

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که تنها اثر جداگانه سیلیسیم در سطح احتمال ۱٪ بر میزان مس در اندام هوایی معنی‌دار شد. سایر اثرهای جداگانه و متقابل دوگانه و سه‌گانه در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نشد. در خصوص میزان مس اندام هوایی بین تیمارهای به کار برده شده در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار نبوده است (جدول ۴). ولی با این وجود، اعمال سیلیسیم باعث افزایش غیرمعنی‌دار میزان مس در اندام هوایی نسبت به شاهد گردید، به طوری که بیشترین مقدار مس در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم بوده است (جدول ۴). در بررسی اثرهای جداگانه فاکتورها، مشخص است که میزان مس اندام هوایی در کاربرد نانوسیلیسیم نسبت به میکروسیلیسیم دارای مقدار بیشتر و اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد (جدول ۳). فرانتز و همکاران (۲۳) گزارش دادند که میزان مس بافت برگ آرابیدوپسیس تالیانا با اعمال سیلیسیم و بدون اعمال آن مشابه بود. اما سیلیسیم باعث مدیریت بهتر منبع مس درونی می‌شود که این امر می‌تواند تحت تأثیر بیان ژن‌ها و تنظیم سطوح RNA ژن‌های درگیر در انتقال درونی مس باشد. نتایج آزمایش حاضر با نتایج فرانتز و همکاران (۲۳) مطابقت دارد.

منگنز

بر طبق نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) مشاهده گردید که اثرهای جداگانه سیلیسیم و غلظت و اثرهای متقابل دوگانه سیلیسیم و غلظت و نیز سیلیسیم و روش کاربرد و اثر متقابل سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ و نیز اثر جداگانه روش کاربرد در سطح احتمال ۵٪ بر میزان منگنز اندام هوایی معنی‌دار شد. اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد بر میزان منگنز در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نشد. در خصوص میزان منگنز اندام هوایی، بین تیمارهای به‌کار برده شده در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار مشاهده گردید، به گونه‌ای که بیشترین میزان منگنز در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم مشاهده گردید. بین بیشترین مقدار ذکر شده با شاهد و اکثر تیمارها اختلاف در سطح ۵٪ معنی‌دار بود (جدول ۶). در مقایسه میانگین اثرهای جداگانه فاکتورهای مورد بررسی (جدول ۳) ملاحظه گردید که بین نانوسیلیسیم و میکروسیلیسیم در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار بود و میانگین میزان منگنز اندام هوایی در نانوسیلیسیم بیشتر از میکروسیلیسیم بوده است. همچنین، بین غلظت‌های به کار برده شده نیز در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار بود و بیشترین مقدار منگنز در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. بین روش کاربرد نیز در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار بوده و مقدار منگنز در روش کاربرد محلول‌دهی ریشه‌ای بیشتر از محلول‌پاشی برگی بوده است (جدول ۳). نتایج این آزمایش در راستای نتایج فخت‌کریستوفرز و همکاران (۲۲) می‌باشد که گزارش دادند کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب منگنز در دیواره سلولی گیاه لوبیای چشم‌بلبلی شد.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر غلظت، روش کاربرد و نوع سیلیسیم بر برخی از عناصر غذایی در اندام هوایی توت‌فرنگی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		آهن	روی	مس	منگنز	سیلیسیم
سیلیسیم	۱	۳۸۵/۶*	۸۲/۸۸**	۱۳/۰۷**	۲۵/۲۳**	۰/۰۵۶**
غلظت	۳	۲۱۹۳/۳**	۶۷/۸۰**	۱/۴۲۷ns	۷۰/۲۶**	۰/۰۴۵**
سیلیسیم × غلظت	۳	۴۱۲۲/۴**	۶/۳۲۱ns	۰/۹۶۴ns	۱۷/۲۴**	۰/۰۰۱*
روش کاربرد	۱	۴۲/۸۴ns	۲۴/۶۸ns	۲/۹۲۵ns	۱۶/۹۲*	۰/۰۱۲**
سیلیسیم × روش کاربرد	۱	۱۴/۵۷ns	۱/۸۲۳ns	۰/۰۰۱ns	۴۲/۵۶**	۰/۰۱۱**
غلظت× روش کاربرد	۳	۷/۷۴۲ns	۰/۷۴۷ns	۰/۰۳۰ns	۴/۰۳۷ns	۰/۰۰۱ns
سیلیسیم × غلظت×روش کاربرد	۳	۲۳۳/۵*	۲/۰۸۵ns	۰/۷۳۸ns	۱۳/۲۴**	۰/۰۰۳**
خطا	۳۲	۸۴/۲۷	۶/۸۱۵	۱/۲۸۲	۲/۹۵۰	۰/۰۰۰۷
ضریب تغییرات (٪)	–	۸/۳۴۰	۷/۳۴۰	۱۲/۸۰	۱۱/۰۸	۷/۷۱۰

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

جدول ۶. اثر متقابل سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد بر میزان منگنز و سیلیسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی

تی‌مار	$mg\ l^{-1}$	منگنز ($\mu g\ gr^{-1}\ DW$)		سیلیسیم (٪)	
		محلول‌پاشی	محلول‌دهی	محلول‌پاشی	محلول‌دهی
شاهد	۰	۱۱/۸۸ef	۱۱/۸۱ef	۰/۰۷۰j	۰/۰۸۰j
میکروسیلیسیم	۲۰	۱۱/۷۰f	۱۰/۴۳f	۰/۲۱۰i	۰/۲۶۰h
	۴۰	۱۴/۶۸ed	۱۱/۶۳f	۰/۳۳۰fg	۰/۲۹۰gh
	۶۰	۱۷/۵۳a–d	۱۸/۱۸a–c	۰/۳۴۰e–g	۰/۳۸۰c–e
	۸۰	۱۶/۵۸b–d	۱۷/۴۶a–d	۰/۳۴۰fg	۰/۲۹۰gh
نانوسیلیسیم	۲۰	۱۰/۸۸f	۱۶/۱۶cd	۰/۲۷۰h	۰/۳۰۰gh
	۴۰	۱۵/۳۱cd	۱۹/۴۶ab	۰/۳۵۰d–f	۰/۴۴۰b
	۶۰	۱۶/۲۳cd	۲۰/۲۰a	۰/۴۲۰bc	۰/۵۰۰a
	۸۰	۱۶/۳۳cd	۱۵/۲۱cd	۰/۳۳۰fg	۰/۳۹۰dc

*: میانگین‌های با حروف مشابه در هر دو ستون مربوط به هر صفت بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

سیلیسیم

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۵) نشان داد که اثرهای جداگانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد و نیز اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و روش کاربرد و اثر متقابل سه‌گانه سیلیسیم، غلظت و روش کاربرد در سطح احتمال ۱٪ بر میزان سیلیسیم در اندام هوایی معنی‌دار گردید. اثر متقابل دوگانه سیلیسیم و غلظت نیز در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد. ولی اثر متقابل دوگانه غلظت و روش کاربرد در هیچیک از سطوح احتمال آماری ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نگردید. بر طبق نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه (جدول ۶)، بین تیمارهای به‌کار رفته در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار وجود داشته است. بدین ترتیب که بیشترین میزان سیلیسیم اندام هوایی در تیمار محلول‌دهی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم و کمترین میزان سیلیسیم در تیمار شاهد ملاحظه گردید. بین تیمار شاهد با تمامی تیمارهای به کار رفته در سطح

۵٪ اختلاف معنی‌دار وجود داشته است. با بررسی میانگین‌های حاصل از اثرهای جداگانه فاکتورهای مورد بررسی (جدول ۳) مشاهده گردید که بین میکرو و نانوسیلیسیم در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار وجود داشت و میزان سیلیسیم در کاربرد نانوسیلیسیم بیشتر از میکروسیلیسیم بوده است. همچنین، بین غلظت‌های به‌کار رفته نیز در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار بود و بیشترین میزان سیلیسیم در کاربرد غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر ملاحظه گردید. بین نوع روش کاربرد سیلیسیم نیز در سطح ۵٪ تفاوت معنی‌دار بود و مقدار سیلیسیم در روش کاربرد محلول‌دهی بیشتر از روش محلول‌پاشی بوده است. در مجموع، به لحاظ تجمع سیلیسیم در اندام هوایی کاربرد محلول‌دهی نانوسیلیسیم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر دارای بیشترین بازده بوده است. فاطمی و همکاران (۱۳) نیز افزایش غلظت سیلیسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی را در نتیجه اعمال سیلیسیم مشاهده کردند، به گونه‌ای که با افزایش غلظت سیلیسیم در تیمارها، میزان سیلیسیم اندام هوایی نیز افزایش پیدا کرد. محقق و همکاران (۱۴) و میاکی و تاکاهاشی (۴۰) نیز افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم در اندام هوایی خیار را در نتیجه کاربرد این عنصر در مرحله رشد گیاه مشاهده کردند. بهتاش و همکاران (۳) گزارش کردند که اعمال سیلیسیم باعث افزایش معنی‌دار غلظت این عنصر در برگ گیاه چغندر لبویی گردید. اسدی و همکاران (۱) افزایش معنی‌دار غلظت سیلیسیم در شاخسار گندم را در نتیجه کاربرد سیلیسیم گزارش کردند. دهقانی‌پوده (۹) گزارش کرد که کاربرد سیلیسیم (پتاسیم سیلیکات) باعث افزایش معنی‌دار کلسیم در اندام هوایی توت‌فرنگی نسبت به شاهد شد. میاکی و تاکاهاشی (۴۲) گزارش دادند که در نتیجه کاربرد سیلیسیم، غلظت سیلیسیم برگ توت‌فرنگی از ۰/۰۶ درصد در تیمار بدون سیلیسیم به ۱/۲۲ درصد در تیمار سیلیسیم (۵۰ میلی‌گرم در لیتر SiO_2) افزایش یافت. آنان اظهار داشتند که روش جذب سیلیسیم در توت‌فرنگی شبیه سویا می‌باشد و گیاه توت‌فرنگی سیلیسیم را آزادانه از ریشه به اندام هوایی انتقال می‌دهد. بلک‌من (۱۷) نیز بیان می‌کند که سیلیسیم از ریشه به اندام هوایی انتقال می‌یابد و از دست دادن آب از طریق تعرق در برگ‌ها تشکیل سیلیس بی‌شکل هیدراته را، خصوصاً در سلول‌های اپیدرم برگ، افزایش می‌دهد. نتایج آزمایش حاضر مطابق با نتایج گزارش‌ها و مطالعات ذکرشده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اظهار داشت که کاربرد سیلیسیم دارای اثرهای مشهودی بر غلظت عناصر پُرمصرف، کم‌مصرف و نیز غلظت آن در پیکره رویشی گیاه توت‌فرنگی می‌باشد. اعمال سیلیسیم و تأثیر آن بر غلظت دیگر عناصر، بستگی به فرم سیلسیم، غلظت به کاربرده شده و نیز روش کاربرد آن دارد. در مجموع، درخصوص تولید گلخانه‌ای توت‌فرنگی و کشت آن در محیط کشت بدون خاک، با توجه به غلظت عناصر غذایی در پیکره رویشی گیاه و به استناد نتایج این پژوهش می‌توان غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیسیم با روش محلول‌دهی ریشه‌ای را به عنوان یک گزینه مطلوب در نظر داشت.

منابع مورد استفاده

۱. اسدی، ا.، غ. حق‌نیا، ا. لکزیان و م. مفتون. ۱۳۹۳. تأثیر مقادیر مختلف سیلیسیم و نیتروژن بر خصوصیات مورفولوژی، عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم گندم. نشریه زراعت (پژوهش و سازندگی) ۱۰۳: ۱۶۷-۱۷۸.

۲. امامی، ع. ۱۳۷۵. روش‌های تجزیه گیاه. جلد اول، نشریه فنی ۹۸۲، انتشارات مؤسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ۲۰۲ صفحه.

۳. بهتاش، ف.، س. ج. طباطبایی، م. ج. ملکوتی، م. ح. سرورالدین و ش. اوستان. ۱۳۸۹. اثر کادمیم و سیلیسیم بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی چغندر لبویی. مجله دانش کشاورزی پایدار ۲۰ (۱): ۵۳-۶۷.

۴. بیات، ح.، س. ح. نعمتی و ی. سلاح‌ورزی. ۱۳۹۱. تأثیر سیلیسیم بر رشد و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی اطلسی ایرانی

(*Petunia hybrida*). نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۶(۱): ۱۰-۱۶.

۵. پیوست، غ.، م. زارع بوانی و ح. سمیع‌زاده لاهیجی. ۱۳۸۷. تأثیر سیلیسیم بر روی عناصر غذایی و نیترات در کاهو. مجله علوم باغبانی ایران ۳۹ (۱):۱-۸.

۶. پیوندی، م.، ه. پرنده و م. میرزا. ۱۳۹۰. مقایسه تأثیر نانوکلات آهن با کلات آهن بر پارامترهای رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ریحان *Ocimum Basilicum*. مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی- ملکولی ۱(۴): ۸۹-۹۹.

۷. پیوندی، م.، ز. کمالی جامکانی و م. میرزا. ۱۳۹۰. تأثیر نانوکلات آهن با کلات آهن بر رشد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مرزه *Satureja hortensis*. مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی- ملکولی ۲(۵): ۲۵-۳۲.

۸. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶. مبانی تغذیه گیاهی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۵۴۰ صفحه.

۹. دهقانی‌پوده، ص. ۱۳۹۱. اثر سیلیکات پتاسیم و نانوسیلیکون روی رشد و نمو توت‌فرنگی تحت شرایط تنش آبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴ صفحه.

۱۰. رحیمی، ز. و م. کافی. ۱۳۸۹. مقایسه تأثیر سطوح مختلف شوری و سیلیسیم در تولید زیست‌توده، مقدار سدیم و پتاسیم برگ و ریشه خرفه (*Portulaca oleracea* L.). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۴(۲): ۳۷۴-۳۶۷.

۱۱. غلامی، م. و م. ر. کیمیایی‌طلب. ۱۳۸۵. فیزیولوژی درختان میوه مناطق معتدله. تألیف میکلوس فاوست، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۴۸۶ صفحه.

۱۲. فاطمی سیدلر، ل.، س. ج. طباطبایی و ا. فلاحی. ۱۳۸۸. اثر سیلیسیم بر رشد و عملکرد گیاه توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری. مجله علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۱): ۸۸-۹۵.

۱۳. فاطمی سیدلر، ل.، س. ج. طباطبایی و ا. فلاحی. ۱۳۸۸. تأثیر سیلیسیم بر شدت فتوسنتز و غلظت عناصر غذایی گیاه توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری. مجله دانش کشاورزی پایدار ۱۹(۱): ۱۰۷-۱۱۸.

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

۱۵. معزاردلان، م. و غ. ثواقبی فیروزآبادی. ۱۳۷۶. تغذیه درختان میوه. تألیف جی. اس. نیجار، مؤسسه نشر جهاد وابسته به جهاد دانشگاهی، ۲۵۹ صفحه.

16. AbdelShafy, H., W. Hegemann and A. Teiner. 1994. Accumulation of metals by vascular plants. Environ. Manage. Health 5: 21-24.
17. Blackman, E. 1969. Observation on the development of the silica cells of the leaf sheath of wheat (*Triticum aestivum*). Can. J. Bot. 47: 827-838.
18. Corrales, I., C. Poschenrieder and J. Barcello. 1997. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. Plant Soil 199: 203-209.
19. Das, R., P.J. Kiley, M. Segal, J. Norville, A. Amy Yu, L. Wang, S.A. Trammell, L. E. Reddick, R. Kumar, F. Stellacci, N. Lebedev, J. Schnur, B.D. Bruce, S. Zhang and M. Baldo. 2004. Integration of photosynthesic protein molecular complexes in solid-state electronic devices. Nano Lett. 4(6): 1079-1083.
20. Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. Proc. Natl. Acad. Sci. 91: 11-17.
21. Epstein, E. and A. Bloom. 2004. Mineral Nutrition of Plants: Principle and Perspectives. Sinauer Associates Publ., Second Edition, 380 p.
22. Fecht-Christoffers, M.M., P. Maier, K. Iwasaki, H.P. Braun and W.J. Horst. 2007. The Role of the leaf apoplast in manganese toxicity and tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). PP. 307-321. *In*: Sattelmache, B. and W.J. Horst (Eds.), The Apoplast of Higher Plants: Compartment of Storage, Transport and Reactions, Springer, The Netherlands.
23. Frantz, J.M., J.C. Locke, D. Sturtz, C. Ranger and S. Leisner. 2010. Silicon in ornamental crops: Detection, delivery, and function. Indo-US Workshop on Silicon in Agriculture, Abstract, Bangalore, India, pp. 25-27.

24. Gao, X., C. Zou, L. Wang and F. Zhang. 2006. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. J. Plant Nutr. 29: 1637-1647.
25. Gerdakaneh, M., A.A. Mozafarin, A. Khalighi and A. Sioseh-mardeh. 2009. The effect of carbohydrate source and concentration on somatic embryogenesis of strawberry (*Fragaria X ananassa* Duch). Amer-Euras. J. Agric. Environ. Sci. 6(1): 76-80.
26. Ghoulam, C., A. Foursy and K. Fares. 2002. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environ. Exp. Bot. 47: 39-50.
27. Giampieri, F., S. Tulipani, J.M. Alvarez-Suarez, J.L. Quiles, B. Mezzetti and M. Battino. 2012. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. Nutr. 28: 9-19.
28. Gottardi, S., F. Iacuzzo, N. Tomasi, G. Cortella, L. Manzocco, R. Pinton, V. Romheld, T. Mimmoe, M. Scampicchio, L.D. Costa and S. Cesco. 2014. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. Plant Physiol. Biochem. 56: 14-23.
29. 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. Sci. Hort. 161: 111-117.
30. Leidi, E.O., M. Silberbush and S.H. Lips. 1991. Wheat growth as affected by nitrogen type, pH and salinity. II. Photosynthesis and transpiration. J. Plant Nutr. 14: 247-256.
31. Liang, Y.C. 1999. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. Plant Soil 29: 217-224.
32. Liang, Y.C., Q.R. Shen, Z.G. Shen and T.S, Ma. 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barely cultivars. J. Plant Nutr. 19: 173-183.
33. Liang, Y.C., W.C. Sun, J. Si and V. Romheld. 2005. Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildew in *cucumis sativus*. J. Plant Pathol. 54: 678-685.
34. Liang, Y.C., W.H. Zhang, Q. Chen and R.X. Ding. 2005. Effects of silicon on tonoplast H^+–ATPase and H^+-PPase activity, fatty acid composition and fluidity in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Environ. Exp. Bot. 53: 29-37.
35. Liu, H.X., Z.G. Guo, X.H. Guo, X.R. Zhou, W.S. Hui and K.Y. Wang. 2009. Effect of addition of silicon on water use efficiency and yield components of alfalfa under the different soil moisture. Acta Ecol. Sinica 29(6): 3075-3080.
36. Lux, A., M. Luxova, J. Abe, E. Tanimoto, T. Hattori and S. Inanaga. 2003. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. New Phytol. 158: 437-441.
37. Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plant to biotic and abiotic stresses. Soil Sci. Plant Nutr. 50(1): 11-18.
38. Ma, J.F., Y. Miyake and E. Takahashi. 2001. Silicon as a beneficial element for crop plants. PP. 17-39. *In:* Datnoff, E. L., G.H. Snyder and G.H. Korndorfer (Eds.), Silicon in Agriculture, Elsevier Sci., Amsterdam.
39. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, Second Edition, London.
40. Miao, B.H., X.G. Han and W.H. Zhang. 2010. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium deficient medium. Ann. Bot. 105: 967-973.
41. Miyake, Y. and E. Takahashi. 1983. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. J. Soil Sci. Plant Nutr. 29: 71-83.
42. Miyake, Y. and E. Takahashi. 1986. Effect of silicon on the growth and fruit production of strawberry plants in a solution culture. J. Soil Sci. Plant Nutr. 32: 321-326.
43. Moyer, C., N.A. Peres, L.E. Datnoff, E.H. Simonne and Z. Deng. 2008. Evaluation of silicon for managing powdery mildew on gerbera daisy. J. Plant Nutr. 31: 2131-2144.
44. Murozuka, E., K.H. Laursen, L. Jane, I.F. Shield, B. Sander, M. Jakob, I.S. Moller and J.K. Schjoerring. 2014. Nitrogen fertilization affects silicon concentration, cell wall composition and biofuel potential of wheat straw. Biomass Bioenerg. 64: 291-298.
45. Pavlovic, J., J. Samardzic, V. Maksimovic, G. Timotijevic, N. Stevic, K.H. Laursen, T.H. Hansen, S. Husted, J.K. Schjoerring, Y. Liang and M. Nikolic. 2013. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. New Phytol. 198(4):1096-1107.
46. Siddiqui, M.H. and M.H. Al-Whaibi. 2014. Role of nano-SiO_2 in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* seeds Mill.). Saudi. J. Biol. Sci. 21: 13-17.
47. Talgar, S., J.X. Gu, C.S. Xu, Z. Yang, Q. Zhao, Y.X. Liu and Y.C. Liu. 2011. Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study. Nanotoxicol. 1: 1-8.
48. Wang, S.Y. and G.J. Galletta. 1998. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. J. Plant Nutr. 21(1): 157-167.