ارزیابی اثر محلول‌پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر خصوصیات فتوسنتزی برگ گیاهچه سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

بیژن سعادتیان[۱]، محمد کافی[۱*]، محمد بنایان اول[۱] و جعفر نباتی[۲]

(تاریخ دریافت:۱۳۹۴/۴/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۲۸)
DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.7.4.111

چکیده

اگرچه سیلیسیم در بیشتر گیاهان عنصری ضروری به شمار نمی‌رود، اما نقش‌های سودمندی در رشد گیاهان دارد. از این رو، بررسی نقش تغذیه‌ای سیلیسیم و کاربرد ترکیبات نانو حاوی این عنصر ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۲ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل اندازه ذرات سیلیکات سدیم در دو سطح (نانو و میکرو) و سطوح محلول‌پاشی (صفر (بدون محلول‌پاشی)، آب مقطر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نتایج نشان داد که سیلیسیم بر صفات شاخص کلروفیل، حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II، فتوسنتز، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و هدایت مزوفیلی برگ سیب‌زمینی رقم آگریا اثر مثبت داشت. در مقابل، هدایت روزنه‌ای، تعرق و دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای با مصرف سیلیسیم کاهش یافت. در بیشتر صفات، اثر نانوذرات سیلیکات سدیم بیشتر از ذرات میکرو بود و غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیسیم بیشترین تأثیر را دارا بود. به طورکلی، نانوذرات، در مقایسه با ذرات میکرو، کارایی بیشتری داشتند. از این رو، استفاده از نانوذرات سیلیکات سدیم در حد بهینه، خصوصیات فتوسنتزی گیاه را بهبود می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیلیسیم، تعرق، شاخص کلروفیل، نانومواد، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

سیلیسیم دومین عنصر معدنی موجود در پوسته زمین است و در حدود ۲۷/۳ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد (۴). در محلول خاک، سیلیسیم به صورت اسید مونوسیلیسیک اسید یافت می‌شود و به همین شکل نیز جذب گیاه می‌گردد (۲۴). نقش سیلیسیم در زیست‌شناسی گیاهی به طور کامل مشخص نشده است و مطالعاتی برای کشف ارتباط سیلیسیم با فعالیت‌های متابولیک و فیزیولوژیک در حال انجام می‌باشد (۲، ۳، ۱۰، ۲۷، ۲۸ و ۲۹). هرچند سیلیسیم در بسیاری از گیاهان زراعی عنصری ضروری برای رشد محسوب نمی‌شود، اما بسیاری از گیاهان قادر به جذب سیلیسیم بوده و اثرهای سودمندی بر رشد و نمو گیاهان دارد (۲، ۷، ۹، ۱۰ و ۲۷). به

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. پژوهشکده علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.kafi@um.ac.ir

طوری که از آن به عنوان یک عنصر شبه ضروری یاد شده است (۴).

کاربرد سیلیسیم در هر دو شرایط نرمال و تنش، بهبود خصوصیات رشدی گونه‌های گیاهی مختلف را در پی داشته و این اثرها به گونه گیاهی و مقدار سیلیسیم وابسته است (۲۲). بنا بر نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده، بیشترین اثرهای سودمند سیلیسیم در اندام‌های برگ، ساقه و پوسته گیاهان مشاهده می‌شود (۱۸). سیلیسیم باعث بهبود تعادل آبی گیاه (۹ و ۲۲)، تقویت فعالیت سیستم دفاعی گیاه (۵، ۱۱، ۲۷ و ۲۸)، تغییرات ساختاری در برگ (۲ و ۲۲)، افزایش محتوای کلروفیل (۹ و ۱۱)، بهبود فعالیت فتوسنتزی (۹، ۱۱، ۱۴ و ۲۷)، مقاومت به تنش‌های محیطی (۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۸ و ۲۲) و تقلیل اثرهای ویژه یون‌ها در شرایط تنش می‌گردد (۲۲).

امروزه استفاده از نانوذرات مورد توجه بسیاری از محققین رشته کشاورزی قرار گرفته است (۹). نانومواد به دلیل اندازه کوچک، خصوصیات منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و می‌توانند خصوصیات فیزیکو- شیمیایی را در مقایسه با شکل متداول مواد، تغییر دهند. ذرات نانو در مقایسه با ذرات متداول، از سطح بیشتری برخوردارند و این ویژگی امکان افزایش حلالیت و واکنش‌پذیری سطحی را فراهم می‌نماید (۲۶).

برخی از گزارش‌ها اثرهای سودمند کاربرد نانومواد در کشاورزی، مربوط به استفاده از نانولوله‌های کربنی، تیتانیوم و سیلیسیم می‌باشد. البته یافته‌های کمی در مورد اثر نانومواد در بخش کشاورزی وجود دارد. به عنوان مثال، می‌توان به استفاده از نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره‌ای اشاره نمود که برای نفوذ به غشای سلولی و ایفای نقش نانوحامل در سلول به کار رفته است (۱۵). همچنین، کاربرد نانواکسید تیتانیوم با افزایش در آنزیم نیترات ردوکتاز و ممانعت از پیری کلروپلاست، سبب افزایش جذب آب و رهایش کود شده است (۱۳ و ۱۶). در تحقیقی دیگر، غلظت یک میلی‌مولار نانوسیلیس خسارت ناشی از تنش شوری بر جوانه‌زنی و خصوصیات رشدی بذر گوجه‌فرنگی را کاهش داد (۸). همچنین، گزارش شده که نانوذرات سیلیسیم و نانوذرات تیتانیوم فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز را در گیاه سویا (*Glycine max*) بهبود دادند (۱۷). نتایج مطالعه روی گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicom*) در محیط کشت هیدروپونیک، حاکی از نقش مثبت ذرات نانو و میکرو سیلیسیم در تخفیف اثرهای تنش شوری در صفات وزن تر گیاه، محتوای کلروفیل، سرعت فتوسنتز و رطوبت نسبی برگ بود. همچنین، هر دو اندازه ذرات سیلیسیم باعث بهبود سرعت فتوسنتز، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی در شرایط تنش شوری شدند. اما تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای نانو و میکرو سیلیسیم از نظر صفات مورد بررسی مشاهده نشد (۹).

سیب‌زمینی یکی از محصولات مهم کشاورزی به‌شمار می‌رود. در حال حاضر، ریزازدیادی یکی از روش‌های جدید برای تکثیر غده‌های بذری است که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و منجر به تولید مقدار زیادی ریزغده سیب‌زمینی عاری از بیماری‌های خاک‌زی می‌شود (۲۱). این روش، با توجه به آنکه در محیط کنترل شده و استریل انجام می‌گیرد، قابلیت تولید گیاهچه‌های عاری از ویروس با ۱۰۰٪ اطمینان را داراست (۱۲). ریزغده‌ها برای تولید بذر کلاس برتر سیب‌زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند و با تکثیر آنها، غده‌های بذری تولید می‌گردد (۲۱). پرورش گیاهچه‌های سیب‌زمینی جهت تولید ریزغده در محیط هیدروپونیک صورت می‌گیرد (۱۲ و ۲۱). گیاهچه‌های سیب‌زمینی حاصل از کشت بافت حساسیت بسیار بالایی به تغییرات محیطی، تنش‌های زیستی و غیر زیستی دارند (۲۱). از این رو، تولید بوته‌های سالم و قوی از طریق بهبود خصوصیات گیاهچه‌ها در مراحل حساس، امکان افزایش راندمان تولید مینی تیوبر را فراهم خواهد کرد. اگرچه به منظور تغذیه گیاهچه‌های سیب‌زمینی از محلول‌های غذایی حاوی تمامی عناصر ضروری استفاده می‌شود، اما علی‌رغم اثبات اثر مثبت کاربرد سیلیسیم بر خصوصیات فیزیولوژیک و آناتومیک در گیاهان مختلف (۸، ۱۱، ۲۲ و ۲۹)، این عنصر جایگاهی در تغذیه سیب‌زمینی در محیط کشت هیدروپونیک ندارد. همچنین، امروزه با توجه به

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی و غلظت‌های مورد استفاده برای تهیه محلول غذایی هوگلند تصحیح شده

ترکیب شیمیایی	نام ماده	ماده مورد نیاز برای ۱۰۰ لیتر محلول غذایی (گرم)
NH_4NO_3	نیترات آمونیوم	۸۰
$Ca(NO_3)_2$	نیترات کلسیم	۱۱۸
KNO_3	نیترات پتاسیم	۴۹
$MgSO_4$	سولفات منیزیم	۵۰/۵
KH_2PO_4	پتاسیم دی هیدروژن فسفات	۶/۸
H_3BO_3	اسید بوریک	۰/۲۸۶
$MnCl_2$	کلرید منگنز	۰/۱۸۱
$ZnSO_4$	سولفات روی	۰/۰۲۲
$CuSO_4$	سولفات مس	۰/۰۰۵
Na_2MoO_4	سدیم مولیبدنات	۰/۰۱۲
Na-Fe-EDTA	کلات آهن	۴/۲

گسترش استفاده از شکل‌های نانومواد، اثر نانوذرات سیلیسیم بر گونه‌های گیاهی در حال بررسی است (۸، ۹ و ۱۳).

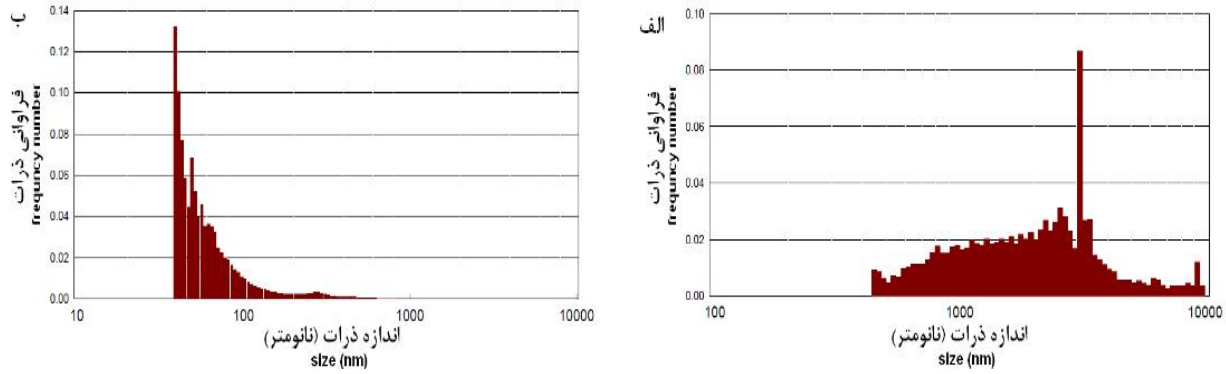
باتوجه به مطالب بیان شده، این پژوهش با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف سیلیسیم در مرحله حساس و مهم استولون‌دهی بر خصوصیات فتوسنتزی و کارایی کوانتومی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی و مقایسه کارایی ذرات نانو و میکرو سیلیسیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر اندازه ذرات سیلیسیم و سطوح مختلف محلول‌پاشی بر پارامترهای فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی برگ سیب‌زمینی رقم آگریا، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در پاییز سال ۱۳۹۲ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل اندازه ذرات سیلیکات سدیم در دو سطح (نانو و میکرو) و محلول‌پاشی غلظت‌های سیلیکات سدیم در شش سطح [صفر (بدون محلول‌پاشی)، آب مقطر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم سیلیکات سدیم در لیتر] بود.

ابتدا از طریق کشت بافت، گره‌های دارای جوانه جانبی سیب‌زمینی رقم آگریا در محیط MS و شرایط درون شیشه‌ای رشد یافتند. پس از ۲۵ روز، گیاهچه‌های عاری از عوامل بیماری‌زا و یکسان از نظر اندازه انتخاب شدند. جهت تطابق با محیط طبیعی، گیاهچه‌ها به مدت یک هفته در بستر کوکوپیت در محیط گلخانه قرار گرفتند. سپس هر گیاهچه به گلدان پلاستیکی با قطر دهانه ۱۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر منتقل شد. گلدان‌ها حاوی بستر پرلیت، کوکوپیت و ماسه به نسبت‌های ۴:۳:۳ بودند. نیمی از بستر در زمان انتقال و نیم دیگر آن در دو مرحله (۲ و ۴ هفته پس از انتقال) به منظور خاک‌دهی پای بوته استفاده شد. هر تکرار شامل چهار گیاهچه بود.

در طول دوره آزمایش، گیاهچه‌های سیب‌زمینی با محلول غذایی هوگلند تصحیح شده تغذیه شدند (جدول ۱). محلول‌دهی هفته‌ای یک بار انجام گرفت و در هر مرحله ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول به هر گلدان اضافه شد. به غیر از محلول‌دهی، هفته‌ای دو بار نیز گیاهچه‌ها با آب مقطر و به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر با فاصله دو روز یکبار و توسط بشر مدرج آبیاری شدند. اسیدیته محلول توسط اسید سولفوریک غلیظ در حد ۵/۶ با کمک pH متر مدل ۷۴۴ (Metrohm) تنظیم گردید. دمای



شکل ۱. نتایج حاصل از اندازه‌گیری قطر ذرات میکرو (الف) و نانو (ب) سیلیکات سدیم توسط دستگاه Particle size

روز و شب گلخانه به ترتیب ۲±۲۴ و ۲±۱۸ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰٪ تنظیم شد (۹).

نانوذرات سیلیکات سدیم در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی تولید شد. تعیین اندازه ذرات نمونه اولیه و نانو با دستگاه اندازه‌گیری ذرات (Particle size) مدل VASCO3 ساخت شرکت Cor Douan فرانسه (دقت اندازه‌گیری در بازه ۶ میکرون تا ۱ نانومتر) انجام شد. از آب به عنوان حلال قطبی در این فرایند استفاده گردید. میانگین قطر ذرات نانو و میکرو استفاده شده در آزمایش به ترتیب ۶۸ و ۲۳۷۱ نانومتر به‌دست آمد (شکل ۱). درجه خلوص هر دو اندازه ذرات ۹۹ درصد، جامد بی‌رنگ با جرم مولی ۱۲۲/۰۶ گرم بود. ذرات میکرو به صورت گرانول و ذرات نانو به صورت پودری بودند.

چهار هفته پس از انتقال گیاهچه‌های سیب‌زمینی به بستر کشت و همزمان با آغاز استولون‌دهی، محلول‌های نانو و میکرو با غلظت‌های مورد نظر تهیه شدند. سپس، برای افزایش کارایی جذب، از مویان سیتوگیت با غلظت دو در هزار استفاده شد (۲۳). با توجه به یافته‌های حاصل از آزمایش‌های پیشین، اسیدیته محلول‌ها توسط اسید کلریدریک یک نرمال معادل ۵ تنظیم شد. همچنین، به ازای هر گیاهچه، ۲۵ میلی‌لیتر محلول برای پاشش در نظر گرفته شد. این مقدار برای خیس نمودن کامل سطح برگ گیاهچه‌ها کافی بود. محلول‌پاشی در ساعات پایانی روز (۴ تا ۵ بعد از ظهر) انجام گرفت.

پنج روز پس از محلول‌پاشی، شاخص کلروفیل چهار برگ فوقانی توسعه یافته هر گیاهچه توسط دستگاه کلروفیل‌متر (Spad-502 Konica Minolta) ثبت و میانگین اعداد چهار گیاهچه برای هر واحد آزمایشی منظور گردید. از هر بوته بالاترین برگ جوان کاملاً توسعه یافته علامت‌گذاری گردید و پارامترهای فلورسانس کلروفیل و فتوسنتز برگ اندازه‌گیری شد. فلورسانس کلروفیل برگ‌ها توسط دستگاه فلورومتری مدل OS1-FL در شرایط نوری انجام شد و پارامترهای حداقل فلورسانس کلروفیل (F_s) و حداکثر فلورسانس کلروفیل (F_{ms}) ثبت گردید. عملکرد کوانتومی فتوسیستم دو ($\Phi PS\Pi$) در شرایط تطابق نوری از طریق معادله ۱ به‌دست آمد (۲۰):

$$\Phi PS\Pi = \frac{Fms - Fs}{Fms} \qquad [۱]$$

فتوسنتز خالص برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی بر حسب میکرومول دی‌اکسید کربن تثبیت شده بر متر مربع در ثانیه، تعرق بر حسب میلی‌مول آب بر متر مربع در ثانیه، غلظت دی‌اکسید کربن زیر اتاقک روزنه‌ای بر حسب میکرومول دی‌اکسید کربن بر مول و هدایت روزنه‌ای بر حسب مول دی‌اکسیدکربن بر متر مربع در ثانیه با دستگاه IRGA مدل LCi Consol تعیین شد. کارایی مصرف آب لحظه‌ای از تقسیم فتوسنتز به تعرق بر حسب میکرومول دی‌اکسید کربن تثبیت شده بر میلی‌مول آب خارج شده به دست آمد (۹). هدایت مزوفیلی ظاهری نیز از طریق تقسیم فتوسنتز به دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای برحسب مول دی‌اکسید کربن بر متر مربع در ثانیه محاسبه شد (۱). تمامی اندازه‌گیری‌ها در ساعت ۱۰ تا ۱۲ قبل

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس صفات شاخص کلروفیل، هدایت روزنه‌ای و پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		شاخص کلروفیل	فلورسانس اولیه کلروفیل	حداکثر فلورسانس کلروفیل	عملکرد کوآنتومی فتوسیستم Π	هدایت روزنه‌ای
تکرار	۲	۶/۱۶^{ns}	۴۱۷/۰*	۷۰۹/۱^{ns}	۰/۰۰۱۵**	۳۹/۸^{ns}
اندازه ذرات	۱	۰/۰۳^{ns}	۳۲/۱^{ns}	۸۲۸/۲^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}	۱۲۲/۳**
غلظت سیلیسیم	۵	۸/۱۰**	۱۷۸/۹^{ns}	۱۶۹۱۱/۲**	۰/۰۰۱۸**	۴۵۳/۶**
اندازه ذرات × غلظت سیلیسیم	۵	۰/۶۰^{ns}	۲۳/۸^{ns}	۶۲۵/۷^{ns}	۰/۰۰۰۲^{ns}	۱۰۷/۰**
خطا	۲۲	۱/۸۹	۱۰۱/۱	۲۴۶۷/۴	۰/۰۰۰۲	۱۳/۳
ضریب تغییرات (٪)	–	۴/۱	۵/۲	۷/۱	۲/۲	۱۱/۲

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

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی سطوح مختلف غلظت سیلیکات سدیم بر شاخص کلروفیل و پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

سیلیکات سدیم (میلی‌گرم در لیتر)	صفت		
	شاخص کلروفیل	حداکثر فلورسانس کلروفیل	عملکرد کوآنتومی فتوسیستم Π
صفر (شاهد)	۳۲/۴۷	۶۴۸/۹	۰/۷۰۳
آب مقطر	۳۴/۷۴	۶۲۵/۴	۰/۷۰۱
۱۰۰	۳۴/۷۸	۷۵۰/۶	۰/۷۴۳
۲۰۰	۳۴/۴۲	۷۲۱/۳	۰/۷۲۳
۳۰۰	۳۴/۳۷	۷۳۶/۹	۰/۷۳۸
۴۰۰	۳۶/۰۷	۷۴۰/۴	۰/۷۲۸
$LSD_{5\%}$	۱/۶۴	۵۹/۵	۰/۰۱۹

از ظهر انجام گرفت.

آنالیز واریانس داده‌ها و تعیین ضرایب همبستگی بین صفات توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین صفات با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

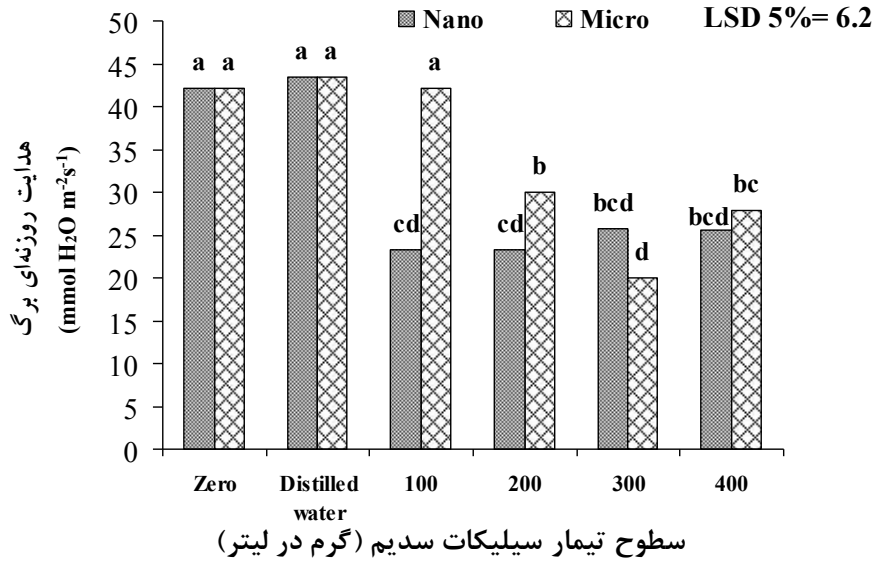
نتایج

شاخص کلروفیل برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس حاکی از معنی‌داری اثر سطوح غلظت سیلیسیم بر شاخص کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی بود (جدول ۲). اما اثر اصلی اندازه ذرات و اثر متقابل غلظت سیلیسیم و اندازه ذرات معنی‌دار نبود (جدول ۲). کمترین مقدار شاخص کلروفیل برگ در تیمار صفر (بدون محلول‌پاشی) به‌دست آمد و از این نظر با سایر سطوح تیماری تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). بیشترین مقدار شاخص کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم حاصل شد که در مقایسه با شاهد ۱۱/۱ درصد افزایش داشت (جدول ۳).

پارامترهای فلورسانس کلروفیل برگ

اثرهای اصلی اندازه ذرات و غلظت سیلیسیم و همچنین اثر



شکل ۲. اثر متقابل اندازه ذرات و غلظت سلیکات سدیم بر هدایت روزنه‌ای برگ سیب‌زمینی رقم آگریا.
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با یکدیگر تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

متقابل آنها بر صفت پارامتر فلورسانس اولیه کلروفیل برگ معنی‌دار نبود (جدول ۲). تنها سطوح غلظت سیلیسیم، پارامترهای حداکثر فلورسانس کلروفیل برگ و عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). در حالی که اثر اصلی اندازه ذرات و اثر متقابل غلظت سیلیسیم و اندازه ذرات در صفات یاد شده معنی‌دار نبود (جدول ۲). کمترین مقادیر پارامتر حداکثر فلورسانس کلروفیل در تیمارهای صفر (بدون محلول‌پاشی) و آب مقطر به‌دست آمد و از این نظر تفاوت آماری بین دو تیمار یاد شده وجود نداشت (جدول ۳). کاربرد سیلیسیم در مقایسه با تیمارهای صفر (شاهد) و آب مقطر، حداکثر فلورسانس کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی را به طور معنی‌داری افزایش داد. اما بین سطوح غلظت سیلیسیم از این نظر تفاوت آماری مشاهده نشد (جدول ۳). در تمامی سطوح غلظت سیلیسیم، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای شاهد و آب مقطر بود (جدول ۳). اگرچه سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر در مقایسه با ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم از نظر عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π برتری معنی‌داری داشت، اما هر یک از دو سطح یاد شده با سطوح غلظت ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم به صورت مقایسات مجزای دوتایی و بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، تفاوت نشان ندادند (جدول ۳).

هدایت روزنه‌ای برگ

اثرهای اصلی اندازه ذرات و غلظت سیلیسیم و اثر متقابل آنها بر هدایت روزنه‌ای برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی معنی‌دار بود (جدول ۲). هدایت روزنه‌ای برگ سیب‌زمینی در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم میکرو، تفاوت معنی‌داری با تیمارهای شاهد و آب مقطر نشان نداد. اما کاربرد غلظت مشابه سیلیسیم نانو (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) سبب کاهش ۴۵ درصدی هدایت روزنه‌ای برگ در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲). همچنین، در تیمار ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، هدایت روزنه‌ای برگ تیمار شده با نانوذرات، در مقایسه با ذرات میکرو، کاهش معنی‌داری نشان داد. اما در سطوح تیماری بالاتر، تفاوت معنی‌داری بین دو سطح اندازه ذره وجود نداشت (شکل ۲).

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس پارامترهای فتوسنتزی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		فتوسنتز	تعرق	CO_2زیر روزنه‌ای	کارایی مصرف آب لحظه‌ای	هدایت مزوفیلی برگ
تکرار	۲	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۰۰^{ns}	۳۷۲/۲^{ns}	۰/۱۷^{ns}	۳×۱۰$^{-۷ns}$
اندازه ذرات	۱	۶/۰۰**	۰/۰۰۴^{ns}	۱۱۳۴۲/۲**	۵/۲۲**	۱۰×۱۰$^{-۵**}$
غلظت سیلیسیم	۵	۳/۳۱**	۰/۲۳**	۱۱۶۷۱/۷**	۸/۴۶**	۵×۱۰$^{-۵**}$
اندازه ذرات × غلظت سیلیسیم	۵	۱/۱۲**	۰/۰۶*	۲۲۳۵/۲*	۱/۲۵**	۱/۴×۱۰$^{-۵**}$
خطا	۲۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۵۷۱/۴	۰/۰۷	۸×۱۰$^{-۷}$
ضریب تغییرات (٪)	–	۱۰/۶	۱۴/۲	۷/۰	۱۴/۰	۱۶/۸

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

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل اندازه ذرات و محلول‌پاشی سطوح سیلیکات سدیم بر پارامترهای فتوسنتزی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

اندازه ذرات	غلظت سیلیکات سدیم (میلی‌گرم در لیتر)	صفت				
		فتوسنتز (µmol CO_2/m.s)	تعرق (mmol H_2O/m·s)	CO_2زیر روزنه‌ای (µmol CO_2/mol)	کارایی مصرف آب لحظه‌ای (µmol CO_2/mmol H_2O)	هدایت مزوفیلی برگ (mol CO_2/m·s)
نانو	صفر	۰/۷۷	۱/۰۹	۴۰۳/۷	۰/۷۰	۰/۰۰۱۹
	آب مقطر	۰/۸۴	۱/۰۴	۳۸۴/۲	۰/۸۰	۰/۰۰۲۲
	۱۰۰	۲/۹۳	۱/۰۹	۲۹۹/۷	۲/۶۸	۰/۰۰۹۸
	۲۰۰	۲/۷۸	۱/۰۴	۳۲۹/۰	۲/۶۸	۰/۰۰۸۴
	۳۰۰	۲/۳۶	۰/۹۵	۲۸۰/۳	۲/۵۳	۰/۰۰۸۵
	۴۰۰	۲/۹۳	۰/۶۵	۲۵۲/۳	۴/۵۹	۰/۰۱۱۷
میکرو	صفر	۰/۷۷	۱/۰۹	۴۰۳/۷	۰/۷۰	۰/۰۰۱۹
	آب مقطر	۰/۸۴	۱/۰۴	۳۸۴/۲	۰/۸۰	۰/۰۰۲۲
	۱۰۰	۰/۶۵	۱/۳۶	۳۸۲/۰	۰/۴۸	۰/۰۰۱۷
	۲۰۰	۱/۵۰	۰/۷۹	۳۳۴/۰	۱/۹۰	۰/۰۰۴۴
	۳۰۰	۱/۶۴	۰/۷۰	۳۳۰/۷	۲/۴۲	۰/۰۰۵۰
	۴۰۰	۲/۳۱	۰/۷۴	۳۲۷/۷	۳/۱۳	۰/۰۰۷۱
	$LSD_{5\%}$	۰/۳۰	۰/۲۳	۴۰/۵	۰/۴۶	۰/۰۰۱۵

فتوسنتز برگ

اثرهای اصلی و متقابل اندازه ذرات و غلظت سیلیسیم بر فتوسنتز برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی معنی‌دار بود (جدول ۴). تیمار آب مقطر، در مقایسه با شاهد، تأثیری بر فتوسنتز برگ نداشت (جدول ۵). در هر یک از سطوح ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم، تیمار نانوذرات، در مقایسه با تیمار میکرو، فتوسنتز برگ را به ترتیب ۳/۵، ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۳ برابر افزایش داد (جدول ۵). همانطور که نتایج نشان می‌دهد،

نانوذرات در غلظت‌های کم اثرگذاری بیشتری در مقایسه با ذرات میکرو داشتند و با افزایش غلظت از سطح آستانه، تأثیر ذرات نانو کاهش یافت.

تعرق برگ

اثرهای اصلی غلظت سیلیسیم و اثر متقابل غلظت و اندازه ذرات سیلیسیم در صفت تعرق برگ معنی‌دار بود (جدول ۴). در تیمار نانو، تنها در سطح ۴۰۰ میلی گرم در لیتر کاهش معنی‌داری در تعرق برگ سیب‌زمینی مشاهده شد و سایر سطوح تفاوت آماری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵). تأثیر ذرات میکرو بر تعرق برگ مشابه نانوذرات نبود، به طوری که در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم، تعرق افزایش معنی‌داری نشان داد. اما در غلظت‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم، از مقدار تعرق کاسته شد (جدول ۵).

دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای

مقدار دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ سیب‌زمینی تحت تأثیر اثرهای اصلی و متقابل اندازه ذرات و غلظت سیلیسیم قرار گرفت (جدول ۴). با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیسیم، مقدار دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵) به طور کلی، تأثیر سطوح مختلف تیمار نانوذرات سیلیسیم بر دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای، در مقایسه با ذرات میکرو، بیشتر بود (جدول ۵). در بین تمامی تیمارهای مورد بررسی، غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات با ۳۷/۵ درصد کاهش نسبت به شاهد، کمترین مقدار دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای را دارا بود (جدول ۵).

کارایی مصرف آب لحظه‌ای

اثر اصلی اندازه ذرات و غلظت سیلیسیم و همچنین اثر متقابل آنها بر کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ‌های سیب‌زمینی معنی‌دار شد (جدول ۴). به طور کلی، در هر دو تیمار نانو و میکرو، افزایش غلظت سیلیکات سدیم از ۱۰۰ به ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ را افزایش داد و در بیشترین غلظت (۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر) هر دو تیمار اندازه ذرات، بیشترین مقادیر صفت مورد بررسی مشاهده شد (جدول ۵). اما تأثیر تیمارهای نانو بر صفت یاد شده در هر یک از سطوح غلظت بیشتر بود، به طوری که کارایی مصرف آب در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیسیم، نسبت به تیمارهای مشابه میکرو، به ترتیب ۴/۶، ۰/۴۱، ۰/۰۵ و ۰/۴۷ برابر افزایش نشان داد (جدول ۵).

هدایت مزوفیلی برگ

اثرهای اصلی اندازه ذرات و سطوح غلظت سیلیسیم و اثر متقابل آنها بر هدایت مزوفیلی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی معنی‌دار شد (جدول ۴). با افزایش غلظت هر دو اندازه ذره، هدایت مزوفیلی برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم، هدایت مزوفیلی تیمارهای نانو به ترتیب ۵/۷، ۱/۹، ۱/۷ و ۱/۶ برابر نسبت به غلظت‌های میکرو بیشتر بود (جدول ۵).

بحث

همانند نتایج به‌دست آمده در این آزمایش، سایر مطالعات انجام شده مبین تأثیر مثبت سیلیسیم بر محتوای کلروفیل است. به عنوان نمونه، اسمر و همکاران (۲) گزارش کردند که محتوای کلروفیل گیاهچه‌های موز (*Musa sapientum*) در تیمار سیلیکات سدیم به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین، گونگ و همکاران (۷) بیان داشتند که کاربرد تیمار سیلیکات سدیم در شرایط تنش، سبب افزایش محتوای کلروفیل برگ گندم (*Triticum aestivum* L.) می‌گردد. در ادامه، یافته‌ها حاکی از تأثیر مثبت سیلیسیم بر محتوای کلروفیل برگ گیاهچه‌های سویا در محیط کشت هیدروپونیک بود (۲۷). نقش مثبت سیلیسیم در تحریک فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی به اثبات رسیده است (۵، ۲۷ و ۲۸). از این رو، به نظر می‌رسد که احتمالاً سیلیسیم با تأثیر

محافظتی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی از طریق افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی برگ یا تحریک واکنش‌های منجر به ساخت این رنگیزه‌ها و یا تلفیقی از هر دو مسیر، شاخص کلروفیل برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی را افزایش داده است (۱، ۵، ۹ و ۲۷). در آزمایش حاضر، تفاوت معنی‌داری از نظر شاخص کلروفیل برگ بین تیمارهای نانو و میکرو مشاهده نشد که با نتایج بررسی انجام شده پیرامون تیمارهای اکسید سیلیسیم نانو و میکرو در گوجه‌فرنگی در شرایط نرمال (۹) منطبق بود.

یافته‌های حقیقی و پسرکلی (۹) نشان داد که در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار سیلیسیم، تأثیر کاهشی نانوذرات در مقایسه با ذرات میکرو بر صفت هدایت روزنه‌ای برگ گوجه‌فرنگی به طور معنی‌داری بیشتر بود، که با نتایج تحقیق حاضر مشابهت داشت. همچنین، به نظر می‌رسد که حد آستانه تأثیر نانوذرات، در مقایسه با ذرات میکرو، بر هدایت روزنه‌ای برگ، کمتر بوده است، به طوری که در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات، هدایت روزنه‌ای به کم‌ترین مقدار خود رسید و با افزایش غلظت از سطح یاد شده تغییر معنی‌داری مشاهده نشد. اما در تیمار میکرو، تأثیرات معنی‌دار مصرف سیلیسیم تا سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر ادامه داشت. یافته‌های دیگر نیز حد آستانه کم‌تر نانوذرات سیلیسیم را تأیید می‌نمایند (۹).

اگرچه تولید مینی‌تیوبر سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای با حفظ رطوبت، دما و در شرایط بهینه انجام می‌گیرد، اما نوسانات احتمالی در شرایط گلخانه‌ای به دلیل حساسیت گیاهچه‌ها می‌تواند تنش‌های مقطعی را موجب شود و حتی گیاه را در برابر عوامل بیماری‌زای محیطی ضعیف نماید. یکی از مکانیزم‌های اولیه مواجه با چنین شرایطی، تغییر در هدایت روزنه‌ای برگ می‌باشد. از این رو، کاهش هدایت روزنه‌ای برگ در اثر مصرف سیلیسیم می‌تواند به کاهش اتلاف آب و در نتیجه مقاومت نسبی به شرایط تنش خشکی موقت و ممانعت نسبی به امراض و بیمارهای گیاهی در شرایط گلخانه‌ای منجر شود (۳ و ۴).

در این آزمایش، سیلیسیم تأثیر مثبتی بر حداکثر فلورسانس کلروفیل و عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π گیاهچه‌های سیب‌زمینی داشت. با توجه به آنکه حداکثر فلورسانس کلروفیل میزان بیشینه توانایی سیستم در دریافت الکترون‌های آزاد شده توسط کوئینن A و ظرفیت بالقوه زنجیره هیل را در انتقال الکترونی نشان می‌دهد (۲۰)، لذا افزایش عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π بر اساس معادله ۱ ارائه شده دور از انتظار نبود. افزایش مشاهده شده در پتانسیل دریافت الکترونی می‌تواند در اثر افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی ناشی از مصرف سیلیسیم و به دنبال آن ثبات در چرخه انتقال الکترونی باشد. یافته‌های فنگ و همکاران (۵) نشان دهنده تأثیر مثبت سیلیسیم بر عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π برگ‌های خیار (*Cucumis sativus*) در شرایط تنش بیش‌بود منگنز بود. همچنین، در تحقیقی دیگر، کاربرد سیلیسیم در تنش شوری ۶۸۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π گرامینه هالوفیت *Spartina densifora* را به طور معنی‌داری بهبود بخشید (۱۹). به طور کلی، نتایج مطالعات مختلف اثر مثبت سیلیسیم بر عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π را تأیید می‌نماید.

در این آزمایش، فتوسنتز برگ سیب‌زمینی تحت تأثیر سیلیسیم بهبود یافت. اسمر و همکاران (۲) نیز گزارش کردند که تیمار سیلیکات سدیم موجب افزایش فتوسنتز برگ گیاهچه‌های موز شد. همچنین، در تحقیقات دیگر، یافته‌ها حاکی از اثر مثبت سیلیسیم بر فتوسنتز برگ در گیاهان مختلف از جمله گندم (۷)، گوجه‌فرنگی (۲۵) در تنش خشکی، خیار در بیش بود منگنز (۵) و تنش کادمیوم (۶)، سویا در تنش خشکی و اشعه UV (۲۷) بود.

فتوسنتز برگ تحت تأثیر عوامل مختلف ساختاری و بیوشیمیایی قرار دارد. لیانگ (۱۴) اثر سودمند سیلیسیم بر فتوسنتز را به بهبود فعالیت کربوکسیلازی آنزیم رابیسکو مرتبط دانست. در این آزمایش نیز احتمالاً سیلیسیم با تأثیر مثبت بر واکنش‌های تاریکی فتوسنتزی از جمله فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین، نقش مؤثری بر افزایش فتوسنتز داشته است. از سوی

جدول ۶. همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله استولون‌دهی

صفت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شاخص کلروفیل برگ (۱)	۱									
هدایت روزنه‌ای برگ (۲)	-۰/۲۰^{ns}	۱								
فلورسانس اولیه (۳)	۰/۱۰^{ns}	-۰/۲۹^{ns}	۱							
حداکثر فلورسانس (۴)	۰/۱۴^{ns}	-۰/۴۵**	۰/۴۳**	۱						
عملکرد کوانتومی (۵)	۰/۱۱^{ns}	-۰/۳۳*	-۰/۱۷^{ns}	۰/۸۱**	۱					
فتوسنتز (۶)	۰/۳۹*	-۰/۸۳**	۰/۳۷*	۰/۴۲*	۰/۲۴^{ns}	۱				
تعرق (۷)	-۰/۲۷^{ns}	۰/۴۹**	-۰/۲۴^{ns}	-۰/۱۳^{ns}	-۰/۰۱^{ns}	-۰/۳۹*	۱			
دی اکسید کربن زیر روزنه‌ای (۸)	-۰/۲۸^{ns}	۰/۷۴**	-۰/۲۹^{ns}	-۰/۴۹**	-۰/۳۶*	-۰/۸۲**	۰/۴۰*	۱		
کارایی مصرف آب لحظه‌ای (۹)	۰/۴۵**	-۰/۷۹**	۰/۴۳**	۰/۴۳**	۰/۲۲^{ns}	۰/۸۹**	-۰/۶۹**	-۰/۷۹**	۱	
هدایت مزوفیلی (۱۰)	۰/۳۶*	-۰/۷۷**	۰/۳۶*	۰/۴۳**	۰/۲۶^{ns}	۰/۹۷**	-۰/۳۸*	-۰/۹۰**	۰/۸۹**	۱

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

دیگر، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین فتوسنتز و صفات شاخص کلروفیل برگ (۰/۳۹*) و حداکثر فلورسانس کلروفیل (۰/۳۷*) مشاهده شد (جدول ۶). با توجه به تأثیر مثبت سیلیسیم بر شاخص کلروفیل و حداکثر فلورسانس کلروفیل برگ، می‌توان بیان داشت که سیلیسیم از طریق افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و پتانسیل دریافت الکترون و به دنبال آن افزایش تولید ATP و NADPH در واکنش زنجیره‌ای هیل را در پی داشته است. در نتیجه، انرژی لازم برای واکنش‌های تاریکی فراهم شده و فتوسنتز افزایش یافته است.

نتایج به‌دست آمده در مطالعات پیشین حاکی از عدم تأثیر (۲، ۹ و ۲۵) یا افزایش تعرق برگی در اثر مصرف سیلیسیم بود (۵ و ۲۷) که با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت نداشت. تعرق برگ رابطه مثبت و معنی‌داری با هدایت روزنه‌ای (۰/۴۹*) داشت (جدول ۶). با توجه به نتایج ذکر شده، به نظر می‌رسد که کاهش هدایت روزنه‌ای در تیمارهای سیلیسیم، تعرق برگی سیب‌زمینی را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش اتلاف آب از برگ‌ها شده است.

برخی مطالعات انجام شده نشان دهنده عدم تأثیر سیلیسیم بر دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای در شرایط عدم تنش است (۲، ۵ و ۱۹). اما در شرایط تنش‌های محیطی، مانند بیش بود عناصر غذایی (۵) و شوری حاصل از نمک کلرید سدیم (۱۹)، دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌داری نشان داده است. در این پژوهش نیز علی‌رغم عدم اعمال تیمارهای تنش، مصرف سیلیسیم کاهش دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای را در پی داشت.

مقدار دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای به عوامل مختلفی از جمله فتوسنتز، تنفس، هدایت مزوفیلی و سرعت تبادلات گازی وابسته است (۱، ۲، ۵، ۶ و ۹). در این آزمایش، دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای با صفات حداکثر فلورسانس کلروفیل (-۰/۴۹**)، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π (-۰/۳۶*) و فتوسنتز برگ (-۰/۸۲**) رابطه منفی نشان داد (جدول ۶). با توجه به تأثیر مثبت سیلیسیم بر صفات حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی و فتوسنتز برگ می‌توان این گونه استنباط نمود که افزایش ظرفیت دریافت و انتقال الکترون در زنجیره انتقال الکترون و افزایش کارایی فتوسیستم Π در استفاده از انرژی نورانی و به دنبال آن افزایش فتوسنتز برگ، مصرف دی‌اکسید کربن در گیاه افزایش یافته است. به طوری که محتوای آن در محفظه روزنه‌ای کاهش یافته، یافته‌های مربوط به هدایت مزوفیلی تأییدی بر مطالب بیان شده است. همانطور که نتایج این بررسی نشان داد، هدایت مزوفیلی برگ با افزایش غلظت

سیلیسیم افزایش یافته است و همبستگی مثبت و معنی‌داری بین هدایت مزوفیلی و صفات شاخص کلروفیل (*۰/۳۶)، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π (**۰/۴۳) و فتوسنتز (*۰/۸۹) وجود داشت (جدول ۶). این نتایج نشان دهنده نقش مثبت سیلیسیم بر هدایت مزوفیلی برگ از طریق بهبود عوامل تأثیرگذار بر فتوسنتز است. به عبارت دیگر، افزایش فتوسنتز ناشی از القای مثبت سیلیسیم سبب مصرف بیشتر دی‌اکسید کربن در بافت برگ شده و هدایت مزوفیلی برگ افزایش یافته و در نهایت دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای نیز کاهش نشان داده است.

یافته‌های حقیقی و پسرکلی (۹)، مشابه نتایج به‌دست آمده در این آزمایش، نشان‌دهنده تأثیر مثبت تیمارهای سیلیسیم بر کارایی مصرف آب برگ بود. همچنین، ایشان در شرایط تنش ۲۵ و ۵۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم تأثیر مثبتی از اعمال تیمارهای میکرو بر کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ مشاهده نکردند. اما در مقابل، کارایی مصرف آب برگ در تیمارهای ۱ و ۲ میلی‌مولار نانوذرات افزایش معنی‌داری در پی داشت. در این آزمایش نیز تأثیر نانوذرات، در مقایسه با ذرات میکرو، بر کارایی مصرف آب برگ بیشتر بود.

کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ سیب‌زمینی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار گرفته است. از جمله این صفات می‌توان به شاخص کلروفیل برگ و عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π و فتوسنتز اشاره نمود که همبستگی مثبت و معنی‌داری با کارایی آب لحظه‌ای نشان دادند (جدول ۶). همچنین، با توجه به همبستگی منفی و معنی‌دار به‌دست آمده بین کارایی مصرف آب لحظه‌ای و صفات هدایت روزنه‌ای و تعرق (جدول ۶)، در نهایت می‌توان این گونه بیان نمود که سیلیسیم با تأثیر مثبت بر عوامل مؤثر بر فتوسنتز برگ و کاهش اتلاف آب از طریق کاهش هدایت روزنه و تعرق، کارایی مصرف آب لحظه‌ای برگ سیب‌زمینی را افزایش داده است.

نتیجه‌گیری

به طور کلی، سیلیسیم بر صفات شاخص کلروفیل، حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π، فتوسنتز، کارایی مصرف آب لحظه‌ای و هدایت مزوفیلی برگ سیب‌زمینی تأثیر مثبت داشت. در مقابل، هدایت روزنه‌ای، تعرق و دی‌اکسید کربن زیر روزنه‌ای برگ در اثر مصرف سیلیسیم کاهش نشان داد. در غالب صفات، اثر نانوذرات سیلیکات سدیم بیشتر از ذرات میکرو بود و بیشترین تأثیر سیلیسیم در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات به‌دست آمد. نانوذرات، در مقایسه با ذرات میکرو، کارایی بیشتری داشتند. از این رو، با توجه به نتایج این آزمایش، کاربرد سیلیسیم، به‌ویژه نانوذرات سیلیکات سدیم، به دلیل کارایی بیشتر، در پرورش گیاهچه‌های سیب‌زمینی به منظور تولید مینی‌تیوبر اثرهای سودمندی در پی خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

1. Ahmadi, A. and A. Siosemardeh. 2005. Investigation on the physiological basis of grain yield and drought resistance in wheat: Leaf photosynthetic rate, stomatal conductance, and non-stomatal limitations. Int. J. Agric. Biol. 7(5): 807-811.
2. Asmar, S.A., E.M. Castro, M. Pasqual, F.J. Pereira and J.D.R. Soares. 2013. Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micro propagated banana plantlets under different silicon sources. Sci. Hort. 161: 328-332.
3. Epstein, E. 1994. The Anomaly of Silicon in Plant Biology. Proc. Natl. Acad. Sci. USA91, pp. 11-17.
4. Epstein, E. 1999. Silicon. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 50: 641-664.
5. Feng, J.P., Q.H. Shi and X.F. Wang. 2009. Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese. Agric. Sci. China 8(1): 40-50.
6. Feng, J., Q. Shi, X. Wang, M. Wei, F. Yang and H. Xu. 2010. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. Sci. Hort. 123: 521-530.
7. Gong. H., X. Zhu, K. Chen, S. Wang and C. Zhang. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in

pots under drought. Plant Sci. 169: 313-321.
8. Haghighi, M., Z. Afifipour and M. Mozafarian. 2012. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. J. Biol. Environ. Sci. 6(16): 87-90.
9. 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.
10. Hashemi, A., A. Abdolzadeh and H.R. Sadeghipour. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Soil Sci. Plant Nutr. 56: 244-253.
11. Kafi, M. and Z. Rahimi. 2011. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). Soil Sci. Plant Nutr. 57: 341-347.
12. Kanwal, A., A. Ali and K. Shoaib. 2006. *In Vitro* microtuberization of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivar Kuroda- A new variety in Pakistan. Int. J. Agric. Biol. 8(3): 337-340.
13. Lee, C.W., S. Mahendra, K. Zodrow, D. Li, Y.C. Tsai, J. Bramm and P.J.J. Alvarez. 2010. Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. Environ. Toxicol. Chem. 29: 669-675.
14. Liang, Y.C. 1998. Effect of Si on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. Pedosphere. 8: 289-296.
15. Liu, Q., B. Chen, Q. Wang, X. Shi, Z. Xiao, J. Lin and X. Fang. 2009. Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. Nano Lett. 9: 1007-1010.
16. Lu, C.M., Zhang, C.Y., Wen, J.Q., Wu, G.R., 2002a. Effects of nano material on germination and growth of soybean. Soybean Sci. 21 (3): 168-171.
17. Lu, C.M., C.Y. Zhang, J.Q. Wen, G.R. Wu and M.X. Tao. 2002b. Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. Soybean Sci. 21: 168-172.
18. Ma, J.A. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. Soil Sci. Plant Nutr. 50: 11-18.
19. Mateos-Naranjo, E., L. Andrades-Moreno and A.J. Davy. 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. Plant Physiol. Biochem. 63: 115-121.
20. Maxwell, K. and G. N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence- a practical guide. J. Exp. Botany. 51: 659-668
21. Ozturk, G. and Z. Yildirim. 2010. A Comparison of field performances of minitubers and micro tubers used in seed potato production. Turk. J. Field Crops. 15(2): 141-147.
22. Parveen, N. and M. Ashraf. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea Mays* L.) cultivars grown hydroponically. Pak. J. Bot. 42 (3): 1675-1684.
23. Rashed Mohassel, M.H., A. Aliverdi and S. Rahimi. 2011. Optimizing dosage of sethoxydim and fenoxaprop-p-ethyl with adjuvants to control wild oat. Ind. Crops and Products. 34: 1583-1587.
24. Richmond, K.E. and M. Sussman. 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. Current Opin. Plant Biol. 62: 68-72.
25. 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.
26. Ruffini, C.M. and R. Cremonini. 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia, 62(2): 161-165.
27. Shen, X., Y. Zhou, L. Duan, Z. Li, A.E. Eneji and J. Li. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. J. Plant Physiol. 167: 1248-1252.
28. Soylemezoglu, G., K. Demir, A. Inal and A. Gunes. 2009. Effect of silicon on antioxidant and stomatal response of two grapevine (*Vitis vinifera* L.) rootstocks grown in boron toxic, saline and boron toxic-saline soil. 2009. Scientia Hort. 123: 240-246.
29. Tuna, A.L., C. Kaya, D. Higgs, B. Murillo-Amador, S. Aydemir and A.R. Girgin. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environ. Exp. Botany. 62: 10-16.