Archive of SID

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۵، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، ص. ۴۳۷-۴۲۵

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 15, No. 2, Summer. 2017, p. 425-437

مقایسه اثر اندازه ذرات سیلیکاته در محلول غذایی بر صفات فیزیولوژیک و رشدی ذرت در مرحله گیاهچه‌ای، تحت تنش کادمیوم

بیژن سعادتیان[۱] - محمد کافی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹

چکیده

به‌منظور بررسی نقش ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر صفات فیزیولوژیک و رشدی ذرت در شرایط تنش کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار به‌صورت هیدروپونیک در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۴ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سطوح تنش کادمیوم از منبع سولفات کادمیوم (صفر، ۵۰ (۱۲/۸ پی‌پی‌ام) و ۱۰۰ (۲۵/۶ پی‌پی‌ام) میکرومول در لیتر) و تیمارهای سیلیکات سدیم (شاهد (صفر)، میکرو و نانو ذرات با غلظت دو میلی‌مولار) بود. نتایج نشان‌دهنده تأثیر سطوح سیلیکات سدیم، کادمیوم و اثرات متقابل آنها بر صفات شاخص پایداری غشای سلولی، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، نسبت Fv/Fm (بیشترین کارایی کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم Π)، ارتفاع، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت وزن اندام هوایی به ریشه بود. اما اثرات متقابل تیمارها بر صفات درصد رطوبت نسبی و شاخص کلروفیل برگ معنی‌دار نشد. با افزایش غلظت کادمیوم شاخص پایداری غشای سلولی، شاخص کلروفیل، نسبت Fv/Fm، رطوبت نسبی برگ، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در شرایط عدم تنش، مصرف نانو ذرات سیلیکات سدیم صفات ارتفاع، قطر ساقه، سطح برگ و وزن خشک اندام هوایی ذرت را به‌ترتیب ۱۲/۸، ۹، ۳۴/۲ و ۲۳/۲ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. درمقابل، مصرف ذرات میکرو در شرایط عدم تنش تأثیر مثبت بر صفات ذکر شده داشت. اما در غلظت ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، مصرف نانو ذرات صفات شاخص پایداری غشای سلولی، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، قطر ساقه و وزن خشک اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. در بالاترین سطح تنش کادمیوم، اثر ذرات میکرو بر صفات پایداری غشای سلولی، هدایت روزنه‌ای و نسبت اندام هوایی به ریشه بیشتر از نانو ذرات بود، اما مصرف نانو ذرات نیز در کاهش تنش کادمیوم در صفات یاد شده تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت. به‌طور کلی کاربرد نانو ذرات در شرایط عدم تنش اثرات فیتوتوکسینی بر رشد و نمو ذرت داشت و تنها در شرایط تنش، تأثیر مثبت آن مشاهد شد.

واژه‌های کلیدی: فلورسانس کلروفیل، کشت هیدروپونیک، نانو ذرات، همبستگی

مقدمه

با توسعه فعالیت‌های صنعتی، سطح وسیعی از خاک‌های کشاورزی جهان به کادمیوم آلوده شده است. مهمترین دلایل این آلودگی خاک‌ها در بخش کشاورزی، کاربرد غیر اصولی کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای فسفره و استفاده از لجن‌های فاضلاب می‌باشد (Vasssilve *et al.,* 2002). عنصر سمی کادمیوم اگرچه برای گیاه ضروری نیست، اما به آسانی از طریق سیستم ریشه‌ای جذب و از مسیرهای سیمپلاستی و آپوپلاستی وارد بافت گیاهی می‌شود (Sanita ta di toppi and Gabbriella, 1999) و اغلب در واکوئل سلول تجمع می‌یابد.

آثار مخرب کادمیوم بر خصوصیات رشدی، مورفولوژی و فیزیولوژی گیاه به‌عنوان علائم سمیت آن مطرح است. تجمع کادمیوم در بافت‌های گیاهی و در سطح سلولی سمی بوده و سبب اختلال در تقسیم و رشد سلول‌ها، تقسیم منطقه مریستمی و کاهش رشد و نمو گیاه می‌گردد (Balestrasse *et al.,* 2001; Joner and Leyval, 2001). یکی از مهمترین عوامل کاهش رشد گیاه در اثر سمیت کادمیوم، اختلالات فتوسنتزی است (Sanita ta di toppi and Gabbriella, 1999; Joner and Leyval, 2001; Wang *et al.,*

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: m.kafi@um.ac.ir
DOI: 10.22067/gsc.v15i2.52432

www.SID.ir

Archive of SID

2008) که در نتیجه کاهش ساخت کلروفیل و زوال غشاهای سلولی پدید می‌آید (Sanita ta di toppi and Gabbriella, 1999; Joner and Leyval, 2001; Vasssilve *et al.,* 2002). نتایج Rasouli sedghiani *et al,* (2013) حاکی از تأثیر منفی غلظت‌های صفر الی ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک بر وزن خشک اندام هوایی، ریشه و ارتفاع گیاه ذرت (*Zea mays* L.) بر اثر تنش ناشی از حضور کادمیوم در خاک بود. غلظت ۰/۵ میلی‌مولار کلرید کادمیوم در گیاه فلفل (*Frutescens caspsicum* L.) نیز کاهش صفات حجم ریشه، طول ریشه، تعداد برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر ریشه و محتوای نسبی آب برگ را در پی داشت (Shekari *et al.,* 2014). در ادامه، یافته‌ها حاکی از کاهش وزن تر، وزن خشک، طول اندام هوایی و ریشه سویا (*Glycine max* L.) در غلظت ۲۰۰ میلی‌مولار کلرید کادمیوم موجود در محلول غذایی هوگلند بود (Amooaghaie *et al.,* 2012).

سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید است که بر رشد و سلامت گیاه تأثیر دارد (Adtina and Beasford, 1986; Epstein, 1999; Saadatian and Kafi, 2015; Yanar *et al.,* 2011). این عنصر برای گیاهان تیره پوآسه از جمله ذرت یک عنصر مفید محسوب می‌گردد (Vaculik *et al.,* 2009; Liu *et al.,* 2009; Liang *et al.,* 2005) و نقش مهمی در رشد و مقاومت آنها نسبت به شرایط تنش‌زای محیطی ایفا می‌نماید (Liang *et al.,* 1996; Epstein, 1999; Liang *et al.,* 2005).

یکی از تأثیرات سودمند سیلیسیم تخفیف تنش ناشی از فلز سنگین کادمیوم است. در تحقیق صورت گرفته توسط Liu *et al,* (2009)، محلول‌پاشی سیلیکا از دو منبع متفاوت ارگانیک و غیرارگانیک در تیمار ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، وزن خشک دانه و اندام هوایی برنج (*Oryza sativa* L.) را به‌ترتیب ۲۰ الی ۲۵ و ۲۱ الی ۲۸ درصد افزایش داد. همچنین غلظت کادمیوم در دانه و اندام هوایی در اثر مصرف سیلیسیم کاهش نشان داد. به اعتقاد ایشان، مکانیزم تأثیر محلول‌پاشی سیلیسیم بر کاهش اثرات فیتوتوکسینی و تجمع کادمیوم در دانه برنج ممکن است به دلیل رسوب کادمیوم در دیواره سلولی باشد. Liang *et al,* (2005) نیز گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم از منبع سیلیکات سدیم در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، به‌طور معنی‌داری اسیدیته خاک را افزایش و به دنبال آن فراهمی کادمیوم را کاهش داد و غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاه کاهش یافت. Vaculik *et al,* (2009) دریافتند که کاربرد سیلیسیم با غلظت ۳۵ میلی‌مولار در محلول غذایی، در هر دو شرایط عدم حضور کادمیوم و تنش ناشی از آن بر بیشتر صفات رشدی ذرت در مقایسه با شاهد تأثیر مثبت داشت. در ارتباط با استفاده از نانو ذرات سیلیسیم نیز گزارش شده که ترکیبی از نانواکسید سیلیسیم و نانواکسید تیتانیوم با غلظت ۵ میلی‌مولار می‌تواند فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز را در گیاه سویا افزایش دهد و باعث بهبود توانایی جذب و مصرف آب و کود و همچنین تحریک سیستم آنزیمی و تسریع جوانه‌زنی و رشد گردد (Lu *et al.,* 2002). همچنین یافته‌های دیگر نشان‌دهنده تأثیر مثبت غلظت مناسب ۰/۳ میلی‌مولار نانو ذرات سیلیکات سدیم بر عملکرد و خصوصیات فیزیولوژیک گیاهچه‌های سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) از جمله پایداری غشای سلولی، عملکرد کوانتومی فتوسیستم Π و عملکرد غده بود (Saadatian and Kafi, 2015).

امروزه استفاده از نانو ذرات مورد توجه بسیاری از محققین رشته کشاورزی قرار گرفته است (Haghighi and Pessarakli, 2013; Saadatian and Kafi, 2015). نانو مواد به دلیل اندازه کوچک، خصوصیات منحصر به‌فردی از خود نشان می‌دهند و می‌توانند خصوصیات فیزیکوشیمیایی 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 (Ruffini and Cremonini, 2009; Saadatian and Kafi, 2015). استفاده از ترکیبات نانو به دلیل مشکلات زیست محیطی ناشی از انتشار آنها در محیط همواره با احتیاط دنبال می‌شود (Haghighi and Pessarakli, 2013). در همین راستا، برخی محققان معتقدند که ترکیبات نانو به دلیل فعالیت و جذب سریع‌تر در طبیعت، می‌توانند وارد چرخه‌های زیستی شده و در محیط‌های غیر هدف اثرات سوئی به‌همراه آورند (Ruffini and Cremonini, 2009; Saadatian and Kafi, 2015). اما لزوم توسعه کاربردها و شناخت اثرات آن در پیشرفت‌های علمی هر روز بیشتر احساس می‌گردد. علی‌رغم استفاده از ترکیبات سیلیکاته رایج، ذرات نانوی آنها در علوم کشاورزی به‌خصوص تولید محصولات زراعی و باغی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است (Saadatian and Kafi, 2015). از این رو شناخت دقیق و برپایه مشاهدات علمی و همچنین مقایسه کارایی نانو ذرات سیلیکاته با شکل متداول آن در شرایط تنش عناصر سنگین، به‌ویژه تنش کادمیوم به‌منظور کاهش تأثیرات مخرب آن می‌تواند راه‌گشای توسعه کاربرد نانو ذرات در کشاورزی باشد و در آینده امکان به‌کارگیری فناوری نانو و نانو ذرات در کنترل آلودگی‌های محیطی فراهم گردد. این آزمایش نیز به‌منظور بررسی نقش تخفیف‌دهندگی ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر صفات فیزیولوژیک و رشدی ذرت در شرایط تنش سطوح مختلف کادمیوم انجام شد.

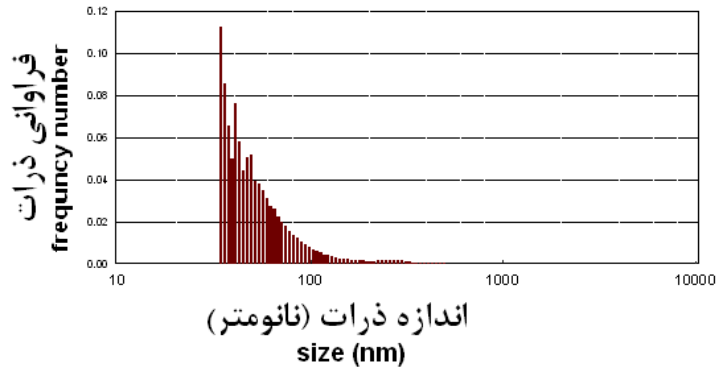
مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی

www.SID.ir

Archive of SID

مشهد در سال ۱۳۹۴ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح کادمیوم از منبع سولفات کادمیوم (صفر، ۵۰ (۱۲/۸ پی‌پی‌ام) و ۱۰۰ (۲۵/۶ پی‌پی‌ام) (۱) و سه سطح سیلیکات سدیم (عدم کاربرد سیلیکات سدیم (شاهد)، نانو سیلیکات سدیم و میکرو سیلیکات سدیم (از منبع سیگما آلدریچ با خلوص ۹۹/۹ درصد) با غلظت دو میلی‌مول در لیتر) (Malčovská, *et al.,* 2014) بود. فرآیند تولید نانو ذرات سیلیکات سدیم در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد (Saadatian and Kafi, 2015). تعیین اندازه ذرات نمونه اولیه و نانو با دستگاه تعیین‌کننده اندازه ذرات (Particle size analyzer) مدل واسکو-۳ (VASCO3) ساخت شرکت کوردان (Cor Douan) فرانسه (دقت اندازه‌گیری در بازه شش میکرون تا یک نانومتر) انجام شد. از آب به‌عنوان حلال قطبی در این فرآیند استفاده گردید. میانگین قطر ذرات نانو و میکرو استفاده شده در آزمایش به‌ترتیب ۶۸ نانومتر و ۲/۳۷۱ میکرومتر به‌دست آمد. در شکل ۱ نتایج حاصل از آنالیز نانو ذرات سیلیکات سدیم توسط دستگاه تعیین‌کننده اندازه ذرات ارائه شده است.



شکل ۱- نتایج آنالیز نانو ذرات سیلیکات سدیم توسط دستگاه تعیین‌کننده اندازه ذرات

Figure 1- Results of nano-sodium silicate analysis with particle size

از ظروف پلاستیکی با گنجایش ۱۰ لیتر برای هر تیمار استفاده شد. به هر ظرف ۸ لیتر محلول غذایی هوگلند (Hoagland and Arnon, 1950) حاوی هر یک از تیمارهای آزمایش اضافه شد. اسیدیته محلول غذایی با استفاده از ترکیبات هیدروکسید پتاسیم یک نرمال و اسید سولفوریک غلیظ بر روی ۵/۸ تنظیم گردید. برای تهیه محلول غذایی از آب مقطر استفاده شد. در طول آزمایش هوادهی محلول‌ها با پمپ آکواریم انجام گرفت. سیلیسیم و کادمیوم در تیمارهای مورد نظر به محلول غذایی هوگلند اضافه شد و از ابتدا تا انتهای آزمایش محلول ثابت بود و تعویض نگردید.

به‌منظور تهیه گیاهچه‌های مورد نیاز، ابتدا بذرهای ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ در داخل پارچه نخی به مدت ۲۴ ساعت و دمای ۲۴±۲ جهت آبنوشی قرار داده شدند. سپس بذرها به داخل سینی‌های کشت حاوی کوکوپیت انتقال یافتند (Wang *et al.,* 2007). در مرحله دو برگی، گیاهچه‌های همسان انتخاب شده و به محیط کشت هیدروپونیک منتقل گردیدند.

در مرحله چهار برگی، از بالا به پایین، دومین و سومین برگ توسعه یافته گیاه انتخاب و هدایت روزنه‌ای آنها توسط دستگاه پرومتر مدل SC-1 تعیین و میانگین آن منظور گردید. همچنین میانگین شاخص کلروفیل چهار برگ توسعه یافته ذرت توسط کلروفیل‌متر دستی (SPAD-502 Konica Minolta) ثبت شد. به‌منظور اندازه‌گیری کارایی کوانتومی فتوسیستم Π نیز، سومین برگ هر بوته توسط کلیپس به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفت. سپس توسط دستگاه فلوریمتر مدل هندی-پا (Handy PEA)، فلورسانس کلروفیل برگ در شرایط تطابق با تاریکی اندازه‌گیری شد و بر اساس معادله ۱، بیشترین کارایی کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم Π (MQPSΠ) به‌دست آمد (Maxwell and Johnson, 2000).

$$MQPS\Pi = \frac{Fv}{Fm} \qquad (۱)$$

در این معادله Fv: فلورسانس متغییر و Fm: حداکثر فلورسانس فتوسیستم Π در شرایط تطابق با تاریکی هستند.

جهت تعیین شاخص پایداری غشای سلولی (Membrane Stability Index) از هر بوته یک برگ جوان توسعه‌یافته جدا و به مدت ۲۴ ساعت در داخل ویال‌های حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. سپس هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) توسط دستگاه EC متر جنوی (JENWAY, Model 4510)، اندازه‌گیری شد. در ادامه ویال‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۳ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ بار اتوکلا شده و پس از سردشدن، هدایت الکتریکی ثانویه (EC_2) قرائت خواهد شد. در نهایت شاخص پایداری غشاء توسط معادله ۲

www.SID.ir

Archive of SID

به‌دست آمد (Sairam, 1994).

$$MSI = \left[1 - \left(EC1/EC2\right)\right] \times 100 \quad (۲)$$

محتوای رطوبت نسبی (RWC) چهارمین برگ توسعه یافته گیاه توسط معادله ۳ تعیین شد (Mohsenzadeh *et al.*, 2006).

$$RWC = \frac{Wf - Wd}{Wt - Wd} \times 100 \quad (۳)$$

در این معادله Wf: وزن تر اولیه برگ، Wd: وزن خشک برگ پس از ۴۸ ساعت قرار گرفتن در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد و Wt: وزن تر برگ در حالت تورژسانس پس از ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدن در آب مقطر است.

به‌منظور تعیین سطح ویژه برگ (SLA)، ابتدا سطح برگ نمونه‌ای که برای تعیین رطوبت نسبی تهیه شده با دستگاه سطح برگ‌سنج اندازه‌گیری شد. سپس وزن خشک برگ پس از خشک شدن به‌دست آمد. در انتها با استفاده از معادله ۴، سطح ویژه برگ تعیین شد.

$$SLA = \frac{L}{W} \quad (۴)$$

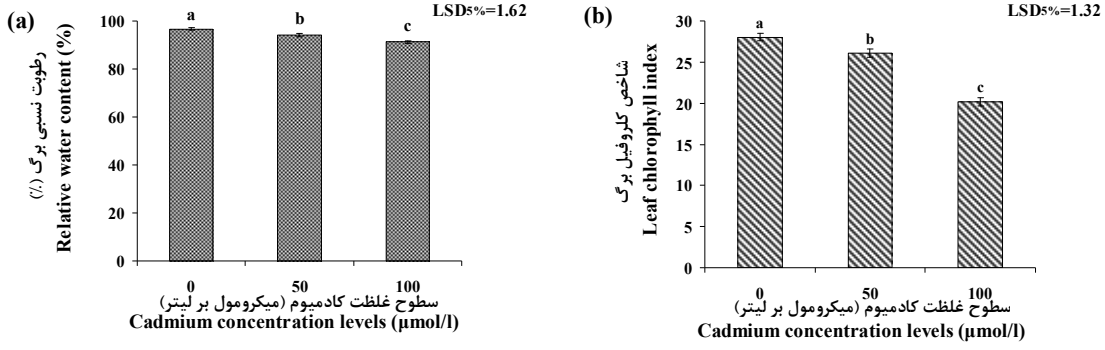
در این معادله SLA: سطح ویژه برگ، L: سطح برگ و W: وزن خشک برگ است.

چهار هفته پس از انتقال به محیط کشت هیدروپونیک ارتفاع بوته‌ها و قطر گره پایینی ساقه اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس گیاهچه‌ها از محلول غذایی خارج و به دو بخش هوایی و زیرزمینی تفکیک شدند و سطح برگ آنها توسط دستگاه سطح برگ‌سنج به تفکیک تعیین شد. در پایان اندام هوایی و ریشه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس با ترازوی یک صدم توزین شدند و از طریق تقسیم وزن خشک اندام هوایی به ریشه، شاخص نسبت اندام هوایی به ریشه در تمامی تیمارها محاسبه گردید. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS و آزمون LSD محافظت شده در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

پایداری غشای سلولی ذرت تحت تأثیر سطوح تنش کادمیوم و تیمارهای سیلیکات سدیم قرار گرفت. همچنین اثر متقابل آنها نیز بر صفت یاد شده معنی‌دار بود (جدول ۱). در شرایط عدم تنش، حضور سیلیکات سدیم پایداری غشای سلولی برگ ذرت را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و بیشترین پایداری غشای سلولی در تیمار میکروسیلیکات سدیم مشاهده شد (جدول ۲). در شرایط تنش کادمیوم نیز افزودن سیلیکات سدیم به محلول غذایی موجب افزایش معنی‌دار پایداری غشای سلولی شد. در تیمار ۵۰ میکرومول بر لیتر کادمیوم، تفاوت آماری بین اندازه ذره سیلیکات سدیم از نظر تأثیر بر پایداری غشای سلولی مشاهده نشد، اما در بالاترین سطح تنش، برتری با ذرات میکرو سیلیکات سدیم بود (جدول ۲).

فقط اثر اصلی سطوح کادمیوم بر درصد رطوبت نسبی برگ معنی‌دار بود (جدول ۱). بیشترین رطوبت نسبی برگ در تیمار شاهد (بدون کادمیوم) به‌دست آمد و با افزایش غلظت کادمیوم این صفت کاهش معنی‌داری نشان داد. به‌طوری‌که در غلظت ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، رطوبت نسبی برگ ذرت در مقایسه با شاهد ۵/۳ درصد کمتر بود (شکل۲، a).



شکل۲- اثر سطوح غلظت کادمیوم بر صفات رطوبت نسبی (a) و شاخص کلروفیل (b) برگ ذرت

Figure 2- Effect of cadmium concentration levels on relative water content (a) and leaf chlorophyll index of corn

www.SID.ir

جدول۱- تجزیه واریانس اثرات غلظت‌های سیلیکات سدیم و کادمیوم بر صفات رشدی و فیزیولوژیک ذرت

Table 1. Analyze of variance of sodium silicate and cadmium concentrations on growth and physiological trials of corn

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degree freedom (df)	میانگین مربعات Mean squares											
		شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index	درصد رطوبت نسبی برگ Leaf relative water content	سطح ویژه برگ Specific leaf area	هدایت روزنه ای برگ Leaf stomatal conductance	شاخص کلروفیل برگ Leaf chlorophyll index	Fv/Fm	ارتفاع height	قطر ساقه Stem diameter	سطح برگ Leaf area	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (S)	وزن خشک ریشه Root dry weight (R)	S/R
کادمیوم Cadmium (Cd)	2	81*	85.2**	0.239**	154.6**	200.4**	0.0165**	833.1**	0.305**	47120**	0.3392**	0.0345**	0.7917**
سیلیکات سدیم Sodium silicate (Si)	2	1599.8**	2.5ns	0.082*	300.6**	12.1*	0.0024*	135.5**	0.028**	10444**	0.0938**	0.0066**	0.4806**
Cd×Si	4	297.7**	5.3ns	0.101**	173.3**	0.8ns	0.0025**	40.8**	0.012**	4313**	0.0276**	0.0032**	0.2601**
خطا Error	27	8.2	3.7	0.016	11.0	2.5	0.0006	5.3	0.001	250	0.0006	0.0001	0.0002
ضریب تغییرات (٪) CV (%)	–	4.8	2.1	6.8	10.3	6.4	3.2	5.7	4.8	9.1	5.0	5.1	1.1

ns،*و** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.

ns, * and ** not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش کادمیوم و تیمارهای سیلیکات سدیم بر صفات صفات رشدی و فیزیولوژیک ذرت.

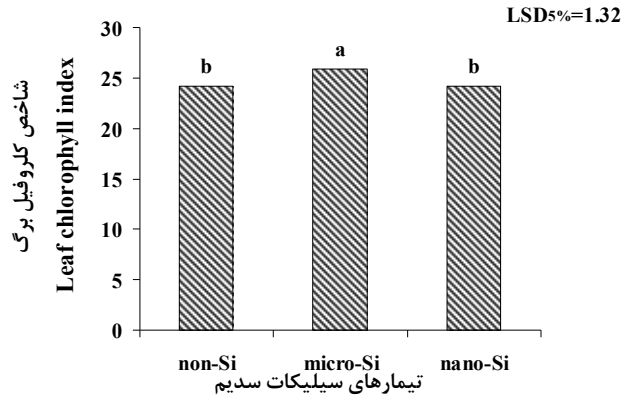
Table 2. Means comparison of interaction sodium silicate treatments and cadmium stress on growth and physiological trials of corn

تنش کادمیوم Cadmium stress ($\mu mol\ l^{-1}$)	سیلیکات سدیم Sodium silicate	صفات Trials									
		شاخص پایداری غشای سلولی Membrane stability index	سطح ویژه برگ Specific leaf area ($cm^2\ g^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای برگ Stomatal conductance ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	Fv/Fm	ارتفاع Height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (cm)	سطح برگ Leaf area (cm^2 per plant)	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (S) (g)	وزن خشک ریشه Root dry weight (R) (g)	S/R
0	Zero	42.8	1.91	35.1	0.785	49.0	0.833	260.1	0.638	0.243	2.632
0	Micro	81.5	2.12	32.2	0.781	56.4	0.940	282.8	0.811	0.334	2.427
0	Nano	62.6	2.03	28.9	0.780	42.7	0.758	171.0	0.490	0.268	1.832
50	Zero	55.1	1.53	27.2	0.734	38.7	0.663	144.6	0.385	0.210	1.831
50	Micro	60.2	1.96	40.7	0.736	42.1	0.758	207.0	0.587	0.267	2.199
50	Nano	64.3	1.83	39.6	0.749	39.4	0.733	161.3	0.435	0.224	1.942
100	Zero	44.1	1.85	19.6	0.753	31.2	0.473	97.9	0.287	0.173	1.660
100	Micro	68.9	1.65	39.0	0.668	35.0	0.553	128.3	0.331	0.164	2.023
100	Nano	58.4	1.83	27.4	0.703	32.0	0.555	111.9	0.312	0.186	1.677
LSD5%		4.2	0.18	4.8	0.035	3.3	0.048	22.9	0.035	0.017	0.023

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- اثر تیمارهای سیلیکات سدیم بر شاخص کلروفیل برگ ذرت

Figure 3- Effect of sodium silicate treatments on leaf chlorophyll index of corn

نتایج حاکی از معنی‌داری اثرات اصلی و متقابل کادمیوم و تیمارهای سیلیکات سدیم بر سطح ویژه برگ ذرت بود (جدول ۱). در شرایط عدم تنش، حضور سیلیکات سدیم سطح ویژه برگ را افزایش داد، اما بین دو اندازه ذره سیلیکات سدیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). تنش کادمیوم سطح ویژه برگ را در هر سه تیمار سیلیکات سدیم به‌طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۲). در شرایط تنش، حضور سیلیکات سدیم سبب افزایش سطح ویژه برگ ذرت شد. اما در هر یک از سطوح تنش سطح ویژه برگ تیمارهای نانو و میکرو سیلیسیم تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نشان نداد (جدول ۲).

هدایت روزنه‌ای برگ ذرت تحت تأثیر اثرات اصلی کادمیوم و سیلیکات سدیم قرار گرفت. همچنین اثر متقابل آنها نیز بر صفت یاد شده معنی‌دار بود (جدول ۱). در شرایط نرمال، کاربرد نانو ذرات سیلیکات سدیم هدایت روزنه‌ای برگ ذرت را در مقایسه با شاهد (عدم حضور سیلسیم) به‌طور معنی‌داری کاهش داد، در حالی‌که حضور ذرات میکرو تأثیر معنی‌داری بر صفت یاد شده نداشت. برخلاف شرایط نرمال، تحت تنش کادمیوم کاربرد نانو ذرات هدایت روزنه‌ای برگ ذرت را نسبت به تیمار عدم مصرف سیلیکات سدیم افزایش داد. در سطح ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم تفاوتی از نظر هدایت روزنه‌ای برگ بین دو اندازه ذره سیلیکات سدیم مشاهده نشد. اما در بالاترین غلظت کادمیوم بیشترین هدایت روزنه‌ای برگ در تیمار میکرو سیلیکات سدیم مشاهده شد (جدول ۲).

علی‌رغم معنی‌داری اثرات اصلی کادمیوم و سیلیکات سدیم در صفت شاخص کلروفیل برگ، اثرات متقابل آنها معنی‌دار نبود (جدول ۱). تنش کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل برگ ذرت شد به‌طوری که مقدار صفت یاد شده در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم نسبت به شاهد به‌ترتیب ۷ و ۲۱ درصد کاهش نشان داد (شکل۲، b). شاخص کلروفیل برگ ذرت تحت تأثیر تیمار ذرات میکرو سیلیکات سدیم در مقایسه با شاهد و تیمار نانو افزایش معنی‌داری نشان داد. اما بین تیمار نانو و شاهد اختلاف آماری از این نظر مشاهده نشد (شکل ۳).

بیشترین کارایی کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم Π (Fv/Fm) تحت تأثیر اثر سطوح کادمیوم و تیمارهای سیلیکات سدیم قرار گرفت. همچنین اثر متقابل آنها نیز معنی‌دار شد (جدول ۱). با افزایش غلظت کادمیوم در محیط ریشه، در هر یک از تیمارهای سیلیکات سدیم Fv/Fm کاهش یافت. اگرچه در شرایط نرمال مصرف هر دو اندازه ذره سیلیکات سدیم تأثیر معنی‌داری بر Fv/Fm نداشت، اما تحت تنش ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، تیمار با نانو ذرات سیلیکات سدیم سبب افزایش معنی‌دار Fv/Fm نسبت به شاهد (عدم مصرف سیلیسیم) و سیلیکات سدیم میکرو گردید. در بالاترین سطح تنش کادمیوم، Fv/Fm در هر دو تیمار مصرف سیلیکات سدیم نسبت به شاهد کمتر بود و در این بین کمترین مقدار در تیمار سیلیکات سدیم میکرو به‌دست آمد (جدول ۲).

ارتفاع بوته‌های ذرت تحت تأثیر اثرات اصلی و متقابل کادمیوم و سیلیکات سدیم قرار گرفت (جدول ۱). هرچند با افزایش غلظت کادمیوم از ارتفاع ذرت به‌طور معنی‌داری کاسته شد، اما کاربرد سیلیکات سدیم میکرو تأثیر مثبت و معنی‌داری بر این صفت داشت. به‌طوری که در هر یک از سطوح صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، ارتفاع ذرت در تیمار سیلیکات سدیم میکرو در مقایسه با شاهد (عدم مصرف سیلیسیم) به‌ترتیب ۱۳/۱، ۸/۸ و ۱۲/۲ درصد بالاتر بود (جدول ۲). اما تیمار نانو ذرات در غالب موارد نسبت به شاهد تغییر معنی‌داری در ارتفاع بوته ذرت ایجاد نکرد (جدول ۲).

علاوه بر اثرات اصلی، اثرات متقابل تیمارهای کادمیوم و سیلیکات سدیم بر قطر گره پایینی ساقه ذرت معنی‌دار بود (جدول ۱). در شرایط عدم حضور کادمیوم، کاربرد ذرات میکرو سیلیکات سدیم

www.SID.ir

Archive of SID

قطر گره پایینی ساقه ذرت را نسبت به عدم مصرف سیلیسیم ۱۲/۸ درصد افزایش داد. در مقابل مصرف نانو ذرات در شرایط یاد شده تأثیر منفی و معنی‌داری بر صفت قطر گره پایینی ساقه داشت (جدول ۲). اگرچه تنش کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار قطر ساقه ذرت شد، اما در هر دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، هر دو اندازه ذره سیلیکات سدیم تأثیر مثبت و معنی‌داری بر قطر ساقه داشتند و تفاوتی از این نظر بین آنها مشاهده نشد (جدول ۲).

اثر اصلی کادمیوم و سیلیکات سدیم و اثرات متقابل آنها بر سطح برگ ذرت معنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش تنش کادمیوم از سطح برگ ذرت به‌طور معنی‌داری کاسته شد. در شرایط نرمال، کاربرد نانو ذرات سیلیکات سدیم موجب کاهش معنی‌دار سطح برگ نسبت به شاهد شد. اما در هر یک از سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم تفاوتی بین مصرف نانو ذرات و شاهد از نظر سطح برگ وجود نداشت (جدول ۲). اگرچه مصرف ذرات میکرو سیلیکات سدیم در سطح صفر کادمیوم تأثیری بر سطح برگ ذرت نداشت، اما در هر یک از سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم نسبت به شرایط عدم مصرف سیلیکات سدیم به‌ترتیب ۴۳/۱ و ۲۳/۷ درصد سطح برگ ذرت را افزایش داد (جدول ۲). در بالاترین سطح تنش، تفاوت معنی‌داری بین سطح برگ گیاهان در تیمارهای نانو و میکروسیلیکات سدیم مشاهده نشد (جدول ۲).

تجزیه واریانس حاکی از تأثیر معنی‌دار تیمارهای سیلیکات سدیم و سطوح تنش کادمیوم و اثرات متقابل آنها بر صفات وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت آنها بود (جدول ۱). وزن خشک اندام هوایی ذرت به شدت تحت تأثیر تنش کادمیوم قرار گرفت به‌طوری‌که در تیمار ۱۰۰ میکرومول در لیتر، صفت یاد شده در تیمارهای عدم مصرف سیلیسیم، سیلیکات سدیم میکرو و نانو نسبت به شرایط نرمال به‌ترتیب ۵۵، ۵۹ و ۳۶ درصد کاهش نشان داد (جدول ۲). در هر یک از سطوح تنش کادمیوم، بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در تیمار سیلیکات سدیم میکرو به‌دست آمد (جدول ۲). در سطح ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، کاربرد نانو ذرات سیلیکات سدیم نسبت به عدم مصرف، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی ذرت داشت. اما در بالاترین سطح تنش اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار یاد شده مشاهده نشد (جدول ۲). در تنش ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم تفاوت آماری بین دو تیمار اندازه ذره سیلیکات سدیم وجود نداشت (جدول ۲). مشابه نتایج به‌دست آمده از وزن خشک اندام هوایی، مصرف ذرات میکرو سیلیکات سدیم در شرایط نرمال و تنش ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم بیشترین تأثیر مثبت را بر وزن خشک ریشه ذرت داشت (جدول ۲). اما در بالاترین سطح تنش، بین تیمارهای عدم مصرف سیلیکات سدیم و ذرات میکرو تفاوت آماری مشاهده نشد (جدول ۲). اگرچه در شرایط حضور کادمیوم مصرف نانو ذرات سیلیکات سدیم در مقایسه با تیمار شاهد (عدم مصرف سیلیسیم) تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک ریشه به دنبال نداشت، اما در بالاترین سطح تنش، تیمار نانو وزن خشک ریشه ذرت را در مقایسه با ذرات میکرو ۱۳/۴ درصد افزایش داد و این اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۲).

بالاترین نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه (S/R) در تیمار عدم مصرف سیلسیم و در شرایط نرمال به‌دست آمد. در شرایط نرمال (عدم تنش)، مصرف سیلیکات سدیم نانو و میکرو سبب کاهش معنی‌دار S/R شد. به عبارت دیگر حضور سیلیسیم سبب افزایش تخصیص مواد به ریشه در مقایسه با شرایط عدم مصرف آن بود. و در این بین، نانو ذرات بیشترین تأثیر را بر این نسبت داشت (جدول ۲). تنش کادمیوم سبب کاهش نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه در تمامی تیمارهای سیلیسیم شد (جدول ۲). برخلاف شرایط نرمال، در شرایط تنش کاربرد ذرات میکرو سیلیکات سدیم S/R را در مقایسه با عدم کاربرد به‌طور معنی‌داری افزایش داد و بیشترین نسبت در هر دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومول در لیتر کادمیوم متعلق به تیمار میکرو سیلیکات سدیم بود (جدول ۲). کاربرد نانو ذرات نیز در حضور کادمیوم نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه را افزایش داد. اما این تأثیر تنها در تیمار ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم معنی‌دار بود (جدول ۲).

یافته‌های آزمایش نشان داد که با افزایش تنش کادمیوم تا ۱۰۰ میکرومول در لیتر شاخص پایداری غشای سلولی، شاخص کلروفیل، نسبت Fv/Fm، رطوبت نسبی برگ، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد (سطح صفر) به‌ترتیب ۸، ۲۴، ۹، ۵، ۱۲، ۱۰، ۳۳، ۳۷، ۵۲، ۳۸ و ۲۲ درصد کاهش یافت. در رابطه با توجیه دلایل این نتایج، محققان بیان داشتند که کادمیوم با تأثیر بر ساختارهای کلروفیلی از طریق کاهش دسترسی به عناصر ضروری و تخریب دیواره سلولی در اثر پراکسیداسیون لیپیدها موجب سست شدن غشاهای سلولی از جمله غشاهای تیلاکوئیدی و به دنبال آن چرخه هیل در برگ ذرت می‌شود (Dabin *et al.*, 1978; Vaculik *et al.*, 2009) که به نوبه خود کاهش کلروفیل برگ و نسبت Fv/Fm را درپی دارد. همچنین عنوان شده، یکی از دلایل اصلی کاهش رطوبت نسبی برگ در اثر تنش کادمیوم، کاهش اندازه و تعداد آوندهای چوبی است (Balestrasse *et al.*, 2001). کاهش رطوبت نسبی برگ در اثر اختلال در روابط آبی، هدایت روزنه‌ای برگ را نیز تحت تأثیر قرار داده و برای جلوگیری از هدر روی آب در شرایط تنش کادمیوم هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد (Joner and Leyval, 2001; Amooaghaie *et al.*, 2012). در ارتباط با اثر منفی کادمیوم بر صفات ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، یافته‌ها نشان داده که کادمیوم با ایجاد اختلال در متابولیسم نیتروژن از طریق مهار فعالیت برخی آنزیم‌ها نظیر گلوتامین سینتتاز،

www.SID.ir

Archive of SID

گلوتامات سینتتاز و نیترات ردوکتاز و همچنین فرآیند احیاء نیترات سبب کاهش تولید پروتئین می‌شود (Zhang *et al.,* 2002) و تمایل بالایی به تجمع در اجزای پروتئینی گیاه دارد (Dabin *et al.,* 1978). از این رو به‌نظر می‌رسد که در این آزمایش نیز اختلال در مسیرهای پروتئین‌سازی از دلایل عمده کاهش رشد گیاهچه‌های ذرت باشد. از آنجا که فعالیت‌های فتوسنتزی وابسته به پروتئین‌هاست، لذا کادمیوم از طریق مهار فعالیت‌های آنزیمی چرخه کالوین از جمله رابیسکو (Sanita ta di toppi and Gabbriella, 1999; Wang *et al.,* 2008) و فعال نمودن آنزیم‌های تخریب‌کننده کلروفیل و آسیب رساندن به غشا تیلاکوئیدی کلروپلاست از طریق پراکسیداسیون اسیدهای چرب و زوال غشاهای سلولی (Sanita ta di toppi and Gabbriella, 1999; Joner and Leyval, 2001; Vasssilve *et al.,* 2002)، ظرفیت فتوسنتزی و به دنبال آن رشد را به‌شدت کاهش داده است که در صفات ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه نمود می‌یابد (Liang *et al.,* 2005; Shekari *et al.,* 2014; Wang *et al.,* 2008). از طرفی، در این آزمایش، کاهش ۲۴ درصدی شاخص کلروفیل برگ در بالاترین سطح تنش کادمیوم نشانه بارزی از کاهش توان فتوسنتزی و رشد ذرت است. همچنین کاهش رطوبت نسبی برگ اگرچه در مقایسه با سایر صفات اندک بوده اما همان مقدار نیز با تأثیر منفی بر رشد و تقسیم سلولی، از توسعه اندام هوایی و ریشه گیاهچه‌های ذرت جلوگیری کرده است.

یافته‌های آزمایش نشان‌دهنده تأثیر مثبت سیلیکات سدیم در شرایط تنش کادمیوم بر صفات پایداری غشای سلولی، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، ارتفاع، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت اندام هوایی به ریشه بود. مصرف ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم در هر دو شرایط تنش و عدم تنش، پایداری غشای سلولی برگ ذرت را افزایش داد. یافته‌های سایر محققین نیز نشان‌دهنده تأثیر مثبت ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم به‌ترتیب در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/۶ میلی‌مولار بر پایداری غشای سلولی سیب‌زمینی بود (Saadatian and Kafi, 2015). به اعتقاد محققان سیلیسیم از دو طریق ساختاری و متابولیکی موجب تغییر در غشای سلولی می‌شود. این عنصر با رسوب در دیواره‌های سلولی استحکام غشاهای زیستی را افزایش می‌دهد (Yanar *et al.,* 2011). از سویی دیگر سیلیسیم از طریق تحریک تولید آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی و آنزیمی مانند سوپراکسید دسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز، گلوتاتیون ریداکتاز و گلوتاتیون در برگ و ریشه گیاه (Liang *et al.,* 1996; Al-Aghabary *et al.,* 2004; Zhu *et al.,* 2004) و کاهش سطح مالون‌دی آلدئید در شرایط تنش، موجب تحریک فعالیت‌های دو پمپ H^+-ATPase و H^+-PPase در غشاهای پلاسمایی و تونوپلاست و در ادامه سیالیت غشاء می‌گردد (Liang *et al.,* 1996) و به دنبال آن با تأثیر بر ساختار و شکل غشاهای پلاسمایی موجب بهبود اثرات پراکسیداسیونی ناشی از تنش می‌شود (Al-Aghabary *et al.,* 2004; Zhu *et al.,* 2004; Liang *et al.,* 2005). به‌نظر می‌رسد که مجموعه عوامل بیان‌شده در تأثیر مثبت سیلیکات سدیم بر شاخص پایداری غشای سلولی ذرت در این آزمایش نقش داشته است.

نتایج آزمایش حاکی از نقش مثبت ذرات میکرو سیلیکات سدیم در افزایش شاخص کلروفیل برگ بود. یافته‌های Saadatian and Kafi (2015) نیز نشان‌دهنده تأثیر مثبت غلظت ۰/۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم بر شاخص کلروفیل برگ سیب‌زمینی بود. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین پایداری غشای سلولی و شاخص کلروفیل برگ وجود داشت (جدول ۳). با توجه به مطالب بیان شده به‌نظر می‌رسد که پایداری غشای سلولی در اثر مصرف سیلیکات سدیم موجب ثبات غشای کلروپلاست‌ها شده و در نتیجه آن، شاخص کلروفیل برگ بهبود یافته است. به اعتقاد Liang *et al,* (1996) نیز سیلیسیم نفوذپذیری غشاء پلاسمایی سلول‌ها را کاهش داده و باعث بهبود معنی‌دار ساختارهای کلروپلاستی می‌گردد.

در این آزمایش اثر سیلیکات سدیم بر سطح ویژه برگ مثبت بود و جذب این عنصر توسط ذرت موجب گسترش بیشتر اندام هوایی و در نتیجه کاهش ضخامت برگ شد. باتوجه به ضروری بودن سیلیسیم در ذرت، به‌نظر می‌رسد که کاربرد این عنصر سبب تغییرات ساختاری و استحکام اپیدرم برگ شده است (Wang *et al.,* 2008). همچنین حضور سیلیسیم در بافت گیاهی موجب افزایش غلظت آنزیم ریبولوزبی فسفات کربوکسیلاز در برگ می‌شود (Adtina and Beasford, 1986). این آنزیم سوخت و ساز دی‌اکسید کربن را تنظیم کرده و در نتیجه کارایی تثبیت دی‌اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش داده و در نهایت به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌انجامد (Saadatian and Kafi, 2015; Adtina and Beasford, 1986) از این رو احتمالاً در نتیجه افزایش کارایی فتوسنتزی، از ضخامت لایه سلول‌های پارانشیم نردبانی برگ کاسته شده و در نتیجه ضخامت برگ کاهش یافته است. با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار Fv/Fm با هدایت روزنه‌ای برگ (جدول ۳)، احتمالاً تأثیر مثبت سیلیسیم بر ساختارهای فتوسنتزی در شرایط تنش کادمیوم یکی از عوامل مؤثر در افزایش هدایت روزنه‌ای برگ بوده است.

هر یک از پارامترهای Fv/Fm (بیشترین کارایی کوانتومی فتوشیمیایی فتوسیستم II)، درصد رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه داشتند (جدول ۳). این نتایج نشان‌دهنده نقش مؤثر عوامل درونی و فیزیولوژیک بر رشد و نمو گیاهی است. همچنین با توجه به تأثیر مثبت سیلیکات سدیم بر پارامترهای Fv/Fm (بیشترین کارایی کوانتومی فتوشیمیایی

www.SID.ir

Archive of SID

فتوسیستم Π)، درصد رطوبت نسبی برگ و شاخص کلروفیل برگ می‌توان این‌گونه استنباط نمود که بهبود شرایط فیزیولوژیک گیاه تحت تنش کادمیوم در اثر مصرف سیلیکات سدیم، تأثیر مثبتی بر صفات سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت اندام هوایی به ریشه در پی خواهد داشت. از این رو توجه به عوامل درون‌سلولی و ساختاری گیاه، بینش بهتری برای درک عوامل تأثیرگذار بر رشد گیاه در دسترس قرار خواهد داد. هر دو اندازه سیلیکات سدیم در شرایط تنش سبب افزایش نسبت اندام هوایی به ریشه شدند. از آنجا که ریشه اولین اندامی است که تنش کادمیوم را دریافت کرده و به‌طور مستقیم با آن در تماس است، لذا افزایش نسبت آن احتمالاً به دلیل گسترش بیشتر ریشه برای افزایش جذب و همچنین افزایش ضخامت برای کاهش تماس مستقیم کادمیوم با ساختار ریشه باشد.

در شرایط عدم تنش، نانو ذرات سیلیکات سدیم در غالب صفات از جمله ارتفاع، قطر گره پایینی ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد (عدم مصرف سیلیکات سدیم) و ذرات میکرو سیلیکات سدیم تأثیر منفی بر جای گذاشت. یافته‌ها نشان داده که به دلیل اندازه و سطح ویژه نانو ذرات سیلیکات سدیم، این ذرات در غلظت‌های مشابه ذرات میکرو دارای اثرات بیشتری هستند (Saadatian and Kafi, 2015). از این رو با توجه به آنکه در این آزمایش از غلظت دو میلی‌مولار برای هر دو اندازه ذره سیلیکات سدیم استفاده شده، لذا به‌نظر می‌رسد که در شرایط عدم تنش غلظت نانو ذرات بیش از مقدار بهینه بوده است. اما در شرایط تنش ۵۰ میلی‌مولار کادمیوم تأثیر نانو ذرات همانند ذرات میکرو بر صفات شاخص پایداری غشای سلولی، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، قطر ساقه، وزن خشک اندام هوایی و نسبت اندام هوایی به ریشه مثبت بود.

جدول ۳- همبستگی بین صفات ذرت

Table 3- Correlation between corn traits

صفات Trials	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
شاخص پایداری غشای سلولی 1. Membrane stability index	1										
درصد رطوبت نسبی برگ 2. Leaf relative water content	0.06^{ns}	1									
سطح ویژه برگ 3. Specific leaf area	0.26^{ns}	0.30^{ns}	1								
هدایت روزنه‌ای برگ 4. Stomatal conductance	0.36^{*}	0.15^{ns}	0.01^{ns}	1							
شاخص کلروفیل برگ 5. Leaf chlorophyll index	0.35^{*}	0.54^{**}	0.40^{*}	0.38^{*}	1						
6. Fv/Fm	-0.012^{ns}	0.59^{**}	0.47^{**}	-0.09^{ns}	0.53^{**}	1					
ارتفاع 7. Height	0.39^{*}	0.62^{**}	0.50^{**}	0.32^{ns}	0.79^{**}	0.60^{**}	1				
قطر ساقه 8. Stem diameter	0.41^{*}	0.62^{**}	0.54^{**}	0.40^{*}	0.91^{**}	0.57^{**}	0.91^{**}	1			
سطح برگ 9. Leaf area	0.29^{ns}	0.53^{**}	0.50^{**}	0.36^{*}	0.80^{**}	0.53^{**}	0.93^{**}	0.90^{**}	1		
وزن خشک اندام هوایی 10. Shoot dry weight	0.40^{*}	0.52^{**}	0.57^{**}	0.34^{*}	0.81^{**}	0.55^{**}	0.94^{**}	0.93^{**}	0.95^{**}	1	
وزن خشک ریشه 11. Root dry weight	0.49^{**}	0.50^{**}	0.60^{**}	0.23^{ns}	0.82^{**}	0.59^{**}	0.86^{**}	0.90^{**}	0.83^{**}	0.93^{**}	1

ns،*و** به‌ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد.

ns, * and ** not significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

در بالاترین سطح غلظت کادمیوم، ذرات نانو و میکروسیلیکات سدیم در صفاتی همچون ارتفاع، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شرایط عدم مصرف آنها تأثیر معنی‌داری ایجاد نکردند. این یافته نشان‌دهنده شدت تنش اعمال شده

www.SID.ir

Archive of SID

کادمیوم بر ذرت بوده است به‌طوری‌که از کارایی سیلیسیم کاسته و حضور آن را بی اثر کرده است. از این نتایج می‌توان اینگونه استنباط نمود که در صورت ادامه آلودگی‌های زیستی ناشی از کادمیوم، امکان کنترل اثرات منفی آن در محیط رشد کاهش یافته و حتی حضور سیلیسیم به‌عنوان دومین عنصر فراوان در پوسته زمین (Epstein, 1999) نیز نمی‌تواند به‌صورت طبیعی و حتی مصنوعی (نانو ذرات سنتزی) از شدت تنش کادمیوم بکاهد.

نتیجه‌گیری

با افزایش غلظت کادمیوم شاخص پایداری غشای سلولی، شاخص کلروفیل، نسبت Fv/Fm، رطوبت نسبی برگ، سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کاربرد نانو ذرات سیلیکات سدیم در شرایط عدم تنش فقط بر صفات شاخص پایداری غشای سلولی و وزن خشک ریشه تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت. اما در غلظت ۵۰ میکرومول در لیتر کادمیوم، مصرف نانو ذرات علاوه بر شاخص پایداری غشای سلولی، در صفات سطح ویژه برگ، هدایت روزنه‌ای، قطر ساقه و وزن خشک اندام هوایی نیز موجب افزایش معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد سیلیکات سدیم شد. در بالاترین سطح تنش کادمیوم، اثر ذرات میکرو بر صفات پایداری غشای سلولی، هدایت روزنه‌ای و نسبت اندام هوایی به ریشه بیشتر از نانو ذرات بود، اما مصرف نانو ذرات نیز در کاهش تنش کادمیوم در صفات یاد شده تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده به‌نظر می‌رسد که کاربرد سیلیکات سدیم در تخفیف اثرات تنش کادمیوم بر صفات مورد بررسی در ذرت مؤثر بوده است. همچنین نانو ذرات به دلیل فعالیت بالا، سطح بیشتر، قابلیت انتقال سریع در اندام گیاهی و نفوذ در بسیاری از ساختارهای سلولی در مقایسه با غلظت مشابه ذرات میکرو اثرات فیتوتوکسینی بر گیاه ذرت داشته و رفتارهای نامتعارفی در اثر خصوصیات منحصر به فرد آن بروز نموده است. باتوجه به نتایج به‌دست آمده توصیه می‌شود که در مطالعات آتی از سطوح غلظت‌های پایین‌تر نانو ذرات سیلیکات سدیم استفاده شود. همچنین سایر ترکیبات سیلیکاته نیز در شرایط تنش کادمیوم مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری

از حوزه معاونت پژوهشی دانشکده کشاورزی و حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد جهت تأمین اعتبار این تحقیق با کد ۲/۳۸۲۲۳ قدردانی می‌شود.

References

1. Astolfi, S., Zuchi, S., and Passera, C. 2005. Effect of cadmium on H^+ATPase activity of plasma membrane vesicles isolated from roots of different S-supplied maize (*Zea mays* L.) plants. Plant Science 169: 361-368.
2. 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.
3. Al-Aghabary, K., Zhu, Z., and Shi, Q. H. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. Journal of Plant Nutrient 27: 2101-2115.
4. Amooaghaie, R., Marefat, E., and Shabani, L. 2012. Interaction of salicylic acid and cadmium on growth, photosynthetic pigments and ion distribution in Arial parts of soybean plantlets. Journal of Plant Biology 14: 75-88. (in Persian with English abstract).
5. Balestrasse, K. B., Gardey, L., Gallego, S. M., and Tomaro, M. L. 2001. Response of antioxidant defence system in soybean nodules and roots subjected to cadmium stress. Australian Journal of Plant Physiology 28: 497-504.
6. Dabin, P., Marafanet, E., Miusny, J. M., and Myttenuere, C. 1978. Adsorption, Distribution and Binding of Cadmium and Zinc in irrigated rice plant. Plant and Soil 50: 32-36.
7. Epstein, E. 1999. Silicon, Annual Review. Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50: 641-664.
8. Haghighi, M., and Pessarakli, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulture 161: 111-117.
9. Hoagland, D. R., and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station Circular 347: 1-32.
10. Joner, E. J., and Leyval, C. 2001. Time course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. Biology and Fertilizer and Soils 33: 351-357.
11. 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.
12. Liang, Y. C., Wong, J. W. C., and Wei, L. 2005. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere 58 (4): 475-483.
13. Liu, C. P., Li, F. B., Lou, C. L., Liu, X. M., Wang, S. H., Liu, T. X., and Li, X. D. 2009. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains. Journal of Hazardous Materials 161(2-3): 1466-1472.
14. Lu, C. M., Zhang, C. Y, Wen, J. Q. Wu, G. R., and Tao, M. X. 2002. Research of the effect of nanometer materials

www.SID.ir

Archive of SID

on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. Soybean Science 21: 168-172 (in Chinese with English abstract).

15. Malčovská, M. S., Dučaiová, Z., Maslaňáková, I., and Bačkor, M. 2014. Effect of Silicon on Growth, Photosynthesis, Oxidative Status and Phenolic Compounds of Maize (*Zea mays* L.) Grown in Cadmium Excess. Water Air Soil Pollut. 225: 2056.
16. Maxwell, K., and Johnson, G. N. 2000. Chlorophyll fluorescence- a practical guide. Experimental of Botany 51: 659-668.
17. Mohsenzadeh, S., Malboobi, M. A., Razavi, K., and Farrahi-Aschtiani, S. 2006. Physiological and molecular responses of Aeluropuslagopoides (Poaceae) to water deficit. Environmental and Experimental Botany 56: 314-322.
18. Rasouli sedghiani, M., Ghara malki, T., Besharati, H., and Karimi, A. 2013. The effect of beneficial soil microorganisms on growth and Cd uptake by maize. Iranian journal of soil research 27 (2): 205-215. (in Persian with English abstract).
19. Ruffini, C. M., and Cremonini, R. 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia 62 (2): 161-165.
20. 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).
21. 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.
22. Sanita ta di toppi, L., and Gabbriella, R. 1999. Response to Cd in higher plant- Review. Environmental and Experimental Botany 45: 105-130.
23. Shekari; L., Kamelmanesh, M. M., and Sadeghi, F. 2014. Effects of Irrigation Water Cadmium Concentration on Yield and Growth Traits of Green Pepper (*Capsicum frutescens*). Iranian journal of soil research 28: 636-646. (in Persian with English abstract).
24. Vaculik, M., Luxa, A., Luxova, M., Tanimoto, E., and Lichtscheid, I. 2009. Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants. Environmental and Experimental Botany 67: 52-58.
25. Vasssilve, A., Liadon, C. F., Matos, M. D. C., Ramalho, J. C., and Yordanov, I. 2002. Photosynthetic performance and content of some nutrients in cadmium -and copper- treated barley plants. Journal of Plant Nutrition 25: 2343-2360.
26. Wang, M., Zou, J., Duan, X., Jiang, W., and Liu, D. 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). Bioresource Technology 98: 82-88.
27. Wang, L., Zhou, Q., Ding, L., and Sun, Y. 2008. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum Nigarum* L. Journal of Hazard Material 154: 818-425.
28. Yanar, Y., Yanar, D., and Gebologlu, N. 2011. Control of powdery mildew (*Leveillula taurica*) on tomato by foliar sprays of liquid potassium silicate (K_2SiO_3). African Journal of Biotechnology 10: 3121-3123.
29. Zhang, G., Fukami, M., and Sekimoto, H. 2002. Influence of cadmium on mineral concentration and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. Field Crops Research 77: 93-98.
30. Zhu, Z. J., Wei, G. Q., Li, J., Qian, Q. Q., and Yu, J. Q. 2004. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). Plant Science 167: 527-533.

www.SID.ir

Archive of SID

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 15, No. 2, Summer. 2017, p. 425-437

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۵، شماره ۲ ، تابستان ۱۳۹۶، ص. ۴۳۷-۴۲۵

Comparison of Effect of Sodium Silicate Particle Size in Nutritional Solution on Physiological Growth Trials of Maize Seedlings under Cadmium Stress

B. Saadatian[1]- M. Kafi[2*]

Received: 23-12-2015
Accepted: 29-05-2016

Introduction: Although silicon (Si) is the second most abundant element in the earth's crust and its content in plants often reaches values of macronutrients, it is not listed among plant essential elements. However, the beneficial effects of Si in alleviation of various kinds of biotic stresses are well known. Concerning biotic stress, Si enhances, for instance, the resistance of plants to the pathogenic fungi, and it protects plants against and various kinds of insects. Silicon can also mitigate abiotic stresses in plants. Silicon can also reduce the negative effects of some toxic metals in plant species. Cadmium (Cd) is one of the most dangerous toxic metals for living organisms. It is a hazardous contaminant of food and through the food chains enters the human body as a cumulative poison. Contamination of agricultural soils by Cd represents a serious. Environmental problem in many countries and ranks high in food safety issues. Silicon was recently described as an effective substance for alleviation of Cd toxicity in some plants. The use of nano-compound material has given a lot of attention by the agricultural researchers, especially by those investigating seed characteristics, although their exact mechanisms of actions are not well understood. Nanomaterials, because of their tiny size, show unique characteristics. For example, they can change physico-chemical properties compared to bulk materials. They have greater surface area than bulk materials, and due to this larger surface area, their solubility and surface reactivity tend to be higher.

Materials and Methods: This experiment was conducted in an environmentally controlled Research greenhouse in Department of Agronomy, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. Corn (SC 704) seeds were germinated in a soil less growing system in cocopite. When the seedlings were at the two leaves stage of growth, they were transplanted hydroponic culture. Experiment was carried out as a factorial based using completely randomized design with four replications the. Treatments were included cadmium ($CdSO_4$) stress levels (Zero, 50 and 100 µmol l^{-1}) and sodium silicate treatments (control (Zero), Nano and micro particles with 2 mM concentration).

Results and Discussion: The results showed that the effects of sodium silicate, cadmium and their interactions on membrane stability index, specific leaf area, stomatal conductance, Fv/Fm, height, stem diameter, leaf area, shoot dry weight, root dry weight and shoot to root weight ratio was significant. But interaction between cadmium and sodium silicate on relative water content and leaf chlorophyll index was not significant. By increasing of Cd concentration, membrane stability index, chlorophyll index, Fv/Fm, relative water content, specific leaf area, stomatal conductance, height, stem diameter, leaf area, shoot dry weight and root dry weight trials reduced compared to control significantly. In no cadmium condition, sodium silicate nano-particles application reduced height, stem diameter, leaf area and shoot dry weight 12.8, 9, 34.2 and 23.2% compared to control, respectively. In contrast, using of micro particles in non-stress condition, had a positive effect on above mentioned traits. But in 50 µmol l^{-1} Cd, nano-particles increased membrane stability index, specific leaf area, stomatal conductance, stem diameter and shoot dry weight trials, significantly. At highest concentration of cadmium, effect of micro particles on membrane stability index, stomatal conductance and shoot to root was higher than nano-particles. Also, using of nano particles had a positive effect on above mentioned traits in Cd stress condition. In general, application of nano particles in non-cadmium stress conditions had phytotoxicity effects on corn and only in cadmium stress condition, the effect of these particles showed their positive effect.

1- Ph.D Student of Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2- Professor Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: m.kafi@um.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID

Conclusions: In general, silicon nanoparticles were only beneficial effect of cadmium stress. Hence, the use of sodium silicate nanoparticles of was possible only in conditions of cadmium stress.

Keywords: Chlorophyll fluorescence, Correlation, Hydroponic culture, Nano-particles

www.SID.ir