



تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر راندمان محلول پاشی گیاهچه‌های سیب زمینی

محمد کافی^{۱*} - بیژن سعادتیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

چکیده

نقش مؤثر سیلیسیم در بهبود خصوصیات گیاهی به اثبات رسیده است. ترکیبات حاوی این عنصر در غالب موارد به صورت برگ پاشی استفاده می‌شوند. از سویی، به نظر می‌رسد که اسیدیته محلول نقش مؤثری در کارایی این فرآیند ایفا نماید. لذا پژوهش حاضر جهت تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم طی دو آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۲ انجام شد. در آزمایش تعیین غلظت بهینه، تیمارها شامل دو اندازه ذره سیلیسیم (نانو و میکرو) و غلظت‌های محلول پاشی در ۱۱ سطح (بدون محلول پاشی، آب مقطر + مویان، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم در لیتر) بود. تیمارهای آزمایش دوم شامل غلظت بهینه سیلیکات سدیم (۴۰۰ میلی گرم در لیتر)، آب مقطر و سه سطح اسیدیته (۵، ۷ و ۱۱/۳) برای غلظت بهینه سیلیسیم نانو و میکرو بود. نتایج آزمایش اول نشان داد که با افزایش غلظت سیلیسیم تا ۴۰۰ میلی گرم در لیتر صفات فتوسنتز، کلروفیل a و عملکرد ریزغده‌های سیب زمینی افزایش معنی داری نشان داد. کاربرد سیلیسیم نانو و میکرو تا غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر افزایش پایداری غشای سلولی، کاهش تعرق برگ، افزایش کارایی مصرف آب، افزایش کلروفیل b و کارتنوئیدهای برگ سیب زمینی را در پی داشت و اثر نانو ذرات به طور معنی داری بیشتر از ذرات میکرو بود. اما در غلظت‌های بالا، هر دو اندازه ذرات سیلیسیم اثر منفی بر صفات مورد بررسی داشت. در آزمایش دوم، تأثیر نانو ذرات سیلیسیم در بهبود صفات شاخص پایداری غشای سلولی، کلروفیل b، میانگین وزن ریزغده و وزن خشک اندام هوایی به ترتیب ۵/۴، ۹/۷، ۹ و ۱۲ درصد بیشتر از ذرات میکرو بود. همچنین در تیمار محلول پاشی با اسیدیته ۵، صفات شاخص پایداری غشای سلولی، وزن خشک اندام هوایی و کارایی مصرف بیشترین افزایش را به ترتیب با ۸/۸، ۱۱/۶ و ۲۱/۳ درصد نسبت به اسیدیته ۱۱/۳ نشان دادند. کاهش اسیدیته محلول پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیسیم از نظر آماری افزایش فتوسنتز، کاهش تعرق، افزایش عملکرد ریزغده و افزایش مقدار سیلیسیم اندام هوایی را نسبت به شاهد در پی داشت. در مجموع بهترین تیمار، غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم و اسیدیته ۵ بود.

واژه‌های کلیدی: شاخص پایداری غشاء سلولی، عملکرد ریزغده، فتوسنتز، کارایی مصرف آب، کلروفیل

مقدمه

هرچند سیلیسیم عنصری ضروری برای بسیاری از گیاهان محسوب نمی‌شود، اما اکثر گیاهان قادر به جذب سیلیسیم بوده و قابلیت جذب آنها در برخی موارد حتی تا ۱۰ درصد زیست توده نیز می‌رسد (Epstein, 1999). سیلیسیم در بسیاری موارد به عنوان یک

عنصر مفید در علم تغذیه گیاهی شناخته می‌شود (Epstein, 1999; Tuna et al., 2008; Haghghi and Pessaraki, 2013; Saadatian and Kafi, 2015). در برخی گزارشات عنوان شده که سیلیسیم در بهبود کارایی مصرف آب (Hu and Schmidhalter, 2005; Romero-Aranda et al., 2006; Haghghi and Pessaraki, 2013)، افزایش فتوسنتز و کاهش اختلالات فیزیولوژیک (Adtina and Beasford, 1986; Samuels et al., 1993; Romero-Aranda et al., 2006; Tuna et al., 2008; Shen et al., 2010; Haghghi and Pessaraki, 2013) نقش مؤثری ایفا نموده و می‌تواند باعث افزایش تولید و کیفیت محصول شود (Cherif and Belanger, 1992; Samuels et al., 1993; Nasri, et al., 2008; Hashemi et al., 2010; Saadatian and

۱- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: m.kafi@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/gsc.v16i2.57918

(*- نویسنده مسئول)

پارامترهای فیزیولوژیک گیاهچه‌های گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) نیز تحت تنش شوری گزارش شده است (Haghighi and Pessaraki, 2013).

علی‌رغم عدم وجود اطلاعات کافی پیرامون اثر اسیدیته محلول بر کارایی جذب آن، این موضوع یکی از فاکتورهای تعیین‌کننده در مطالعات مرتبط با برگ‌پاشی عناصر و ترکیبات مختلف است و می‌تواند نقش مؤثری در تغییر نتایج داشته باشد (Wójcik, 2004). از سویی دیگر، در حالی که نتایج پیشین حاکی از اثرات سمیت گیاهی غلظت‌های بالای نانو ذرات بوده (Haghighi and Pessaraki, 2015; Saadatian and Kafi, 2013)، اما تحقیقی در زمینه تعیین غلظت بهینه نانو ذرات سیلیکات سدیم برای محلول‌پاشی سیب‌زمینی صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش تعیین غلظت و اسیدیته بهینه ذرات سیلیکات سدیم از طریق بررسی پارامترهای فتوسنتزی، رنگدانه‌ها، عملکرد و اجزای عملکرد ریزغده‌ها انجام شد و در سطوح بالاتر، کاربرد نانو ذرات بر خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد سیب‌زمینی داشت

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور تعیین غلظت بهینه محلول‌پاشی سیلیکات سدیم در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به‌صورت دو مرحله‌ای و در سال ۱۳۹۲ انجام شد. آزمایش اول به‌صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل شکل متداول سیلیکات سدیم در کنار نانو ذرات سیلیکات سدیم و غلظت‌های محلول‌پاشی در ۱۱ سطح (بدون محلول‌پاشی، آب مقطر+ مویسان، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. هر تکرار شامل چهار بوته بود. اسیدیته ناشی از انحلال سیلیکات سدیم برای تیمارها توسط دستگاه pH متر ثبت گردید (جدول ۱). به هر یک از تیمارهای سیلیکات سدیم، مویسان سیتوگیت با غلظت دو در هزار اضافه شد (Rashed Mohassel et al., 2011). محلول‌پاشی در طی دو مرحله شروع استولون‌دهی و شروع غده‌دهی انجام شد.

از طریق کشت گره سیب‌زمینی عاری از ویروس رقم آگریا در محیط درون شیشه‌ای، گیاهچه‌های سیب‌زمینی تولید شد. هر بوته گیاهچه در گلدان پلاستیکی با قطر دهانه و ارتفاع ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر قرار گرفت. بستر کشت با ترکیب پرلیت، کوکوپیت و ماسه به نسبت‌های ۴:۳:۳ تهیه شد. نیمی از بستر ابتدا و نیم دیگر طی فصل اضافه شد. تعیین میانگین قطر ذرات نانو و میکرو توسط اشعه ایکس و با دستگاه تعیین اندازه ذرات (PSA) مدل VASCO3 ساخت شرکت Cor Douan فرانسه (دقت اندازه‌گیری در بازه ۶

Kafi, 2015). رسوب سیلیسیم در دیواره سلولی می‌تواند افزایش استحکام و تقویت دیواره را در پی داشته (Epstein, 1999) و سبب پایداری غشاهای زیستی شود (Liang et al., 1996; Haghighi and Pessaraki, 2013).

گزارشات نشان داده که کاربرد سیلیسیم در گندم (*Triticum aestivum* L.) کاهش درصد نشت الکترولیت، افزایش رطوبت نسبی و افزایش محتوای کلروفیل a و b و مجموع آنها را در پی داشته است (Tuna et al., 2008). همچنین یافته‌ها حاکی از افزایش قابل ملاحظه عملکرد خیار (*Cucumis sativus*) در تیمارهای ۱۰۰ الی ۲۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم در لیتر بود (Cherif and Belanger, 1992). در ادامه، کاربرد غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیکات سدیم در محلول غذایی، علاوه بر افزایش غلظت سیلیسیم در بافت ریشه و اندام‌های هوایی، بر صفات وزن خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی، طول ریشه و ارتفاع گیاهان تیمار شده اثر مثبت و معنی‌داری داشت (Mohaghegh et al., 2010). محلول‌پاشی سیلیسیم با غلظت ۶ در هزار سیلیکات سدیم نیز ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و بیولوژیک کلزا (*Brassica napus* L.) را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Nasri et al., 2008).

در حال حاضر کشت بافت یکی از روش‌های جدید برای تکثیر غده‌های بذری سالم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) است که بسیار انعطاف‌پذیر بوده و منجر به تولید تعداد زیادی غده می‌شود (Lim et al., 2004; Ozturk and Yildirim, 2010). پرورش گیاهچه‌های سیب‌زمینی جهت تولید ریزغده‌ها در محیط هیدروپونیک و بسترهای کشت صورت می‌گیرد. اگرچه تمامی عناصر غذایی مورد نیاز در این روش از طریق استفاده از محلول‌های غذایی تأمین می‌گردد، اما نقش تغذیه‌ای سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر مفید در تولید ریزغده‌ها مورد توجه قرار نگرفته است (Saadatian and Kafi, 2015).

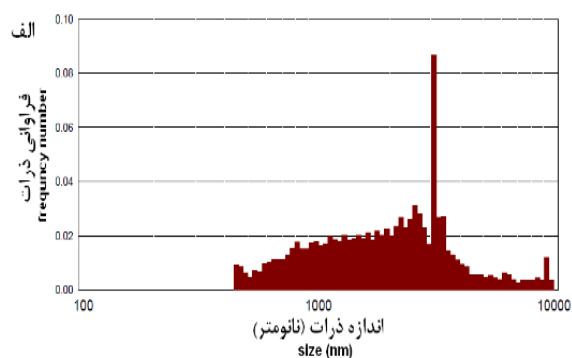
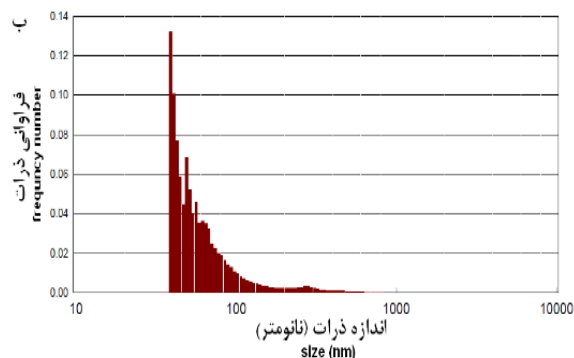
امروزه جهت گسترش استفاده از نانو مواد به‌ویژه سیلیسیم در بخش کشاورزی تلاش‌هایی صورت گرفته است. در این رابطه گزارشات نشان داده که وزن خشک اندام هوایی و ریشه، میزان کلروفیل و کارتنوئید ذرت (*Zea mays* L.) تحت تأثیر غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر ذرات نانو و میکرو سیلیکون به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در هر یک از سطوح سیلیکون، اثر نانو ذرات در بهبود صفات به‌طور معنی‌داری بیشتر از ذرات میکرو بود (Zare et al., 2016). در آزمایشی دیگر، بیشترین مقادیر صفات حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی فتوسنتز II، عملکرد و تعداد ریزغده سیب‌زمینی در غلظت ۰/۳ میلی‌مولار ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم افزوده شده به محلول غذایی به‌دست آمد (Saadatian and Kafi, 2015). تأثیر مثبت نانو ذرات سیلیسیم بر

بی‌رنگ با جرم مولی ۱۲۲/۰۶ گرم بود. ذرات میکرو به صورت گرانول و ذرات نانو به صورت پودری بود.

میکرون تا ۱ نانومتر) بود (شکل ۱). میانگین قطر ذرات نانو و میکرو استفاده شده در آزمایش به ترتیب ۶۸ و ۲۳۷۱ نانومتر بود (Saadatian and Kafi, 2015). درجه خلوص هر دو اندازه ذرات ۹۹ درصد، جامد

جدول ۱- اسیدیته محلول‌های آزمایش اول
Table 1- Solutions pH of first experiment

اندازه ذرات Particle size	آب مقطر Distilled water	غلظت سیلیکات سدیم Concentration of sodium silicate (mg l ⁻¹)								
		100	200	300	400	500	600	700	800	900
میکرو Micro	7.5	10.75	11.10	11.20	11.30	11.43	11.48	11.53	11.56	11.62
نانو Nano	7.5	10.81	11.10	11.17	11.32	11.34	11.47	11.51	11.56	11.61



شکل ۱- نتایج حاصل از اندازه‌گیری قطر ذرات میکرو (الف) و نانو (ب) سیلیکات سدیم توسط دستگاه PSA

Figure 1- Results of diameter measured of micro (a) and nano (b) particles of sodium silicate with particle size analyzer

(and Pessarakli, 2013). نور ورودی به گلخانه نور طبیعی خورشید بود و مقدار آن به طور متوسط در ساعت ۱۴ ظهر روز آفتابی ۱۲۰۰ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه بود. که توسط نورسنج نقطه‌ای اندازه‌گیری و ثبت گردید.

به منظور تغذیه گیاهچه‌های سیب‌زمینی از محلول غذایی هوگلند تغییر یافته استفاده شد (جدول ۲). محلول غذایی در طی فصل رشد و با فواصل زمانی هفت روز و به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر به هر گیاهچه اضافه شد. دمای روز و شب گلخانه به ترتیب 24 ± 2 و 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۰ درصد تنظیم شده بود (Haghighi

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی و غلظت‌های محلول غذایی هوگلند تصحیح شده

Table 2- Chemical components and concentrations of modified Hoagland solution

ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l ⁻¹	ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l ⁻¹	ترکیب شیمیایی Chemical component	غلظت mg l ⁻¹
NH ₄ NO ₃	800	Ca(NO ₃) ₂	1180	KNO ₃	490
MgSO ₄	505	KH ₂ PO ₄	68	H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂	1.81	ZnSO ₄	0.22	CuSO ₄	0.05
Na ₂ MoO ₄	0.12	Na-Fe-EDTA	42	-	-

به تعرق به دست آمد (Haghighi and Pessarakli, 2013). سپس برگ بالای علامت‌گذاری شده برای تعیین کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئیدها و برگ پایینی آن نیز برای تعیین شاخص پایداری غشای سلولی استفاده شد. از طریق استخراج رنگدانه‌ها با متانول ۹۹ درصد و در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۵۳ و ۶۶۶ نانومتر با استفاده از

یک هفته پس از محلول‌پاشی دوم و همزمان با هفته هشتم انتقال گیاهچه‌ها، در هر تکرار یک بوته انتخاب و از بالا به پایین دو برگ کاملاً توسعه یافته علامت‌گذاری شد. سپس پارامترهای فتوسنتزی برگ‌ها شامل فتوستنتر خالص و تعرق با دستگاه IRGA مدل LCi Consol تعیین شد. کارایی مصرف آب از تقسیم فتوستنتر

ذرات تا سطح ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، شاخص پایداری غشای سلولی در مقایسه با تیمارهای بدون محلول پاشی و محلول پاشی با آب مقطر به طور معنی داری بیشتر بود، اما با افزایش غلظت نانو ذرات از سطح ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، پایداری غشای سلولی برگ سیب زمینی کاهش معنی داری نشان داد، به طوری که در سطوح بالاتر از ۵۰۰ میلی گرم در لیتر، مقادیر به دست آمده به طور معنی داری کمتر از شرایط عدم مصرف سیلیکات سدیم بود (جدول ۴). کاربرد ذرات میکرو سیلیکات سدیم در سطوح ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در لیتر تأثیر مثبت و معنی داری بر پایداری غشای سلولی برگ سیب زمینی داشت. اما در سطوح بالاتر، محلول پاشی سیلیکات سدیم میکرو سبب کاهش شاخص پایداری غشای سلولی شد. به طوری که در بالاترین غلظت نسبت به تیمار بدون محلول پاشی ۹/۵ درصد افت داشت. اگرچه تأثیر مثبت غلظت‌های مشابه نانو ذرات تا سطح ۲۰۰ میلی گرم لیتر در مقایسه با ذرات میکرو ۱۰ درصد بالاتر بود، اما به طور کلی در سطوح بالاتر از ۵۰۰ میلی گرم در لیتر، تأثیر منفی نانو ذرات بر شاخص پایداری غشای سلولی بیشتر از ذرات میکرو بود (جدول ۴).

تحقیقات بسیاری نشان دهنده تأثیر مثبت غلظت‌های بهینه سیلیسیم بر افزایش پایداری غشای سلولی است. گزارشات از تأثیر معنی دار سیلیسیم بر کاهش درصد نشت الکترولیت برگ گندم در هر دو شرایط تنش شوری و عدم تنش حکایت داشته (Tuna et al., 2008)، در ادامه یافته‌ها نشان دهنده تأثیر مثبت ذرات میکرو و نانو سیلیکات سدیم بر پایداری غشای سلولی برگ‌های سیب زمینی در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/۶ میلی مولار بود. همچنین در سطوح بالاتر، اثرات منفی نانو ذرات بر شاخص پایداری غشای سلولی مشاهده شد (Saadatian and Kafi, 2015) که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت داشت. محققان در رابطه با نقش سیلیسیم بر پایداری غشای سلولی، رسوب سیلیسیم در دیواره سلولی را موجب افزایش استحکام و تقویت دیواره دانسته (Epstein, 1999) و آن را عاملی در جهت افزایش پایداری غشاهای زیستی می‌دانند (Liang et al., 1996; Haghghi and Pessarakli, 2013). اما همانطور که نتایج نشان داده این عنصر در سطوح غلظت مناسب چنین تأثیر مثبتی را بر شاخص پایداری غشای سلولی خواهد داشت.

فتوستنتز برگ تیمار نانو ذرات در مقایسه با ذرات میکرو به طور معنی داری بیشتر بود (شکل ۲، a). فتوستنتز برگ در سطوح ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم به طور معنی داری افزایش یافت (جدول ۳). به طوری که بالاترین مقدار آن در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در لیتر مشاهده شد که در مقایسه با تیمارهای بدون محلول پاشی و محلول پاشی با آب مقطر به ترتیب ۳۸ و ۱۸ درصد بیشتر بود. اما در سطوح ۵۰۰ الی ۹۰۰ میلی گرم در لیتر، فتوستنتز برگ در مقایسه با سطوح پایین تر (۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم)

اسپکتروفوتومتر Jenway UV/Vis مدل ۶۳۰۵، محتوای کلروفیل a, b (Arnon, 1949) و کاروتنوئیدها (Wellburn, 1983) اندازه گیری شد. دومین برگ بالایی علامت گذاری شده از هر تکرار جدا و به مدت ۲۴ ساعت در داخل ویال‌های حاوی ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر قرار گرفت. سپس هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) اندازه گیری شد. در ادامه ویال‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۳ درجه سانتی گراد و فشار ۱/۵ بار اتوکلا شده و پس از سرد شدن، هدایت الکتریکی ثانویه (EC_2) قرائت و شاخص پایداری غشاء توسط معادله ۱ به دست آمد (Sairam, 1994).

$$MI = [(1 - (EC_1 / EC_2))] \times 100 \quad (1) \text{ معادله}$$

پس از حدود ۹۰ روز از انتقال گیاهچه‌ها به محیط کشت، گیاهچه‌های سیب زمینی کفبر شده و بخش هوایی آن به آون با دمای ۷۲ درجه سانتی گراد و به مدت ۴۸ انتقال یافت. سپس وزن خشک اندام هوایی با ترازوی دارای دقت یک هزارم گرم اندازه گیری شد. پس از تخلیه بستر گلدان‌ها، تعداد ریزغده هر بوته شمارش و وزن ریزغده‌ها و عملکرد هر بوته توسط ترازوی با دقت یک هزارم گرم تعیین شد. اندازه گیری غلظت سیلیسیم اندام هوایی سیب زمینی با استفاده از روش رنگ سنجی مولبیدات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۵۰ نانومتر اندازه گیری شد (Elliot and Snyder, 1991). تجزیه واریانس داده‌ها با نرم افزار آماری SAS و رسم شکل‌ها با نرم افزار Excel صورت گرفت. در صورت عدم معنی داری اثرات در تجزیه واریانس، از ارائه نتایج آن صرف نظر شد. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال پنج درصد با آزمون LSD انجام شد.

آزمایش دوم به صورت فاکتوریل دو عاملی و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل غلظت بهینه سیلیکات سدیم نانو و میکرو (۴۰۰ میلی گرم در لیتر) و شاهد (آب مقطر) و سه سطح اسیدپتته (اسیدپتته ناشی از انحلال غلظت بهینه سیلیسیم نانو و میکرو در آب (pH=۱۱/۳)، pH=۷ و pH=۵) برای آب و دو اندازه ذره بود. به منظور تنظیم اسیدپتته محلول‌ها از اسید کلریدریک یک صدم نرمال استفاده شد. تمامی مراحل تهیه گیاهچه، کشت، محلول پاشی، اندازه گیری صفات و تجزیه تحلیل داده‌ها مشابه آزمایش اول انجام گرفت.

نتایج و بحث

آزمایش تعیین غلظت بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم

محلول پاشی غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم بیشترین تأثیر مثبت را بر شاخص پایداری غشای سلولی برگ گیاهچه‌های سیب زمینی داشت. با افزایش غلظت نانو

نشان‌دهنده تأثیر متفاوت سطوح مختلف سیلیسیم بر تعرق برگی و وجود حد بهینه برای کاربرد سیلیسیم در تغذیه گیاهی است (Haghighi and Pessaraki, 2013).

بیشترین کارایی مصرف آب در تیمارهای ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم به دست آمد و از این نظر اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای یاد شده وجود نداشت. محلول‌پاشی ذرات میکرو تنها در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب برگ سیب‌زمینی را نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی موجب شد (جدول ۴). علی‌رغم تأثیر بالاتر نانو ذرات نسبت به ذرات میکرو بر کارایی مصرف آب در هریک از تیمارهای ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، افزایش غلظت نانو ذرات از سطوح یاد شده سبب تأثیر منفی بیشتر نسبت به ذرات میکرو بر صفت یاد شده گردید (جدول ۴). یافته‌های دیگر نیز نشان‌دهنده افزایش کارایی مصرف آب لحظه‌ای در تنش شوری با مصرف سیلیسیم در گیاه شورزیست *Spartina densiflora* (Mateos-Naranjo et al., 2013) و گوجه‌فرنگی (Haghighi and Pessaraki, 2013) بود. همچنین آزمایشی دیگر کارایی مصرف آب لحظه‌ای گوجه‌فرنگی با افزودن سیلیسیم به محلول غذایی هگلند، افزایش نشان داد (Romero-Asmar et al., 2006). در ادامه، کارایی مصرف آب لحظه‌ای گیاهچه‌های موز نیز در اثر مصرف سیلیسیم بهبود یافت (Asmar et al., 2013).

بیشترین غلظت کلروفیل a به ترتیب با ۳۲ و ۳۸ درصد افزایش نسبت به تیمار صفر در تیمارهای ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به دست آمد. اما با افزایش غلظت سیلیکات سدیم از سطوح یاد شده، مقدار کلروفیل a کاهش معنی‌داری نشان داد به طوری که در بالاترین سطح، غلظت کلروفیل a نسبت به تیمارهای صفر و آب مقطر به ترتیب ۱۴ و ۲۶ درصد افت نشان داد (جدول ۳). محلول‌پاشی هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم تا غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش معنی‌دار غلظت کلروفیل b نسبت به تیمارهای عدم کاربرد سیلیسیم شد (جدول ۴). اما با افزایش غلظت هر دو اندازه ذره نانو و میکرو، غلظت کلروفیل b کاهش معنی‌داری نسبت به تیمارهای صفر (عدم محلول‌پاشی) و آب مقطر نشان داد (جدول ۴). با افزایش غلظت سیلیکات سدیم نانو و میکرو تا سطح ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت کارتنوئید برگ به ترتیب با ۹۶ و ۷۴ درصد رشد نسبت به سطح صفر، افزایش معنی‌داری نشان داد. اما با افزایش غلظت هر دو اندازه ذره غلظت کارتنوئیدها به طور معنی‌داری کاهش یافت. به طوری که بالاترین غلظت کاربرد هر دو اندازه ذره نانو و میکرو غلظت کارتنوئیدهای برگ سیب‌زمینی تنها ۳ و ۱۱ درصد بالاتر از تیمار صفر بود (جدول ۴).

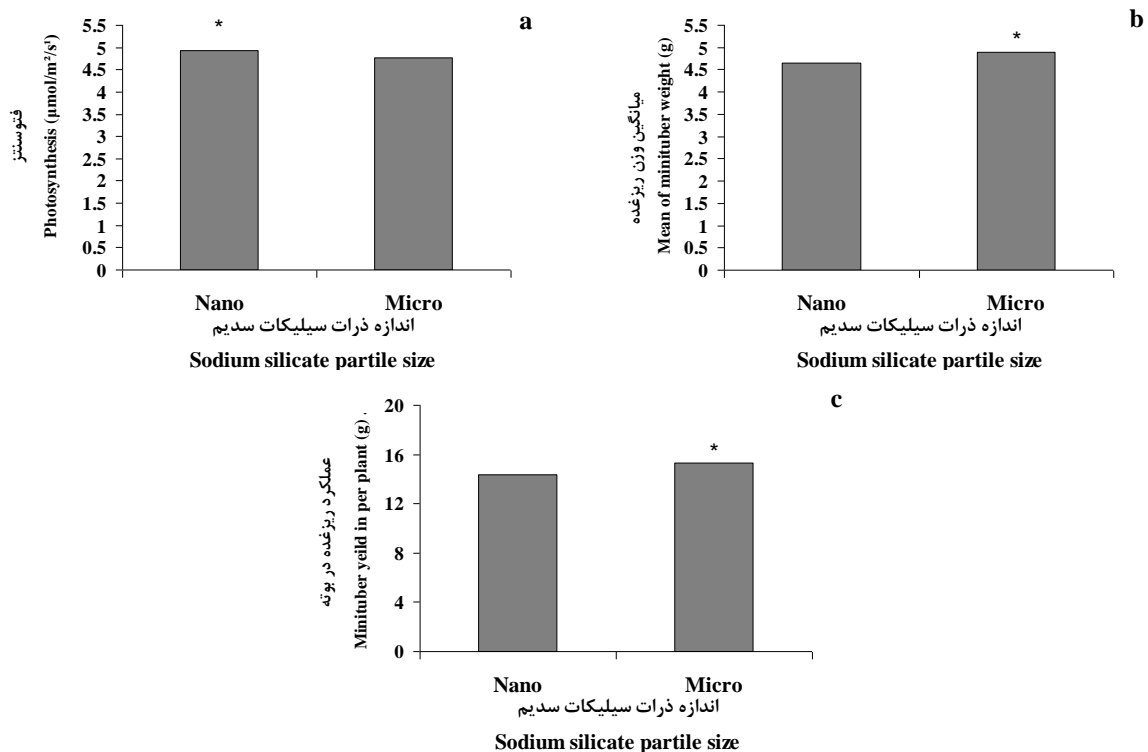
کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). یافته‌های محققان نشان داد که تغذیه با غلظت بهینه سیلیسیم، از طریق افزایش عملکرد کوانتومی فتوسیستم II نقش مؤثری در بهبود فتوسنتز برگ سیب‌زمینی دارد (Saadatian and Kafi, 2015). در ادامه نیز گزارش شده که غلظت مناسب سیلیکات سدیم فتوسنتز برگ گیاهچه‌های موز (*Musa sapientum*) را افزایش داد (Asmar et al., 2013). در مطالعه‌ای دیگر، غلظت بهینه ۱ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیسیم بیشترین تأثیر را بر فتوسنتز برگ گوجه‌فرنگی داشت و در سطوح بالاتر اثر منفی نانو ذرات بر فتوسنتز مشاهده شد (Haghighi and Pessaraki, 2013) که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. همچنین عنوان شده که کاربرد سیلیسیم جهت تولید غلظت‌های بالاتر آنزیم ریبولوزی فسفات کربوکسیلاز در برگ لازم است. این آنزیم سوخت و ساز دی‌اکسید کربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی‌اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (Adtina and Beasford, 1986). اما همانطور که از نتایج این تحقیق و سایر مطالعات (Mohaghegh et al., 2010; Haghighi and Pessaraki, 2013; Saadatian and Kafi, 2015) برمی‌آید، سیلیسیم در غلظت‌های مناسب سبب تأثیرات مثبت بر چرخه فتوسنتزی و عوامل درونی آن می‌شود.

با کاربرد تیمارهای ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم تعرق برگ گیاهچه‌های سیب‌زمینی کاهش معنی‌داری در مقایسه با تیمار بدون محلول‌پاشی داشت. اما با کاربرد سطوح بالاتر نانو ذرات، تعرق برگی به تدریج افزایش یافت به طوری که در تیمارهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار آن در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی به ترتیب ۱۵، ۱۸ و ۲۰ درصد بالاتر بود (جدول ۴). اگرچه محلول‌پاشی غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر ذرات میکرو تعرق برگ سیب‌زمینی را در مقایسه با سطح بدون محلول‌پاشی به طور معنی‌داری کاهش داد، اما در سطوح بالاتر تأثیر ذرات میکرو بر صفت یاد شده مثبت بود (جدول ۴). مقایسه سطوح محلول‌پاشی دو اندازه ذره نشان می‌دهد که در هر یک از سطوح ۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اثر کاهش نانو ذرات بر تعرق برگی در مقایسه با ذرات میکرو به طور معنی‌داری بیشتر بوده است. اما در غلظت‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر تعرق برگی تیمار نانو ذرات به ترتیب ۱۲ و ۱۶ درصد بیشتر از تیمار میکرو بود (جدول ۴). در آزمایش انجام شده تحت شرایط تنش ۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، تعرق برگ گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی تحت تیمار ۱ میلی‌مولار نانو سیلیسیم افزایش معنی‌داری نشان داد. اما غلظت ۲ میلی‌مولار سیلیسیم نانو هر دو صفت را به کمترین مقدار رساند، اگرچه روند تغییرات تعرق در تحقیق حاضر برخلاف نتایج فوق‌الذکر بود، اما روند معکوس تغییرات صفت تعرق در دو سطح غلظت سیلیسیم

جدول ۳- مقایسه میانگین سطوح محلول پاشی سیلیکات سدیم در صفات فتوسنتز، کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد ریزغده گیاهچه‌های سیب‌زمینی

Table 3- Mean comparison of foliar application levels of sodium silicate on seedling potato photosynthesis, chlorophyll, yield and yield components of minitubers

غلظت سیلیکات سدیم Sodium silicate concentration (mg l ⁻¹)	فتوسنتز Photosynthesis (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	غلظت کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	تعداد ریزغده در بوته Minituber number per plant	میانگین وزن ریزغده Mean of mini-tuber weight (g)	عملکرد ریزغده Mini-tuber yield (g per plant)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g per plant)
Zero	4.79	0.382	3.12	4.682	14.40	1.495
water	4.76	0.445	2.91	4.698	13.56	1.482
100	5.10	0.464	3.12	5.273	16.34	1.458
200	5.24	0.465	3.35	4.965	16.56	1.457
300	5.27	0.503	3.44	4.819	16.51	1.528
400	5.49	0.527	3.36	4.952	16.55	1.518
500	4.59	0.466	3.15	4.830	15.18	1.516
600	4.70	0.430	3.06	4.559	13.97	1.499
700	4.24	0.429	3.15	4.389	13.80	1.486
800	4.70	0.375	2.74	4.874	13.36	1.431
900	4.51	0.327	2.79	4.586	12.76	1.455
LSD 5%	0.352	0.035	0.347	0.467	1.02	0.037



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر اندازه ذرات سیلیکات سدیم بر صفات فتوسنتز برگ (a)، میانگین وزن ریزغده (b) و عملکرد ریزغده در بوته (c). علامت ستاره (*) نشان‌دهنده برتری تیمار مورد نظر با آزمون LSD در سطح پنج درصد است.

Figure 1- Mean comparison effects of sodium silicate size on leaf photosynthesis (a), mean of mini-tuber weight (b) and mini-tuber yield in plant (c). Symptom star was indicated performance of treatment with LSD

کارتوتیویدهای برگ در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم نانو ذرات به‌دست آمد

اگرچه روند تغییرات دو اندازه ذره مشابه بود، اما بیشترین غلظت

مشابه نتایج به دست آمده، وزن خشک اندام هوایی ذرت تحت تأثیر کاربرد غلظت‌های مناسب نانو و میکرو ذرات سیلیکون به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Zare et al., 2016). همچنین محلول‌پاشی سیلیسیم با غلظت بهینه ۶ در هزار سیلیکات سدیم عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک کلزا را در شرایط مزرعه‌ای به‌طور معنی‌داری افزایش داد (Nasri, et al., 2008). مطابق با نتایج حاضر، محققان دیگر نیز گزارش کردند که کاربرد غلظت‌های بهینه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم تأثیر مثبت بر عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی داشته و افزایش مقادیر سیلیسیم از حد بهینه تأثیر منفی بر عملکرد خواهد داشت. همچنین یافته‌های ایشان نشان داد که عملکرد ریزغده با افزایش غلظت ذرات میکرو به‌طور معنی‌داری بیشتر شد. اما تأثیر مثبت ذرات نانو بر صفت یاد شده تا سطح ۰/۳ میلی‌مولار بود. به‌طور کلی اثرات مثبت کاربرد نانو ذرات به دلیل کارایی جذب بالا، در غلظت‌های پایین ظهور یافت. اما در سطوح بالاتر، بر خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد سیب‌زمینی اثرات فیتوتوکسینی داشت (Saadatian and Kafi, 2015). در رابطه با افزایش عملکرد گیاه در حضور غلظت بهینه سیلیسیم عنوان شده که این عنصر از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی، رشد و عملکرد را بهبود می‌دهد (Samuels et al., 1993). در ادامه، محققان تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه را به دلیل رسوب آن در پهنای برگ و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ مرتبط دانسته‌اند (Adtina and Beasford, 1986). در آزمایش حاضر نیز روند تغییرات مشابه فتوسنتز، کلروفیل با وزن خشک اندام هوایی و عملکرد ریزغده، این موضوع را تأیید می‌نماید.

با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم، غلظت و مقدار سیلیسیم در اندام هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش نشان داد (جدول ۴). بین اندازه ذرات در هر یک از سطوح تیماری ۱۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری در غلظت سیلیسیم اندام هوایی مشاهده نشد. اما در هر یک از سطوح غلظت ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر، غلظت سیلیسیم اندام هوایی تیمار محلول‌پاشی نانو ذرات به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ۶ درصد بیشتر از ذرات میکرو بود. همچنین بالاترین غلظت سیلیسیم موجود در اندام هوایی گیاهچه‌های سیب‌زمینی (۳/۰۳ گرم در گرم وزن خشک)، در تیمار ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات به‌دست آمد (جدول ۴). اگرچه با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم، مقدار سیلیسیم موجود در اندام هوایی افزایش معنی‌داری در مقایسه با هر یک از تیمارهای عدم محلول‌پاشی و آب مقطر نشان داد، اما بین تیمار نانو و میکرو در اکثر سطوح محلول‌پاشی تفاوت آماری وجود نداشت و تنها در هر یک از تیمارهای ۴۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار

(جدول ۴). مشابه نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، مطالعه بر روی گیاه گوجه‌فرنگی نیز نشان داد که در شرایط شور، غلظت ۱ میلی‌مولار ذرات سیلیسیم نانو و میکرو تأثیر مثبت بر محتوای کلروفیل برگ داشت (Haghighi and Pessaraki, 2013). همچنین گزارشات نیز حاکی از افزایش معنی‌داری محتوای کلروفیل a، b و مجموع آنها در برگ گندم (Tuna et al., 2008) و کلزا (Hashemi et al., 2010) در هر دو شرایط تنش شوری و عدم تنش در غلظت بهینه سیلیسیم بود. در ادامه یافته‌های آزمایشی دیگر مبین تأثیر مثبت غلظت‌های مناسب ذرات نانو و میکرو سیلیکون بر میزان کلروفیل و کارتنوئید ذرت بود. همچنین در هر یک از سطوح سیلیکون اثر نانو ذرات در بهبود صفات مرتبط با رنگدانه‌های فتوسنتزی به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (Zare et al., 2016) که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مطابقت داشت.

علی‌رغم تغییرات صفت تعداد ریزغده در بوته، کاربرد غلظت‌های ۱۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم تأثیر معنی‌داری بر صفت فوق‌الذکر در مقایسه با تیمارهای صفر (عدم محلول‌پاشی) و آب مقطر نداشت و حتی در تیمار ۸۰۰ میلی‌گرم در لیتر تعداد ریزغده در بوته در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی از نظر آماری کمتر بود (جدول ۳). میانگین وزن ریزغده در تیمار ذرات میکرو سیلیکات سدیم نسبت به نانو ذرات به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (شکل ۲، b). تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم تأثیر مثبت و معنی‌داری بر میانگین وزن ریزغده‌های سیب‌زمینی داشت. اما در سایر سطوح سیلیکات سدیم نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی تفاوتی مشاهده نشد (جدول ۳). بیشترین عملکرد ریزغده سیب‌زمینی در تیمار میکرو سیلیکات سدیم با ۶/۲ درصد افزایش نسبت به نانو ذرات به‌دست آمد (شکل ۲، c). کاربرد برگی تیمارهای ۱۰۰ الی ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی را در مقایسه با عدم محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری افزایش داد و بین تیمارهای سیلیکات سدیم در سطوح غلظت یاد شده تفاوت آماری وجود نداشت (جدول ۳). با افزایش غلظت سیلیکات سدیم از ۵۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی ۱۶ درصد کاهش نشان داد. به‌طوری‌که در دو غلظت بالای سیلیکات سدیم عملکرد ریزغده در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری کمتر بود (جدول ۳).

اگرچه بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به‌دست آمد، اما کاربرد سیلیکات سدیم تا غلظت ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در صفات یاد شده نگردید و حتی در غلظت‌های ۸۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در لیتر وزن خشک اندام هوایی سیب‌زمینی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی از نظر آماری کاهش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳).

سیلیسیم اندام هوایی تیمار نانو در مقایسه با تیمار میکرو افزایش معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل اندازه ذرات سیلیکات سدیم و سطوح غلظت در صفات شاخص پایداری غشا، تعرق، کارایی مصرف آب، رنگدانه‌ها، غلظت و محتوای سیلیسیم اندام هوایی گیاهچه‌های سبب زمینی

اندازه ذرات سیلیکات سدیم Particle size of sodium silicate	غلظت Concentration (mg l ⁻¹)	صفات Traits					مقدار سیلیسیم در اندام هوایی Si amount in shoot (g)	
		شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index (%)	تعرق Transpiration (mmol m ⁻² s ⁻¹)	کارایی مصرف آب Water use efficiency (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll (mg g ⁻¹ FW)	غلظت کاروتنوئیدها Carotenoids (mg g ⁻¹ FW)		غلظت Si در اندام هوایی Si concentration in shoot (mg g ⁻¹ DW)
نانو Nano	Zero	59.9	2.96	1.62	0.483	0.378	1.50	2.24
	water	59.6	3.19	1.49	0.509	0.362	1.51	2.24
	100	70.8	2.57	2.13	0.579	0.512	1.68	2.45
	200	72.9	2.19	2.55	0.643	0.575	1.84	2.69
	300	66.9	2.06	2.68	0.651	0.641	1.89	2.91
	400	61.5	2.2	2.48	0.563	0.739	2.32	3.61
	500	55.1	2.35	2.06	0.525	0.521	2.43	3.66
	600	42.1	3.00	1.59	0.539	0.537	2.61	3.89
	700	37.3	3.42	1.29	0.458	0.466	2.85	4.22
	800	42.0	3.49	1.28	0.423	0.368	2.90	4.10
میکرو Micro	900	42.1	3.55	1.25	0.416	0.391	3.03	4.40
	Zero	59.9	2.96	1.62	0.483	0.378	1.50	2.24
	water	59.6	3.19	1.49	0.509	0.362	1.51	2.24
	100	60.5	2.69	1.81	0.538	0.469	1.67	2.43
	200	62.5	2.95	1.68	0.632	0.674	1.83	2.66
	300	66.7	2.99	1.69	0.594	0.611	1.92	2.91
	400	66.4	2.59	2.14	0.638	0.658	2.30	3.40
	500	48.4	3.12	1.39	0.533	0.490	2.40	3.66
	600	51.5	3.10	1.50	0.468	0.452	2.54	3.83
	700	50.0	3.57	1.14	0.442	0.452	2.72	4.06
LSD 5%	800	45.8	3.08	1.61	0.429	0.428	2.80	4.06
	900	50.1	2.97	1.55	0.444	0.420	2.85	4.16
		5.44	0.380	0.260	0.0499	0.0627	0.053	0.123

درصد بالاتر بود و تفاوتی بین دو اندازه ذره در صفت یاد شده مشاهده نشد (جدول ۶). کاهش اسیدیته محلول باعث افزایش کارایی مصرف آب برگ سیب زمینی شد و در اسیدیته ۵ این کارایی به حداکثر مقدار خود رسید (شکل ۳، b).

غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها در تیمار ۴۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکات سدیم نسبت به آب به طور معنی داری بیشتر بود. اما تیمار ذرات میکرو از نظر صفات یاد شده تفاوتی با تیمار آب نشان نداد (جدول ۶). میانگین وزن ریزغده‌های سیب زمینی در تیمار نانو ذرات در مقایسه با تیمارهای آب و ذرات میکرو به ترتیب ۱۱ و ۱۲ درصد بالاتر بود و از این نظر با هر یک از تیمارهای یاد شده اختلاف معنی داری داشت (جدول ۶). در تیمار آب، کاهش اسیدیته اثر منفی بر تولید ریزغده سیب زمینی داشت. اما در تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم، با کاهش اسیدیته محلول افزایش معنی دار عملکرد ریزغده در بوته حاصل شد. به طوری که تیمار ۵ بیشترین مقادیر صفت یاد شده را در هر دو اندازه ذره به خود اختصاص داد. همچنین در اسیدیته یاد شده، عملکرد ریزغده سیب زمینی تیمار نانو ذرات با ۲۰ درصد اختلاف نسبت به تیمار میکرو برتری داشت (جدول ۶). وزن خشک اندام هوایی تیمار نانو ذرات در مقایسه با هر یک از تیمارهای آب و میکرو به طور معنی داری بیشتر بود (جدول ۵). نتایج نشان داد که در تیمارهای محلول پاشی با اسیدیته ۵ و ۷، وزن خشک اندام هوایی در مقایسه با تیمار ۱۱/۳ افزایش معنی داری داشت (شکل ۳، c).

اگرچه با کاهش اسیدیته آب از ۱۱/۳ به ۷ و ۵ غلظت سیلیسیم اندام هوایی به ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد کاهش نشان داد، اما در هر یک از تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم تغییر معنی داری بین سطوح اسیدیته از این نظر مشاهده نشد. همچنین نتایج مؤید افزایش معنی دار غلظت سیلیسیم اندام هوایی در اثر محلول پاشی سیلیکات سدیم نانو و میکرو در اسیدیته‌های مورد آزمایش بود نسبت به آب بود (جدول ۶). برخلاف غلظت، مقدار سیلیسیم در بین تیمارهای نانو و میکرو و سطح اسیدیته تغییرات مشهودی نشان داد. به طوری که در هر یک از سطوح اندازه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم، محلول پاشی اسیدیته‌های ۷ و ۵، مقدار سیلیسیم تجمع یافته در اندام هوایی را در مقایسه با اسیدیته ۱۱/۳ به طور میانگین ۷ و ۹ درصد افزایش نشان داد و بین سطوح ۵ و ۷ اسیدیته در هر سطح اندازه ذره، تفاوت آماری مشاهده نشد (جدول ۶).

نتایج حاصل از آزمایش دوم حاکی از تأثیر مثبت کاهش اسیدیته محلول سیلیکات نانو و میکرو بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد ریزغده سیب زمینی بود. در این رابطه محققان عنوان داشته‌اند که از لایه واکسی کوتیکولی تا لایه پکتینی برگ یک شیب افزایشی حاصل از بار منفی، عامل ایجادکننده یک گرادیان الکتروشیمیایی است که

همانطور که نتایج نشان داده، افزایش غلظت محلول‌های سیلیکات نانو و میکرو افزایش جذب را در بخش هوایی سیب زمینی در پی داشته است. در این رابطه محققان بیان داشتند که بین غلظت پاشش مواد معدنی بر روی سطح برگ و سرعت جذب آنها توسط سلول‌های اپیدرمی همبستگی بسیار زیادی وجود دارد (Wójcik, 2004).

به طور کلی در فاز اول، با افزایش غلظت سیلیکات سدیم تا ۴۰۰ میلی گرم در لیتر صفات فتوسنتز، کلروفیل a و عملکرد ریزغده‌های سیب زمینی افزایش معنی داری نشان داد. اما در سطوح بالاتر، مقادیر صفات یاد شده کاهش نشان داد. کاربرد برگی سیلیکات نانو و میکرو تا غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر افزایش پایداری غشای سلولی، کاهش تعرق برگی، افزایش کارایی مصرف آب، افزایش کلروفیل b و کارتنوئیدهای برگ سیب زمینی را در پی داشت. اما با افزایش غلظت هر دو اندازه ذرات سیلیکات سدیم اثر مثبت آنها بر صفات کاهش یافت. اگرچه با افزایش غلظت محلول پاشی سیلیکات سدیم، غلظت و مقدار سیلیسیم در تیمارهای نانو و میکرو افزایش یافت، اما با توجه به نتایج حاصل از صفات بیوشیمیایی، فتوسنتزی و عملکرد ریزغده، افزایش سیلیسیم در بافت گیاهی تا غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر هر دو اندازه ذره تأثیر مثبتی بر گیاهچه‌های سیب زمینی در پی داشت. از این رو در فاز بعدی آزمایش غلظت بهینه به دست آمده مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش تعیین اسیدیته بهینه سیلیکات سدیم

بیشترین شاخص پایداری غشای سلولی در تیمار نانو ذرات سیلیکات سدیم به دست آمد (جدول ۵). همچنین تحت تأثیر افزایش اسیدیته محلول، شاخص پایداری غشای سلولی کاهش نشان داد و در اسیدیته ۱۱/۳ این تفاوت معنی دار بود (شکل ۳، a).

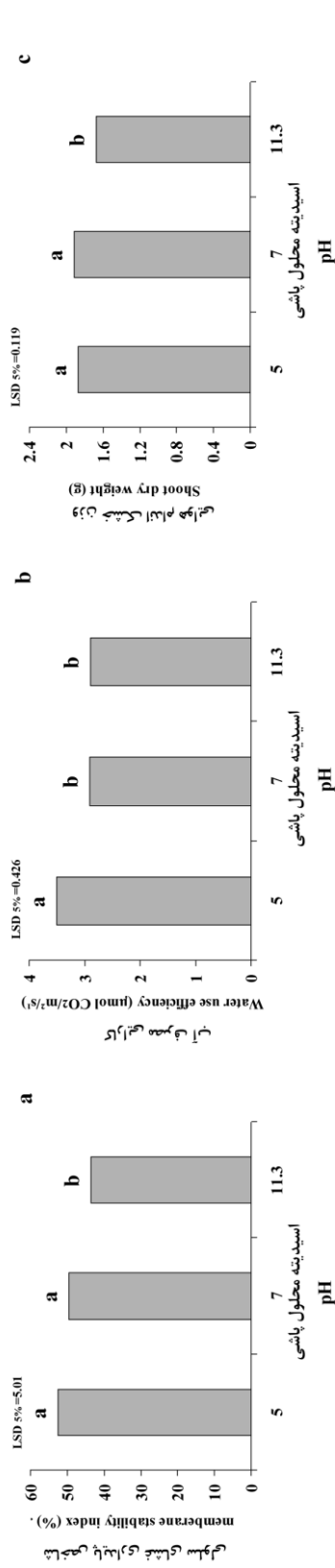
اسیدیته ۱۱/۳ و ۵ آب، فتوسنتز برگ را در مقایسه با اسیدیته ۷ به ترتیب ۱۸ و ۲۷ درصد تقلیل داد (جدول ۶). در هر یک از سطوح اسیدیته محلول، تفاوت آماری بین ذرات نانو و میکرو از نظر فتوسنتز برگ وجود نداشت. اما در هر یک از تیمارهای نانو و میکرو، اسیدیته‌های ۷ و ۵ در مقایسه با اسیدیته ۱۱/۳ مقادیر فتوسنتز بالاتری داشت (جدول ۶). آب دارای اسیدیته ۵ در مقایسه با اسیدیته‌های دیگر آن، تعرق برگ گیاهچه‌های سیب زمینی را به طور معنی داری کاهش داد. در هر یک از سطوح اسیدیته محلول، تعرق برگی تیمارهای نانو و میکرو سیلیکات سدیم در مقایسه با آب به طور معنی داری کمتر بود. اما بین تیمارهای نانو و میکرو در هر سطح اسیدیته از این نظر تفاوتی مشاهده نشد (جدول ۶). کارایی مصرف آب ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم در مقایسه با آب به ترتیب ۸۰ و ۸۵

موجب افزایش حرکت کاتیون‌ها و ملکول‌های آب می‌گردد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر نوع تیمار محلول‌پاشی بر صفات شاخص پایداری غشاء، کارایی مصرف آب، غلظت رنگدانه‌ها، میانگین وزن ریزنده و وزن خشک اندام هوایی گیاهچه‌های سبب‌زمینی

Table 5- Mean comparison effect of spraying type on membrane stability index, water use efficiency, pigments concentration, mean of mini-tuber weight and soot dry weight of seedling potato

نوع تیمار Foliar application treatments	صفات Trials					میانگین وزن ریزنده Mean of mini-tuber weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g)
	شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index (%)	کارایی مصرف آب Water use efficiency ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	کلروفیل a Chlorophyll a ($\text{mg g}^{-1}\text{FW}$)	کلروفیل b Chlorophyll b ($\text{mg g}^{-1}\text{FW}$)	کاروتنوئیدها Carotenoids ($\text{mg g}^{-1}\text{FW}$)		
Water	43.6	2.0	0.70	0.29	0.107	5.05	1.76
Micro Si	48.3	3.6	0.77	0.31	0.111	5.17	1.74
Nano Si	53.7	3.7	0.85	0.34	0.121	5.64	1.95
LSD 5%	5.01	0.42	0.088	0.037	0.0108	0.460	0.119



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر اسیدیته محلول‌پاشی بر صفات پایداری غشای سلولی (a)، کارایی مصرف آب (b) و وزن خشک اندام هوایی (c) گیاهچه‌های سبب‌زمینی. میانگین‌های دارای حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD ندارند.
Figure 2- Mean comparison of foliar application acidity effect on membrane stability index (a), water use efficiency (b), and shoot dry weight (c) of seedling potato. The means of similar letters not significant difference with LSD 5%.

یافته‌ها می‌توان عنوان داشت که کاهش اسیدیته محلول سیلیکات سبب افزایش بار مثبت و در نتیجه حرکت آسان‌تر آن در لایه‌های برگ و افزایش کارایی نفوذ و جذب در برگ سیب‌زمینی شده است. لذا با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق اسیدیته ۵، اسیدیته بهینه هر دو اندازه ذرات سیلیکات نانو و میکرو بود و در اندازه نانو علی‌رغم افزایش کارایی جذب باز هم کاهش اسیدیته توانست اثر مثبت بر بهبود فرآیند جذب و انتقال در بخش هوایی سیب‌زمینی داشته باشد.

لذا حرکت و انتقال کاتیون‌ها در سراسر پوسته کوتیکولی برگ در محلول‌های دارای بار مثبت‌تر آسان‌تر است (Franke, 1967; Tyree, 1990; Mengel, 2002) اسیدیته برای افزایش کارایی جذب برگ متفاوت گزارش شده (Wójcik, 2004). اما در این راستا، مقدار بهینه اسیدیته محلول‌های به کار رفته برای بالاترین مقدار جذب برگ اکثر ترکیبات غذایی بین ۳ الی ۵/۵ است گزارش شده است (Kannan, 1980). با توجه به این

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع تیمار و اسیدیته بر صفات فتوسنتز، تعرق، عملکرد ریزغده، غلظت و مقدار سیلیسیم اندام هوایی گیاهچه‌های سیب زمینی

Table 6- Mean comparison of interaction effects of spraying type and acidity on photosynthesis, transpiration, mini-tuber yield, concentration and amount of Si in seedling potato shoot

تیمار محلول پاشی Foliar application treatment	pH	صفات Trials				
		فتوسنتز Photosynthesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	تعرق Transpiration ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	عملکرد ریزغده Mini-tuber yield (g per plant)	غلظت Si در اندام هوایی Si concentration in shoot	مقدار سیلیسیم در اندام هوایی Si amount in shoot (g)
Water	11.3	4.5	2.75	25.8	1.36	2.1
	7	5.5	2.62	23.7	1.08	2.06
	5	4.0	1.69	21.4	0.99	1.81
Micro Si (400 mg l ⁻¹)	11.3	4.6	1.37	24	1.84	3.02
	7	5.6	1.78	25.4	1.8	3.15
	5	5.5	1.35	26.7	1.81	3.31
Nano Si (400 mg l ⁻¹)	11.3	5.2	1.43	24.8	1.82	3.31
	7	5.7	1.67	27.5	1.75	3.65
	5	6.1	1.53	29.8	1.85	3.57
LSD 5%		0.63	0.301	2.47	0.166	0.251

افزایش فتوسنتز، کاهش تعرق، افزایش عملکرد غده و افزایش مقدار سیلیسیم اندام هوایی را در پی داشت. در مجموع اسیدیته ۵، اسیدیته بهینه هر دو اندازه ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بود و در این اسیدیته بیشترین اثرات مثبت سیلیسیم در گیاهچه‌های سیب‌زمینی به‌دست آمد.

سپاسگزاری

از حوزه معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی و حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تأمین اعتبار این تحقیق با کد ۲/۳۸۷۸۷ قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

محلول پاشی سیلیکات سدیم تا غلظت بهینه ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر مثبتی بر پارامترهای فتوسنتزی، رنگدانه‌ها و عملکرد اجزای عملکرد ریزغده‌های سیب‌زمینی داشت. نانو ذرات سیلیکات سدیم در مقایسه با ذرات میکرو در غلظت‌های کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر در غالب صفات مورد بررسی اثر مثبت بالاتری داشت. اما در غلظت‌های بالاتر سیلیکات سدیم اثرات سمیت گیاهی بر گیاهچه‌های سیب‌زمینی داشت و کاربرد ذرات نانو تأثیر منفی بیشتری نشان داد. اسیدیته محلول سیلیکات سدیم در اثرات فیزیولوژیک، فتوسنتزی و عملکرد گیاهچه‌های سیب‌زمینی بسیار مؤثر بود. کاهش اسیدیته محلول پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم از ۱۱/۳ به ۷ و ۵

References

- Adtina, M. H., and Beasford, R. T. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Journal Annual of Botany* 58: 343-351.
- Arnon, D. 1949. Copper enzyme polyphenoloxides in isolated chloroplast in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24: 1-15.
- Asmar, A., Castro, E. M., Pasqual, M., Pereira, F. J., and Soares, J. D. R. 2013. Changes in leaf anatomy and

- photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. *Scientia Horticulturae* 161: 328-332.
4. Cherif, M., and Belanger, R. R. 1992. Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress *Pythium ultimum* on long english cucumber. *Journal of Plant Disease* 76 (10): 1008-1011.
 5. Epstein, E. 1999. Silicon, *Annual Review. Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 641-664.
 6. Elliot, C. L., and Snyder, G. H. 1991. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Agricultural and Food Chemistry* 39: 1118-1119.
 7. Franke, W. 1967. Mechanisms of foliar penetration of solutions. *Annual review. Plant Physiology* 18: 281-300.
 8. Haghghi, M., and Pessaraki, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae* 161: 111-117.
 9. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., and Sadeghipour, H. R. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 56 244-253.
 10. Hu, Y., and Schmidhalter, U. 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168: 541-549.
 11. Kannan, S. 1980. Mechanisms of foliar uptake of plant nutrients: accomplishments and prospects. *Journal of Plant Nutrient* 2: 717-735.
 12. Lichtenthaler, H. K., and Wellburn, A. R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11: 591-592.
 13. Liang, Y. C., Shen, Q. R., Shen, Z. G., and Ma, T. S. 1996. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. *Journal of Plant Nutrition* 19. 173-183.
 14. Lim, T. H., Cheol, S. Y., Choi, S. P., and Dhital, S. 2004. Application of giberelic acid and paclobutrazol for efficient production of potato (*Solanum tuberosum* L.) minitubers and their dormancy breaking under soilless culture system. *Journal of Korea Society Horticulture Science* 45 (4): 189-193.
 15. Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., and Davy, A. J. 2013. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiology and Biochemistry* 63: 115-121.
 16. Mengel, K. 2002. Alternative or complementary role of foliar supply in mineral nutrition. *Acta Horticulture* 594: 33-48.
 17. Mohaghegh, P., Shirvani, M., and Ghasemi, S. 2010. Silicon application effects on yield and growth of two cucumber genotypes in hydroponics system. *Journal of Science technology and greenhouse culture* 1 (1): 35-40. (in Persian with English abstract).
 18. Nasri, M., Khalat bari, M., Pak nejad, F., Hasanpor, J., and Kasraie, P. 2008. Effect of different levels of silic spraying and plant density on some quantitative characteristics of rapeseed (*Hyola-42*) in varamin condition. *Iranian agricultural science* 315-325. (in Persian with English abstract).
 19. Ozturk, G., and Yildirim, Z. 2010. A comparison of field performances of minitubers and micro tubers used in seed potato production. *Turkish Journal of Field Crops* 15 (2): 141-147.
 20. Rashed Mohassel, M. H., Aliverdi, A., and Rahimi, S. 2011. Optimizing dosage of sethoxydim and fenoxaprop-p-ethyl with adjuvants to control wild oat. *Industrial Crops and Products* 34: 1583-1587.
 21. Romero-Aranda, M. R., Jurado, O., and Cuartero, J. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology* 163: 847-855.
 22. Saadatian, B., and Kafi, M. 2015. Study of nutritional role of silicon nano-particles on physiological characteristics of minituber potato production. *Journal of Plant Production Research* 22: 173-189. (in Persian with English abstract).
 23. Sairam, R. K. 1994. Effect of moisture stress on physiological activities of two con-trasting wheat genotypes. *Indian Journal. Experimental of Biology* 32: 594-597.
 24. Samuels, A. L., Glass, A. D. M., Ehret, D. L., and Menzies, J. G. 1993. The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: Changes in surface characteristics. *Journal of Annual Botany* 72: 433-440.
 25. Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A. E., and Li, J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology* 167: 1248-1252.
 26. Tuna A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., and Girgin, A. R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental Experiment of Botany* 62: 10-16.
 27. Tyree, M. T., Scherbatskoy, T. D., and Tabor, C. A. 1990. Leaf cuticles behave as asymmetric membranes. Evidence from the measurement of diffusion potentials. *Plant Physiology* 92: 103-109.
 28. Wójcik, P. 2004. Uptake of mineral nutrients from foliar fertilization (Review). *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* 12: 201-218.
 29. Zare, H. R., Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A., and Mohsenzadeh, S. 2016. Effect of silicon and nano silicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. *Iranian Journal of plant biology* 7 (26): 59-74. (in Persian with English abstract).



Determination of Optimal Acidity and Concentration of Nano and Micro Sodium Silicate on Efficiency of Foliar Application of Potato Plantlets

M. Kafi^{1*} - B. Saadatian²

Received: 03-08-2016

Accepted: 01-03-2017

Introduction

Silicon (Si) is one of the most abundant elements in Earth's crust. It has been regarded as an essential element in a number of species of the Poaceae and Cyperaceae, however it has not been possible to demonstrate that it is essential to all higher plants because direct evidence is still lacking that it is part of the molecule of an essential plant constituent or metabolite. Recently, the role of Si in plant metabolism has received increasing attention. It has been suggested that Si may be involved in metabolic or physiological and/or structural activity in higher plants in normal condition and exposed to abiotic and biotic stresses. In many researches, it has been found that Si improved water use efficiency, photosynthesis, membrane stability index and yield in crops. The use of nano-compound material has been given a lot of attention by the agricultural researchers, especially by those who examine the characteristics of the seeds, although the exact mechanism of their actions is not well understood. Nanomaterials, because of their tiny size, show unique characteristics. Previous work reported that nano sodium silicate was affected on physiological and yield of potato seedlings in greenhouse. Acidity was determinant factor in foliar application of solutions. However, studies have not been paid attention to this factor.

Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment based on a randomized complete block design with three replications at the faculty of agriculture's research greenhouse, Ferdowsi University of Mashhad, in 2013. Plantlets of Agria cv. produced from nodal tissue culture in Murashige and Skoog (MS) medium. After 25 days, Free disease and uniform plantlets exported to plastic pots with 12 cm diameter and 30 cm height. Perlite, cocopite and sand with 3:3:4 ratios, formed the substrate. Potato plantlets were fed with corrected Hoagland solution. In the first experiment, Treatments were particle size of sodium silicate (nano and micro) and eleven concentrations (Non-spraying, Distilled water, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 and 900 mg l⁻¹). The pH of Concentrations were measured and was in the range of 7.5 (distilled water) and 11.6. In the second experiment, the optimal concentrations nano and micro particles of first experiment and three pH levels (5, 7 and 11.3) were used. In both experiments, membrane stability index, photosynthesis parameters, chlorophyll a, b and carotenoids, shoot dry weight, silicon concentration and amount, yield and yield components of minituber were measured.

Results and Discussion

In the first experiment, the results showed that with increasing silicon concentration up to 400 mg l⁻¹, photosynthesis, chlorophyll a and yield of potato minituber, significantly increased. Membrane stability index increased, transpiration reduced, water use efficiency increased, chlorophyll a and carotenoids of potato leaves increased as a result of nano and micro silicon foliar application up to 400 mg l⁻¹ and effects of nano particles on traits more than of micro particles. But, both of silicon particle sizes had a negative effect on traits in higher concentrations. In second experiment, effect of nano silicon particles to improve membrane stability index, chlorophyll b, mean of minituber weight and shoot dry weight traits was higher than the micro particles by 5.4, 9.7, 9 and 12 percentages, respectively. Also, membrane stability index, shoot dry weight and water use efficiency trials, improved in foliar application with pH 5 compared to 11.3 by 8.8, 6.11 and 21.3 percentage, respectively. Reducing the acidity of nano and micro-particles sprayed silicon was caused to increasing of photosynthesis, decreasing of transpiration, increasing of silicon amount of shoot significantly.

1- Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Ph.D Student of Crop physiology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.kafi@um.ac.ir)

Conclusions

Optimal concentration was obtained to foliar application of nano and micro Sodium silicate particles. Overall, the best treatments were 400 mg l⁻¹ sodium silicate and pH=5.

Keywords: Chlorophyll, Membrane stability index, Minituber yield, Photosynthesis, Water use efficiency