اثر سلنیوم بر شاخص‌های رشد، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر (*Allium sativum*) در شرایط سمیت کادمیوم

ملیحه نامدار[۱]، سید محمد جواد آروین*[۱] و نادیا بهره مند[۲]

[۱] گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه شهید باهنر کرمان و [۲] گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه جیرفت

(تاریخ دریافت: ۱۳۹٦/۰٦/۲۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹٦/۱۱/۲۱)

چکیده

افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده موضوع قابل بحث و بااهمیتی است. سلنیوم می‌تواند در کاهش اثرات تنش نقش داشته باشد. به همین منظور، در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۳۹۲، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تیمار، کلرید کادمیوم در دو سطح (صفر و۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) از طریق خاک و سلنات سدیم دارای سه سطح (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به شکل محلول‌پاشی برگی، با چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد، کادمیوم سبب کاهش زیست توده گیاه، رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوی نسبی رطوبت برگ و افزایش پراکسید هیدروژن، ولی سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، وزن تر و خشک شاخساره، ریشه و سوخ سیر، کلروفیل، کاروتنوئید، محتوی نسبی رطوبت و پراکسیدهیدروژن را به ترتیب افزایش و کاهش داد. سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط تنش کادمیوم، باعث افزایش طول شاخساره (۱٦/۱ درصد)، طول ریشه (۱۹ درصد)، کاهش میزان مالون دی آلدئید (۱۵/۳ درصد)، و نشت یونی (درصد ۱٤)، پرولین (۱۱ درصد)، قندهای احیاکننده (۲۵ درصد)، افزایش فعالیت آنزیمی سوپراکسید دیسموتاز (۲۲/۲ درصد)، کاتالاز (٤۱/۸ درصد)، آسکوربات پراکسیداز (۲۷ درصد)، گایاکول پراکسیداز (۱۰/۱ درصد)، پلی‌فنل اکسیداز (۱۷ درصد) و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی آنتوسیانین (۲۸ درصد) و فلاونوئید جذب ۳۳۰ نانومتر (۲۱ درصد) در برگ گیاه، نسبت به تیمار کادمیوم گردید. در اغلب موارد، سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نقش بازدارنده داشت. برطبق نتایج حاصل، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌تواند در کاهش اثرات مخرب کادمیوم و فعال کردن سیستم دفاعی گیاه سیر در شرایط سمیت کادمیوم نقش داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان، آنزیم، پرولین، زیست توده، نشت یونی

مقدمه

در راستای افزایش تولید محصول، توجه به عوامل ایجادکننده اختلال در رشد و نمو گیاه و راه‌کارهای کاهش خسارت اهمیت بسزایی دارد (Pandey and Sharma, 2002). از طرفی، گیاه در طی دوره رشد و نمو با تنش‌های مختلفی در محیط اطراف خود ازجمله سرما، گرما، خشکی و فلزات سنگین مواجه است که جزء تنش‌های غیرزنده بوده و در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرارگرفته‌اند (Schutzendubel *et al*., 2001).

در این میان، فلزات سنگین مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده محیط‌زیست می‌باشند که با آلودگی خاک، آب‌وهوا به گیاهان صدمه می‌زنند (Benavides *et al*., 2005). در مقایسه

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی:smjArvin@gmail.com

فلزات سنگین، کادمیوم به‌علت پایداری بالا (نیمه‌عمر ۳۰ ساله) اثرات منفی قابل توجهی روی گیاهان، انسان و جانوران می‌گذارد (Zengin and Munzuroglu, 2005). علاوه بر آلودگی طبیعی که سالیانه ۲۵۰۰۰ تن کادمیوم به محیط‌زیست وارد می‌شود آلودگی کارخانه‌ها، پالایشگاه‌ها، معادن و فاضلاب‌ها که حاصل فعالیت‌های بشری است نیز افزوده شده است (Pandey and Sharma, 2002). کادمیوم، فتوسنتز، تنفس و تعرق گیاه را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و از طریق تولید رادیکال‌های آزاد در گیاه تنش اکسیداتیو را سبب می‌شود (Benavides *et al*., 2005). چنانچه مولکول اکسیژن به هر علتی مثل بسته شدن روزنه‌ها یا کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در حضور این فلز به‌عنوان پذیرنده الکترون عمل کند تبدیل به سوپر اکسید، پراکسید هیدروژن و یا رادیکال آزاد هیدروکسیل می‌شود که سه ترکیب موجود به نام گونه‌های واکنشگر اکسیژن شناخته می‌شوند و می‌توانند به مولکول‌های مهم زیستی مانند رنگیزه‌های فتوسنتزی، لیپیدها، پروتئین و اسیدهای نوکلئیک گیاه آسیب جدی وارد و منجر به مرگ سلولی شود (Prasad *et al*., 1994). بخشی از سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش به‌عنوان سیستم آنتی‌اکسیداتیو نیز شناخته‌شده و شامل آنزیم‌ها و ترکیبات غیرآنزیمی است که آنتی‌اکسیدان نامیده می‌شوند (Dixit *et al*., 2001). تحریک تولید رادیکال‌های آزاد و پراکسیداسیون چربی‌ها توسط فلزات سنگین بخصوص کادمیوم گزارش شده است (Hu *et al*., 2007). کاهش بیومس گیاه نخود فرنگی در معرض کادمیوم ٤٠ میکرومولار در محیط کشت هیدروپونیک گزارش شده است (Dixit *et al*., 2001). افزایش تولید رادیکال آزاد حاصل از تنش کادمیوم در لوبیا (Smeets *et al*., 2005)، برنج (Shah *et al*., 2001) و سویا (Yang *et al*,. 2007) مشاهده‌شده است. محتوی مالون دی آلدئید برگ در برنج (Chien *et al*., 2001) و لوبیا (Smeets *et al*., 2005) تحت کادمیوم تنش افزایش یافت. افزایش چشمگیر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در برنج با غلظت ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم (Shah *et al*., 2001) و آسکوربات پراکسیداز در گوجه‌فرنگی تا غلظت ۸۰ میکرومولار و کاهش فعالیت آنزیم در غلظت ۱۰۰ میکرومولار این فلز (Hana *et al*., 2008). دفاع آنزیمی گیاه را نشان می‌دهد. افزایش فلاونوئیدها تحت تنش مس در گیاه خرفه گزارش شده است (قربانعلی و کیانپور، ۱۳۹۱). در میان عوامل متعدد تخفیف‌دهنده اثرات تنش در گیاهان، نقش سلنیوم در خنثی‌سازی اثر تنش‌های غیرزنده با مکانیسم‌هایی نسبتاً پیچیده و ناشناخته از قبیل تنظیم گونه‌های فعال اکسیژن، افزایش آنتی‌اکسیدان‌ها، ممانعت از جذب و انتقال فلز سنگین و تغییر ویژگی آن، بازسازی غشا سلولی، تأثیر در کمپلکس‌های فتوسنتزی، انتقال الکترون و بهبود سیستم فتوسنتزی، تنظیم جذب و باز توزیع عناصر ضروری مشخص شده است (Feng and Wei, 2012) علاوه بر این، سلنیوم در ساختار برخی از آنزیم‌ها و ترکیبات موجود در گیاه به‌کاررفته یا با تأثیر بر فعالیت آنزیمی، رادیکال‌های آزاد تولیدشده را مهار می‌کند (Beladel *et al*., 2013). البته قابل ذکر است سلنیوم عنصر ضروری برای تمام گیاهان نیست، اما در گیاهان انباشتگر سلنیوم مانند سیر (*Allium sativum* L.) می‌تواند به‌عنوان عنصر مفید ایفای نقش کند (Pilon-Smits and Quinn, 2010). افزایش میزان آنتوسیانین ریحان با کاربرد سلنیوم ۵۰-۱ میلی‌گرم بر دسی‌متر مکعب خاک مشاهده شده است (Hawrylak-Nowak, 2008). کاهش پراکسیداسیون لیپیدها تحت تأثیر سلنیوم ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر در گیاه شاهی در شرایط تنش کادمیوم گزارش شده است (Y-Barrientes *et al*., 2012). کاربرد سلنیوم تا غلظت ١٦ میکرومولار در گیاه طالبی، اثرات بازدارنده تنش شوری را کاهش داده است (Hu *et al*., 2013). با توجه به اثرات تعدیل‌کننده سلنیوم در شرایط تنش، این مطالعه باهدف بررسی اثر سلنیوم بر شاخص‌های رشد، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر در شرایط سمیت کادمیوم انجام شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تیمار و چهار تکرار در آبان ماه ۱۳۹۲ در گلخانه

تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنرکرمان با دمای ثابت (۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی ٦۰ درصد انجام شد. تیمارها شامل، کاربرد کلرید کادمیوم با دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) از طریق خاک و محلول‌پاشی سلنات سدیم با سه سطح (صفر، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، یکماه پس از کاشت بود. گلدان‌های سه کیلوگرمی با مخلوط شن و خاک به نسبت ۲ به ۱ پر شده و سه حبه سیر درون آن‌ها کاشته و در نهایت یک گیاه نگهداری شد. رقم مورد آزمایش، سیر محلی 'شهداد' با دوره رشد ۸-٦ ماه و متوسط عملکرد ۱۰-۷ تن در هکتار بود و نمونه برداری جهت اندازه‌گیری صفات، ۱۱۰ روز پس از زمان کاشت شروع شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل، وزن تر و خشک اندام‌های گیاه، طول شاخساره و ریشه، کلروفیل و کاروتنوئید (Lichtenthaler, 1987)، آنتوسیانین (Wanger, 1979)، فلاونوئید در طول موج‌های ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۳۰ نانومتر (Krizek *et al*., 1998)، مالون دی آلدئید (Heath. and Packer, 1968) و سایرآلدئیدها (Meir *et al*., 1992)، پرولین (Bates *et al*., 1973)، قندهای احیاکننده (Somogyi, 1952)، نشت‌یونی (Kumar and Dey, 2011)، پراکسیدهیدروژن (Velikova *et al*., 2000)، محتوی نسبی رطوبت برگ (Smart and Bingham. 1974)، سوپراکسیددیسموتاز (Giannopolitis and Ries, 1977)، کاتالاز (Velikova *et al*., 2000)، آسکوربات پراکسیداز (Nakano and Asada, 1981)، گایاکول پراکسیداز (Plewa *et al*., 1991) وپلی‌فنل‌اکسیداز (Nicoli *et al*., 1991) بود. برای اندازه‌گیری مالون دی آلدئید غلظت با ضریب خاموشی ۱۵۵ مول بر سانتی‌متر و سایر آلدئیدها با روش مشابه، فقط طول موج جذبی ٤۵۵ و ضریب خاموشی٤۵۸۰۰ مول بر سانتی‌متر بود. برای اندازه‌گیری کلیه آنزیم‌ها ابتدا یک عصاره آنزیمی تهیه گردید به این صورت که ۰/۵ گرم از بافت تازه گیاهی با ۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار که حاوی پیرو لیدین ۱ درصد و اتیلن دی امین استیک اسید ۱ میلی‌مولار بود، در محیط یخ سائیده، با سانتریفیوژ یخچال دار به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه صاف شد. از قسمت شفاف رویی جهت سنجش انواع آنزیم‌ها استفاده شد. تجزیه آماری داده‌ها با نرم افزار SAS و آزمون GLM، مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و رسم شکل با نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده کادمیوم و سلنیوم بر صفات وزن تر و خشک شاخساره، ریشه و سوخ گیاه سیر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲ و ۱). کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک شاخساره، ریشه و سوخ و سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، افزایش این صفات را در مقایسه با شاهد در برداشت (جدول ۳). کاهش زیست توده تحت تأثیر کادمیوم در سایرگیاهان نیز مشاهده شده است (Dixit *et al*., 2001). همچنین گزارش شده، ٤۸ ساعت پس از کاربرد سولفات کادمیوم ۲ میکرومولار در گیاه لوبیا، پارامترهای زیست توده و رشد گیاه از جمله وزن خشک برگ کاهش معنی‌دار نشان داده است (Smeets *et al*., 2005). کادمیوم با افزایش گونه‌های واکنشگر اکسیژن، آسیب غشاها، بستن روزنه‌های گیاه، اختلال در انتقال الکترون و تجزیه مولکول آب، اختلال در ساخت کلروفیل، افزایش آنزیم‌های تجزیه پروتئین‌ها، اختلال متابولیسم نیتروژن، کاهش جذب آب و عناصرغذایی، رشد و زیست توده گیاه را کاهش می‌دهد (Benavides *et al*., 2005). گزارشات اعلام شده از بررسی گیاه منداب که سلنیوم در غلظت ۵ و ۱۰ میکرومولار اثرات افزاینده بر وزن تر و خشک ساقه و ریشه گیاه داشته ولی غلظت ۱۰۰ میکرومولار با اثرات بازدارنده همراه بوده است، با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (Khattab, 2004). سلنیوم با حفاظت از رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش جذب روی و مس، افزایش رطوبت گیاه، افزایش محتوی نشاسته کلروپلاست و تأخیر فرآیند پیری، سبب بهبود رشد و متابولیسم گیاه می‌شود (Pennanen *et al*., 2002). غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیترسلنیوم بر زیست توده گیاه سیر اثر بازدارنده داشت. افزایش غلظت سلنیوم کاهش پروتئین و زیست توده گیاه را سبب

جدول ۱– تجزیه واریانس اثر کلرید کادمیوم و سلنات سدیم بر رشد و زیست توده گیاه سیر (*Allium sativum*)

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		وزن تر شاخساره	وزن خشک شاخساره	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	وزن تر سوخ	وزن خشک سوخ	طول شاخساره	طول ریشه
کادمیوم	۱	۲/٤۰**	۰/۰۷**	۱/۹٦**	۰/۰٦۸۳**	٥/٦۰**	۰/۲۷**	۱٥٥**	٥٥/٥**
سلنیوم	۲	۰/٤٥**	۰/۰۱۱**	۰/۱۳**	۰/۰۰٥۸**	۰/٦۸**	۰/۰٥**	۷۱/٤**	۸/٥۰**
اثرمتقابل	۲	۰/۰۲۱^{ns}	۰/۰۰۱۳۲^{ns}	۰/۰۷۳۹^{ns}	۰/۰۰۰٦^{ns}	۰/۰٤۸ ^{ns}	۰/۰۰۳۱^{ns}	۹/٥۰**	۲/٥۳*
خطا	۱۷	۰/۰۳	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۷٥	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱٤	۰/۰۰۱	۱/۲	۰/٤۰
ضریب تغییرات		۱۰/۳	۸/۹	۸/۱	۷/۹۰	۷/۹۰	٦/۳۰	٤/۰۰	٥/۲۸

****، * و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار را نشان می‌دهد.**

جدول ۲– اثر ساده کلرید کادمیوم بر وزن تر و خشک شاخساره، ریشه و سوخ گیاه سیر (*Allium sativum*)

تیمار	غلظت	وزن ترشاخساره (گرم)	وزن خشک شاخساره (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه(گرم)	وزن تر سوخ(گرم)	وزن خشک سوخ (گرم)
کادمیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۰	۱/۹۰^{a}	۰/۲۲ ^{a}	۱/۳۰ ^{a}	۰/۲۰ ^{a}	۲/۰۰ ^{a}	۰/٦۰ ^{a}
	۱۰	۱/۳۰^{b}	۰/۱۲ ^{b}	۰/۷٦ ^{b}	۰/۱۰ ^{b}	۱/۰۰ ^{b}	۰/٤۰ ^{b}

میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون تی تست دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ٥ درصد هستند.

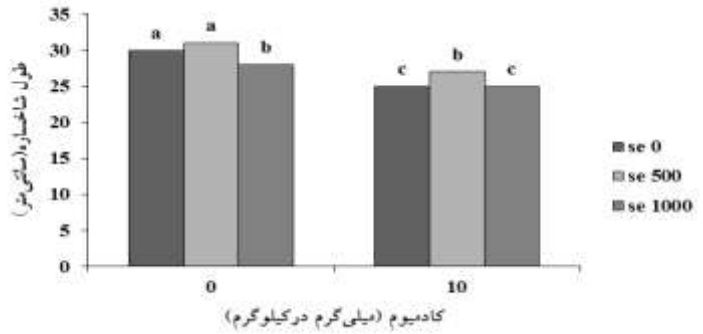
جدول ۳– اثر ساده سلنات سدیم بر وزن تر و خشک شاخساره، ریشه و سوخ گیاه سیر (*Allium sativum*)

تیمار	غلظت	وزن ترشاخساره (گرم)	وزن خشک شاخساره (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه(گرم)	وزن تر سوخ(گرم)	وزن خشک سوخ (گرم)
سلنیوم (میلی‌گرم در لیتر)	۰	۱/٦۰ ^{b}	۰/۱۹ ^{b}	۱/۱۰ ^{b}	۰/۱٤ ^{b}	۱/٥۰ ^{b}	۰/٥۲ ^{b}
	٥۰۰	۱/۹۰ ^{a}	۰/۲۲ ^{a}	۱/۲۰ ^{a}	۰/۱۸ ^{a}	۱/۸۰ ^{a}	۰/٥٦ ^{a}
	۱۰۰۰	۱/۳۰^{c}	۰/۱٤ ^{c}	۰/۹۰ ^{c}	۰/۱۱ ^{c}	۱/۲۰ ^{c}	۰/۳۷ ^{c}

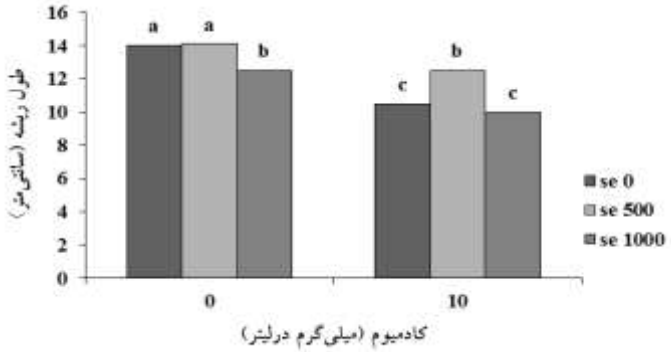
میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ٥ درصد هستند.

می‌شود که ممکن است به دلیل اثر تخریبی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و یا واکنش با گروه سولفیدریل برخی آنزیم‌ها، جانشین شدن به جای گوگرد در ساختار سولفولیپیدهای غشاء تیلاکوئیدها و تجزیه آنزیم روبیسکو (آنزیم کلیدی چرخه‌کالوین) باشد که فتوسنتز گیاه را نهایتاً کاهش می‌دهد (Pilon-Smits and Quinn, 2010).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثرساده و متقابل کادمیوم و سلنیوم بر صفات طول شاخساره و طول ریشه گیاه سیر معنی‌دار است (جدول ۱). طول ساقه و ریشه شاخص‌های بیانگر میزان رشد گیاه‌اند که در این تحقیق، تحت اثر کادمیوم



شکل ۱- اثر متقابل کادمیوم و سلنیوم بر محتوی آنتوسیانین، ستون‌های با حروف غیر مشابه بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.



شکل ۲- اثر متقابل کادمیوم و سلنیوم بر محتوی آنتوسیانین، ستون‌های با حروف غیر مشابه بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

کاهش یافتند (شکل ۱ و۲) و نتایج مشابه در گیاه برنج نیز حاکی از کاهش طول ریشه با کاربرد کلرید کادمیوم ۱۰ میکرومولار اعلام شده است (Choudhury and Panda, 2004). افزایش پروتئازها، بلوک کردن پروتئین و کاهش آنزیم نیترات ریداکتاز، کاهش محتوی آب گیاه و اختلال در عمل تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی و کاهش فتوسنتز می‌تواند دلایل عمده کاهش تقسیم و بزرگ شدن سلول در اندام‌های گیاه توسط کادمیوم باشد (Pandey and Sharma, 2002). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در مقایسه با تیماری که فقط کادمیوم دریافت کرده بود، سبب افزایش معنی‌دار طول شاخساره و طول ریشه گیاه شد، ولی در شرایط عادی با گیاه شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب کاهش طول شاخساره و ریشه در حالت عادی و عدم تأثیر معنی‌دار در شرایط تنش کادمیوم شد. سلنیوم در غلظت مناسب، با کاهش گونه‌های واکنشگر اکسیژن به طرق مختلف مانند رقابت با یون‌های کادمیوم در شکل معدنی سلنیوم و یا خنثی‌سازی مستقیم آن‌ها و تشکیل کلات با فلز و ممانعت از انتقال آن از ریشه به ساقه گیاه در شکل آلی سلنیوم در ترکیباتی نظیر گلوتاتیون، افزایش رطوبت بافت‌های گیاه و جذب عناصر غذایی مانند روی حفاظت از رنگیزه‌های فتوسنتزی و ممانعت از افت فتوسنتز بوسیله فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و سایر اثرات ترمیمی، اثرات مخرب کادمیوم بر رشد گیاه را کاهش داده است (Singh *et al.*, 2018). تخفیف کاهش ارتفاع ساقه گیاه شاهی، با کاربرد ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط تنش کادمیوم ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شده ولی سلنیوم ۲ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط تنش کادمیوم ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، اثرات تنش را افزایش داده که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (Y- Barrientes *et al.*, 2012).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده کادمیوم و سلنیومبر

محتوی کلروفیل و کاروتنوئید گیاه سیر معنی‌دار است (جدول ٤). برطبق نتایج این تحقیق، کادمیوم رنگیزه‌های فتوسنتزی را کاهش داده است (جدول ٥) که با نتایج بررسی گیاه لوبیا تحت تنش سولفات کادمیوم ۲ میکرومولار مطابقت دارد (Smeets *et al.*, 2005). این اثر منفی ممکن است با دخالت در ساخت آنزیم‌های پروتو کلروفیل ردوکتاز و آمینولولینیک سنتتاز و ممانعت از جذب آهن یا منیزیم اعمال شود (Jin *et al.*, 2008). سلنیوم ٥۰۰ میلی‌گرم در لیتر، سبب افزایش محتوی کلروفیل گیاه شده است (جدول ٦) که نتایج بررسی گیاه پیاز با غلظت ٥۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سلنیوم را تأیید می‌کند (Moldovan *et al.*, 2005).

ساخت و فعال‌سازی آنزیم‌ها، ساخت ترکیبات حیاتی مثل گلوتاتیون پراکسیداز و شبه تیول‌ها، بازسازی کلروپلاست، حفاظت از اسیدهای چرب، غشا و مهارراديکال‌های آزاد، فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها، در توجیه این اثر کافی است (Pennanen *et al.*, 2002). افزایش غلظت سلنیوم در این پژوهش رنگیزه‌های فتوسنتزی را کاهش داده است. افزایش غلظت سلنیوم با افزایش ترکیبات فنلی مانند کوماریک و فرولیک اسید و افزایش آنزیم کلروفیلاز تجزیه کلروفیل را افزایش داده، با جانشین شدن به جای منیزیوم در ساختار کلروفیل و مهار ساخت پورفوبیلینوژن سنتتاز و واکنش با گروه سولفیدریل آنزیم‌های آمینولولینیک اسید دهیدراتاز و پورفوبیلینوژن دآمیناز، سبب کاهش ساخت کلروفیل شده است (Hawrylak-Nowak, 2008). همچنین کادمیوم، کاروتنوئیدهای برگ گیاه سیر را کاهش داد، و نتایج مشابه نیز در برگ گیاه عدسک آبی تحت اثر کاربرد کادمیوم ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است (Hou *et al.*, 2007). تولید رادیکال آزاد توسط کادمیوم، کاروتنوئیدها را که یکی از انواع آنتی‌اکسیدان‌های گیاه بوده و نقش حفاظت از کلروفیل را دارد با افزودن اکسیژن به ساختار کاروتنوئید و تبدیل آن به گزانتوفیل کاهش می‌دهد (Kaur *et al.*, 2017). سلنیوم ٥۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش کاروتنوئید گیاه سیر در این پژوهش شده که با گزارشات بررسی گیاه فلفل دلمه‌ای حاکی از عدم تأثیر سلنیوم بر محتوی کاروتنوئید در شرایط تنش کادمیوم متناقض است (Mozafariyan *et al.*, 2014). شاید یکی از دلایل مهم این تناقض اینست که سیر یکی از گیاهان انباشتگر سلنیوم شناخته شده است (Pilon-Smits and Quinn, 2010). سلنیوم با بهبود متابولیسم گیاه در شرایط عادی و کاهش رادیکال‌های آزاد در برابر تنش می‌تواند سبب افزایش کاروتنوئید شود (Feng and Wei, 2012).

تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده و متقابل تیمارها بر محتوی آنتوسیانین برگ گیاه سیر معنی‌دار است (جدول ٤). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار آنتوسیانین نسبت به شاهد شده که با نتایج بررسی گیاه خردل مطابقت دارد (Kaur *et al.*, 2017). کادمیوم از طریق افزایش گونه‌های واکنشگر اکسیژن سبب افزایش آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی گیاه از قبیل آنتوسیانین می‌شود (Dixit *et al.*, 2001). آنتوسیانین یکی از آنتی‌اکسیدان‌های گیاه است که مهار گونه‌های فعال اکسیژن را یا با کلات کردن آهن (ممانعت از تولید هیدروکسیل) یا جمع‌آوری سوپر اکسید و پراکسید هیدروژن انجام و فلز سنگین را سم زدایی می‌کند (Hernandez *et al.*, 2006). کادمیوم با تأثیر برآنزیم فنیل آلانین آمینولیاز بر مسیر ساخت آنتوسیانین که آخرین مرحله ساخت فلاونوئیدهاست اثر می‌گذارد (Marrs and Walbot, 1997). بیوسنتز آنتوسیانین در گیاه تحت تأثیر عوامل درونی و بیرونی از جمله نور، کربوهیدرات، تنظیم کننده‌های رشد و تنش‌های وارده به گیاه است (Rahmat *et al.*, 2017). در شرایط سمیت کادمیوم، سلنیوم ٥۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آنتوسیانین را افزایش ولی غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آن را کاهش داد. افزایش میزان آنتوسیانین در گیاه سورگوم در شرایط تنش سرما، تحت اثر کاربرد سلنیوم ۳ و ٦ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است(Abbas, 2012). سلنیوم قادر است در موارد تنش آنتی‌کسیدان‌های گیاه را افزایش دهد (Feng and Wei, 2012). تأثیر بر آنزیم گلوتاتیون-اس-ترانسفراز به‌عنوان یک مولکول پیام رسان می‌تواند دلیل این تغییر باشد (Marrs and Walbot, 1997). سلنیوم با غلظت بالا سبب کاهش محتوی آنتوسیانین

جدول ٤- تجزیه واریانس اثر کلرید کادمیوم و سلنات سدیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر (*Allium sativum*)

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		کلروفیل کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	آنتوسیانین	فلاونوئید ۳۳۰	فلاونوئید ۳۰۰	فلاونوئید ۲۷۰
کادمیوم	۱	۲/٤۰**	۰/۰۷**	۱/۹٦**	۰/۰٦۸۳**	۵/٦۰**	۰/۲۷*	۱۵۵^{ns}	۵۵^{ns}
سلنیوم	۲	۰/٤۵**	۰/۰۱۱**	۰/۱۳**	۰/۰۰۵۸**	۰/٦۸**	۰/۰۵**	۷۱/٤**	۸/۵۰**
اثرمتقابل	۲	۰/۰۲۱^{ns}	۰/۰۰۱۳۲^{ns}	۰/۰۷۳۹^{ns}	۰/۰۰۰٦^{ns}	۰/۰٤۸**	۰/۰۰۳۱*	۹/۵^{ns}	۲/۵۳^{ns}
خطا	۱۷	۰/۰۳	۰/۰۰۰٤	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱٤	۰/۰۰۱	/۲	۰/٤۰
ضریب تغییرات		۱۰/۳	۸/۹	۸/۱	۷/۹۰	۷/۹۰	٦/۳۰	٤	۵/۲۸

****، * و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار را نشان می‌دهد.**

ادامه جدول ٤-

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		مالون دی آلدئید	سایر آلدئیدها	پرولین	قندهای احیاکننده	پراکسید هیدروژن	نشت یونی	محتوی نسبی رطوبت
کادمیوم	۱	۰/۱۳۳**	٤۸۷**	۱۰۲۱**	۲۲۵**	۱۵۲۰**	۰/۲۱**	۹۰۸**
سلنیوم	۲	۰/۰۰۵**	۳۰/۲**	۳۰/۸*	۵۵/۵**	۱۳۵**	۰/۰٤**	۲٦۷**
اثرمتقابل	۲	۰/۰۰۱*	۸/۱۰*	۵۱/۷**	۵/٦۲**	۲۹/۷^{ns}	۰/۰۰۲٤*	٤/۳٦^{ns}
خطا	۱۷	۰/۰۰۰٤	۱/٦۹	۷/۱۵	۰/٤۵	۲/٦۹	۰/۰۰۰۲	۳/٦۰
ضریب تغییرات		٦/۰۷	٤/۹۰	٦/۳۰	۵/٤۳	٦/۳۰	۹/۵٤	٤/۸۰

****، * و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار را نشان می‌دهد.**

جدول ۵- اثر ساده کلرید کادمیوم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر (*Allium sativum*)

غلظت	کلروفیل کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	فلاونوئید ۲۷۰ (درصد)	فلاونوئید ۳۰۰ (درصد)	پراکسید هیدروژن (میکرومول بر گرم وزن تر)	محتوی نسبی رطوبت (درصد)	تیمار
	(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)								
۰	۱/۸۰^{a}	۱/٤۰^{a}	۰/۵۰^{a}	۰/۳۸^{a}	۵۳^{a}	٤۰/۳^{a}	۱۷/٦^{a}	٤٤/۰۰^{a}	کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
۱۰	۱/۳۰^{b}	۱/۰۰^{b}	۰/۳۰^{b}	۰/۲۹^{b}	۵۲^{a}	۳۸/۸^{a}	۳٤/۱^{b}	۳۳/۰۰^{b}	

میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون تی تست دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

برگ گیاه سیر شد که می‌تواند مرتبط با ایجاد سمیت در گیاه باشد (Talukdar, 2013). در شرایط بدون تنش کادمیوم، سلنیوم در هر دو غلظت (۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) سبب افزایش آنتوسیانین نسبت به شاهد شد (شکل ۳). افزایش آنتوسیانین در شرایط بدون تنش در گیاه ریحان نیز مشاهده شده است (Hawrylak-Nowak, 2008). سلنیوم با بهبود

جدول ٦- اثر ساده سلنات سدیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر (*Allium sativum*)

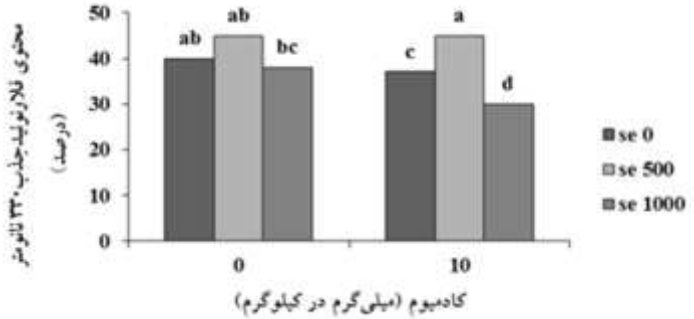
محتوی نسبی رطوبت (درصد)	پراکسید هیدروژن (میکرومول بر گرم وزن تر)	فلاونوئید ۳۰۰ (درصد)	فلاونوئید ۲۷۰ (درصد)	کاروتنوئیدها	کلروفیل b	کلروفیلa	کلروفیل کل	غلظت	تیمار
				(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)					
۳۸/۰۰^{b}	۲٦^{b}	۳۹ ^{b}	۵۳^{b}	۰/۳۵^{b}	۰/۸۰^{b}	۱/۲۰^{b}	۱/۵۰^{b}	۰	سلنیوم
٤۵/۰۰^{a}	۲۱/۵ ^{a}	٤٤ ^{a}	۵۵ ^{a}	۰/۳۹^{a}	۱/۰۰^{a}	۱/٤۰^{a}	۱/۹۰^{a}	۵۰۰	(میلی‌گرم
۳۳/۰۰^{c}	۳۰ ^{c}	۳٤/۵ ^{c}	۵۰ ^{c}	۰/۲۸^{c}	۰/٦۰^{c}	۱/۰۰^{c}	۱/۳۰^{c}	۱۰۰۰	بر لیتر)

میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

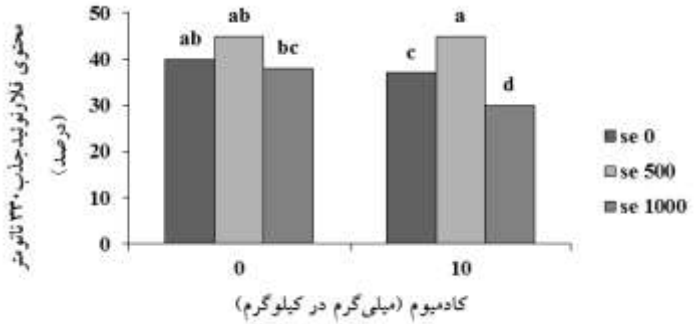
برگ گیاه سیر شد که می‌تواند مرتبط با ایجاد سمیت در گیاه باشد (Talukdar, 2013). در شرایط بدون تنش کادمیوم، سلنیوم در هر دو غلظت (۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) سبب افزایش آنتوسیانین نسبت به شاهد شد (شکل ۳). افزایش آنتوسیانین در شرایط بدون تنش در گیاه ریحان نیز مشاهده شده است (Hawrylak-Nowak, 2008). سلنیوم با بهبود سیستم فتوسنتز گیاه و افزایش قند، ساخت ترکیب گلیکوزیدی را آسان می‌کند (Beladel *et al*., 2013).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، فلاونوئید طول موج‌های ۲۷۰ و ۳۰۰ نانومتر، فقط تحت اثر ساده سلنیوم قرارگرفته است (جدول ٤). سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر این گروه از فلاونوئیدها را نسبت به شاهد افزایش داده در حالیکه سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب کاهش آن‌ها شده است (جدول ٤). فلاونوئیدها جزو ترکیبات فنلی و از مشتقات ترکیب ۱۵ کربنه فنیل پروپانوئید که از اسید آمینه فنیل آلانین تحت تأثیر عمل فنیل آلانین آمونیالیاز ساخته شده، در سلول‌های اپیدرم انباشته و اعمال متعددی نظیر حفاظت گیاه از اشعه ماوراء بنفش (طول موج ۲۸۰-٤۰۰ نانومتر)، گرده افشانی و انتقال اکسین را بر عهده دارند (Hernandez *et al*., 2006). قابل ذکر است که فلاونوئیدهای درون گیاه دو دسته اند: نهادی و القایی که مورد اخیر درموارد تنش تولید می‌شود (Agati *et al*., 2012). دخالت سلنیوم در سیستم ایمنی گیاه، سبب افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدان غیر آنزیمی از جمله فلاونوئیدها می‌شود (Feng and Wei, 2012). اثر ساده و متقابل تیمارها بر محتوی فلاونوئید در طول موج ۳۳۰ معنی‌دار است (جدول ۳). کادمیوم میزان فلاونوئید در طول موج ۳۳۰ نانومتر را در مقایسه با شاهد کاهش داد (شکل ٤). کاهش فلاونوئید تحت اثر کادمیوم با نقش این ترکیب در شرایط تنش ارتباط تنگاتنگی دارد (Lavid *et al*., 2001). فلاونوئید درون دو لایه لیپیدی غشا سلول به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند (Hernandez *et al*., 2006). فلاونوئید در مقابله با تنش اکسیداتیو یا به طور مستقیم در واکنش‌های اکسید و احیا شرکت می‌کند یا به طور غیر مستقیم با کلات کردن آهن رادیکال‌های آزاد را کاهش می‌دهد (Yang *et al*., 2007; Zhu *et al*., 2004). تجمع پلی‌آمین‌ها (مشتقات فلاونوئید) در شرایط تنش در واکوئل نیز مشاهده شده است (Zhu *et al*., 2004). کادمیوم علاوه بر تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن و مصرف فلاونوئیدها، مستقیماً بیوسنتز ترکیبات فنلی را از طریق کاهش آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز متأثر می‌سازد (Lavid *et al*., 2001). در شرایط سمیت کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، سبب افزایش فلاونوئید نسبت به تیمار کادمیوم شد که با نتایج بررسی گیاه گندم با کاربرد سلنیوم ۵ میلی‌گرم در لیتر تحت تنش سرما مطابقت دارد (Akladious, 2012). سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، در شرایط تنش، سبب کاهش معنی‌دار فلاونوئیدها شد (شکل ٤).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر محتوی مالون دی آلدئید و سایر آلدئیدها معنی‌دار است (جدول ٤). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار مالون دی آلدئید و



شکل ۳- اثر متقابل کادمیوم و سلنیوم بر محتوی آنتوسیانین، ستون‌های با حروف غیر مشابه بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.



شکل ٤- اثر متقابل کادمیوم و سلنیوم بر محتوی فلاونوئید جذب ۳۳۰ نانومتر، ستون‌های با حروف غیر مشابه بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

سایر آلدئیدها به میزان ٦۰ و ٤۵ درصد به ترتیب در برگ گیاه سیر در مقایسه با شاهد شده است (جدول ۷). در بررسی گیاه لوبیا تحت اثر کادمیوم نیز نتایج مشابهی گزارش شده است (Smeets *et al*., 2005). افزایش مالون‌ها که شاخص مهمی از سنجش میزان خسارت به غشا سلولی است، می‌تواند حاصل افزایش گونه‌های واکنشگر اکسیژن و تنش اکسیداتیو باشد (Dixit *et al*., 2008; Jin *et al*., 2001). رادیکال‌های آزاد، پیوند دوگانه اسید چرب را در حضور آنزیم هیدروپراکسیداز هدف قرار داده و سبب تولید مالون‌ها می‌شود یا با گروه متیل اسید چرب جایگزین و پراکسیداسیون غشاء را افزایش می‌دهد (Radotic *et al*., 2000). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به طرز معنی‌دار مالون دی آلدئید و سایر آلدئیدها را کاهش داد، که با نتایج بررسی گیاه شاهی مطابقت دارد و بیانگر نقش سلنیوم در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد است (Y-Barrientes *et al*., 2012; Beladel *et al*., 2013).

سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر اثر معنی‌داری در شرایط تنش و بدون تنش نداشت (جدول ۵). افزایش غلظت سلنیوم در گیاه عدس نیز نتایج رضایت‌بخشی نداشته است (Talukdar, 2013).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر میزان پرولین برگ معنی‌دار است (جدول ٤). کاربرد کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار پرولین در مقایسه با گیاه شاهد شد(جدول ۷). نتایج مشابه در گیاه نخود فرنگی گزارش شده است (Dixit *et al*., 2001). کادمیوم با کاهش محتوی آب درون گیاه و تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن سبب افزایش آنزیم پیرولین – ۵ – کربوکسیلات سنتتاز شده، تولید پرولین را افزایش می‌دهد (Jin *et al*., 2008). پرولین به سه طریق، تشکیل کمپلکس با کادمیوم، کاهش پراکسیداسیون غشاء به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان زیستی و تنظیم اسمزی، خسارت کادمیوم در گیاه را تعدیل می‌کند (Zengin and Munzuroglu, 2005).

جدول ۷- اثر متقابل کلرید کادمیوم وسلنات سدیم بر برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سیر (*Allium sativum*)

کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	سلنیوم (میلی‌گرم بر لیتر)	مالون دی آلدئید (میکروگرم بر گرم وزن تر)	سایر مالون‌ها (میکروگرم بر گرم وزن تر)	محتوی پرولین (میکرومول بر لیتر)	قند احیا کننده (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	نشت یونی (درصد)
	۰	۰/۲۸^{c}	۲۳^{cd}	۳۲ ^{d}	۱۵ ^{b}	۳۰ ^{e}
۰	۵۰۰	۰/۲۷ ^{c}	۲۱ ^{d}	۳۲^{d}	۱۸ ^{a}	۲۸ ^{e}
	۱۰۰۰	/۲۹ ^{c}	۲٤ ^{c}	٤۰ ^{c}	۱۱ ^{c}	۳۸^{d}
	۰	۰/٤۵^{a}	۳۱ ^{a}	٤۸^{b}	۸ ^{d}	۵۰ ^{b}
۱۰	۵۰۰	۰/۳۹^{b}	۲۷^{b}	۵۰ ^{a}	۱۱ ^{c}	٤۲ ^{c}
	۱۰۰۰	۰/٤٦ ^{a}	۳۳ ^{a}	٤۸^{b}	۷ ^{e}	٦۰ ^{a}

میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

افزایش میزان پرولین برگ در شرایط تنش پدیده‌ای بسیار متداول و تأیید کننده نقش‌های متنوع پرولین به خصوص حفظ تمامیت غشا است. در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان پرولین را به طرز معنی‌دار در مقایسه با گیاهی که فقط کادمیوم دریافت کرده بود افزایش داد. در گیاه برنج هم نتایج مشابه نتایج این تحقیق گزارش شده است (Shah *et al*., 2001). افزایش آنتی‌اکسیدان‌ها در شرایط تنش از اثرات سلنیوم در گیاه است (Pennanen *et al*., 2002). افزایش غلظت سلنیوم در این تحقیق نتوانسته بر کاهش خسارت سمت کادمیوم مؤثر باشد که با نتایج بررسی گیاه عدس همخوانی دارد (Talukdar, 2013).

تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده و متقابل تیمارها بر محتوی قندهای احیاکننده معنی‌دار است (جدول ٤). کادمیوم سبب کاهش قندهای احیاکننده دراین تحقیق شده است (جدول ۷). و با گزارشات اعلام شده حاکی از افزایش میزان قند در گیاه لوبیا در شرایط تنش شوری مغایرت دارد (Palma *et al*., 2004). کاهش یا افزایش قند در شرایط تنش در گیاهان مختلف مشاهده شده است که معمولاً افزایش قند ناشی از واکنش گیاه برای تنظیم اسمزی است (Akladious, 2012). افزایش میزان ساکارز در برگ‌های خیار تحت تنش فلز مس، بعنوان یک بازدارنده فتوسنتز مشاهده شده است (Alaoui-Sosse *et al*., 2004). کاهش قند در شرایط تنش فلز سنگین می‌تواند ناشی از کاهش فتوسنتز به دلیل کاهش رنگیزه‌ها، افزایش پراکسیداسیون چربی و اختلال در سیستم آنزیمی گیاه باشد (Hou *et al*., 2007). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، قندهای احیاکننده را افزایش داده که با افزایش محتوی قند تحت تأثیر سلنیوم در گیاه سورگوم در تنش سرما همخوانی دارد (Abbas, 2012). نقش سلنیوم در ساختار یا فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوی رطوبت نسبی برگ گیاه می‌تواند توجیه کننده افزایش قند باشد (Pennanen *et al*., 2002). سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، سبب کاهش میزان قند احیا در برگ گیاه سیر شده است (جدول ۵).

تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده کادمیوم و سلنیوم بر میزان پراکسید هیدروژن معنی‌دار است (جدول ٤). با کاربرد کادمیوم افزایش پراکسید هیدروژن در گیاه سیر مشاهده شده (جدول ۵). که با نتایج بررسی گیاه گوجه‌فرنگی مطابقت دارد (Hana *et al*., 2008). کادمیوم با بستن روزنه‌های گیاه افزایش میزان پراکسید هیدروژن که یکی از گونه‌های فعال اکسیژن و عامل خسارت به گیاه است را سبب می‌شود (Chien *et al*., 2001). سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان پراکسید هیدروژن در گیاه سیر را کاهش داد (جدول ٦). و مطالعات انجام شده روی گیاه برنج نیز نتایج مشابهی داشت (Shah *et al*., 2001). سلنیوم با افزایش ساخت یا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از

قبیل کاتالاز، قادرست پراکسید هیدروژن را درون بافت گیاه کاهش دهد (Feng and Wei, 2012).

تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر نشت یونی معنی‌دار است (جدول ٤). کادمیوم سبب افزایش میزان نشت یونی در برگ گیاه سیر شده (جدول ۷) که با نتایج بررسی دو رقم گیاه خردل تحت تأثیر کادمیوم ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم همخوانی دارد (Mobin and Khan, 2007). تنش فلزات سنگین با اثرات منفی بر ساختار غشاها نشت یونی را افزایش می‌دهد. سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، نشت یونی را در شرایط تنش کاهش داده و بررسی گیاه طالبی نیز نتایج مشابهی داشته است (Hu *et al*., 2013). سلنیوم در ساختمان سیستئین بعنوان یکی از مهمترین اجزا ساختاری غشاهای زیستی و گلوتاتیون که کنترل پراکسیداسیون چربی‌ها را مدیریت می‌کند به طور غیرمستقیم نشت یونی را کاهش می‌دهد (Marrs and Walbot, 1997). نقش حفاظتی سلنیوم با کاهش گونه‌های واکنشگر اکسیژن و حفظ غشاها در شرایط تنش ثابت شده است (Pennanen *et al*., 2002). افزایش غلظت سلنیوم سبب افزایش میزان نشت یونی در برگ گیاه سیر شده است که با نتایج بررسی گیاه عدس مطابقت دارد (Talukdar, 2013).

تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده کادمیوم و سلنیوم بر محتوی نسبی رطوبت برگ گیاه سیر معنی‌دار است (جدول ٤). محتوی نسبی رطوبت برگ تحت تأثیر کادمیوم کاهش یافت (جدول ۵). کاهش کارایی مصرف آب در گیاه نخودسبز با کاربرد کادمیوم ۰/۵ تا ۵ میکرومولارگزارش شده است (Popova *et al*., 2009). کادمیوم از طریق تنش اسمزی و آسیب به غشاها، سبب کاهش محتوی نسبی رطوبت برگ می‌شود (Benavides *et al*., 2005). آب عامل اساسی در تنظیم رشد بوده و بطورکلی تمام فرآیندهای گیاه مستقیم یا غیر مستقیم به آب وابسته است که جذب، انتقال و اتلاف آن میزان نهایی رطوبت بافت گیاه را تعیین می‌کند (Popova *et al*., 2009). در این تحقیق سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و اثرات التیام بخش، اثر منفی کادمیوم را بر محتوی رطوبت برگ کاهش داده است (جدول ٦). نتایج با مطالب گزارش شده از گیاه ذرت و لوبیا چشم بلبلی مغایر است (Ajiboso and Adenuga, 2012).

اثر ساده و متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز معنی‌دار است (جدول ٦). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم در مقایسه با تیمار شاهد شده است (جدول ۷). گزارشات بررسی گیاه گوجه‌فرنگی نتایج حاصل را تأیید می‌کند (Hana *et al*., 2008). آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز اولین سد دفاعی در برابر تولید رادیکال‌های آزاد است و رادیکال سوپر اکسید را به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کند و قابل ذکر است ترکیبات غیر آنزیمی در سم زدایی این آنیون در مقایسه با آنزیم سرعت کمی دارند (Alscher *et al*., 2002). نتیجه تحقیق با نتایج حاصل از بررسی گیاه برنج مطابقت دارد (Mei Chun and KAO, 2004). درشرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر فعالیت آنزیم را به طرز معنی‌دار افزایش داد افزایش دیسموتاز تحت اثر سلنیوم می‌تواند ناشی از اثر بر بیان ژن‌های مربوط به آنزیم، افزایش جذب مس یا افزایش سلنوپروتئین‌ها باشد (Seppanen *et al*., 2003). سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب کاهش فعالیت آنزیم شد. در شرایط بدون تنش سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با تیمار شاهد تفاوتی نداشت ولی غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم شده است که در گیاه طالبی نیز نتایج مشابه گزارش شده است (Hu *et al*., 2013).

تجزیه واریانس نشان داد اثر ساده و متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار است (جدول ۸). کاربرد کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار آنزیم در مقایسه با تیمار شاهد شده است (جدول ۹). در بررسی گیاه برنج نتایج متفاوت با این تحقیق گزارش شده که کاهش آنزیم می‌تواند ناشی از سمیت شدید فلز سنگین باشد (Shah *et al*., 2001). این تناقض می‌تواند ناشی از غلظت فلز، مرحله رشد گیاه، زمان کاربرد و اندام مورد مطالعه باشد (Wang *et al*., 2009). آنزیم کاتالاز با خنثی کردن پراکسید هیدروژن در دفاع آنتی اکسیدانی ایفای نقش می‌کند (Jin *et al*., 2008). نقش کاتالاز در کاهش تنفس

جدول ۸- تجزیه واریانس اثر کلرید کادمیوم و سلنات سدیم بر فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی گیاه سیر (*Allium sativum*)

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گایاکول پراکسیداز	پلی فنل اکسیداز	پراکسیداز
کادمیوم	۱	۱۹۱**	۰/۰۰۳۶**	۱۲۰**	۱۰/٤*	۰/۰۰٦**	۰/۰۰۱۸**
سلنیوم	۲	۱۹/٤**	۰/۰۰۰۳**	۱۷/۱**	۱/۸۰**	۰/۰۸۷**	۰/۰۰۰٤ ^{ns}
اثر متقابل	۲	۲۸/۸**	۰/۰۰۰٦**	۱۸/۷**	٦/۳۱**	۰/۰۲**	۰/۰۰۲ ^{ns}
خطا	۱۷	۰/۸۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۵۰	۰/۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات		۷/٤۰	۸/۵٤	۷/۷۰	۱۰/٤	۹/۵۰	۷/۷۰

****، * و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار را نشان می‌دهد.**

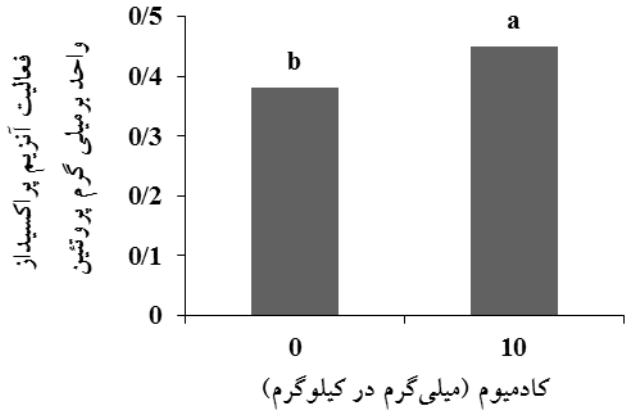
جدول ۹ - اثر متقابل کلرید کادمیوم و سلنات سدیم بر فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی گیاه سیر (*Allium sativum*)

کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	سلنیوم (میلی‌گرم بر لیتر)	سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گایاکول پراکسیداز	پلی فنل اکسیداز
		(واحد بر میلی‌گرم پروتئین)				
۰	۰	۸^{e}	۰/۰۲۵ ^{d}	۵ ^{a}	۲/۵ ^{d}	۰/۲۷ ^{d}
	۵۰۰	۹^{de}	۰/۰۲۸ ^{d}	۷/۸۰ ^{c}	۳/۵ ^{c}	۰/۳۲ ^{c}
	۱۰۰۰	۱۰^{d}	۰/۰۳۹ ^{c}	۸^{c}	۵/۰۰ ^{b}	۰/۳۸ ^{bc}
۱۰	۰	۱٤^{b}	۰/۰۵۵ ^{b}	۱۱ ^{b}	۵/۰۰ ^{b}	۰/٤۱ ^{b}
	۵۰۰	۱۸^{a}	۰/۰۷۸ ^{a}	۱٤ ^{a}	۵/۵۰ ^{a}	۰/٤۸ ^{a}
	۱۰۰۰	۱۲^{c}	۰/۰٤۹ ^{b}	۹ ^{c}	٤/۰۰ ^{c}	۰/۳۲ ^{c}

میانگین‌های دارای حروف غیرمشابه، بر اساس آزمون دانکن دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

نوری و نقطه جبران دی اکسیدکربن و محل فعالیتش علاوه بر بر پراکسی زوم، در سیتوزول، میتوکندری و گلی‌اکسی‌زوم ثابت شده است (Prasad *et al*., 1994). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، فعالیت آنزیم را به طرز معنی‌داری افزایش داد ولی افزایش غلظت سلنیوم باعث کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز شد که با نتایج بررسی گیاه طالبی مطابقت دارد (Hu *et al*., 2013). نقش سلنیوم در تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ثابت شده است (Beladel *et al*., 2013).

تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار است (جدول ۸). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار آنزیم در مقایسه با تیمار شاهد شده است (جدول ۹). ا فزایش آنزیم آسکوربات پراکسیداز گیاه طالبی با کاربرد کادمیوم با نتایج بررسی گیاه سیر مطابقت دارد (Hu *et al*., 2013). آسکوربات یکی از آنتی‌اکسیدان‌های مهم و مخزن نگهداری گلوتاتیون از طریق چرخه آسکوربات- گلوتاتیون است و با تولید گونه‌های واکنشگر اکسیژن در تنش فلزات سنگین، آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزایش می‌یابد (Hu *et al*., 2013). آنزیم آسکوربات پراکسیداز هم به‌عنوان مولکول پیام رسان عمل کرده و هم عمل مشابه آنزیم کاتالاز یعنی جمع آوری پراکسید هیدروژن را انجام می‌دهد (Feng and Wei, 2012). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، فعالیت آنزیم را در مقایسه با تیمار کادمیوم



شکل ۵- اثر ساده کادمیوم فعالیت آنزیم پراکسیداز، ستون‌های با حروف غیر مشابه بر اساس آزمون تی تست دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

افزایش داد ولی افزایش غلظت سلنیوم سبب کاهش آنزیم شده است که با بررسی گیاه شاهی مطابقت دارد (Y-Barrientes *et al.*, 2012). سلنیوم با در شرایط بدون تنش کادمیوم، هر دو غلظت سلنیوم فعالیت آنزیم را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داده است که تأیید کننده نتایج بررسی گیاه است افزایش آسکوربات پراکسیداز با غلظت مناسب سلنیوم در شرایط بدون تنش بیانگر نقش حفاظتی آسکوربات است (Hana *et al.*, 2008).

تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز معنی‌دار است (جدول ۸). در شرایط تنش کادمیوم، فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز به طرز معنی‌دار در مقایسه با شاهد افزایش یافته است (جدول ۹). گایاکول از ترکیبات فنلی و مشتقات متوکسی فنل در گیاهان می‌باشد که تحت اثر آنزیم گایاکول پراکسیداز کاهش گونه‌های واکنشگر اکسیژن را در تنش اکسیداتیو سبب می‌شود (Schutzendubel *et al.*, 2001). سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، سبب افزایش فعالیت آنزیم در مقایسه با تیماری که فقط کادمیوم دریافت کرده بود شد. نقش سلنیوم قابل ذکر است سلنیوم در هر دو غلظت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در شرایط بدون تنش، فعالیت آنزیم را به طرز معنی‌داری افزایش داد که می‌تواند ناشی از اثر سلنیوم بر دفاع داخلی گیاه و نقش حفاظتی ترکیبات فنلی باشد (Lavid *et al.*, 2001). اما افزایش غلظت سلنیوم در شرایط حضور کادمیوم فعالیت آنزیمی را کاهش داد که احتمالاً حاصل اثرات مخرب غلظت زیاد سلنیوم بوده است (جدول ۹)

تجزیه واریانس آنزیم پلی‌فنل اکسیداز نشان داد، اثر ساده و متقابل تیمارها بر فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز معنی‌دار است (جدول ۸). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار آنزیم در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول ۹). تبدیل ترکیبات فنلی محلول به لیگنین که اولین سد مکانیکی دفاع گیاه در هنگام تنش است که بر عهده این آنزیم می‌باشد (Dixit *et al.*, 2001). در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز را نسبت به تیمار کادمیوم افزایش داد که بیانگر نقش سلنیوم در فعال سازی سیستم دفاعی گیاه بوده و گزارشات مشابه نیز این مطلب را تأیید می‌کند (Lavid *et al.*, 2001). اثرات منفی افزایش غلظت سلنیوم در گیاه سیر در این پژوهش با نتایج بررسی گیاه ریحان همخوانی دارد (Hawrylak-Nowak, 2008).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر ساده کادمیوم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار است (جدول ۸). کادمیوم سبب افزایش معنی‌دار پراکسیداز در مقایسه با تیمار شاهد شده است (شکل ۵). پراکسیدازها در تنش فلزات سنگین نقش اصلی در مهار رادیکال‌های آزاد دارند (Radotic *et al.*, 2000; Schutzendubel *et al.*, 2001). علت کاهش آنزیم پراکسیداز در گیاه کلم، در شرایط تنش کادمیوم ناشی از کاهش جذب آهن که در ساختار این آنزیم وجود دارد گزارش شده است

(Pandey and Sharma, 2002). در حالیکه افزایش پراکسیداز تحت اثر کادمیوم در این تحقیق می‌تواند حاصل افزایش گونه‌های واکنشگر اکسیژن باشد (Schutzendubel *et al*., 2001). کاهش آسکوربات پراکسیداز و افزایش گایاکول پراکسیداز در گیاه برنج تحت تنش کادمیوم گزارش شده ست (Shah *et al*., 2001).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، کادمیوم ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سبب کاهش زیست توده و رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوی نسبی رطوبت، قند احیاکننده، فلاونوئیدها و افزایش مالون دی آلدئید و سایر آلدئیدها، آنتوسیانین، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین، پراکسیدهیدروژن و نشت یونی در برگ گیاه سیر شد. در شرایط تنش کادمیوم، سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و کاهش اثرات تخریبی کادمیوم شده که حاصل فعال شدن سیستم دفاعی گیاه سیر است. قابل ذکر است در شرایط بدون کادمیوم، مصرف سلنیوم ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، رنگیزه‌های فتوسنتز، قنداحیاء، محتوی رطوبت نسبی، آنتوسیانین و آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز وگایاکول پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز را افزایش داده که می‌تواند با ظرفیت انباشت سلنیوم توسط گیاه سیرمرتبط باشد. سلنیوم ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر اثرات رضایت بخشی نداشته است.

منابع

قربانعلی، م. و کیاپور، ع. (۱۳۹۱) بررسی اثر غلظت‌های مختلف مس بر رنگیزه‌ها و فعالیت سیستم‌های دفاعی غیرآنزیمی و آنزیمی در گیاه خرفه (*Purtulaca oleracea* L.). فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران۲: ۲۴۷-۲۳

Abbas, S. M. (2012) Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. Journal of Stress Physiology and Biochemistry 8: 268-288.

Agati, G., Azzarello, E., Pollastri, S. and Tattini, M. (2012) Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance. Plant Science 196: 67-76.

Ajiboso, S. O. and Adenuga, G. A. (2012) The influence of zinc and selenium on some biochemical responses of *Vigna unguiculata* and *Zea mays* to water deficit condition and rehydration. Biokemistri 24: 108-115.

Akladious, S. A. (2012) Influence of different soaking times with selenium on growth, metabolic activities of wheat seedlings under low temperature stress. African Journal of Biotechnology 11: 14792-14804.

Alaoui-Sosse, B., Genet, P., Vinit-Dunand, F., Toussaint, M. L., Epron, D., and Badot, P. M. (2004) Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. Plant Science 166: 1213-1218.

Alscher, R. G., Erturk, N. and Heath, L. S. (2002) Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. Journal of Experimental Botany 53: 1331-1341.

Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.

Beladel, B., Nedjimi, B., Mansouri, A., Tahtat, D., Belamri, M., Tchanchane, A., Khelfaoui, F. and Benamar, M. E. A. (2013) Selenium content in wheat and estimation of the selenium daily intake in different regions of Algeria. Applied Radiation and Isotopes 71: 7-10.

Benavides, M. P., Gallego, S. M. and Tomaro, M. L. (2005) Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology 17: 21-34.

Chien, H. F., Wang, J. W., Lin, C. C. and Kao, C. H. (2001) Cadmium toxicity of rice leaves is mediated through lipid peroxidation. Plant Growth Regulation 33: 205-213.

Choudhury, S. and Panda, S. K. (2004) Role of salicylic acid in regulating cadmium induced oxidative stress in *Oryza sativa* L. roots. Bulgarian Journal of Plant Physiology 30: 95-110.

Dixit, V., Pandey, V. and Shyam, R. (2001) Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad). Journal of Experimental Botany 52: 1101-1109.

Feng, R. W. and Wei, C. Y. (2012) Antioxidative mechanisms on selenium accumulation in *Pteris vittata* L., a potential selenium phytoremediation plant. Plant Soil and Environment 58: 105-110.

Giannopolitis, C. N. and Ries, S. K. (1977) Superoxide dismutases II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. Plant Physiology 59: 315-318.

Hana, S., Rachid, R., Ibtissem, S., Houria, B. and Mohammed-Reda, D. (2008) Induction of anti-oxidative enzymes by cadmium stress in tomato (*Lycopersicon esculentum*). African Journal of Plant Science 2: 072-076.

Hawrylak-Nowak, B. (2008) Enhanced selenium content in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) by foliar fertilization. Vegetable Crops Research Bulletin 69: 63-72.

Heath, R. L. and Packer, L. (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics 125: 189-198.

Hernandez, I., Alegre, L. and M-Bosch, S. (2006) Enhanced oxidation of flavan-3-ols and proanthocyanidin accumulation in water-stressed tea plants. Phytochemistry 67: 1120-1126.

Hou, W., Chen, X., Song, G., Wang, Q. and Chang, C. C. (2007) Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (*Lemna minor*). Plant Physiology and Biochemistry 45: 62-69.

Hu, J. Z., Shi, G. X., Xu, Q. S., Wang, X., Yuanand, Q. H. and Du, K. H. (2007) Effects of Pb^{2+} on the active oxygen-scavenging enzyme activities and ultrastructure in *Potamogeton crispus* leaves. Russian Journal of Plant Physiology 54: 414-419.

Hu, K. L., Zhang, L., Wang, J. T. and You, Y. (2013) Influence of selenium on growth, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activity in melon (*Cucumis melo* L.) seedlings under salt stress. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 82: 193-197

Jin, X., Yang, X., Islam, E., Liu, D. and Mahmood, Q. (2008) Effects of cadmium on ultrastructure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii* Hance. Journal of Hazardous Materials 156: 387-397.

Kaur, P., Bali, S., Sharma, A., Vig, A. P. and Bhardwaj, R. (2017) Effect of earthworms on growth, photosynthetic efficiency and metal uptake in *Brassica juncea* L. plants grown in cadmium-polluted soils. Environmental Science and Pollution Research 24: 452-456

Khattab, H. (2004) Metabolic and oxidative responses associated with exposure of *Eruca sativa* (Rocket) plants to different levels of selenium. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 6:1101-1106.

Krizek, D. T., Britz, S. J. and Mirecki, R. M. (1998) Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of *Lactuca sativa* L. cv. New Red Fire lettuce. Physiologia Plantarum 103: 1-7.

Kumar, S. and Dey, P. (2011) Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry. Cientia Horticulturae 127: 318-324.

Lavid, N., Schwartz, A., Lewinsohn, E. and Tel-Or, E. (2001) Phenols and phenol oxidases are involved in cadmium accumulation in the water plants *Nymphoides peltata* (Menyanthaceae) and *Nymphaeae* (Nymphaeaceae). Planta 214: 189-195.

Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology 148: 350-382.

Marrs, K. A. and Walbot, V. (1997) Expression and RNA splicing of the maize glutathione S-transferase Bronze2 gene is regulated by cadmium and other stresses. Plant Physiology 113: 93-102.

Mei Chun, K. U. O. and KAO, C. H. (2004) Antioxidant enzyme activities are upregulated in response to cadmium in sensitive, but not in tolerant, rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Botanical Bulletin of Academia Sinica 45: 291-299.

Meir, S., Philosoph-Hadasand, S. and Aharoni, N. (1992) Ethylene-increased accumulation of fluorescent lipid-peroxidation products detected during senescence of parsley by a newly developed method. Journal of the American Society for Horticultural Science 117: 128-132.

Mobin, M. and Khan, N. A. (2007) Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress. Journal of Plant Physiology 164: 601-610.

Moldovan, C., Ianculov, I., Hadaruga, N. G., Dumbrava, D., Crainiceanu, E., Druga, M., Alda, L. and Moldovan, G. Z. (2009) Influence of chlorophyll content of onion (*Allium cepa*) after selenium and zinc adding. Journal of Agroalimentary Processes and Technologies 15:437-440.

Mozafariyan, M., Shekari, L., H-Nowak, B. and Kamelmanesh, M. M. (2014) Protective role of Selenium on pepper exposed to Cadmium stress during reproductive stage. Biological Trace Element Research 160: 97-107.

Nakano,Y. and Asada, K. (1981) Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology 22: 867-880.

Nicoli, M. C., Elizalde, B. E., Pitottiand, A. and Lerici, C. R. (1991) Effect of sugars and maillard reaction products on polyphenol oxidase and peroxidase activity in food. Journal of Food Biochemistry 15: 169-184.

Palma, F., Lluch, C., Iribarne, C., Garrido, J. M. G and Garcia, N. A. T. (2009) Combined effect of salicylic acid and salinity on some antioxidant activities, oxidative stress and metabolite accumulation in *Phaseolus vulgaris*. Plant Growth Regulation 58: 307-316.

Pandey, N. and Sharma, C. P. (2002) Effect of heavy metals Co^{2+}, Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage. Plant Science 163: 753-758.

Pennanen, A., Tailin, X. and Hartikainen, H. (2002) Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. Journal of Applied Botany 76: 66-76.

Pilon-Smits, E. A. and Quinn, C. F. (2010) Selenium Metabolism in Plants: Cell Biology of Metals and Nutrients: Springer, Berlin Heidelberg.

Plewa, M. J., Smith, S. R. and Wagner, E. D. (1991) Diethyldithiocarbamate suppresses the plant activation of aromatic amines into mutagens by inhibiting tobacco cell peroxidase. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis 247: 57-64.

Popova, L. P., Maslenkova, L. T., Yordanova, R. Y., Ivanova, A. P., Krantev, A. P., Szalai, G. and Janda, T. (2009) Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. Plant Physiology Biochemistry 47: 224-231.

Prasad, T. K., Anderson, M. D., Martinand, B. A. and Stewart, C. R. (1994) Evidence for chilling-induced oxidative stress in maize seedlings and a regulatory role for hydrogen peroxide. The Plant Cell 6: 65-74.

Radotic, K., Ducic, T. and Mutavdzic, D. (2000) Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium.Environmental and Experimental Botany 44: 105-113.

Rahmat, S., Hajiboland, R. and Sadeghzade, N. (2017) Selenium delays leaf senescence in oilseed rape plants. Photosynthetica 55: 338-350.

Schutzendubel, A., Schwanz, P., Teichmann, T., Gross, K., angenfeld-Heyser, R. L., Godbold, D. L. and Polle, A. (2001) Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots. Plant Physiology 127: 887-98.

Seppanen, M., Turakainen, M. and Hartikainen, H. (2003) Selenium effects on oxidative stress in potato. Plant Science 165: 311-319.

Shah, K., Kumar, R. G., Verma, S. and Dubey, R. S. (2001) Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. Plant Science 161: 1135-1144.

Singh, R., Upadhyay, A. K. and Singh, D. P. (2018) Regulation of oxidative stress and mineral nutrient status by selenium in arsenic treated crop plant *Oryza sativa*. Ecotoxicology and Environmental Safety 148: 105-113.

Smart, R. E. and Bingham, G. E. (1974) Rapid estimates of relative water content. Plant Physiology 53: 258-260.

Smeets, K., Cuypers, A., Lambrechts, A., Semane, B., Hoet, P.,VanLaere, A. and Vangronsveld, J. (2005) Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. Plant Physiology and Biochemistry 43: 437-444.

Somogyi, M. (1952) Determination of reducing sugars by Nelson–Somogyi method. Journal of Biological Chemistry 200: 245.

Talukdar, D. (2013) Selenium priming selectively ameliorates weed–induced phytotoxicity by modulating antioxidant defense components in Lentil (*Lens culinaris* Medik.) and Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.). Annual Review Research in Biology 3:195-212.

Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. Plant Science 151: 59-66.

Wang, W. B., Kim, Y. H., Lee, K. Y., Kim, H. S., Deng, X. P. and Kwak, S. S. (2009) Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. Plant Physiology and Biochemistry 47: 570-577.

Wanger, G. J. (1979) Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanins in protoplasts. Plant Physiology 64: 88-93.

Y- Barrientes, E., Rodriguez Flores, C. and Wrobel, K. (2012) Impact of cadmium and selenium exposure on trace elements, fatty acids and oxidative stress in *Lepidium sativum*. Journal of the Mexican Chemical Society 56: 03-09.

Yang, Y. J., Cheng, L. M. and Liu, Z. H. (2007) Rapid effect of cadmium on lignin biosynthesis in soybean roots. Plant Science 172: 632-639.

Zengin, F. K. and Munzuroglu, O. (2005) Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica 47: 157-164.

Zhu, Y. G., Huang, Y., Hu, Y., Liu, Y. and Christie, P. (2004) Interactions between selenium and iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) in solution culture. Plant and Soil 261: 99-105.

Effect of selenium on growth, physiological and biochemical indices of garlic plant (*Allium sativum*) under cadmium toxicity

Malihe Namdar[1], Sayed Mohammad Javad Arvin[1*] and NadiaBahremand[2]

[1]Department of Horticultural science and engineering, Agricultural Faculty, Shahid Bahonar University of kerman
[2]Department of Horticultural science and engineering, Agricultural Faculty, University of Jiroft.
(Received: 19/09/2017, Accepted: 10/02/2018)

Abstract

Increasing the tolerance of plants to biotic and abioticts stresses is an important and debatable subject. Selenium can play a role in mitigating the effects of stress. For this purpose, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with two treatments, cadmium chloride including two levels (0 and 10 mg /kg) in soil and sodium selenate involved three levels (0, 500 and 1000 mg /L) as foliar applications with four replication at Shahid Bahonar University of Kerman Research Greenhouse in 2012. The results indicated that cadmium decreased plant biomass, photosynthetic pigments, relative wet content of leaves and increased hydrogen peroxide, but selenium 500 mg /L caused increasing fresh and dry shoot, root and bulb of garlic plant, chlorophyll content, carotenoids content, relative water content and decreasing hydrogen peroxide respectively. Selenium 500 mg /L under cadmium stress decreased malondialdehyde (15.3%) and ion leakage (14%) whereas increased shoots length (16.1%), root length (19%), proline (11%), reduced sugars (25%), superoxide dismutase (22.2%), catalase (41.8%), ascorbate peroxidase (27%), guaiacol peroxidase (10.1%), polyphenol oxidase (17 %) and non-enzymatic antioxidants anthocyanin (28%) and flavonoid 330 nm (21%) in plant leaves, compared to the cadmium treatment. In most cases, selenium 1000 mg /L had an inhibitory effect. According to the results, selenium 500 mg /L could play a role in reducing the destructive effects of cadmium and activating defense system of the garlic plant under cadmium toxicity.

Keywords: Antioxidant, Biomass, Enzyme, Ion leakage, Proline

***Corresponding author, Email: smjArvin@gmail.com**.