بررسی تغییرات رویشی، مورفولوژیک و فتوسنتزی گوجه‌فرنگی در اثر سیلیسیم و نانوسیلیسیم افزوده شده به محلول غذایی

مریم حقیقی[۱] و مریم مظفریان[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۵)

چکیده

با پیشرفت علم و تولید ذرات نانو، کاربرد آنها در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی مطرح شده است. سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید برای گیاهان محسوب می‌شود که باعث افزایش تولید و کیفیت محصول، کاهش تبخیر و تعرق و افزایش مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های غیرزیستی می‌گردد. به منظور ارزیابی تأثیر سیلیسیم به‌عنوان عنصر کاهنده اثر تنش و نانوسیلیسیم به احتمال با آثار مشابه اما در اندازه کوچک‌تر و احتمالاً مؤثرتر بر خصوصیات رویشی، مورفولوژیک و فتوسنتز گوجه‌فرنگی رقم فالکاتو (Falcato)، آزمایشی در محیط هیدروپونیک در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو سطح سیلیسیم و نانوسیلیسیم (۱ و ۲ میلی‌مولار) و بدون سیلیسیم (به‌عنوان شاهد) با ۴ تکرار انجام شد. خصوصیاتی نظیر شاخص کلروفیل (SPAD)، فتوسنتز، میزان جذب محلول، قطر ساقه و محتوای نسبی آب بافت و تغییرات مورفولوژیک شامل تراکم پرزهای ساقه در طول آزمایش اندازه‌گیری شد. در پایان آزمایش، وزن تر و خشک و حجم ریشه محاسبه شد. نتایج آزمایش نشان داد که سیلیسیم در فاکتورهای وزن تر و هدایت مزوفیلی مؤثرتر از نانوسیلیسیم بود. غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم به‌ترتیب باعث افزایش معنی‌دار وزن تر و هدایت مزوفیلی گیاه شد. هرچند این غلظت تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک و میزان نسبی آب بافت نداشت. در مورد کارایی مصرف آب فتوسنتزی و فتوسنتز، نانوسیلیسیم مؤثرتر از سیلیسیم بود. بیشترین میزان فتوسنتز و کمترین میزان تعرق در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم مشاهده شد. کاربرد سیلیسیم و نانوسیلیسیم باعث کاهش میزان مصرف محلول در سیستم هیدروپونیک شد و کمترین میزان مصرف محلول در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم مشاهده شد. به‌طورکلی، کاربرد سیلیسیم به شکل فلزی یا نانو، با اندازه ذرات ۲۰-۳۰ نانومتر، در شرایط بهینه رشد گوجه‌فرنگی و بدون تنش، باعث افزایش فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی و خصوصاً کاهش مصرف محلول غذایی در شرایط کشت هیدروپونیک شد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات، شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب

مقدمه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در سطح کره زمین و یکی از عناصر غذایی مفید در رشد و سلامت گیاهان می‌باشد. اگر چه سیلیسیم عنصر ضروری برای گیاهان در نظر گرفته نشده است، اما در برخی از گیاهان یک عنصر ضروری است (۱۶). نتایج تجزیه بافت گیاهی نشان می‌دهد که غلظت سیلیسیم بسته به گونه گیاهی بین ۱ تا ۱۰۰ گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه متغیر است (٤). این عنصر می‌تواند باعث افزایش تولید و کیفیت محصول و کاهش تبخیر و تعرق شود. تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه ممکن است به‌دلیل رسوب آن در پهنای برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ باشد که از این طریق توانایی گیاه برای استفاده

۱. گروه علوم باغبانی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: maryam_mozafariyan@yahoo.com

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

مؤثرتر از نور را بالا می‌برد (۱۳).

مصرف کودهای سیلیسیم در خاک از دو طریق بر رشد و نمو گیاهان تأثیر می‌گذارد. اول این که بهبود تغذیه سیلیسیم موجب تقویت سیستم حفاظتی گیاه در شرایط نامساعد محیطی، بیماری و حشرات می‌شود. از سوی دیگر، تیمار کردن خاک با ترکیبات حاوی سیلیسیم سبب بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی برای گیاه شده و حاصل‌خیزی خاک را افزایش می‌دهد (۴). تغذیه سیلیسیم در حد مناسب و بهینه موجب افزایش زیست‌توده و حجم ریشه‌ها شده، در نتیجه سطح جذب‌کننده عناصر از محیط را افزایش می‌دهد (٤). کاربرد سیلیسیم در کشت هیدروپونیک خیار نشان داد که وزن خشک ریشه و شاخساره، و طول ریشه و شاخساره در گیاهان تیمار شده با سیلسیم نسبت به گیاهان تیمار نشده افزایش معنی‌داری داشته است (۷).

سیلیسیم سبب افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود و با افزایش غلظت کلروفیل برگ، توانایی گیاه برای استفاده مؤثرتر از نور زیاد شده و می‌تواند شدت‌های کم و زیاد نور را بهتر تحمل کند (۴). به‌علاوه، کاربرد سیلیسیم جهت تولید غلظت‌های بیشتر آنزیم ریبولوز بیس فسفات کربوکسیلاز در برگ لازم است (۴). آگاری و همکاران (۱۰) نشان دادند که در صورت کمبود سیلیسیم، مقدار کلروفیل کم شده و در نتیجه آن فتوسنتز در گیاه برنج کاهش می‌یابد. آنان دلیل این امر را نقش سیلیسیم در زنجیره فتوسنتزی و ممانعت از تخریب کلروفیل توسط سیلیسیم دانستند. سیلیسیم اثرهای مثبتی بر رشد و تولید ماده خشک، میزان فتوسنتز، عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارد (۱۰).

اخیراً فن‌آوری نانو در سطح گسترده مورد توجه بیشتر پژوهشگران علوم مختلف قرار گرفته است. امروزه افزودن نانوذرات به محلول غذایی گیاهان به‌عنوان کود به‌دلیل داشتن اثرهای بی‌نظیر آنها مانند نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی، توجه زیادی را در بین تولید کنندگان به خود جلب کرده است. تحقیقات مختلفی اثر این مواد را بر جوانه‌زنی بذر نشان داده است. افزایش درصد جوانه‌زنی بذر سویا با ترکیب نانوسیلیسیم و نانوتیتانیوم (۲۸) و بذرهای فلفل، مریم گلی و چمن با نانولوله‌های کربنی (۳۰) گزارش شده است. نانولوله‌های کربنی می‌تواند باعث ایجاد رخنه در بذر گوجه‌فرنگی و در نتیجه تسهیل ورود آب و اکسیژن به بذر شود. هم‌چنین، این احتمال وجود دارد که نانولوله‌های کربنی با تأثیر بر آکوآپورین‌ها (کانال‌های عبور آب در غشا) و تنظیم عمل آنها بتوانند به ورود آب به درون یاخته‌ها کمک کنند (۲۳). نتایج تحقیق دیگری نیز نشان داد که غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی شد (۱۸). نتایج تحقیق مظفریان و همکاران (۸) نشان داد که نانوسیلیسیم باعث افزایش طول شاخساره و ریشه‌چه نسبت به بذرهای گوجه‌فرنگی تیمار شده با سیلیکات پتاسیم شد.

تحقیقات محدودی اثر نانوذرات مختلف را بر رشد و فیزیولوژی گیاهان مورد بررسی قرار داده‌اند. نانوتیتانیوم باعث افزایش قدرت و استحکام ریشه و افزایش توانایی ریشه در جذب آب و کود و افزایش فعالیت نیترات ردوکتاز شد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مثل سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را افزایش داد (۲۸). نانواکسید تیتانیوم هم‌چنین باعث بهبود فتوسنتز و رشد گیاه اسفناج شد (۱۹ و ۲۱).

ژو و همکاران (۴۴) گزارش کردند که کدوتنبل (*Cucurbita maxima*) که در بستر آبی حاوی نانوذرات منیزیم رشد یافته می‌تواند ذرات را در بافت گیاهی جذب، انتقال و ذخیره نماید. در حالی‌که لوبیای آمریکایی (*Phaseolus limensis*) قادر به جذب و انتقال این ذرات نیست. این نشان می‌دهد که گیاهان مختلف پاسخ‌های متفاوتی به چنین ذراتی نشان می‌دهند.

حضور نانوذرات آلومینیوم اثر منفی بر رشد لوبیا و لولیوم (*Lolium Perenne*) نداشت (۱۶). کاربرد TiO_2 (اندازه ۲۵ نانومتر و ۱۰۰ نانومتر) در قلمه‌های بید آثار سمی نشان نداد، اگرچه میزان تجمع و رسوب‌گذاری ذرات بزرگ‌تر بیشتر بود (۳۵). سمیت نانوذرات روی در کلم و هویج به‌وسیله یانگ و واتس (۴۱) و در تربچه، شلغم و رای‌گراس در غلظت‌های بیش

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر توسط لین و شینگ (۲۶) گزارش شده است. کاربرد کود کندرها شونده پوشش‌دار و دارای نانومواد در مقایسه با کود شیمیایی NPK روی غلات توسط شیائو و همکاران (۴۰) بررسی شد. نتایج نشان داد که عملکرد و میزان پروتئین افزایش و میزان قند کاهش یافت (۳۱). سمیت نانوذرات ZnO تجاری بر رای‌گراس به‌وسیله لین و شینگ (۲۷) و سمیت نانوذرات اکسید فلز تجاری بر آرابیدوپسیس به‌وسیله لی و همکاران (۲۵) گزارش شده است.

سیلیسیم از مواد عمده تشکیل‌دهنده خاک است که در کشت‌های خاکی به‌طور طبیعی در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. اما در تولیدات گلخانه‌ای با محیط کشت‌های مختلف یا آبکشت و محلول‌های غذایی متداول، سیلیسیم موجود نیست (۳۷).

با وجود انجام تحقیقاتی در خصوص اثرهای مفید سیلیسیم بر رشد و نمو گیاهان، اثرهای این عنصر بر تغییرات مورفولوژیک و فتوسنتز گیاهان به‌طور کامل مشخص نشده است. از طرفی، از آثار این عنصر در اندازه نانو بر خصوصیات گیاهان، منابع بسیار محدودی در دست است. لذا، هدف از این آزمایش، بررسی اثر غلظت‌های مختلف سیلیکات پتاسیم، به‌عنوان یک عنصر مفید و مقایسه سیلیسیم با ذرات نانوسیلیسیم در کشت گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط گلخانه، بر خصوصیات رشدی، مورفولوژیک و فتوسنتزی آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر سیلیکات پتاسیم و نانوسیلیسیم بر خصوصیات رشدی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicum esculentum* Mill c.v. Falcato) در محیط کشت هیدروپونیک، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نسبت طول روز به شب ۱۴ به ۱۰ ساعت انجام شد. تیمارهای مورد استفاده شامل سیلیسیم (غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار از منبع سیلیکات پتاسیم) و نانوسیلیسم (غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار) و محلول غذایی بدون این عناصر به‌عنوان شاهد بود. خصوصیات نانوسیلیسیم تهیه شده از پژوهشکده نانوتکنولوژی دانشگاه شیراز در جدول ۱ نشان داده شده است (۱۸). نشاهای گوجه‌فرنگی پس از رسیدن به مرحله ۲-۳ برگی به سیستم آبکشت حاوی محلول غذایی هوگلند (جدول ۲) منتقل شدند و پس از استقرار گیاهان در سیستم هیدروپونیک، تیمارهای مورد نظر اعمال شد. در تمام مراحل رشد، pH محلول غذایی با استفاده از اسید سولفوریک یا هیدروکسید پتاسیم در محدوده ۶-۷ کنترل شد. سطح محلول غذایی داخل ظروف با محلول غذایی مناسب هر تیمار به حجم ثابتی نگه داشته شد و میزان محلول اضافه شده به هر ظرف ثبت می‌شد. کارایی مصرف آب از تقسیم میزان محلول مصرفی به وزن خشک محاسبه شد (۱۴). پس از گذشت یک ماه از اعمال تیمارها، میزان کلروفیل برگ‌ها به‌وسیله دستگاه کلروفیل‌سنج (مدل Minolta-502) و شدت فتوسنتز و نرخ تبخیر و تعرق به‌وسیله دستگاه فتوسنتزمتر (مدل Li-Cor, Li-3000, USA) اندازه‌گیری شد. در پایان آزمایش، گیاهان برداشت شده و ریشه و ساقه از محل طوقه جدا شد و حجم ریشه و مقدار نسبی آب بافت اندازه‌گیری شد.

جهت تعیین تغییرات مورفولوژیک و تراکم پرزها تحت تأثیر سیلیسیم و نانوسیلیسیم، عکس پرزهای روی ساقه در محل مشابه ساقه (۵ و ۱۵ سانتی‌متر از طوقه) در تیمارهای مختلف به‌وسیله دوربین میکروسکوپی دیجیتال (Digital Micro-measure Camera مدل BW1008) با بزرگنمایی حداکثر X ٤٠٠ گرفته شده و با نرم‌افزار Micro Measure طول پرزها در هر تیمار مشخص شد.

به‌منظور اندازه‌گیری صفات فتوسنتزی از جمله شدت فتوسنتز در واحد سطح برگ ($\mu mol\ CO_2/m^2.s$) و میزان تعرق ($mmol/m^2.s$) و میزان CO_2 درون روزنه‌ای و نرخ تبخیر و تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) از دستگاه فتوسنتزمتر (Li-Cor, Li-3000, USA) استفاده گردید. به این منظور، قسمت میانی برگ‌های بالغ در داخل محفظه شیشه‌ای قرار گرفت و داده‌ها هر ۹۰ ثانیه یک‌بار یادداشت گردید. جهت

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

جدول ۱. خصوصیات نانوسیلیسیم

خصوصیات ساختاری	مقدار
Thermogravimetric analysis (TGA)	۵/۰±۰/۰۲
Inductively coupled plasma (ICP)	۴/۹±۰/۰۹
اندازه (nm)	۲۰–۳۵
درصد خلوص	۹۸
سطح فعال (m^2/g)	۴۶۱

جدول ۲. فرمول‌های محلول غذایی هوگلند (۱)

ترکیب	محلول پایه	میلی‌لیتر محلول پایه در یک لیتر
2M KNO_3	۲۰۲ گرم در لیتر	۲/۵
2M $Ca(NO_3)_2•4H_2O$	۲۳۶ گرم در نیم لیتر	۲/۵
Iron (Sprint 138 iron chelate)	۱۵ گرم در لیتر	۱
2M $MgSO_4•7H_2O$	۴۳۹ گرم در لیتر	۱
1M NH_4NO_3	۸۰ گرم در لیتر	۱
H_3BO_3	۲/۸۶ گرم در لیتر	۱
$MnCl_2•4H_2O$	۱/۸۱ گرم در لیتر	۱
$ZnSO_4•7H_2O$	۰/۲۲ گرم در لیتر	۱
$CuSO_4$	۰/۰۵۱ گرم در لیتر	۱
$H_3MoO_4•H_2O$	۰/۰۹ گرم در لیتر	۱
1M KH_2PO_4 (pH to 6.0)	۱۳۶ گرم در لیتر	۰/۵

تعیین هدایت مزوفیلی، میزان فتوسنتز به‌میزان CO_2 درون روزنه‌ای تقسیم شد.

تعداد پنج برگ مشابه از هر گیاه انتخاب و با استفاده از دستگاه SPAD (مدل Minolta-502) میزان کلروفیل برگ اندازه‌گیری شد.

جهت تعیین مقدار نسبی آب بافت (RWC)، برگ‌های تازه گیاه به‌طور تصادفی انتخاب و به اندازه یک سانتی‌متر جدا و وزن شدند (W_i). این قطعات برگ در آب مقطر در محل تاریک در دمای ۴ درجه سلسیوس قرار داده شده و پس از ۲۴ ساعت دوباره وزن شدند (W_f). سپس، وزن خشک این قطعات پس از قرار دادن در خشک کن با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (۳۲). برای محاسبه مقدار نسبی آب بافت از فرمول زیر استفاده شد:

$$RWC = \frac{wi-wd}{wf-wd}\times 100 \quad [۱]$$

که W_i وزن اولیه برگ گیاه، Wf وزن گیاه پس از قرار گرفتن در دمای ۴ درجه سلسیوس پس از ۲۴ ساعت و Wd وزن خشک گیاه پس از قرار گرفتن در خشک کن با دمای ۶۰ درجه سلسیوس پس از ۲۴ ساعت است.

حجم ریشه به روش تغییر حجمی آب طبق قانون ارشمیدس برحسب میلی‌متر برآورد گردید. وزن تر گیاه بلافاصله پس از خارج کردن گیاه از ظروف کشت و گرفتن آب اضافی گیاه، به‌وسیله ترازوی دقیق تعیین شد و سپس نمونه‌ها

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

درون پاکت قرار گرفتند و در آزمایشگاه درون خشک کن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ٤٨ ساعت خشک شدند. برای توزین وزن خشک نمونه‌ها از ترازوی دیجیتالی دقیق استفاده شد.

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistix-8 تجزیه و تحلیل شده و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ صورت گرفت.

نتایج

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سیلیسیم اثر بهتری بر وزن تر و خشک گیاه نسبت به تیمارهای نانوسیلیسیم داشت. بیشترین وزن تر گیاه در غلظت ۱ میلی‌مولار سیلیسیم مشاهده شد؛ به‌طوری‌که ۶٪ نسبت به تیمار شاهد و ۴۹٪ نسبت به تیمار ۱ میلی‌مولار نانوسیلیسیم افزایش نشان داد. اعمال تیمارهای مختلف سیلیسیم و نانوسیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک گیاه نداشت (جدول ۳). غلظت ۱ میلی‌مولار سیلیسیم و نانوسیلیسیم اثر بهتری نسبت به غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و نانوسیلیسیم در فاکتورهای وزن تر و خشک گیاه و حجم ریشه داشت (جدول ۳). افزودن سیلیسیم و نانوسیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر محتوای کلروفیل گیاه نداشت؛ اگرچه میانگین کلروفیل در تیمار سیلیسیم بیشتر از نانوسیلیسیم و در غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم بود (جدول ۳). به‌طورکلی، اضافه کردن سیلیسیم و نانوسیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر مقدار نسبی آب بافت نداشت. بیشترین میزان نسبی آب بافت در غلظت ۱ میلی‌مولار سیلیسیم مشاهده شد که این افزایش ۱۳/۵۳ برابر تیمار شاهد بود (جدول ۳).

نانوسیلیسیم اثر بهتری بر میزان فتوسنتز نسبت به تیمارهای سیلیسیم داشت. به‌طوری‌که بیشترین میزان فتوسنتز در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم بود، که ۱۱٪ نسبت به شاهد و ۲۹٪ نسبت به تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم افزایش نشان داد. در همین غلظت سیلیسیم (۲ میلی‌مولار)، فتوسنتز ۱۳٪ نسبت به شاهد کاهش داشت (جدول ۴). اضافه کردن سیلیسیم و نانوسیلیسیم باعث کاهش معنی‌دار هدایت روزنه‌ای گیاه شد. به‌طوری‌که کمترین میزان هدایت روزنه‌ای در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم مشاهده شد (جدول ۴).

افزودن سیلیسیم و نانوسیلیسیم اثر معنی‌داری بر نرخ تبخیر و تعرق و غلظت دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای گیاه نداشت؛ ولی کمترین میزان تعرق و غلظت دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم مشاهده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب فتوسنتزی تحت تأثیر سیلیسیم و نانوسیلیسیم قرار گرفته و بیشترین میزان کارایی مصرف آب فتوسنتزی در زمانی بود که غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم استفاده شد (جدول ۵). هدایت مزوفیلی با افزودن سیلیسیم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و به حداکثر میزان خود در غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم رسید. افزایش هدایت مزوفیلی در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم به‌ترتیب ۴ و ۱۳ درصد و در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم به‌ترتیب ۹/۴۲ و ۷/۳۷ درصد نسبت به شاهد بود (جدول ۵).

بیشترین قطر ساقه در غلظت ۱ میلی‌مولار سیلیسیم مشاهده شد. به‌طوری‌که این افزایش ۴/۶۶ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود؛ هرچند تفاوت معنی‌داری در قطر ساقه تیمار ۱ میلی‌مولار سیلیسیم، تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم و شاهد وجود نداشت و کمترین قطر ساقه در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم بود (جدول ۶). مصرف نانوسیلیسیم باعث کاهش مصرف میزان محلول اضافه شده شد. به‌طوری‌که در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم باعث کاهش میزان مصرف محلول به میزان ۱۷٪ نسبت به شاهد و تیمار ۲ میلی‌مولار سیلیسیم شد (جدول ۶). کارایی مصرف آب افزایش جزئی داشت؛ ولی تیمارهای مختلف تأثیری بر این فاکتور نداشتند (داده‌ها نشان داده نشده است).

طول و تراکم پرزهای ساقه به‌طور بصری بررسی شد و نشان داد که کاربرد نانوسیلیسیم تأثیر بیشتری بر طول پرز ساقه گوجه‌فرنگی نسبت به سیلیسیم داشت. بیشترین طول پرز ساقه در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم (با میانگین ۲/٥٤٦ میلی‌متر) مشاهده شد. کمترین تراکم و طول پرز ساقه (۰/۱۷٤ میلی‌متر)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

جدول ۳. اثر سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر وزن تر و خشک گیاه، حجم ریشه، محتوای کلروفیل و مقدار نسبی آب بافت

تیمار	وزن تر گیاه (گرم در گیاه)	وزن خشک گیاه (گرم در گیاه)	حجم ریشه (میلی‌لیتر در گیاه)	محتوای کلروفیل (SPAD value)	مقدار نسبی آب بافت (٪)
شاهد	۱/۰۹۰۶^{ab}	۹/۸۰^{a}	۵/۵۵^{a}	۳۳/۵۰^{a}	۷۴/۴۴^{a}
۱ میلی‌مولار سیلیسیم	۱/۱۵۷۵^{a}	۹/۸۶^{a}	۵/۳۲^{ab}	۳۳/۲۲^{a}	۸۷/۹۲^{a}
۲ میلی‌مولار سیلیسیم	۰/۷۵۶۹^{bc}	۹/۱۵^{a}	۵/۰۸^{b}	۳۵/۰۷^{a}	۷۷/۵۳^{a}
۱ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۰/۷۷۲۹^{abc}	۹/۳۳^{a}	۵/۰۰^{b}	۳۰/۴۲^{a}	۷۸/۹۱^{a}
۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۰/۶۳۴۸^{c}	۹/۱۴^{a}	۴/۹۶^{b}	۳۳/۲۷^{a}	۸۲/۷۷^{a}

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۴. اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر خصوصیات فتوسنتزی

تیمار	فتوسنتز (میکرومول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه)	هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	نرخ تبخیر و تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه)	غلظت CO_2 درون روزنه‌ای (میکرومول بر مول)
شاهد	۵/۸۰۹۵^{ab}	۴/۷۸۵۳^{a}	۵/۷۸۷^{a}	۳۲۱/۱۷^{a}
۱ میلی‌مولار سیلیسیم	۴/۷۰^{b}	۳/۷۷^{b}	۶/۴۱^{a}	۳۰۴/۰۸^{ab}
۲ میلی‌مولار سیلیسیم	۵/۰۱^{b}	۴/۳۶^{ab}	۵/۹۳^{a}	۲۸۶/۱۷^{b}
۱ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۵/۷۰^{ab}	۳/۶۶^{b}	۶/۰۴^{a}	۲۹۶/۰۸^{ab}
۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۶/۴۹^{a}	۳/۷۰^{b}	۵/۵۴^{a}	۳۰۵/۰۰^{ab}

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

در غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم مشاهده شد (شکل ۱).

بحث

سیلیسیم اثر بهتری نسبت به نانوسیلیسیم در وزن تر گیاه داشت؛ اما بر وزن خشک اثر معنی‌داری نداشت. نتایج مشابه توسط موسی (۳۰) بیان کرد که در گیاه ذرت، افزودن سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک کل گیاه نداشت. هم‌چنین، سیلیسیم تأثیری بر وزن خشک گوجه‌فرنگی رقم Hong نداشت (۱۰). نتایج متناقض دیگری مبنی بر اثر افزایشی و بی‌تأثیر بودن سیلیسیم بر وزن خشک وجود دارد. ولی نتایج متعدد تأییدکننده افزایش وزن تر توسط سیلیسیم است. محقق و همکاران (۷) در بررسی کاربرد سه غلظت (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم) بر رشد و عملکرد دو رقم خیار در کشت هیدروپونیک نشان دادند که اضافه کردن سیلیسیم به محلول غذایی سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و شاخساره می‌شود (۷). نتایج بررسی اثر غلظت سیلیسیم (صفر، ۱ و ۲ میلی‌مولار) در شرایط تنش شوری در گیاه توت‌فرنگی (*Fragaria* × *ananassa* Duch) نشان داد که کاربرد ۱ میلی‌مولار سیلیسیم در شرایط غیرشور باعث افزایش وزن تر و خشک و تعداد برگ می‌شود (۵). نتایج تحقیقات پیوست و همکاران (۳) در بررسی اثر سیلیسیم و تنش شوری بر رشد کاهوپیچ (*Lactuca sativa* L. Var. *Capitata* f. Butterhead)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

جدول ۵. اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر کارایی مصرف آب و هدایت مزوفیلی

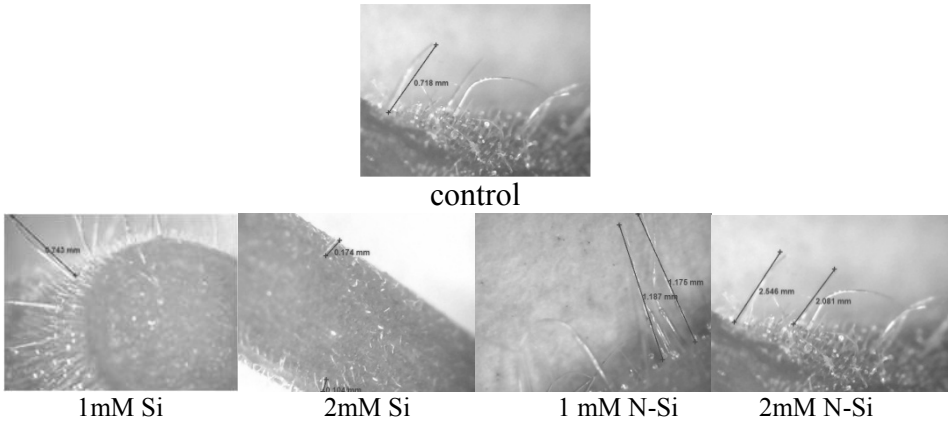
تیمار	کارایی مصرف آب فتوسنتزی (H_2O بر مول CO_2 میکرومول)	هدایت مزوفیلی (CO_2 میلی مول در مترمربع در ثانیه)
شاهد	۷/۶۸^{ab}	۹/۱۵^{d}
۱ میلی‌مولار سیلیسیم	۴/۰۲^{b}	۹/۴۷^{cd}
۲ میلی‌مولار سیلیسیم	۵/۰۲^{b}	۱۰/۴۲^{a}
۱ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۷/۳۵^{ab}	۱۰/۰۱^{ab}
۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۹/۹۶^{a}	۹/۸۲^{bc}

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۶. اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر قطر ساقه و میزان محلول اضافه شده

تیمار	قطر ساقه (سانتی‌متر)	میزان محلول اضافه شده (میلی‌لیتر)
شاهد	۰/۵۸^{a}	۱۷۵/۰۰^{a}
۱ میلی‌مولار سیلیسیم	۰/۵۹^{a}	۱۴۰/۰۰^{ab}
۲ میلی‌مولار سیلیسیم	۰/۵۸^{a}	۱۴۷/۵۰^{ab}
۱ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۰/۵۳^{ab}	۱۲۷/۵۰^{ab}
۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم	۰/۴۸^{b}	۱۰۰/۰۰^{b}

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند.



شکل ۱. اثر غلظت‌های مختلف سیلیسیم و نانوسیلیسیم بر تراکم و طول پرز ساقه گوجه‌فرنگی

در شرایط کشت هیدروپونیک نشان داد که سطوح مختلف سیلیسیم باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک و طول ریشه می‌شود. این محققین بیان داشتند که علت کاهش رشد ریشه در تیمارهای سیلیسیم در شرایط غیر شور، وجود مقادیر زیاد سیلیسیم و اختلالات ناشی از مقادیر زیاد سیلیسیم در گیاه و یا بلوغ زود هنگام سلول‌ها می‌باشد (۳). یئو و همکاران (۴۳) بر

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

این عقیده هستند که وجود مقادیر زیاد سیلیسیم در دیواره سلولی باعث استحکام دیواره در مراحل اولیه رشد و در نتیجه کاهش اندازه سلول و اندازه گیاه می‌شود. اثرهای متناقض کاهشی و افزایشی رشد توسط نانوذرات نسبت به فرم فلزی در سایر عناصر نیز گزارش شده است. نتایج تحقیق یانگ و همکاران (۴۱) نشان داد که در گیاه اسفناج، کاربرد نانوتیتانیوم باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه نسبت به تیتانیوم شد. نتایج تحقیق تالگر و همکاران (۳۷) نشان داد که با افزایش غلظت نانوروی از ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در گیاه سیر، طول ریشه کاهش یافت. در آزمایش حاضر نیز اثر کاهشی نانوذرات سیلیسیم بر رشد ریشه گوجه‌فرنگی در غلظت بالای آن (۲ میلی‌مولار) مشاهده شد (جدول ۳).

سیدلر فاطمی و همکاران (۵) در بررسی اثر سیلیسیم بر کاهش تنش شوری در گیاه توت‌فرنگی مشاهده کردند که سیلیسیم در شرایط غیرشور تأثیر معنی‌داری بر شاخص کلروفیل ندارد. این نتایج تأییدی بر نتایج حاصله در مورد گوجه‌فرنگی است که نشان داد سیلیسیم و نانوسیلیسیم اثری بر کلروفیل برگ در شرایط بهینه رشد نداشت؛ اگرچه بیشتر گزارش‌ها مبنی بر اثر مثبت سیلیسیم بر میزان کلروفیل است. نتایج تحقیقات گرامی و همکاران (۶) در بررسی اثر سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم در سه غلظت (شاهد، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بر گیاه برنج نشان داد که با افزایش سطوح تیمار، مقدار کلروفیل کل و کلروفیل a، b افزایش می‌یابد (۶). همچنین، نتایج تحقیق آگاری و همکاران (۱۰) نشان داد که با کاهش مقدار سیلیسیم، مقدار کلروفیل برگ برنج کاهش می‌یابد. تأثیر سیلیسیم بر افزایش مقدار کلروفیل برگ از طریق تأثیر بر فعالیت آنزیم ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز (۹) و جلوگیری از تخریب کلروفیل توسط سیلیسیم می‌باشد (۶). نتایج تحقیقات یانگ و همکاران (۴۱) در بررسی اثر تیتانیوم و نانوتیتانیوم نشان داد که نانوتیتانیوم باعث افزایش میزان کلروفیل برگ اسفناج در مقایسه با تیمار تیتانیوم شد. اما در این آزمایش، تفاوتی در میزان کلروفیل گوجه‌فرنگی با استفاده از شکل فلزی و نانوی سیلیسیم مشاهده نشد.

میزان نسبی آب بافت از نظر آماری تحت تأثیر سیلیسیم نانو و غیر نانو قرار نگرفت (جدول ۳). نتایج این آزمایش با نتایج رومرو- آراندا و همکاران (۳۴) در بررسی اثر سیلیسیم در گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط شوری مطابقت داشت. این محققین مشاهده کردند که کاربرد سیلیسیم در شرایط غیرشور تأثیر معنی‌داری بر آب بافت ندارد. کاهش از دست‌دهی آب بافت در تیمارهای سیلیسیم به‌دلیل کاهش تعرق تحت تأثیر سیلیسیم و یا تجمع این عنصر در سلول‌های زیرین اپیدرم است که میزان از دست‌روی آب از طریق کوتیکول را کاهش می‌دهد (۱۲، ۲۰، ۲۹ و ۴۰).

افزایش تعداد و اندازه کرک‌های سطحی ساقه در شکل ۱ نشان داده شده است. در آزمایشی روی خیار، تجمع سیلیسیم در کرک‌های ساقه گزارش شد و از این طریق مقاومت گیاه در برابر سفیدک پودری کاهش یافت (۳۷).

نتایج نشان داد که ذرات نانو اثر بیشتری بر میزان فتوسنتز داشت و بیشترین میزان فتوسنتز در نانوسیلیسیم ۲ میلی‌مولار مشاهده شد و در همین غلظت سیلیسیم، میزان فتوسنتز کاهش یافت. علت این موضوع احتمالاً نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر ذرات نانوسیلیسیم به بافت گیاه و اثرهای مورفولوژیک آن باشد (۳۰). موسی (۳۰)، در بررسی اثر سیلیسیم بر خصوصیات فیزیولوژیک ذرت تحت شرایط شوری نشان داد که سیلیسیم فعالیت فتوسنتزی گیاه در شرایط غیرشور نسبت به گیاهان شاهد را ۲۲٪ افزایش داد. او افزایش فتوسنتز را به‌علت ذخیره و افزایش سیلیسیم در دیواره سلول برگ ایستاده و سایه‌گستری کمتر آن دانست که در نتیجه باعث امکان افزایش دسترسی به نور توسط برگ‌ها و افزایش فتوسنتز می‌شود. نتایج تحقیق لی و همکاران (۲۴) در بررسی اثر سیلیکات پتاسیم بر رشد و فتوسنتز گیاه خیار در شرایط هیدروپونیک نشان داد که غلظت‌های زیاد سیلیسیم، برگ‌های تیره‌تری را ایجاد می‌کند و ظرفیت فتوسنتز را افزایش می‌دهد و در نتیجه افزایش وزن تر و میزان کلروفیل را به دنبال دارد.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

ساموئل و همکاران (۳۵) نشان دادند که افزایش رشد و عملکرد گیاه در حضور سیلیسیم از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها صورت می‌گیرد که باعث ایستادگی ساقه و گسترش برگ‌ها در برابر نور و افزایش جذب نور و ظرفیت فتوسنتزی گیاه گوجه‌فرنگی می‌شود.

افزودن سیلیسیم و نانوسیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر میزان تعرق گیاه نداشت. نتایج گائو و همکاران (۱۹) در بررسی اثر سیلیسیم بر گیاه در شرایط هیدروپونیک نشان داد که افزودن سیلیسیم به‌طور معنی‌داری تعرق و هدایت روزنه‌ای سطح رویی و زیرین برگ را کاهش می‌دهد. هم‌چنین، با کاربرد سیلیسیم بر گیاه ذرت مشاهده شد که غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم به‌طور معنی‌داری تعرق سطح برگ را کاهش می‌دهد. علت کاهش تعرق را می‌توان آغشته شدن دیواره سلول‌های اپیدرمی به‌وسیله لایه‌های محکم سیلیسیم دانست (۱۷).

با استفاده از سیلیسیم و مخصوصاً نانوسیلیسیم، میزان محلول مصرفی کاهش یافت. سیدلر فاطمی و همکاران (۵) بیان کردند که سیلیسیم در دیواره‌های سلول رسوب کرده و با ماکرومولکول‌های آلی ترکیب شده و ترکیبات کلوئیدی بی‌شکل را با سطح جذب زیاد ایجاد می‌کند. مقدار یک گرم از ذره‌های سیلیسیم با قطر ۷ نانومتر دارای سطح جذبی معادل ۴۰۰ مترمربع است. در نتیجه، نانوذرات سیلیسیم بر خصوصیت مرطوب بودن لوله‌های آوند چوبی و میزان انتقال آب اثرگذار بوده و کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد (۵).

کاهش مصرف محلول‌های غذایی علاوه بر کاهش هزینه تهیه نمک‌های محلول غذایی، باعث کاهش مصرف آب می‌شود. اضافه کردن نانوسیلیسیم باعث کاهش مصرف محلول غذایی شد. در حالی‌که وزن خشک گیاه تغییری نکرد؛ اگرچه وزن تر به‌طور قابل پیش‌بینی به‌دلیل کاهش جذب آب کاهش یافت. کمترین میزان مصرف محلول غذایی در غلظت ۲ میلی‌مولار نانوسیلیسیم و با ۱۷ درصد کاهش نسبت به شاهد همراه بود (جدول ۶). داتنوف و پرس (۱۵) در بررسی اثر سیلیسیم بر گل ژربرا (*Gerbera jamesonii*) مشاهده کردند که تیمارهای مختلف سیلیسیم در قطر ساقه تأثیر معنی‌داری نداشت، ولی بر قطر گل تأثیر معنی‌دار داشت. کامنیدو و همکاران (۲۲) مشاهده کردند که کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیکات سدیم باعث افزایش معنی‌دار قطر ساقه گل بریدنی آفتابگردان نسبت به شاهد شد. تصور می‌شود که سیلیسیم با ایجاد کمپلکس‌های پیچیده با ترکیبات دیواره سلول، در استحکام و اندازه منافذ دیواره و نیز رشد قطری و طولی یاخته‌ها، به‌ویژه آوند چوبی این گیاهان، نقش اساسی داشته باشد (۲). سیلیسیم اثر معنی‌داری بر قطر ساقه نداشت و در غلظت‌های زیاد نانوسیلیسیم باعث کاهش آن شد. چنین نتایجی تاکنون گزارش نشده است.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی، سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید است که بر رشد و سلامت گیاه اثر می‌گذارد. کاربرد سیلیسیم به شکل فلزی یا نانو با اندازه ذرات ۲۰-۳۰ نانومتر در شرایط بهینه رشد گوجه‌فرنگی (عدم وجود تنش‌های غیرزیستی) باعث افزایش فتوسنتز و وزن تر، کارایی مصرف آب فتوسنتزی و خصوصاً کاهش مصرف محلول غذایی در شرایط کشت هیدروپونیک شد. در مورد تأثیر نانوسیلیسیم تحقیقات اندکی انجام شده است و از آنجایی که مکانیسم اصلی اثر نانوذرات هنوز ناشناخته مانده، پژوهش‌های بیشتری نیاز است که به بررسی مکانیزم جذب و انتقال ذرات نانو و تغییرات فیزیولوژی گیاه بپردازد.

منابع مورد استفاده

۱. ارزانی، ا. ۱۳۸۶. کشت بدون خاک (هیدروپونیک) تجاری و خانگی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۱۰ صفحه.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

۲. بندانی، م. و ا. عبدل‌زاده. ۱۳۸۶. اثر تغذیه سیلیسیم در تحمل به شوری گیاه پوکسینلیا دیستنس *Puccinellia distans*. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۴: ۱۱۱-۱۱۹.

۳. پیوست، غ.، م. زارع و ح. ا. سمیع‌زاده. ۱۳۸۷. اثر متقابل سطوح مختلف سیلیسیم و تنش شوری بر رشد کاهوپیچ تحت شرایط کشت در سیستم لایه نازک محلول غذایی NFT. علوم و صنایع کشاورزی، ویژه علوم باغبانی ۲۲(۱): ۷۹-۸۸

۴. خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۹. مباحث پیشرفته در تغذیه گیاه. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.

۵. سیدلر فاطمی، ل.، س. ج. ا. 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.

۶. گرامی، م.، م. قربانلی، ا. فلاح و م. بابایی. ۱۳۸۸. بررسی آثار سیلیس بر روی فتوسنتز، عملکرد و رشد رویشی گیاه برنج در شرایط گلدانی (http://www.berenge.com).

۷. محقق، پ.، م. شیروانی و س. قاسمی. ۱۳۸۹. تأثیر کاربرد سیلیسیم بر رشد و عملکرد دو رقم خیار در سیستم هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۱(۱): ۳۵-۴۰.

۸. مظفریان، م.، ز. عفیفی‌پور و م. حقیقی. ۱۳۹۰. اثر نانوسیلیسیوم و سیلیکات پتاسیم بر پرایمینگ بذرهای گوجه‌فرنگی. همایش فناوری‌های نوین در کشاورزی، دانشگاه زنجان، صفحات ۴۹۶-۴۹۸.

9. Adatia, M.H. and R.T. Besford. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. Ann. Bot. 58: 343-351.
10. Agarie, S., H. Uchida, W. Agata, F. Kubota and P.B. Kaufman. 1993. Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice plant (*Oryza stiva*). Crop Prod. Improve. Technol. 34: 225-234.
11. Al-Aghabary, K., Z. Zhu and Q. Shi. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and anti-oxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. J. Plant Nutr. 27: 2101-2115.
12. Belanger, R.R., P.A. Bowen, D.L. Ehret and J.G. Menzes. 1995. Soluble silicone: Its role in crop and disease management of greenhouse crops. Plant Dis. 79: 329-336.
13. Cherif, M., N. Benhamou, J.G. Menzies and R.R. Bélanger. 1992. Silicon-induced resistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. Physiol. Mol. Plant Pathol. 41: 411-425.
14. Claussen, W. 2002, Growth, water use efficiency, and proline content of hydroponically grown tomato plants as affected by nitrogen source and nutrient concentration. Plant Soil 257: 199-209.
15. Datnoff, L.E. and N.A. Peres. 2007. Potential horticultural and disease management benefits of silicon fertilization of gerbera. Research Report, Department of Plant Pathology, University of Florida.
16. Doshi, R., W. Braida, C. Christodoulatos, M. Wazne and G. O'connor. 2008. Nano aluminum: Transport through sand columns and environmental effects on plant and soil communities. Environ. Res. 106: 296-303.
17. Epstein, E. 1999. Silicon. Plant Physiol. 50: 641-664.
18. Haghighi, M., Z. Afifipour and M. Mozafariyan. 2012. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. J. Biol. Environ. Sci. 6(16): 87-90.
19. 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.
20. Hattori, T., K. Sonobe, S. Inanaga, P. An and S. Morita. 2008. Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress. J. Plant Nutr. 31(6): 1046-1058.
21. Hong, F., F. Yang, C. Liu, Q. Gao, Z. Wan, F. Gu, C. Wu, Z Ma, J. Zhou and P. Yang. 2005. Influences of nano-TiO_2 on the chloroplast aging of spinach under light. Biol. Trace Elem. Res. 104: 249-260.
22. Kamenidou, S., T.J. Cavins and S. Marek 2008. Silicon supplements affect horticultural traits of greenhouse-produced ornamental sunflowers. Hortsci. 43(1): 236-239.
23. Khodakovskaya, M., E. Dervishi, M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li, F. Watanabe and A.S. Biris. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. ACS Nano 3: 3221-3227.
24. Lee, J., P. Jong and S.U. Kyeong. 2000. Effect of potassium silicate on growth, photosynthesis, and inorganic ion absorbtion in cucumber hydroponics. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 41(5): 480-484.
25. Lee, C.W., S. Mahendra, K. Zodrow, D. Li, Y. Tsai, J. Braam and P.J.J. Alvarez. 2010. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabodopsis thaliana*. Environ. Toxicol. Chem. 29: 669-675.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]

26. Lin, D. and B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth. Environ. Pollut. 150: 243-250.
27. Lin, D. and B. Xing. 2008. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. Environ. Sci. Technol. 42: 5580-5585.
28. Lu, C.M., C.Y. Zhang, J.Q. Wen, G.R. Wu and M.X. Tao. 2002. Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. Soybean Sci. 21: 168-172.
29. Matoh, T., P. Kairusmee and E. Takahashi. 1986. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. Soil Sci. Plant Nutr. 32: 295-304.
30. Moussa, H.R. 2006. Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). Int. J. Agric. Biol. 8(2): 293-297.
31. Pourkhaloee, A., M. Haghighi, M.J. Saharkhiz, H. Jouzi and M.M. Doroodmand. 2011. Investigation on the effects of carbon nanotubes (CNTs) on seed germination and seedling growth of salvia (*Salvia microsiphon*), pepper (*Capsicum annum*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*). J. Seed Technol. 33(2): 155-160.
32. Raven, J.A. 2003. Cycling silicon: The role of accumulation in plants. New Phytol. 158: 419-430.
33. Ritchie, S.W. and H.T. Nguyen. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Sci. 30: 105-111.
34. Romero-Aranda, M.R., O. Jurado and J. Cuartero. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. J. Plant Physiol. 163: 847-855.
35. Samuels, A.L., A.D.M. Glass, D.L. Ehret and J. G. Menzies. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: Changes in surface characteristics. J. Ann. Bot. 72: 433-440.
36. Seeger, E.M., A. Baun, M. Kastner and S. Trapp. 2009. Insignificant acute toxicity of TiO2 nanoparticles to willow trees. J. Soils Sediments 9: 46-53.
37. 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.
38. Trenholm, L.E., L.E. Datnoff and R.T. Nagata. 2004. Influence of silicon on drougth and shade tolerance of St. Augustinegrass. HortTechnol. 14: 487-490.
39. Voogt, W. and C. Sonneveld. 2001. Silicon in horticultural crops grown in soilless culture. PP. 115-131. *In:* Datnoff, L.E., G.H. Snyder and G.H. Korndo¨rfer (Eds.), Silicon in Agriculture, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
40. Xiao, Q., F.D. Zhang, Y.J. Wang, J.F. Zhang and S.Q. Zhang. 2008. Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by nano-materials on crop yield and quality. Acta Metall. Sin. 14(5): 951-955.
41. Yang, F., F.S. Hong, W.J. You, C. Liu, F. Gao, Q. Wu and P. Yang. 2006. Influences of nano-anatase TiO_2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. Biol. Trace Elem. Res. 110: 179-190.
42. Yang, L. and D.J. Watts. 2005. Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. Toxicol. Letters 158: 122-132.
43. Yeo, A.R., S.A. Flowers, G. Rao, K. Welfare, N. Senanayake and T.J. Flowers. 1999. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow. Plant, Cell Environ. 22: 559-565.
44. Zhu, H., J. Han, J.Q. Xiao and Y. Jin. 2008. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. J. Environ. Monit. 10: 713-717.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2026-02-25]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1393.5.3.4.0]