تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۷
۴۳۵-۴۴۸
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2017.584.1116

اثر سلنیوم بر جذب کادمیوم، خصوصیات رشدی و فتوسنتزی گیاهچه‌های سیر (*Allium sativum* L.) در معرض کادمیوم و کلرید سدیم در شرایط هیدروپونیک

نساء قره‌باغلی[۱]، علی سپهری[۲*]
۱. دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۲۶

چکیده

سلنیوم یکی از عناصر ضروری برای موجودات زنده است که نقش مهمی در کاهش اثرات نامطلوب تنش‌های محیطی در گیاهان ایفا می‌کند. به‌منظور بررسی اثر سلنیوم بر گیاهچه‌های سیر تحت کلرید سدیم و غلظت‌های مختلف کادمیوم، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. از کلرید سدیم در دو سطح صفر و ۲۵ میلی‌مولار، کادمیوم در چهار غلظت صفر، 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار کلرید کادمیوم و سلنیوم با غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم و بدون کاربرد آن استفاده شد. نتایج نشان داد که کلرید سدیم و کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی، محتوای کلروفیل کل، فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه سیر شد. برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم در غلظت 10^{-4} مولار باعث کاهش ۱۴/۴۷ درصدی جذب کادمیوم در ریشه و به دنبال آن افزایش میزان کلروفیل کل و فتوسنتز خالص نسبت به شرایط بدون کلرید سدیم شد، ولی در غلظت‌های 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم این اثر ملاحظه نگردید. افزایش کادمیوم در حضور کلرید سدیم سبب افزایش ۲/۷ برابری نسبت سدیم به پتاسیم در اندام هوایی شد. کاربرد سلنیوم با کلرید سدیم، وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه سیر را به ترتیب ۱۴/۲۸ و ۸/۵۷ درصد افزایش داد. همچنین سلنیوم اثر منفی کادمیوم (10^{-3} مولار) بر وزن خشک ریشه و وزن خشک اندام هوایی را به ترتیب ۲۰/۷۷ و ۱۲/۷۱ درصد کاهش داد. به نظر می‌رسد سلنیوم از طریق کاهش جذب کادمیوم و همچنین نسبت سدیم به پتاسیم در افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز در حضور کلرید سدیم و کادمیوم مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: **شوری، فتوسنتز خالص. کلرید سدیم. محتوای کادمیوم. نسبت سدیم به پتاسیم.**

مقدمه

گیاهان با تنش‌های مختلف ازجمله نور، املاح، دماهای بالا و پایین، سمیت گازها، کمبود یا زیادی عناصر غذایی، سمیت عناصر سنگین، کم‌آبی و غرقابی مواجه می‌باشند. موارد مذکور به‌تنهایی یا به‌صورت مشترک بر گیاه تأثیر منفی گذاشته و رشد و فیزیولوژی آن را با مشکل مواجه می‌کنند. حضور املاحی مانند کلرید سدیم یکی از عوامل مهم کاهش‌دهنده رشد و عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی و باغی است. واکنش معمول گیاهان به افزایش غلظت نمک در محیط ریشه، تنش اسمزی، سمیت یونی و کمبود عناصر غذایی است (Misra and Dwivedi., 2004). در این شرایط، فعالیت فتوسنتزی به علت دهیدراته شدن غشاء سلولی و کاهش نفوذپذیری CO_2 و همچنین به علت ورود یون‌های سدیم به سلول، و غیرفعال شدن سیستم‌های انتقال الکترون در فتوسنتز، کاهش‌یافته و درنتیجه سبب کاهش رشد در گیاهان می‌گردد (Soltana et al., 1999). از سوی دیگر برهم خوردن تعادل عناصر غذایی، به دلیل حضور مقادیر فراوان یون‌های Na^+ و Cl^- در محیط ریشه منجر به تأثیر نامطلوب بر رشد گیاه می شود (Aslam et al., 2011). برخی از خاک‌ها، به‌طور هم‌زمان دارای املاح نسبتاً زیادی بوده و از طرفی به سطوحی از فلزات سنگین آلوده می‌باشند؛ که می‌توان دلیل آن را رشد

* نگارنده پاسخگو: علی سپهری. پست الکترونیک: sepehri110@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

روزافزون صنایع، توسعه شهرها، افزایش بیش‌ازحد مصرف کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها و دخالت بشر در محیط‌زیست دانست.

در بین عناصر سنگین، کادمیوم یکی از سمی‌ترین آلاینده ها در لایه سطحی خاک است و تجمع آن در گیاهان و خاک نگرانی در این مورد را افزایش داده است (Alloway, 1995). با توجه به اینکه حداکثر غلظت قابل‌قبول کادمیوم توسط بسیاری از کشورها ۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تعیین‌شده، غلظت این عنصر در اکثر خاک‌های مطالعه شده در ایران بالاتر از حد مجاز است (Malakouti, 2008). کادمیوم به خاطر قابلیت دسترسی بالا در خاک از مهم‌ترین عوامل تهدید محسوب می‌گردد و امکان تجمع این عنصر در حد سمیت در زنجیره غذایی انسان و دام وجود دارد. کادمیوم در گیاه از باز شدن روزنه‌ها جلوگیری می‌کند و با کاهش میزان تعرق و مقدار نسبی آب برگ می‌تواند موجب تنش کمبود آب در گیاهان شود (Surwar et al., 2010). همچنین جذب زیاد کادمیوم توسط گیاهان از فرآیندهای فیزیولوژیکی مثل فتوسنتز، جذب و تجمع عناصر غذایی جلوگیری کرده و درنتیجه باعث رشد ضعیف و حتی مرگ گیاه می‌شود (Hossain et al., 2010). حضور کلرید سدیم در محیط‌های آلوده به کادمیوم با توجه به نوع گیاه، غلظت کلرید سدیم و غلظت کادمیوم اثرات مختلفی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه دارد (Wang et al., 2010). به‌طوری‌که در گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) کلرید سدیم، فراهمی کادمیوم را افزایش داده (Gorbani et al., 2016) و همچنین سبب افزایش کادمیوم در بافت‌های گیاه ذرت شده است (Farzami sepehr and Ghorbanli., 2006). گرچه ژو و همکاران (Xu et al., 2010) گزارش کردند که برهمکنش کادمیوم و کلرید سدیم در گیاه آرابیدوپسیس (*Arabidopsis thaliana*) رشد را از طریق کاهش جذب و تجمع کادمیوم در بافت‌های گیاه بهبود داده است.

همواره ترکیبات مختلفی برای کاهش اثرات سوء تنش‌ها بر گیاهان مورد توجه قرار گرفته است. در این خصوص سلنیوم نیز به‌عنوان یکی از عناصر مفید برای گیاهان معرفی شده به‌طوری‌که می‌تواند گیاهان را در برابر اثرات نامطلوب تنش‌ها حفاظت کند (Feng et al., 2013). کادمیوم و سلنیوم هر دو از عناصر سنگین بوده و ممکن است سلنیوم برخی از اثرات مضر کادمیوم را در گیاه کاهش دهد. سعیدی و همکاران (Saidi et al., 2013) گزارش کردند که افزودن سلنیوم به محیط کشت، سمیت کادمیوم را کاهش، میزان کلروفیل و فتوسنتز را افزایش داده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که سلنیوم با کاهش جذب و تجمع کادمیوم باعث کاهش اثرات مضر کادمیوم در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus*) شده است. در پژوهش دیگری بر گیاهچه‌های گندم (*Triticum aestivum*)، نشان داده شد که سلنیوم می‌تواند اثرات نامناسب ناشی از کادمیوم را به‌وسیله تنظیم تولید اتیلن، افزایش پرولین و گلوتاتیون در گیاه بهبود دهد (Iqbal et al., 2015).

سیر (*Allium sativum* L.) گیاهی از خانواده آلیاسه است که ازنظر تولید جهانی در بین گیاهان پیازی، بعد از پیاز در درجه دوم اهمیت قرار دارد (Kamentsky, 2017). ایران با تولید صد هزار تن سیر در سال رتبه ۱۵ دنیا را به خود اختصاص داده است (Faostate, 2012). قابل‌ذکر است سیر گونه‌ای بااهمیت اقتصادی زیاد و مقاوم به تنش‌های محیطی زنده و غیرزنده مانند فلزات سنگین، تنش اکسیداتیو، ویروس و باکتری است. هدف از این آزمایش، بررسی چگونگی اثر سلنیوم بر میزان جذب کادمیوم، خصوصیات رشدی و فتوسنتزی گیاهچه‌های سیر در معرض غلظت‌های مختلف کادمیوم و کلرید سدیم بوده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه و آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شد. بذرهای گیاه سیر باکیفیت مناسب و سایز نسبتاً یکسان (حدود ۵ گرم) برای انجام این آزمایش از مرکز تحقیقات کشاورزی همدان تهیه گردید. سیرچه‌ها بعد از جوانه‌دار شدن، برای رشد اولیه و سازگاری نسبی به شرایط هیدروپونیک حدود ده روز به گلدان‌های حاوی محلول غذایی هوگلند تغییریافته منتقل شده و سپس تیمارها اعمال شدند. به‌طورکلی هدایت الکتریکی محلول غذایی تهیه شده پس از اضافه نمودن ۲۵ میلی مولار کلرید سدیم حدود چهار دسی زیمنس بر متر بود. هر گلدان به ابعاد (۱۵×۵۰×۲۰) سانتی متر حاوی پنج لیتر محلول غذایی و ۱۶ گیاهچه بود که به‌طور مرتب هوادهی شدند. تیمارهای آزمایش شامل کادمیوم (۰، 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار) از منبع کلرید کادمیوم (Jiang et al., 2008)، کلرید سدیم در دو سطح (۰ و ۲۵ میلی‌مولار)

Archive of SID

www.SID.ir

و سلنیوم (۰ و ۵ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع سلنات سدیم (Sun et al., 2010) بود. شانزده گروه تیماری به شرح زیر اعمال گردید: (۱) شاهد، (۲) سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۳) کادمیوم 10^{-4} مولار، (۴) کادمیوم 10^{-4} مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۵) کادمیوم 10^{-3} مولار، (۶) کادمیوم 10^{-3} مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۷) کادمیوم 10^{-2} مولار، (۸) کادمیوم 10^{-2} مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۹) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار، (۱۰) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۱۱) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + کادمیوم با غلظت 10^{-4} مولار، (۱۲) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + کادمیوم 10^{-4} مولار + سلنیوم ۵ میلی گرم در لیتر، (۱۳) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + کادمیوم 10^{-3} مولار، (۱۴) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + کادمیوم 10^{-3} مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر، (۱۵) کلرید سدیم ۲۵ میلی مولار + کادمیوم 10^{-2} مولار، (۱۶) کلرید سدیم ۲۵ میلی‌مولار + کادمیوم 10^{-2} مولار + سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر.

مدت زمان روشنایی در طول دوره آزمایش ۱۴ ساعت در روز تنظیم شد. دمای گلخانه بین ۱۸-۲۰ درجه سانتی‌گراد در طول شبانه‌روز متغیر و میانگین رطوبت نسبی گلخانه ۶۰ درصد بود. گیاهچه‌های ۱۰ روزه به مدت هفت روز تحت تأثیر تیمارهای مذکور قرار گرفتند، سپس از محیط کشت خارج شده و خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مورد نظر اندازه‌گیری شد. صفات رشدی شامل وزن تر ریشه و اندام هوایی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین گردید. پس از تفکیک بخش هوایی و ریشه در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند و سپس ۰/۲ گرم از ماده خشک پودر شده با استفاده از هضم مرطوب تهیه و در نهایت به کمک دستگاه جذب اتمی مدل (Varian 220) محتوای کادمیوم قرائت شد. مقدار کلروفیل بخش هوایی با استفاده از روش آرنون محاسبه گردید (Arnon, 1949). همچنین پارامترهای فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و تعرق در یک برگ بالغ که به‌طور کامل باز شده بود با استفاده از دستگاه آنالیزور مادون‌قرمز (مدل LCi, Photosynthesis system, Bio-Scientific, UK) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامترهای مذکور در هر واحد آزمایش بخشی از برگ گیاه معادل ۶/۲۵ سانتیمترمربع داخل محفظه حساس دستگاه قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها بین ساعت ۹ تا ۱۱ صبح و در حضور شدت نور بیش از ۱۰۰۰ میکرومول بر فوتون بر مترمربع در ثانیه و در محیط گلخانه انجام گرفت.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) و LSMEANS در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

وزن خشک ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، علاوه بر اثرات کلرید سدیم، کادمیوم و سلنیوم، برهمکنش دوگانه آن‌ها بر وزن خشک ریشه معنی‌دار بود (جدول ۱). در هر دو وضعیت کلرید سدیم و بدون کلرید سدیم با افزایش غلظت کادمیوم تجمع وزن خشک ریشه روند کاهشی داشت. در بالاترین غلظت کادمیوم وزن خشک ریشه در حضور و یا عدم حضور کلرید سدیم به ترتیب ۶۵/۷۷ و ۴۳/۳۰ درصد کاهش یافت (جدول ۳). تأثیر بازدارنده املاح بر رشد ریشه و کاهش توسعه ریشه‌های مویین قبلاً گزارش شده است (Heydari Sharifabad, 2000). سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2006) نیز به اثر منفی کلرید سدیم بر تقسیم سلولی سلول‌های ریشه، در کاهش وزن خشک ریشه‌ها تأکید کرده‌اند. کادمیوم نیز تقسیم سلولی را در نقاط مریستمی ریشه تحت تأثیر قرار می‌دهد (Anna et al., 2007). این عنصر باعث کاهش فعالیت هورمون سیتوکینین شده و تأثیر قابل‌توجهی در کاهش تکثیر سلول‌ها دارد (Mok et al., 2000). کمترین وزن خشک ریشه در غلظت 10^{-2} کادمیوم در حضور کلرید سدیم معادل ۰/۰۹ گرم در بوته بود (جدول ۳). در سطح پایین کادمیوم تأثیر منفی کلرید سدیم، بر وزن خشک ریشه کمتر بود. به‌طوری‌که تیمار 10^{-4} کادمیوم وزن خشک ریشه را در شرایط عدم کاربرد کلرید سدیم ۱۴ درصد و در کاربرد کلرید سدیم ۶/۳ درصد کاهش داد (جدول ۳). ژو و همکاران (Xu et al., 2010) گزارش کردند بیان ژن تولید اکسین در ریشه گیاه آرابیدوپسیس تحت تأثیر کادمیوم و کلرید سدیم افزایش یافته است. اکسین می‌تواند نمو ریشه‌ها، طول ریشه‌ها، نمو ریشه‌های جانبی و تولید تارهای کشنده را تحریک کند. هرچند در سطوح بالای کادمیوم به همراه کلرید سدیم، تنش وارده بیش‌ازحد تحمل گیاه سبب کاهش رشد ریشه می‌گردد (Jiang et al., 2003).

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و اثرات متقابل آن‌ها بر وزن خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی، جذب کادمیوم ریشه، کادمیوم اندام هوایی و سدیم/پتاسیم اندام هوایی گیاه سیر.

Table 1. ANOVA (mean square) of sodium chloride, cadmium, selenium and their interactions on root dry weight, shoot dry weight, root cadmium uptake, shoot cadmium uptake and shoot Na/K of garlic plant.

		میانگین مربعات (MS)				
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	کادمیوم ریشه Root cadmium	کادمیوم اندام هوایی Shoot cadmium	سدیم/ پتاسیم اندام هوایی Shoot Na/K
کلرید سدیم Sodium chloride	1	0.005**	0.038**	241047.3**	194.59**	0.034**
کادمیوم Cadmium	3	0.052**	0.218**	26223973.8**	7253.54**	0.041**
سلنیوم Selenium	1	0.016**	0.046**	395762.7**	311.62**	0.002^{ns}
کلرید سدیم × کادمیوم Sodium chloride *cadmium	3	0.004**	0.014**	43307.2*	38.33**	0.003*
کلرید سدیم × سلنیوم Sodium chloride * Selenium	1	0.001*	0.010**	48260.7*	1.23^{ns}	0.0005^{ns}
کادمیوم × سلنیوم Cadmium* Selenium	3	0.001*	0.004**	133389**	69.17**	0.00009^{ns}
کلرید سدیم × کادمیوم × سلنیوم Sodium chloride *Cadmium*Selenium	3	0.0003^{ns}	0.002^{ns}	7620.6^{ns}	3.49**	0.0005^{ns}
خطا Error	32	0.0003	0.0008	11590.3	0.774	0.0009
ضریب تغییرات (%) C.V. (%)		*8.37*	*6.76*	*3.44*	*3.48*	*22.93*

^{ns} و *و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵٪ است.

ns, * and **: non- significant,and significant at 5 and 1% levels of probability, respectively.

در مطالعه‌ی حاضر، کاربرد سلنیوم موجب تخفیف اثرات منفی کادمیوم و کلرید سدیم گردید. در حضور کلرید سدیم کاربرد سلنیوم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیوم وزن خشک ریشه را ۱۴/۲۸ درصد افزایش داد (جدول ۴). همچنین کاربرد سلنیوم در غلظت‌های مختلف $۱۰^{-۴}$، $۱۰^{-۳}$ و $۱۰^{-۲}$ مولار کادمیوم به ترتیب ۲۰/۷۷، ۱۴/۴۳ و ۱۲/۷۱ درصد وزن خشک اندام هوایی را در مقایسه با عدم مصرف سلنیوم بهبود بخشید (جدول ۵). اثر مثبت سلنیوم بر رشد گیاه ترشک (*Rumex alpinus*) (Kong et al., 2005) در معرض کلرید سدیم، گیاه درمنه (*Stylosanthe humilis*) (Ribeiro et al., 2011) تحت تنش فلزات سنگین و گیاه سیر (Han-Wen et al., 2010) تحت تنش کادمیوم گزارش شده است. در همین رابطه هان ون و همکاران (Han-wen et al., 2010) بیان کردند سلنیوم می‌تواند تقسیم میتوزی سلول های نوک ریشه را در سیر افزایش داده و از این طریق باعث افزایش رشد ریشه شود.

وزن خشک اندام هوایی

اثرات اصلی کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و همچنین اثر متقابل کلرید سدیم و کادمیوم، کلرید سدیم و سلنیوم و کادمیوم و سلنیوم در سطح یک درصد بر وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۱). با توجه به نتایج برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم، افزایش سطوح کادمیوم در حضور کلرید سدیم و بدون کلرید سدیم وزن خشک اندام هوایی را کاهش داد (جدول ۳). بیشترین وزن خشک اندام هوایی (۰/۵۸۲ گرم در بوته) در تیمار بدون کلرید سدیم و عدم اعمال کادمیوم و کمترین وزن خشک اندام هوایی (۰/۱۷۲ گرم در بوته) در کاربرد کلرید سدیم و کادمیوم با غلظت

Archive of SID

www.SID.ir

10^{-2} مولار حاصل گردید (جدول ۳). سطوح 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم وزن خشک اندام هوایی سیر را به ترتیب ۶/۵۰، ۲۶/۹۵ و ۶۸/۰۲ درصد در حضور کلرید سدیم و ۱۴/۰۸، ۲۷/۴۹ و ۴۳/۴۷ درصد در شرایط عدم حضور کلرید سدیم کاهش داد (جدول ۳).

به نظر می‌رسد در حضور کلرید سدیم، سطوح پایین کادمیوم با افزایش وزن خشک ریشه، شرایط بهتری را برای رشد اندام هوایی فراهم کرده است. از طرف دیگر در حضور کلرید سدیم کاربرد سلنیوم نسبت به عدم مصرف ۸/۵۷ درصد وزن خشک اندام هوایی را بهبود بخشید (جدول ۴). کاربرد سلنیوم در حضور کادمیوم در مقایسه با عدم مصرف آن در غلظت‌های مختلف 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم به ترتیب ۱۲/۷۱، ۱۰/۵۹ و ۱۳/۱۹ درصد وزن خشک اندام هوایی را افزایش داد (جدول ۵). لین و همکاران (Lin et al., 2012) نیز گزارش کردند کاربرد سلنیوم در گیاهچه‌های برنج در معرض کادمیوم از طریق کاهش جذب کادمیوم در بافت های گیاهان باعث افزایش بیوماس اندام هوایی می‌گردد.

کادمیوم ریشه

اثر کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و برهمکنش سلنیوم و کادمیوم بر جذب کادمیوم ریشه در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۱). همچنین برهمکنش‌های کلرید سدیم و کادمیوم، کلرید سدیم و سلنیوم در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). بیشترین جذب کادمیوم ریشه در تیمار 10^{-2} مولار کادمیوم، بدون کلرید سدیم معادل ۱۰۱۵۱ میکروگرم بر گرم ماده خشک مشاهده شد (جدول ۳). در هر دو تیمار کلرید سدیم و بدون کلرید سدیم با افزایش غلظت کادمیوم، جذب کادمیوم در ریشه‌های گیاه افزایش یافت. در غلظت پایین کادمیوم 10^{-4} مولار بین کاربرد کلرید سدیم و عدم کاربرد آن اختلاف معنی‌داری در جذب کادمیوم ریشه مشاهده نشد. ولی در غلظت‌های 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم، جذب کادمیوم در شرایط کلرید سدیم و بدون کلرید سدیم اختلاف معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). کلرید سدیم بسته به غلظت و تحمل گیاه می‌تواند اثرات متفاوتی بر محتوای کادمیوم تجمع یافته در گیاه ایجاد کند (Shafi et al., 2010). بر اساس گزارش نورول و همکاران (Norvell et al., 2000) کلرید سدیم از طریق کاهش فعالیت کادمیوم در محلول غذایی باعث کاهش جذب کادمیوم در بافت گیاه شده که کاهش فعالیت کادمیوم با افزایش pH محلول با نمک کلرید سدیم قابل توجیه است. پارکر و همکاران (Parker et al., 1995) گزارش کردند کلرید سدیم فعالیت کادمیوم آزاد را در محلول خاک کاهش می‌دهد. همچنین فراهمی شوری غلظت کادمیوم آزاد را به سبب تشکیل $CdCl_n^{2-n}$ کاهش می دهد (Smolders and Mclaughlin., 1996). برهمکنش سلنیوم و کادمیوم نیز سبب کاهش جذب کادمیوم در ریشه گیاه سیر شد (جدول ۵). بیشترین کاهش جذب کادمیوم در تیمار سلنیوم با غلظت 10^{-4} مولار کادمیوم در حدود ۳۵/۴۰ درصد و کمترین آن در تیمار سلنیوم با 10^{-2} مولار کادمیوم و در حدود ۰/۳۵ درصد اتفاق افتاد. نتایج حاصل بیان‌گر آن است که سلنیوم جذب کادمیوم در ریشه را در بیشترین حالت ۳۵ درصد کاهش داده است (جدول ۵). با توجه به اینکه گیاهان خانواده آلیاسه جزء گیاهان سلنوفروز (سلنیوم دوست) می‌باشند، لذا تمایل بالایی برای جذب و انباشت سلنیوم از محیط ریشه دارند، در این آزمایش سلنیوم موجود در محیط ریشه در رقابت با کادمیوم برای جذب غلبه یافته، درنتیجه محتوای کادمیوم ریشه‌ها کاهش یافت. عدم تأثیر سلنیوم در غلظت بالای کادمیوم (10^{-2} مولار) به علت عدم جذب سلنیوم است، در این شرایط سلنیوم نمی‌تواند اثرات نامطلوب کادمیوم را کاهش دهد.

کادمیوم اندام هوایی

با توجه به جدول ۱ برهمکنش سه‌گانه‌ی فاکتورهای کلرید سدیم، کادمیوم و سلنیوم بر میزان کادمیوم اندام هوایی گیاه سیر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). با تشدید تنش کادمیوم، میزان انباشته شدن کادمیوم در اندام هوایی گیاه سیر افزایش معنی‌داری داشت. به‌طوری‌که بیشترین میزان در سطح 10^{-2} مولار کادمیوم و کلرید سدیم معادل ۶۱/۲۶ میکروگرم بر گرم ماده خشک به دست آمد (جدول ۶). بر اساس نتایج این پژوهش، کلرید سدیم در تمام غلظت‌های کادمیوم مصرفی، افزایش معنی‌داری را بر محتوای کادمیوم اندام هوایی ایجاد کرد. به نظر می‌رسد کلرید سدیم انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی را افزایش داده است. شوری می‌تواند از طریق ایجاد حلالیت بیشتر و ممانعت از تثبیت کادمیوم در مسیر سیمپلات، انتقال کادمیوم از ریشه به برگ را افزایش دهد (Niu et al., 2007).

کاربرد سلنیوم موجب کاهش کادمیوم در اندام هوایی سیر در تیمارهای موردمطالعه شد (جدول ۶). به‌طوری‌که کاربرد سلنیوم در غلظت 10^{-2} کادمیوم به همراه کلرید سدیم، میزان

Archive of SID

www.SID.ir

کادمیوم ریشه را ۱۰/۶ درصد کاهش داد. چنین روند مثبتی در اثر استفاده از سلنیوم در دیگر تیمارها نیز مشاهده گردید (جدول ۶). در همین رابطه شانکر و همکاران (Shanker et al, 1996) اظهار داشتند اضافه نمودن سلنیوم به خاک‌های آلوده به کادمیوم، محتوای کادمیوم ریشه و اندام هوایی ذرت را کاهش داده به‌طوری‌که کاهش در ریشه بیشتر از اندام هوایی بود.

کلروفیل کل

اثرات اصلی و برهمکنش دوگانه و سه‌گانه کلرید سدیم، کادمیوم و سلنیوم بر محتوای کلروفیل کل در برگ گیاهچه های سیر معنی‌دار بود (جدول ۲). در آزمایش حاضر مقدار کلروفیل در گیاهان شاهد ۰/۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ بود که با سایر گزارش‌ها مبنی بر محدوده ۰/۸ تا ۰/۹۹ میلی-گرم بر گرم وزن‌تر همخوانی دارد (Bo et al., 2016; Bidmeshki et al., 2012). با تشدید تنش کادمیوم، میزان کلروفیل کل در برگ گیاه سیر کاهش معنی‌داری داشت به‌طوری‌که کمترین میزان در سطح 10^{-2} مولار کادمیوم، کلرید سدیم و سلنیوم معادل ۰/۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به دست آمد (جدول ۶). در همین رابطه بیشترین محتوای کلروفیل کل در تیمار بدون کلرید سدیم و عدم مصرف کادمیوم با حضور سلنیوم معادل ۱/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ مشاهده گردید (جدول ۶). از دست رفتن آب بافت‌های برگ در اثر املاح نمک نه‌تنها مانع ساخته‌شدن کلروفیل می‌شود، بلکه تخریب کلروفیل را به دنبال دارد (Heydari sharifabad, 2000). ازآنجایی‌که کلروفیل و پرولین هر دو از پیش ماده مشترکی به نام گلوتامات سنتز می‌شوند، بنابراین افزایش پرولین در حضور املاح می‌تواند منجر به کاهش سنتز کلروفیل گردد (Maiti and Rose-Ibarra., 1994). خطیبی و همکاران (Khatibi et al., 2008) گزارش کردند که عناصر سنگین به‌وسیله کاهش فعالیت آنزیم‌های گاما-آمینولوالونیک اسید دهیدروژناز و پروتوکلروفیل ردوکتاز سبب مهار بیوسنتز کلروفیل می‌شوند. از سوی دیگر کاربرد سلنیوم در حضور کلرید سدیم و غلظت‌های 10^{-4} و 10^{-3} مولار کادمیوم، میزان کلروفیل را به ترتیب ۳/۳۳ و ۹/۰۹ درصد بهبود بخشید. (جدول ۶). ازآنجاکه سلنیوم بر کاهش جذب کادمیوم در ریشه و اندام هوایی اثر می‌گذارد، افزایش جذب عناصر ضروری و بهبود رشد ریشه و اندام هوایی را سبب می‌شود که ارتباط مثبتی با محتوای کلروفیل گیاه دارد. به نظر می‌رسد با افزایش جذب ریشه‌ای، جذب سایر عناصر مؤثر در تولید کلروفیل بهبود می یابد (Khan et al., 2009). پنانن و همکاران (Pennanen et al., 2002) افزایش محتوای کلروفیل در گیاهچه‌های گندم را به اثرات سلنیوم بر حفاظت از آنزیم‌های فتوسنتزی و افزایش بیوسنتز کلروفیل ارتباط دادند. همچنین بر اساس گزارش پدررو و همکاران (Pedrero et al., 2008)، محتوای کلروفیل برگ‌های گیاه کلم (*Brassica oleracea*) تحت تنش کادمیوم، با کاربرد سلنیوم افزایش یافت. به نظر می‌رسد سلنیوم با نقش آنتی‌اکسیدانی خود موجب ثبات غشاء تیلاکوئیدی و حفظ پروتئین‌ها و لیپیدهای غشاء در مقابل تنش اکسیداتیو ناشی از کلرید سدیم و کادمیوم شده که نتیجه آن حفاظت کلروفیل از صدمات ناشی از تنش است. همچنین در شرایط تنش افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز موجب کاهش کلروفیل می‌گردد، لذا می‌توان اثر حفاظتی سلنیوم را به کاهش فعالیت کلروفیلاز نسبت داد.

فتوسنتز خالص

علاوه بر اثرات ساده عوامل موردبررسی، برهمکنش‌های کلرید سدیم در کادمیوم و کلرید سدیم در سلنیوم در سطح یک درصد و برهمکنش کادمیوم در سلنیوم و برهمکنش سه‌گانه آن‌ها بر فتوسنتز خالص در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). قابل‌ذکر است در این آزمایش حداکثر فتوسنتز خالص گیاهچه‌ها در محدوده ۴/۸ تا ۶/۷ میکرومول CO2 بر مترمربع در ثانیه در شرایط گلخانه بود که از مقادیر گزارش شده توسط کیم و همکاران (Kim et al., 2013) (معادل ۱۰ میکرومول CO_2 بر مترمربع در ثانیه) در شرایط مزرعه اندکی کمتر است این امر می‌تواند به دلیل تفاوت ژنتیکی توده مورد استفاده و یا شرایط نوری و مقدار CO_2 گلخانه باشد. برهمکنش سه‌گانه کلرید سدیم، کادمیوم و سلنیوم نشان داد که بیشترین میزان فتوسنتز خالص در تیمار بدون شوری و بدون کادمیوم با کاربرد سلنیوم، معادل ۶/۷۳ میکرومول CO_2 بر مترمربع در ثانیه حاصل گردید و کمترین آن در تیمار کلرید سدیم و کادمیوم 10^{-2} مولار بدون سلنیوم معادل ۰/۲۰ میکرومول CO_2 بر مترمربع در ثانیه به دست آمد (جدول ۶). به‌طورکلی کلرید سدیم به سبب تغییراتی که در میزان باز بودن روزنه‌ها و میزان کلروفیل برگ به وجود می‌آورد سبب کاسته شدن ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود (Munns, 2002). همچنین کادمیوم با تولید رادیکال‌های آزاد سبب

Archive of SID

www.SID.ir

خسارت به اجزاء فتوسنتزی شده، درنتیجه پتانسیل فتوسنتزی گیاه را کاهش می‌دهد (Asgher et al., 2014). در این مطالعه کاربرد سلنیوم باعث افزایش فتوسنتز خالص گیاه گردید. گزارش‌های متعددی ازجمله تنباکو (*Nicotiana tabacum*) (Jiang et al., 2015) و گندم (*Triticum aestivum*) (Iqbal et al., 2015) در خصوص اثر مثبت سلنیوم بر فتوسنتز خالص وجود دارد. در این آزمایش کاربرد سلنیوم در حضور کلرید سدیم، فتوسنتز خالص را ۲۲/۳۸ درصد افزایش داد. به نظر می‌رسد سلنیوم اثرات کاهنده کلرید سدیم بر فتوسنتز گیاه را تا حدی کاهش داده است. گزارش شده سلنیوم می‌تواند از آسیب به کلروپلاست‌ها از طریق افزایش میزان کلروفیل ممانعت کند (Malik et al., 2012). اثر سلنیوم بر میزان فتوسنتز گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری به‌وسیله دیائو و همکاران (Diao et al., 2014) تائید شده است. سلنیوم از طریق تنظیم سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در کلروپلاست‌ها و بهبود کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم *II*، سبب حفاظت از سیستم فتوسنتزی گیاه می‌شود. در این آزمایش افزایش معنی‌دار فتوسنتز خالص در تیمار سلنیوم با کادمیوم در تمام سطوح کادمیوم مشهود بود.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و اثرات متقابل آن‌ها بر کلروفیل کل، فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه سیر

Table 2. ANOVA (mean square) of sodium chloride, cadmium, selenium and their interactions on total chlorophyll, net photosynthesis rate, stomatal conductance and transpiration rate of garlic plant.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS) کلروفیل کل Total Chlorophyll	فتوسنتز خالص Net photosynthesis rate	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance	سرعت تعرق Transpiration rate
کلرید سدیم Sodium chloride	1	0.126**	8.49**	0.0009**	4.60**
کادمیوم Cadmium	3	0.728**	48.57**	0.0062**	30.61**
سلنیوم Selenium	1	0.097**	10.57**	0.0027**	5.28**
کلرید سدیم × کادمیوم Sodium chloride *cadmium	3	0.117**	1.22**	0.0001**	1.33**
کلرید سدیم × سلنیوم Sodium chloride * Selenium	1	0.039**	2.59**	0.0001*	1.39**
کادمیوم × سلنیوم Cadmium* Selenium	3	0.010*	0.444*	0.0002**	0.47**
کلرید سدیم × کادمیوم × سلنیوم Sodium chloride * Cadmium * Selenium	3	0.023**	0.524*	0.00004ns	0.02ns
خطا Error	32	0.003	0.145	0.00003	0.05
ضریب تغییرات C.V.		*8.17*	*13.80*	*13.37*	*9.26*

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

ns, * and **: non- significant,and significant at 5 and 1% levels of probability, respectively

Archive of SID

www.SID.ir

هدایت روزنه‌ای

اثرات ساده کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و همچنین برهمکنش‌های کلرید سدیم در کادمیوم، سلنیوم در کادمیوم بر هدایت روزنه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). برهمکنش کلرید سدیم در سلنیوم نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با تشدید تنش کادمیوم هدایت روزنه‌ای روند کاهشی داشت. کمترین هدایت روزنه‌ای در تیمار 10^{-2} کادمیوم حاصل گردید. چنین روندی در کاربرد کلرید سدیم نیز مشاهده شد (جدول ۳). در شرایط تنش گیاهان با سازوکارهای متفاوتی ازجمله کاهش هدایت روزنه ای و بستن روزنه‌ها از انجام تعرق جلوگیری می‌کنند. از سوی دیگر کادمیوم بر تعادل آبی گیاه مؤثر بوده و از طریق کاهش مقدار نسبی آب برگ از باز شدن روزنه‌ها جلوگیری می‌کند که این موضوع سبب تشدید تنش در گیاه می‌شود (Surwar et al., 2010). ماکسیمویک و همکاران (Maksimovic et al., 2010) گزارش کردند شوری از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای موجب کاهش میزان فتوسنتز در گیاه نخود می‌گردد.

با افزایش غلظت کادمیوم، کاربرد یا عدم کاربرد کلرید سدیم هدایت روزنه‌ای را کاهش داد (جدول ۳). کمترین هدایت روزنه‌ای در تیمار 10^{-2} کادمیوم + کلرید سدیم معادل ۰/۰۰۷ میلی‌مول CO_2 بر مترمربع بر ثانیه حاصل گردید (جدول ۳). قابل‌ذکر است که هدایت روزنه‌ای در تیمار کلرید سدیم و غلظت 10^{-4} مولار کادمیوم نسبت به تیمار بدون کلرید سدیم تغییری نشان نداد (جدول ۳). درحالی‌که هدایت روزنه‌ای در 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم در مقایسه با بدون کلرید سدیم ۳۴ و ۵۶/۲۵ درصد کاهش یافت (جدول ۳). کلرید سدیم و کادمیوم از طریق ایجاد تنش کمبود آب سبب کاهش پتانسیل آب برگ، هدایت روزنه‌ای و تعرق و اثرات نامطلوب ناشی از کمبود آب بر گیاهان می‌شوند (Parida and Das., 2005). در گیاه جو (*Hordeum vulgar*) (Zhu et al., 2014) و خردل سیاه (*Brassica nigra*) (Jamil and Rha., 2013) اظهار شد کاهش هدایت روزنه ای می‌تواند پیامد تنش کمبود آب ناشی از وجود املاح بر فیزیولوژی روزنه‌ها باشد.

در این پژوهش، کاربرد سلنیوم موجب تخفیف اثرات منفی تنش‌های کادمیوم و کلرید سدیم گردید (جداول ۴ و ۵). در حضور کلرید سدیم، کاربرد سلنیوم در مقایسه با عدم کاربرد سلنیوم هدایت روزنه‌ای را ۳۸/۷۰ درصد افزایش داد (جدول ۴). همچنین کاربرد سلنیوم در حضور کادمیوم در مقایسه با عدم مصرف سلنیوم در غلظت‌های مختلف 10^{-4} و 10^{-3} مولار کادمیوم به ترتیب ۴۲/۵۰، ۵۱/۵۱ درصد هدایت روزنه‌ای را بهبود بخشید ولی در غلظت 10^{-2} مولار کادمیوم هیچ تفاوتی را نشان نداد (جدول ۵). افزایش رطوبت برگ و هدایت روزنه‌ای در گیاه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) در معرض سلنیوم توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است (Germ et al., 2007; Kaur and Naggar., 2015).

سرعت تعرق

کلرید سدیم، کادمیوم، سلنیوم و همچنین برهمکنش‌های دوگانه بین عوامل آزمایشی بر سرعت تعرق در سطح یک درصد اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۲). بیشترین سرعت تعرق در تیمار بدون کلرید سدیم و کادمیوم معادل ۴/۹۰ میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه و کمترین سرعت تعرق در حضور کلرید سدیم با کادمیوم 10^{-2} مولار برابر ۰/۱۹ میلی مول آب بر مترمربع در ثانیه حاصل گردید (جدول ۳). سطوح 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم سرعت تعرق گیاهچه‌ها را ۹/۹۱، ۵۹/۵۱ و ۹۴/۹۰ درصد در حضور کلرید سدیم و ۳۸/۵۷، ۵۲/۴۴ و ۷۸/۷۷ درصد در شرایط عدم حضور کلرید سدیم کاهش داد (جدول ۳). به نظر می‌رسد میزان کاهش در حضور کلرید سدیم به‌ویژه در غلظت‌های پایین کادمیوم کمتر بود. با توجه به روند مشابه هدایت روزنه‌ای در تیمارهای مذکور کاهش کمتر هدایت روزنه‌ای می‌تواند دلیل این موضوع باشد. از طرف دیگر سرعت تعرق با مصرف سلنیوم در حضور کلرید سدیم نسبت به عدم مصرف سلنیوم ۱۵/۶۸ درصد بهبود یافت (جدول ۴) همچنین مصرف سلنیوم در غلظت های 10^{-4}، 10^{-3} و 10^{-2} مولار کادمیوم به ترتیب ۳۷/۶۸، ۴۳/۰۳ و ۱۶/۶۴ درصد سرعت تعرق را افزایش داد (جدول ۵). گزارش شده است سلنیوم با افزایش جذب پتاسیم در اندام هوایی گیاه، هدایت روزنه‌ای را افزایش داده که این موضوع سبب افزایش سرعت تعرق و به دنبال آن افزایش فتوسنتز در گیاهان تحت تنش می‌شود (Germ et al., 2007).

نسبت سدیم به پتاسیم اندام هوایی

اثر کلرید سدیم و کادمیوم در سطح یک درصد و برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). کلرید سدیم و کادمیوم، نسبت سدیم به پتاسیم اندام هوایی را افزایش دادند (جدول ۳). به‌طوری‌که افزایش

Archive of SID

www.SID.ir

کادمیوم در حضور کلرید سدیم سبب افزایش ۲/۷ برابری نسبت سدیم به پتاسیم در اندام هوایی شد. ازآنجا که هر دو ترکیب کلرید سدیم و کادمیوم موجب افزایش جذب سدیم و به دنبال آن کاهش جذب پتاسیم می‌شود درنتیجه این نسبت افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج برهمکنش کلرید سدیم در کادمیوم، افزایش غلظت کادمیوم سبب افزایش این نسبت در اندام هوایی گیاه شد (جدول ۳). هم‌زمان با افزایش میزان سدیم در محیط ریشه، جذب پتاسیم در اندام هوایی گیاهچه های سیر کاهش یافت. برآیند کاهش جذب پتاسیم و افزایش جذب سدیم سبب افزایش نسبت سدیم به پتاسیم شده که مطابق با نتایج سایر محققان است (Munns and tester., 2008). عزیزپور و همکاران (Azizpour et al., 2010) نیز کاهش جذب پتاسیم و افت نسبت پتاسیم به سدیم را در گیاه گندم تحت تنش شوری گزارش کردند.

جدول ۳. مقایسه میانگین برهمکنش کلرید سدیم و کادمیوم بر صفات موردبررسی در گیاهچه سیر

Table 3. Mean comparison for interaction effects of sodium chloride and cadmium on studied garlic seedling traits

کلرید سدیم Sodium chloride	کادمیوم Cadmium	وزن خشک ریشه Root dry weight (g plant^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g plant^{-1})	کادمیوم ریشه Root Cd uptake (µg/gDW)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (mmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	سرعت تعرق Transpiration rate (mmol $H_2O$$m^{-2}s^{-1}$)	سدیم به پتاسیم اندام هوایی Shoot Na/K
0	**0**	0.284^{a}	0.582^{a}	4.70^{f}	0.072^{a}	4.90^{a}	0.068^{f}
	10^{-4} M	0.244^{b}	0.500^{c}	570^{e}	0.048^{c}	3.01^{d}	0.081^{ef}
	10^{-3} M	0.207^{c}	0.422^{d}	2071.23^{c}	0.050^{c}	2.33^{e}	0.106^{de}
	10^{-2} M	0.161^{d}	0.329^{e}	10151.0^{a}	0.016^{e}	1.04^{g}	0.164^{b}
25 mM	**0**	0.263^{ab}	0.538^{b}	3.68^{f}	0.060^{b}	3.73^{b}	0.096^{d}
	10^{-4} M	0.266^{a}	0.503^{c}	487.50^{e}	0.049^{c}	3.36^{c}	0.127^{cd}
	10^{-3} M	0.193^{c}	0.393^{d}	1827.16^{d}	0.033^{d}	1.51^{f}	0.144^{bc}
	10^{-2} M	0.090^{e}	0.172^{f}	9911.66^{b}	0.007^{f}	0.19^{h}	0.266^{a}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSMEANS در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% level, according to LSMEANS

جدول ۴. مقایسه میانگین برهمکنش کلرید سدیم و سلنیوم بر صفات موردبررسی در گیاهچه سیر

Table 4. Mean comparison for the interaction effect of sodium chloride and selenium on studied garlic seedling traits

کلرید سدیم Sodium chloride	سلنیوم Selenium	وزن خشک ریشه Root dry weight (g plant^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g plant^{-1})	کادمیوم ریشه Root Cd uptake (µg/gDW)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (mmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	سرعت تعرق Transpiration rate (mmol $H_2O$$m^{-2}s^{-1}$)
0	**0**	0.200^{c}	0.412^{b}	3321.74^{a}	0.037^{c}	2.32^{b}
	5 mg/l	0.248^{a}	0.504^{a}	3076.72^{b}	0.056^{a}	3.32^{a}
25 mM	**0**	0.189^{c}	0.385^{c}	3116.59^{b}	0.031^{d}	2.04^{c}
	5 mg/l	0.216^{b}	0.418^{b}	2998.41^{c}	0.043^{b}	2.36^{b}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSMEANS در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% level, according to LSMEANS test.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵. مقایسه میانگین برهمکنش کادمیوم و سلنیوم بر صفات موردبررسی در گیاهچه سیر

Table 5. Mean comparison for the interaction effect of cadmium and selenium on studied garlic seedling traits

کادمیوم Cadmium	سلنیوم Selenium	وزن خشک ریشه Root dry weight (g plant^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g plant^{-1})	کادمیوم ریشه Root Cd uptake (µg/gDW)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (mmol CO_2 m^{-2} s^{-1})	سرعت تعرق Transpiration rate (mmol H_2Om^{-2}s^{-1})
0	**0**	0.244^{c}	0.501^{bc}	5.45^{f}	0.054^{bc}	3.88^{b}
	5 mg/l	0.320^{a}	0.619^{a}	2.93^{f}	0.078^{a}	4.74^{a}
10^{-4} M	**0**	0.231^{cd}	0.472^{c}	642.5^{d}	0.040^{d}	2.68^{c}
	5 mg/l	0.279^{b}	0.532^{b}	415^{e}	0.057^{b}	3.69^{b}
10^{-3} M	**0**	0.187^{e}	0.387^{e}	2179.56^{b}	0.033^{e}	1.58^{e}
	5 mg/l	0.214^{d}	0.428^{d}	1718.83^{c}	0.050^{c}	2.26^{d}
10^{-2} M	**0**	0.118^{f}	0.235^{f}	10049.16^{a}	0.01^{f}	0.56^{f}
	5 mg/l	0.133^{f}	0.266^{f}	10013.50^{a}	0.01^{f}	0.67^{f}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSMEANS در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% level, according to LSMEANS test.

جدول ۶. مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه کلرید سدیم، کادمیوم و سلنیوم بر صفات موردبررسی در گیاهچه سیر

Table 6. Mean comparison for the interaction effect of sodium chloride, cadmium and selenium on studied garlic seedling traits

کلرید سدیم Sodium chloride	کادمیوم Cadmium	سلنیوم Selenium	کادمیوم اندام هوایی Shoot Cd uptake (µg/gDW)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mgg^{-1} FW)	فتوسنتز خالص Net photosynthesis rate (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1})
0	0	0	0.106^{j}	0.90^{b}	4.81^{b}
		5 mg/l	0.092^{j}	1.04^{a}	6.73^{a}
	10^{-4} M	0	12.48^{h}	0.75^{d}	3.16^{fg}
		5 mg/l	8.19^{i}	0.86^{b}	4.73^{bc}
	10^{-3} M	0	33.53^{e}	0.63^{e}	1.63^{h}
		5 mg/l	21.43^{g}	0.76^{c}	2.84^{fg}
	10^{-2} M	0	56.37^{b}	0.42^{f}	0.30^{i}
		5 mg/l	53.68^{c}	0.63^{e}	1.21^{h}
25	0	0	0.21^{j}	0.70^{de}	3.82^{de}
		5 mg/l	0.11^{j}	0.90^{b}	4.17^{cd}
	10^{-4} M	0	16.71^{h}	0.90^{b}	3.21^{efg}
		5 mg/l	12.79^{h}	0.93^{b}	3.29^{ef}
	10^{-3} M	0	41.70^{d}	0.66^{de}	1.16^{h}
		5 mg/l	30.56^{f}	0.72^{de}	2.62^{g}
	10^{-2} M	0	61.26^{a}	0.25^{g}	0.20^{j}
		5 mg/l	54.76^{c}	0.10^{h}	0.20^{j}

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSMEANS در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% level, according to LSMEANS test.

در بسیاری از مطالعات وجود اثر آنتاگونیستی بین سدیم و پتاسیم گزارش شده است (Munns and Termaat., 1986). تخریب غشای سیتوپلاسمی سبب از بین رفتن خاصیت تراوایی غشاء در انتقال فعال الکترولیت‌های سلولی شده درنتیجه پتاسیم درون‌سلولی خارج می‌شود (Wahid et al., 2007). در همین راستا علی و همکاران (Ali et al.,

Archive of SID

www.SID.ir

2014) نیز گزارش کردند در گیاهان کلزا در معرض کادمیوم، با افزایش جذب سدیم و کاهش جذب پتاسیم، نسبت سدیم به پتاسیم افزایش داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

کلرید سدیم در غلظت کم کادمیوم، سبب افزایش اندک وزن خشک ریشه و اندام هوایی شد که حاکی از افزایش فتوسنتز و میزان کلروفیل در گیاهچه‌های سیر در چنین شرایطی دارد ولی کاهش در پارامترهای رشدی در غلظت‌های زیاد کادمیوم کاملاً مشهود بود. سلنیوم اثر مثبت و معنی‌داری در بهبود وزن خشک ریشه، اندام هوایی، کلروفیل کل، فتوسنتز خالص، تعرق، هدایت روزنه‌ای و جذب پتاسیم کاهش‌یافته در اندام هوایی در معرض کلرید سدیم و کادمیوم داشت و سبب بهبود محتوای کلروفیل کل، فتوسنتز و رشد گیاه در حضور کلرید سدیم و کادمیوم شد. این موضوع اثر مثبت سلنیوم در غلظت به‌کاررفته را در شرایط مذکور بر بهبود رشد گیاهچه‌های سیر تائید می‌کند که از لحاظ فرآیندهای فیزیولوژیکی و مولکولی مؤثر بر آن بایستی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

منابع

Ali, B., Gill, R.A., Yang, S., Gill, M.B., Ali, S., Rafiq, M.T., Zhou, W., 2014. Hydrogen sulfide alleviates cadmium-induced morpho-physiological and ultrastructural changes in *Brassica napus*. Ecotoxicology and Environmental Safety. 110, 197-207.

Alloway, B.J., 1995. Toxic metals in soil-plant systems: Edited by Sheila M. Ross. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 469 p.

Ameriyan, M., Dashti, F., Delshad, M., 2014. Effect of different sources and levels of selenium on growth and some physiological characteristics of onion *(Allium cepa* L.). Plant Production Technology. 4(2), 163-179.[In Persian with English summary].

Anna, F., Cristina, G., Wanda, C., 2007. Effects of Cadmium on Root Apical Meristems of *Pisum sativum* L. Cell Proliferation and Microtubule Pattern as Suitable Markers for Assessment of Stress Pollution. Mutant Research. 632-919.

Arnon, D.T., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in Beta vulgaris. Plant Physiology. 24, 1-15.

Asgher, M., Khan, N.A., Khan, M., Iqbal, R., Mehar, F., Asim, M., 2014. Ethylene production is associated with alleviation of cadmium-induced oxidative stress by sulfur in mustard types differing in ethylene sensitivity. Ecotoxicology and Environmental Safety. 106, 54-61.

Aslam, R., Bostan, N., Nabgha-e, A., Maria, M., Safdar, W., 2011. A critical review on halophytes: salt tolerant plants. Journal of Medicinal Plants Research. 5, 7108-7118.

Azizpour, K., Shakiba, M.R., Sima, N.K.K., Alyyari, H., Moghaddam, M., Esfandiari, E., Pessarakli, M., 2010. Physiological response of spring durum wheat genotypes to salinity. Journal of Plant Nutrition. 33, 45-51.

Bidmeshki, A., Arvin, M.J., Maghsoudi, K., 2012. Effect of indole-3 Butyric acid (IBA) foliar application on growth, bulb yield and allicin of garlic (*Allium sativum* L.) under water deficit stress in field. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 28, 567-577. [In Persian with English Summary].

Bo, C., Hai-feng, L., Ying-ying, L., Xin-hui, Y., Ya-li, S., Xiu-dong, S., Qing-hua, S., Shi-qi, L., 2016. Effects of selenium and sulfur on antioxidants and physiological parameters of garlic plants during senescence. Journal of Integrative Agriculture. 15, 566-572.

Castillo-Godina, R.G., Foroughbakhch-Pournavab, R., Benavides-Mendoza, A., 2016. Effect of selenium on elemental concentration and antioxidant enzymatic activity of tomato plants. Journal of Agriculture Science and Technology. 18, 233-244.

Diao, M., Long, M., Jianwei, W., Jinxia, C., Aifei, F., Huiying, L., 2014. Selenium promotes the growth and photosynthesis of tomato seedling under salt stress by enhancing chloroplast antioxidant defense system. Journal of Plant Growth Regulator. 33, 671-682.

Faostate, 2012. data. from http://apps.fao.org/default.htm.

Farzami sepehr, M., Ghorbanli, M., 2006. Physiological responses of Zea mays

Archive of SID

www.SID.ir

seedlings to interactions Between Cadmium and salinity. Journal of Integrative Plant Biology. 48, 807-813.

Feng, R., Wei, C., Tu, S., 2013. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. Environmental and Experimental Botany. 87, 58-68.

Germ, M., Kreft, I., Stibilj, V., Urbanc-Bercic, O., 2007. Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato. Plant Physiology and Biochemistry. 45, 162-167.

Han-Wen, S., Jing, H., Shu-xuan, L., Wei-jin, K., 2010. protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 41, 1195-1204.

Heydari Sharifabad, H., 2000. Plant and salinity. publications of the research institute of Forests and Rangelands, tehran.199 P. [In Persian]

Hossain, M.A., Hasanuzzaman, M., Fujita, M., 2010. up regulation of antioxidant and glyoxalase systems by exogenous glycinebetaine and proline in mung bean confer tolerance to cadmium stress. Physiology and Molecular Biology of Plant. 16, 259-272.

Jamil, M., Rha, E.S., 2013. NaCl stress-induced reduction in growth, photosynthesis and protein in mustard. Journal of Agricultural Science. 5, 114.

Jiang, C., Zu, C., Shen, J., Shao, F., Li, T., 2015. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 84, 71-77.

Jiang, W., Liu, D., Hou, W., 2001. Hyperaccumulation of cadmium by roots, bulbs and shoots of garlic (*Allium sativum* L.). Bioresource Technology. 76, 9-13.

Kamenetsky, R., Rabinowitch, H.D., 2017. Physiology of Domesticated Alliums: Onions, Garlic, Leek, and Minor Crops A2 - Thomas, Brian. In: Murray, B.G., Murphy, D.J. (Eds.), Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition). Academic Press, Oxford, pp. 255-261.

Kaur, N., Sharma, S., Kaur, S., Nayyar, H., 2014. Selenium in agriculture: a nutrientor contaminant for crops? archives of agronomy and soil science. 60, 1593-1624.

Khan, M.I.R., Nazir, F., Asgher, M., Per, T.S., Khan, N.A., 2015. Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat. Journal of Plant Physiology. 173, 9-18.

Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A., 2009. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: review. Biomedical and Life Sciences. 5, 551-570.

Khatibi, M., Rashed, M.H., Ganjeali, A., Lahooti, M., 2008. The effects of different nikel concentration on some morpho-physiological characteristics of parsley. Iranian Journal of Field Crops Research. 2, 292-302. [In Persian with English summary].

Kim, S-H.,Jeong, J.H., Nackley, L.L., 2013. Photosynthetic and transpiration responses to light, CO_2, temperature, and leaf senescence in garlic: analysis and modeling. Journal of the American Society for Horticultural Science. 138, 149-156.

Kong, L., Wang, M., Bi, D., 2005. Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seedling under salt stress. Plant Growth Regulators. 45, 155-163.

Lin, L., Zhou, W., Dai, H., Cao, F., Zhang, G., Wu, F., 2012. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. Journal of Hazardous Materials. 235–236, 343-351.

Maiti, R.K., Rosa, M., Gutierrez, L.A.A., De la Roza, M., 1994. Evaluation of several sorghum genotype for salinity tolerance. International Sorghum and Millets Newslands. 35, 121-129.

Maksimovic, I., Putnik-DelićIvana, M., Gani, I., Maric, J., Ilin, Z., 2010. Growth, ion composition, and stomatal conductance of peas exposed to salinity. Central European Journal of Biology. 5, 682-691.

Malakouti, M.J., 2008. Relationship between Balanced Fertilization and Healthy Agricultural Products (A review). Journal of Ecophysiology of Crops and Weeds.16, 133-150. [In Persian with English Summary].

Malik, J.A., Goel, S., Kaur, N., Sharma, S., Singh, I., Nayyar, H., 2012. Selenium antagonists the toxic effects of arsenic on mung bean (*Phaseolus aureus Roxb.)* plants

Archive of SID

www.SID.ir

by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms. Environmental and Experimental Botany. 77, 242-248.

Misra, N., Dwivedi, U.N., 2004. Genotypic difference in salinity tolerance of green gram cultivars. Plant Science. 166, 1135-1142.

Mok, M.C., Martin, R.C., Mok, D.W.S., 2000. CYTOKININS: Biosynthesis, Metabolism and Perception. In Vitro Cellular and Developmental Biology plant. 36, 102-107.

Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment. 25, 659-671.

Munns, R., Termaat, A., 1986. Whole plant response to salinity. Australian Journal of Plant Physiology. 13, 143-160.

Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology. 59, 651-681.

Najeeb, U., Jilani, G., Ali, S., Sarwar, M., Xu, L., Zhou, W., 2011. Insights into cadmium induced physiological and ultra-structural disorders in *Juncus effusus* L. and its remediation through exogenous citric acid. Journal of Hazardous Materials. 186, 565-574.

Niu, Z.-x., Sun, L.-n., Sun, T.-h., Li, Y.-s., Wang, H., 2007. Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. Journal of Environmental Sciences. 19, 961-967.

Norvell, W., Wu, J., Hopkins, D., Welch, R., 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. Soil Science Society of America Journal. 64, 2162-2168.

Parida, A.K., Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety. 60, 324-349.

Parker, D.R., Norvell, W.A., Chaney, R.L., 1995. Geochem-PC: a chemical speciation program for IBM compatibles. Soil Science Society of America. 253-269.

Pedrero, Z., Madrid, Y., Hartikainen, H., Camara, C., 2008. Protective effect of selenium in broccoli (*Brassica oleracea*) plants subjected to cadmium exposure. Journal of Agricultural Food Chemistry. 56, 266-271.

Pennanen, A., Xue, T., Hartikainen, H., 2002. Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. Journal of Application Botany. 76, 66-76.

Ribeiro, D.M., Mapeli, A.M., Antunes, W.C., Barros, R.S., 2011. A dual role of selenium in the growth control of seedling of *Stylosanthes humilis*. Agriculture Science. 2, 78-85.

Saidi, I., Chtourou, Y., Djebali, W., 2014. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings. Journal of Plant Physiology. 171, 85-91.

Sarwar, N., Sukhdev, S.M., Munir, H.Z., Asif, N., Sadia, B., Ghulam, F., 2010. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants (Review). Journal of Science Food Agriculture. 90, 925-937.

Shafi, M., Bakht, J., Khan, M.J., M.A., K., 2010. Effect of salinity and ion accumulation of wheat genotypes. Pakistan Journal of Botany. 42, 4113-4121.

Shanker, K., Mishra, S., Srivastava, S., Srivastava, R., Daas, R., Prakash, S., Srivastava, M.M., 1996. Effect of Selenite and Selenate on Plant Uptake of Cadmium by Maize (*Zea mays*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 56, 419-424.

Smolders, E., McLaughlin, M.L., 1996. Effect of Cl on Cd uptake by Swiss Chard in nutrient solutions. Plant and Soil. 179, 57-64.

Soltani, A., Gholipoor, M., Zeinali, E., 2006. Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. Environmental and Experimental Botany. 55, 195-200.

Sultana, N., Ikeda, T., Itoh, R., 1999. Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. Environmental and Experimental Botany. 42, 211-220.

Wahid, A., Perveen, M., Gelani, S., Basra, S.M.A., 2007. Pre-treatment of seed with H2O2 improves salt tolerance of wheat seedlings by alleviation of oxidative damage and experssion of stress proteins. Journal of Plant Physiology. 61, 195-204.

Wang, Y., Hu, Y., Duan, Y., Feng, R., Gong, H., 2016. Silicon reduces long-term cadmium toxicities in potted garlic plants. Acta Physiologiae Plantarum. 38, 211.

Archive of SID

www.SID.ir

Wang, Y., Wu, W., 2010. Plant sensing and signaling in response to K+-deficiency. Molecular Plant. 3, 280-287.

Xu, J., Yin, H., Liu, X., Li, X., 2010. Salt affects plant Cd-stress responses by modulating growth and Cd accumulation. Planta. 231, 449-459.

Zhang, B., Shang, S., Zhang, H., Jabeen, Z., Zhang, G., 2013. Sodium chloride enhances cadmium tolerance through reducing cadmium accumulation and increasing anti-oxidative enzyme activity in tobacco. Environmental Toxicology and Chemistry. 32, 1420-1425.

Zhu, M., Zhou, M., Shabala, L., Shabala, S., 2014. Linking osmotic adjustment andstomatal characteristics with salinity stress tolerance in contrasting barley accessions. Functional Plant Biology. 42, 252-263.

Archive of SID

www.SID.ir