تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد دوازدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۸
۲۹۱-۳۰۵
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2018.1285.1263

بررسی پاسخ گندم (*Triticum aestivum* L.) به مصرف سلنیم تحت شرایط تنش کادمیم

بصیر عطاردی[۱و۲]، امیر فتوت[۱*]، رضا خراسانی[۱]، پیمان کشاورز[۳]

۱. گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان جنوبی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بیرجند، ایران.

۳. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۰۷

چکیده

بر اساس برخی گزارش‌های، متوسط کادمیم در برخی خاک‌ها و محصولات زراعی ایران از مقادیری که توسط سازمان خواروبار کشاورزی و سازمان بهداشت جهانی به‌عنوان سطح مجاز معرفی‌شده، بیشتر است. در دهه‌های اخیر، به‌منظور کاهش اثرات مخرب کادمیم در گیاهان استفاده از عناصری نظیر سلنیم که خاصیت آنتاگونیستی با کادمیم دارند موردتوجه قرارگرفته‌اند. پژوهش حاضر با هدف بررسی پاسخ گیاه گندم (رقم فلات) به مصرف سلنیم در شرایط تنش کادمیم انجام شد. به این منظور، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و در شرایط گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل چهار سطح سلنیم (۰، ۰/۵، ۱ و ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سه سطح کادمیم (۰، ۵ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. صفات موردبررسی شامل غلظت کلروفیل *a*، *b*، کاروتنوئید، پرولین، فعالیت آنزیم کاتالاز و وزن خشک ساقه بود. نتایج نشان داد با افزایش غلظت کادمیم در خاک، محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و فعالیت آنزیمی گندم کاهش ولی میزان پرولین افزایش یافت. در مقابل، گیاهانی که در معرض تنش کادمیم قرار داشتند و هم‌زمان غلظت‌های کمی از سلنیم نیز دریافت کردند در مقایسه با گیاهان مشابه که سلنیم دریافت نکردند محتوی کلروفیل *b* و فعالیت آنزیمی بیشتری داشتند. بااین‌وجود، سلنیم تأثیر مثبتی بر غلظت کاروتنوئید، کلروفیل *a* و وزن خشک ساقه گندم نداشت. ضمناً غلظت‌های زیاد سلنیم نه‌تنها تأثیر سودمندی بر صفات موردبررسی نداشت بلکه باعث کاهش غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی و وزن خشک ساقه گردید. درمجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط تنش کادمیم، مصرف غلظت‌های مناسبی از سلنیم باعث بهبود برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گندم می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: **آنتاگونیست، رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، سلنیم، عناصر سنگین، کاتالاز**

مقدمه

با گسترش فعالیت‌های صنعتی، غلظت عناصر سنگین ازجمله کادمیم در آب‌وخاک افزایش‌یافته به‌طوری‌که غلظت این عنصر در برخی از اراضی زراعی به حد سمیت برای گیاهان زراعی رسیده است (Yan et al., 2016). خاک‌های زراعی ایران نیز مانند سایر کشورهای جهان با درجات کم تا متوسط آلوده به کادمیم می‌باشند. بر اساس برخی گزارش‌ها، متوسط کادمیم در برخی محصولات زراعی کشور ما، از مقادیری که توسط سازمان خواروبار کشاورزی (FAO) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) به‌عنوان سطح مجاز معرفی‌شده، بیشتر است (Maleki et al., 2009).

اثرات سوء ناشی از کادمیم در گیاهان برای اولین بار در گوجه‌فرنگی گزارش شد (Jing et al., 2005). از علائم سمیت کادمیم در گیاهان می‌توان به زرد شدن برگ‌ها، قهوه‌ای شدن حاشیه برگ‌ها، سوختگی، قرمزی رگبرگ‌ها و

* نگارنده پاسخگو: امیر فتوت. پست الکترونیک: afotovat@um.ac.ir

دمبرگ‌ها، کاهش و توقف رشد ریشه و چوب‌پنبه‌ای شدن و صدمه دیدن ساختار داخلی و خارجی ریشه اشاره کرد (Kabata-Pendias, 2010). این عنصر به دلیل ممانعت از تشکیل آنتوسیانین و رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی برای گیاهان سمی بوده و باعث کاهش فتوسنتز در گیاه می‌شود (Rascio et al., 2008; Wang et al., 2014) به‌علاوه به دلیل میل ترکیبی بالا با گروه تیول موجود در آنزیم‌ها و دیگر پروتئین‌ها، باعث اختلال در فعالیت آنزیمی گیاهان می‌شود (Salt et al., 1995). از طرفی کادمیم با افزایش تولید گروه‌های فعال اکسیژن[1] و نیز پراکسید هیدروژن در گیاه سبب بروز تنش‌های اکسیداتیو[2] می‌شود (Nagajyoti et al., 2010; Gallego et al., 2012; Abbas et al., 2017).

برای کاهش جذب و همچنین کاهش اثرات مخرب کادمیم در گیاهان، روش‌های مختلفی ازجمله گیاه‌پالایی[3] ارائه شده است (Martínez-Alcalá et al., 2016). بااین‌وجود، در سال‌های اخیر بیشتر بر استفاده از روش‌هایی که جنبه کاربردی داشته و مقرون‌به‌صرفه باشند تأکید شده است. به‌عنوان‌مثال، استفاده از عناصری که خاصیت آنتاگونیستی با کادمیم دارند ازجمله روش‌هایی هستند که ویژگی‌های کاربردی بودن و صرفه اقتصادی را دارا می‌باشند (Khan et al., 2015). در بین عناصر غذایی مورداستفاده به این منظور، اگرچه عناصری نظیر کلسیم موردتوجه قرار داشته‌اند ولی در دهه‌های اخیر استفاده از سلنیم به دلیل نقش چندگانه این عنصر توجه محققان را جلب کرده است (Huang et al., 2017). اگر کمبود سلنیم در خاک و محصولات کشاورزی و نقش سلنیم در سلامت انسان و از طرف دیگر تأثیر مثبت این عنصر در کاهش اثرات تنش‌های زنده و غیرزنده بر گیاهان مدنظر قرار گیرد آنگاه اهمیت این عنصر در مقایسه با سایر عناصر بیش‌ازپیش مشخص خواهد گردید (Lin et al., 2012; Ahmad et al., 2016).

مطالعات نشان داده است که سلنیم اثرات سودمندی بر برخی خصوصیات گیاه دارد. کوتاب و همکاران (Qutab et al., 2017) تأثیر سلنیم را در گیاه ذرت در معرض تنش کادمیم مطالعه کردند. نتایج بررسی آنان نشان داد مصرف سلنیم، میزان رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و فعالیت کاتالاز گیاهان شاهد و همچنین گیاهان در معرض غلظت‌های پایین کادمیم را افزایش داد. بااین‌حال در غلظت‌های زیاد کادمیم (۱۰۰ میکرومولار) سلنیم قادر نبود اثرات منفی این عنصر بر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را خنثی کند. بر اساس یافته‌های شکاری و همکاران (Shekari et al., 2017) اضافه کردن سلنیم از منبع سلنیت سدیم با غلظت ۷ میکرومولار، کاهش کلروفیل در گیاهان فلفل که با ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار کادمیم تیمار شده بودند را جبران نمود و باعث افزایش غلظت کلروفیل گردید. در این مطالعه، تأثیر مثبت سلنیم بر افزایش میزان کاروتنوئیدها نیز مشاهده شد. ضمناً فعالیت آنزیم کاتالاز گندم نیز که با اعمال تیمار کادمیم کاهش یافته بود با مصرف ۳ و ۷ میکرومولار سلنیم بهبود پیدا کرد. نتایج مشابهی از نقش مثبت سلنیم در جبران اثرات منفی کادمیم بر میزان کلروفیل و کاروتنوئید در سایر گیاهان نیز گزارش شده است (Hawrylak-Nowak et al., 2014; Sun et al., 2016).

با توجه به این‌که در خصوص نقش حفاظتی عنصر سلنیم در گندم و اثر آنتاگونیستی آن بر کادمیم، در شرایط خاکی ایران اطلاعات منتشرشده کمی وجود دارد پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر سلنیم بر برخی خصوصیات گندم در شرایط تنش کادمیم انجام شد. ضمناً با توجه به این‌که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهان، شاخص مناسبی برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای آهن در آن‌ها است (De Santiago et al., 2011; Mann et al., 2017) لذا به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر وضعیت آهن در گندم، فعالیت آنزیم مذکور نیز اندازه‌گیری شد تا در پژوهش‌های بعدی مورداستفاده قرار گیرد. درمجموع نتایج این مطالعه به بهبود یا توسعه راهبردهای کاهش اثرات منفی تنش کادمیم در گندم کمک خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در زمستان ۱۳۹۴ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در پردیس دانشکده کشاورزی با مشخصات جغرافیائی ۳۶/۲ درجه شمالی و ۵۹/۴ درجه شرقی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل و در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل چهار سطح سلنیم (۰، ۰/۵، ۱ و ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از منبع سلنیت سدیم و سه سطح

[1] Reactive oxygen species

[2] Oxidative stress

[3] Phytoremediation

کادمیم (۰، ۵ و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از منبع نیترات کادمیم بود.

آماده‌سازی نمونه‌های خاک

برای اجرای این آزمایش یک خاک لومی دارای مقدار سلنیم پائین، از مزرعه بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی انتخاب شد. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیائی این خاک در جدول ۱ آمده است. pH در گل اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، پتاسیم قابل‌استفاده به روش چپمن و پرات (Chapman and Pratt, 1961) و با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر مدل Jenway- PFP7 اندازه‌گیری شد. فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن و همکاران (Olsen et al., 1982) و با رنگ‌سنجی به روش مورفی و رایلی (Murphy and Riley, 1962) توسط اسپکتروفتومتر CECIL مدل ۲۰۰۰، کربن آلی به روش اکسایش با دی‌کرومات (Walkley and Black, 1934) و رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی در مکش ۳۳ کیلو پاسکال با دستگاه صفحات فشاری اندازه-گیری شد. درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید و عناصر کم‌مصرف قابل‌استفاده روی، منگنز و آهن به روش لیندزی و نرول (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). برای اندازه‌گیری کادمیم قابل‌استفاده خاک نیز از روش سلطانپور و شواب (Soltanpour and Schwab, 1977) استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات خاک مورداستفاده در آزمایش

Table 1 Soil characteristics used in the experiment

Characteristic	ویژگی	Unit واحد	Value مقدار
pH	**اسیدیته**	-	8.1
Clay	**رس**	%	13
Sand	**شن**	%	33
Silt	**سیلت**	%	54
O.C	**کربن آلی**	%	0.63
N	**نیتروژن**	%	0.064
ECe	**قابلیت هدایت الکتریکی**	$dS\ m^{-1}$	0.95
P (Available)	**فسفر قابل‌دسترس**	$mg\ kg^{-1}$	8.4
K (Available)	**پتاسم قابل‌دسترس**	$mg\ kg^{-1}$	219
Zn (Available)	**روی قابل‌دسترس**	$mg\ kg^{-1}$	1.58
Mn (Available)	**منگنز قابل‌دسترس**	$mg\ kg^{-1}$	10.28
Fe (Available)	**آهن قابل‌دسترس**	$mg\ kg^{-1}$	4.43
Na (Soluble)	**سدیم محلول**	$mg\ kg^{-1}$	18.4
Cl (Soluble)	**کلر محلول**	$mg\ kg^{-1}$	17
Ca (Soluble)	**کلسیم محلول**	$mg\ kg^{-1}$	36
SO4 (Soluble)	**سولفات محلول**	$mg\ kg^{-1}$	72
Se (Available)	**سلنیم قابل‌دسترس**	$\mu g\ kg^{-1}$	2.63
Cd (Available)	**کادمیم قابل‌دسترس**	$\mu g\ kg^{-1}$	30

مقدار ۲۱۶ کیلوگرم از خاک انتخاب‌شده جهت کشت گلدانی جمع‌آوری گردید و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری در دسته‌های ۱۸ کیلوگرمی توزین و روی سطوح پلاستیکی ریخته شد. این عمل برای یکنواخت شدن شرایط و همگنی نمونه‌های خاک انجام گردید. به هر نمونه خاک، عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، منگنز و آهن به ترتیب به میزان ۱۵۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰، ۵ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع اوره، فسفات آمونیم، نیترات پتاسیم،

سولفات روی، سولفات منگنز و سکوسترین آهن ۱۳۸ به نمونه‌های خاک اضافه گردید. ضمناً به‌منظور اختلاط کامل و یکنواخت، کودها آسیاب و ابتدا به حجم کمتری از نمونه خاک اضافه و سپس با کل خاک مخلوط شد. در این مرحله فقط ۱/۳ کود اوره موردنیاز به خاک‌ها اضافه شد و ۲/۳ باقی‌مانده به‌صورت تقسیط در طول دوره رشد و طی دو نوبت (دو و پنج هفته پس از کاشت) مصرف شد. ضمناً میزان نیتروژنی که از سایر منابع کودی استفاده‌شده، به خاک‌ها اضافه گردیده بود در محاسبات میزان اوره مصرفی لحاظ شد. در مرحله بعد، سطوح موردنظر سلنیم و کادمیم از منبع سلنیت سدیم و نیترات کادمیم در مقداری آب مقطر حل شد و با توجه به تیمارهای تعریف‌شده، بر روی نمونه‌های خاک اسپری گردید. خاک‌ها پس از اعمال تیمارها، کاملاً هم‌رده شد تا یکنواختی حاصل گردد و سپس به پاکت‌های پلاستیکی منتقل شد. نمونه‌های خاک در داخل پاکت‌ها تا حد ظرفیت زراعی مرطوب شد، درب پاکت‌ها بسته و به‌منظور تبادل هوا در دیواره پاکت‌ها منافذی تعبیه شد. در طی ۴۵ روز پاکت‌ها در همین وضعیت نگهداری گردید و در طول این دوره، هر سه روز یک‌بار نمونه‌ها توزین تا اطمینان حاصل شود تا رطوبت نمونه‌ها از حد ظرفیت زراعی کمتر نشود. در صورت ضرورت و کمبود رطوبت، به نمونه‌ها آب مقطر اضافه می‌گردید. پس‌ازاین مرحله، خاک‌ها از پاکت خارج و بر روی سطح پلاستیکی پهن شد تا هوا خشک شوند.

آماده‌سازی گلدان‌ها

به‌منظور ایجاد زه‌کش مناسب و نیز جلوگیری از خروج خاک از ته گلدان‌ها در حین آبیاری، در ته هر گلدان دو عدد کاغذ صافی گذاشته شد و سپس بر روی آن ۳۰۰ گرم گراول درشت و مقدار مساوی گراول متوسط و ۱۰۰ گرم شن ریخته شد به‌طوری‌که وزن گلدان خالی و سنگریزه برای تمام گلدان‌ها مساوی شد. به هر گلدان ۶ کیلوگرم خاک که طبق مرحله قبلی آماده شده بود اختصاص داده شد.

کاشت و برداشت

در هر گلدان ۸ عدد بذر گندم رقم فلات کشت گردید. جهت جلوگیری از صدمات قارچی، بذور گندم قبل از کشت به سم سرزان آغشته شدند. ضمناً بعد از جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها تعداد بوته‌های هر گلدان به ۴ بوته کاهش یافت و بوته‌های اضافی تنک شدند. رطوبت گلدان‌ها در طول دوره کشت با روش توزین در حد ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نگه‌داشته شد. در صورت خروج آب از گلدان‌ها، آب اضافی به ظروف پلاستیکی زیر گلدان‌ها واردشده که مجدداً برای آبیاری همان گلدان مورداستفاده قرار می‌گرفت. دو و پنج هفته پس از کاشت، باقی‌مانده کود اوره (به‌صورت مساوی) همراه با آب آبیاری به خاک گلدان‌ها اضافه شدند. شصت روز پس از کشت و در ابتدای مرحله خوشه‌دهی، برگ‌های پرچمی توسعه‌یافته از هر گلدان به‌صورت مجزا برداشت و با نگهداری در ظرف نیتروژن مایع جهت اندازه‌گیری میزان کلروفیل، کاروتنوئید و فعالیت آنزیمی به آزمایشگاه پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شد. به‌منظور آنالیزهای بعدی، مقادیر لازم از نمونه‌ها در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد ذخیره گردید. همچنین ساقه گیاهان مربوط به هر گلدان نیز به‌طور مجزا از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت گردید و ابتدا با آب مقطر، سپس با محلول ۲۰ میلی‌مولار EDTA و مجدداً با آب مقطر شستشو داده شد. نمونه‌ها سپس به پاکت-های کاغذی منتقل و در آون تهویه‌دار در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک هفته نگهداری تا کاملاً خشک شدند. پس‌ازآن، وزن خشک نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی با دقت یک میلی‌گرم اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری غلظت کلروفیل a، b و کاروتنوئید

اندازه‌گیری غلظت کلروفیل *a*، *b* و کاروتنوئید به روش دره و همکاران (Dere et al., 1998) و با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل CE2502, UK) و در طول‌موج‌های ۶۶۶، ۶۵۳ و ۴۷۰ نانومتر انجام شد.

اندازه‌گیری پرولین

برای اندازه‌گیری میزان پرولین از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973)، توصیف‌شده توسط هاریلک- نواک (Hawrylak-Nowak, 2009)، استفاده شد. میزان پرولین نمونه‌ها با مقایسه اعداد جذب آن‌ها با منحنی جذب محلول-های استاندارد پرولین محاسبه گردید.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی، از روش توصیف‌شده توسط کونگ و همکاران (Kong et al., 2005) و لن و همکاران (Lin et al., 2012) استفاده شد. فعالیت آنزیمی با استفاده

از ضریب خاموشی[۴] ۳۹/۴ مول محاسبه شد (Hasanuzzaman et al., 2011; Lin et al., 2012).

تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS PC version 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل در سطح ۵ درصد با آزمون توکی صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثر کادمیم بر محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس ساده و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت کلروفیل *a*، *b* و میزان کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر کادمیم مصرفی قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارها بر این صفات در جدول ۳ ارائه گردیده است. غلظت کلروفیل *a* از ۲/۵۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در تیمار شاهد با حدود ۱۶ درصد کاهش به ۲/۱۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در تیمار ۱۵ میلی‌گرم کادمیم رسید (جدول ۳). اعمال این سطح کادمیم، غلظت کلروفیل *b* را نیز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد و باعث کاهش ۳۰ درصدی غلظت این رنگ‌دانه نسبت به شاهد گردید (جداول ۲ و ۳). این نتایج همچنین نشان داد که بیشترین مقدار کاروتنوئید به میزان ۰/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر، در غیاب کادمیم (سطح کادمیم صفر) حاصل گردید و با افزایش میزان کادمیم مصرفی این مقدار به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. هم‌راستا با این نتایج، سان و همکاران (Sun et al., 2016) گزارش کردند که با اعمال تیمار ۱۰۰ میکرومولار کادمیم از منبع کلرید کادمیم، غلظت کلروفیل *a* خیار از ۰/۷۵ به ۰/۴۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کاهش یافت. همچنین، واسیلو و همکاران (Vassilev et al., 2002)، ارشد و همکاران (Arshad et al., 2016) و شکاری و همکاران (Shekari et al., 2017) کاهش میزان کلروفیل و کاروتنوئید را در شرایط تنش کادمیم به ترتیب در گیاهان جو، گندم و فلفل گزارش کردند. کادمیم در روند جذب عناصر غذایی (به‌ویژه عناصری با ظرفیت مشابه نظیر روی، آهن و مس) توسط گیاه اختلال ایجاد می‌کند که این امر درنهایت باعث کاهش بیوسنتز کلروفیل و ایجاد کلروز در برگ‌ها می‌گردد (Vassilev et al., 2002; Dong et al., 2006; Sun et al., 2016).

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات موردبررسی در گندم تحت تأثیر سلنیم و کادمیم

Table 2. Analysis of variance for measured traits of wheat as affected by selenium and cadmium

			Mean Square			میانگین مربعات		
S.O.V	منبع تغییرات	درجه آزادی df	غلظت کلروفیل a Chlorophyll a concentration	غلظت کلروفیل b Chlorophyll b concentration	غلظت کاروتنوئید Carotenoids concentration	غلظت پرولین Proline concentration	فعالیت کاتالاز Catalase activity	وزن خشک ساقه Shoot dry weight
Cadmium	کادمیم	2	1.59**	0.75**	0.32**	1895.47**	0.13**	31.83**
Selenium	سلنیم	3	0.42**	0.25**	0.07**	1174.36**	0.84**	8.04**
Selenium × Cadmium	سلنیم × کادمیم	6	0.03*	0.04**	0.002*	133.10**	0.007**	1.34**
CV (%)	ضریب تغییرات (٪)	-	*3.94*	*6.34*	*5.21*	*2.45*	*2.57*	*4.6*

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح ۱ و ۵ درصد است.

* and ** means significant at%1 and%5 probability levels, respectively.

[۴] Extinction coefficient

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارها بر غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، پرولین، فعالیت آنزیمی و وزن خشک ساقه

Table 3. Mean comparison of photosynthetic pigments concentration, proline content, enzyme activity and shoot dry weight in different levels of experimental treatments

تیمار Treatment	سطوح تیمار Treatment levels	غلظت کلروفیل a Chlorophyll a concentration (mg g^{-1})	غلظت کلروفیل b Chlorophyll b concentration (mg g^{-1})	غلظت کاروتنوئید Carotenoids concentration (mg g^{-1})	غلظت پرولین Proline concentration (µg g^{-1})	فعالیت کاتالاز Catalase activity (µmol min g FW^{-1})	وزن خشک ساقه Shoot dry weight (g pot^{-1})
Cadmium کادمیم	0	2.55^{a}	0.99^{a}	0.56^{a}	74.8^{b}	0.86^{a}	9.87^{a}
	5	2.43^{b}	0.89^{b}	0.47^{b}	74.5^{b}	0.78^{b}	9.34^{b}
	15	2.14^{c}	0.70^{c}	0.37^{c}	87.2^{a}	0.74^{b}	8.04^{c}
Selenium سلنیم	0	2.40^{b}	0.86^{b}	0.49^{a}	71.09^{c}	0.86^{b}	9.50^{a}
	0.5	2.43^{ab}	0.94^{a}	0.50^{a}	75.72^{b}	1.03^{a}	9.41^{ab}
	1	2.47^{ab}	0.93^{a}	0.49^{a}	84.28^{a}	0.67^{c}	9.16^{b}
	4	2.19^{c}	0.72^{c}	0.38^{b}	84.41^{a}	0.65^{c}	8.30^{c}

در هر ستون (مربوط به هر تیمار) تیمارهایی که حداقل یک حرف مشترک دارند بر اساس آزمون توکی در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشند.

Means with common letters in the same column and in each treatment are not significantly different at $P<0.05$, according to Tukey's LSD test.

اثر کادمیم بر محتوی پرولین

تیمار کادمیم تفاوت معنی‌داری در غلظت پرولین ایجاد کرد (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثر ساده این تیمار نشان داد که اعمال سطح ۱۵ میلی‌گرم کادمیم، مقدار پرولین گیاه را نسبت به شرایط شاهد افزایش داد اما اختلاف معنی‌داری بین سطوح کادمیم صفر و ۵ میلی‌گرم مشاهده نشد (جدول ۳). مقدار پرولین گیاهان در معرض بالاترین سطح کادمیم (۱۵ میلی‌گرم) در مقایسه با گیاهان شاهد ۱۶/۶ درصد افزایش داشت. افزایش میزان پرولین در گیاهان تیمار شده با کادمیم در برخی از مطالعات تائید شده است. عرفان و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی سطوح مختلف کادمیم از منبع کلرید کادمیم بر تجمع پرولین در گیاه *Brassica juncea* گزارش کردند که با اعمال ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم، میزان پرولین در مقایسه با گیاهان شاهد ۸۲ درصد افزایش داشت. افزایش پرولین در حضور کادمیم توسط اصغری پور و همکاران (Asgharipour et al., 2011) در گندم و شکاری و همکاران (Shekari et al., 2017) در فلفل نیز گزارش شده است. گیاهانی که در معرض تنش واقع می‌شوند ترکیبات خاصی به نام اسمولیت در آن‌ها ساخته می‌شود که پرولین یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. مکانیسم عمل پرولین در شرایط تنش، از بسیاری از جهات ناشناخته است. بااین‌حال، این نظریه وجود دارد که تجمع پرولین در گیاهان از طریق پایداری غشاء سلولی سبب مقاومت گیاهان در شرایط تنش می‌شود (Yao et al., 2009).

اثر کادمیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز

تیمار کادمیم تفاوت معنی‌داری در میزان فعالیت آنزیم کاتالاز ایجاد کرد (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثر ساده این تیمار نشان داد که با افزایش سطح کادمیم، میزان فعالیت این آنزیم نسبت به شاهد کاهش یافت هرچند اختلاف معنی‌داری بین سطوح ۵ و ۱۵ میلی‌گرم کادمیم مشاهده نشد (جدول ۳). فعالیت آنزیم مذکور در گیاهان در معرض بالاترین سطح کادمیم (۱۵ میلی‌گرم) در مقایسه با گیاهان شاهد، حدود ۱۳ درصد کاهش داشت. بررسی کوتاب و همکاران (Qutab et al., 2017) نشان داد که کادمیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در ذرت تأثیری دوگانه دارد به‌طوری‌که در غلظت‌های پائین، سبب کاهش فعالیت آنزیم مذکور شده ولی در غلظت‌های بالاتر تأثیر معکوسی داشت. برعکس، نتایج شاه و همکاران (Shah et al., 2001) نشان داد که کادمیم در غلظت‌های متوسط (۱۰۰ میکرومولار) باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه برنج شد ولی سطوح بالای کادمیم (غلظت ۵۰۰ میکرومولار) کاهش فعالیت این آنزیم را به همراه داشت. تأثیر کادمیم بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز توسط چن و همکاران (Chen et al., 2007) در برنج و ارشد و همکاران (Arshad et al., 2016) در گندم نیز بررسی شده است.

اثر کادمیم بر وزن خشک ساقه

نتایج تجزیه واریانس برای وزن خشک ساقه نشان داد که کادمیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر روی این صفت داشت (جدول ۲). نتایج حاصل از مقایسات میانگین نشان داد که در بین سطوح کادمیم، سطح صفر کادمیم با میانگین ۹/۸۷ گرم وزن خشک بر گلدان، بیشترین مقدار وزن خشک ساقه را به خود اختصاص داد و در مقابل، کمترین مقدار وزن خشک ساقه (۸/۰۷ گرم وزن خشک بر گلدان) در بالاترین سطح کادمیم مصرفی (۱۵ میلی‌گرم کادمیم) به دست آمد (جدول ۳). تأثیر منفی کادمیم بر عملکرد گندم توسط محققین متعددی ازجمله شکاری و همکاران (Shekari et al., 2017) نیز گزارش شده است. کادمیم به‌آسانی توسط گیاهان جذب می‌شود و اثرات منفی بر جای می‌گذارد. به‌عنوان‌مثال، این عنصر با گروه‌های سولفیدریل پروتئین‌های گیاهی ترکیب‌شده و فعالیت آنزیمی گیاه را تغییر می‌دهد. در حضور کادمیم، گونه‌های فعال اکسیژن[۵] بیشتری در گیاهان تولید می‌شود، در جذب عناصر غذایی و عملکرد غشاء سلولی اختلال ایجاد گردیده و درنهایت کاهش رشد و مرگ سلول گیاهی اتفاق می‌افتد (Qutab et al., 2017; Wu et al., 2003; Dong et al., 2006).

اثر سلنیم بر محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

تیمار سلنیم تفاوت معنی‌داری در غلظت کلروفیل *a*، *b* و میزان کاروتنوئید گندم ایجاد کرد (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثر ساده این تیمار نشان داد که گیاهانی که مقدار کمی از سلنیم (۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) دریافت کردند در مقایسه با گیاهان شاهد، دارای کلروفیل *b* بیشتری بودند اما سلنیم بر میزان کلروفیل *a* و نیز مقدار کاروتنوئید گیاهان تأثیر مثبتی نداشت (جدول ۳). برعکس، مصرف غلظت بالای سلنیم (۴ میلی‌گرم) محتوی هر سه رنگ‌دانه موردبررسی را در مقایسه با گیاهان شاهد کاهش داد؛ به‌عبارت‌دیگر، کمترین غلظت این سه رنگ‌دانه در شرایطی حاصل گردید که گیاهان در معرض ۴ میلی‌گرم سلنیم در کیلوگرم خاک رشد کردند (جدول ۳).

نقش مثبت سلنیم در افزایش غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در بسیاری از گیاهان گزارش شده است. به‌عنوان‌مثال، حاجی‌بلند و کیوانفر (Hajiboland and Keivanfar, 2012) گزارش کردند که غلظت کلروفیل *b* در گیاه گندمی که سلنیم دریافت نکرد ۰/۶۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود ولی با اعمال تیمار ۱۰ میکروگرم سلنیم مقدار این رنگ‌دانه به‌طور معنی‌داری افزایش و به ۰/۷۸ میلی‌گرم بر گرم رسید. گزارش دیگری از این محققین، افزایش میزان کلروفیل *a* گندم را در اثر کاربرد سلنیم نشان می‌دهد (Hajiboland et al., 2014). بر اساس گزارش‌های منتشرشده توسط حاجی‌بلند و کیوانفر (Hajiboland and Keivanfar, 2012) و جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2017) نقش حفاظتی سلنیم، به‌ویژه حفاظت این عنصر از مراکز فتوشیمیائی برگ‌ها دلیل افزایش میزان رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی گیاهان در حضور سلنیم است.

اثرات منفی کاربرد غلظت‌های بالای سلنیم بر گیاهان نیز در برخی از گزارش‌ها منتشر شده است. پنگ و همکاران (Peng et al., 2000) گزارش کردند که جوانه‌زنی و رشد گندم در خاک‌های حاوی بیش از ۱۶ میلی‌گرم سلنیم بر کیلوگرم خاک به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافت. نتایج تائید کننده دیگری در خصوص اثرات منفی کاربرد غلظت بالای سلنیم در کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی گندم توسط ملناروا و فرگاسوا (Molnárová and Fargašová, 2009) منتشر شده است. بر اساس بسیاری از گزارش‌های، اثر منفی سلنیم بر صفات فوق‌الذکر ازآنجا ناشی می‌شود که این عنصر در غلظت‌های زیاد، تمایل بالایی برای برهمکنش با عنصر آهن دارد و درنهایت به دلیل کاهش جذب این عنصر، کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی اتفاق می‌افتد (Molnárová and Fargašová, 2009; Guerrero et al., 2014).

اثر سلنیم بر محتوی پرولین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سلنیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر محتوی پرولین داشت (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثرات ساده سلنیم نشان داد که با افزایش سطح سلنیم تا یک میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، میزان پرولین نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت ولی مصرف سطح بالاتر سلنیم تأثیری بر غلظت این اسمولیت نداشت (جدول ۳). نتایج مشابهی در خصوص افزایش میزان این اسمولیت در گندم تیمار شده با سلنیم، توسط یائو و همکاران (Yao et al., 2009) منتشر شده است. نامبردگان گزارش

[۵] Reactive oxygen species

کردند که با مصرف ۳ میلی‌گرم سلنیم بر کیلوگرم خاک، میزان پرولین از حدود ۸۵ به ۱۰۰ میکروگرم بر گرم وزن تر گیاه افزایش یافت. حاجی‌بلند و همکاران (Hajiboland et al., 2014) نیز تأثیر سلنیم بر غلظت پرولین ساقه را دو ژنوتیپ گندم به نام‌های «سارا» و «هما» موردبررسی قرار دادند و گزارش کردند که کاربرد سلنیم در واریته «سارا» سبب افزایش غلظت پرولین گردید ولی در واریته «هما» باعث کاهش غلظت پرولین شد. یائو و همکاران (Yao et al., 2009) اظهار داشتند که افزایش میزان پرولین گیاهانی که در شرایط تنش با سلنیم تیمار می‌شوند درواقع واکنشی از طرف گیاه محسوب می‌گردد تا با شرایط تنش، تطابق اکولوژیکی بهتری حاصل شود.

اثر سلنیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اعمال تیمار سلنیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز داشت (جدول ۲). مقایسات میانگین اثر ساده سلنیم نشان داد که میزان فعالیت این آنزیم در سطح ۰/۵ میلی‌گرم سلنیم در مقایسه با سطح صفر، حدود ۱۹ درصد بیشتراست (جدول ۳). برخلاف انتظار، مصرف مقادیر بیشتر سلنیم، نه‌تنها باعث افزایش فعالیت آنزیم مذکور نگردید بلکه باعث کم شدن آن در مقایسه با گیاه شاهد نیز شد. به‌عنوان‌مثال، میزان فعالیت آنزیمی در گیاهانی که ۴ میلی‌گرم سلنیم دریافت کردند حدود ۲۴ درصد کمتر از گیاهانی بود که هیچ‌گونه سلنیمی دریافت نکردند (جدول ۳). تأثیر سلنیم در افزایش فعالیت آنزیمی گیاه موضوع تحقیقات متعددی بوده است که از آن جمله می‌توان به گزارش‌های حسنزومان و همکاران (Hasanuzzaman et al., 2011)، ویو و همکاران (Wu et al., 2016) و جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2017) اشاره کرد.

برخی از محققین بیان کرده‌اند که سلنیم باعث فعال کردن آنزیم کاتالاز شده و از این طریق منجر به افزایش ظرفیت جاروب کنندگی[6] گیاه برای حذف گونه‌های فعال اکسیژن (که در شرایط تنش در گیاه به وجود می‌آیند) می‌شود. (Yao et al., 2011; Lin et al., 2012). در توجیه مکانیسم این واکنش، مطالعات فنگ و همکاران (Feng et al., 2013)، تاباسز و همکاران (Tobiasz et al., 2014) و سیداآرلا و همکاران (Sida-Arreola et al., 2015) نشان داد که سلنیم در غلظت‌های کم، باعث بهبود جذب برخی عناصر غذایی به‌ویژه آهن گردیده و به دلیل آنکه آهن به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت محسوب می‌شود، نتیجه نهائی تیمار گیاهان با سلنیم، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز است.

اثر سلنیم بر وزن خشک ساقه

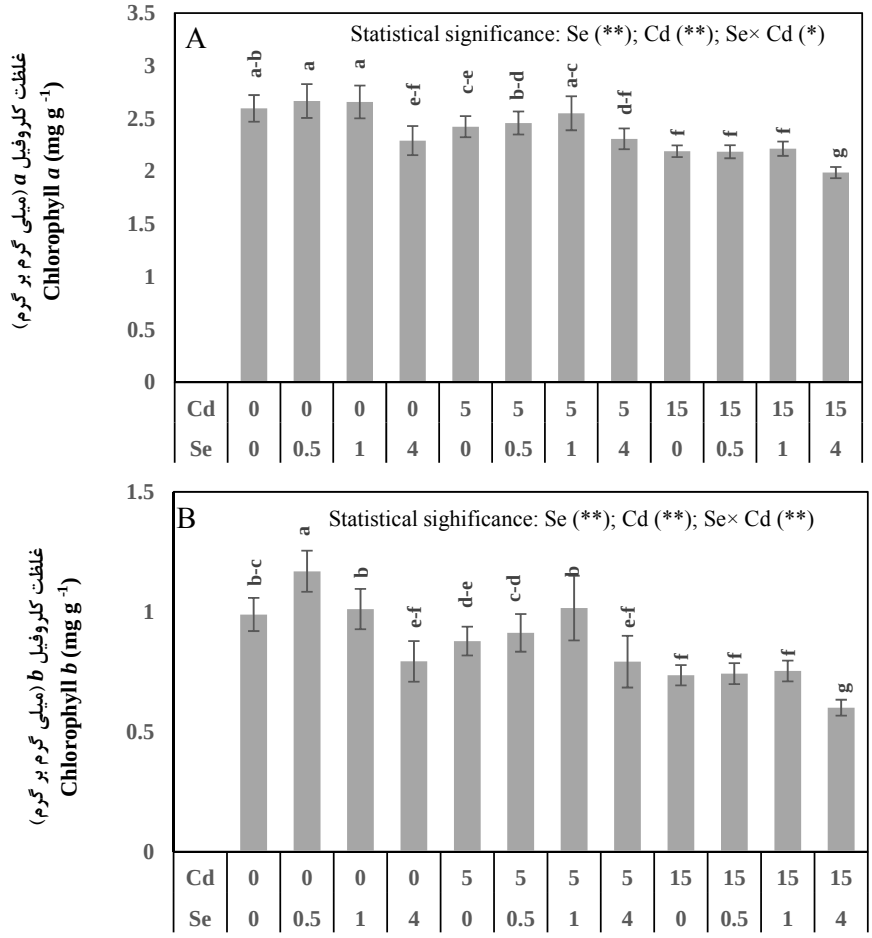
تیمار سلنیم تفاوت معنی‌داری در مقدار وزن خشک ساقه گندم ایجاد کرد (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین اثر ساده این تیمار نشان داد که بالاترین سطح سلنیم (۴ میلی‌گرم در کیلوگرم)، وزن خشک ساقه را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش داد به‌طوری‌که وزن خشک ساقه در گیاهان تیمار شده با ۴ میلی‌گرم سلنیم، در مقایسه با گیاهان شاهد حدوداً ۱۳ درصد کاهش یافت (جدول ۳). در خصوص سمّیت ناشی از غلظت‌های بالای سلنیم و کاهش عملکرد حاصل از آن، ترکانن (Turakainen, 2007) و گوپتا و گوپتا (Gupta and Gupta, 2017) اظهار داشتند که این عنصر در غلظت‌های زیاد در داخل گیاه با اسیدهای آمینه سیستئین و متیونین ترکیب‌شده و تولید سلنوسیستئین و سلنومتیونین می‌کند. دو ترکیب اخیر، سپس به ساختمان پروتئین‌ها الحاق می‌شوند و باعث تخریب آن‌ها می‌شوند.

اثر متقابل سلنیم × کادمیم بر غلظت کلروفیل *a* و *b* به ترتیب در سطح احتمال ۵ و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل سلنیم × کادمیم بر غلظت کلروفیل *a* نشان داد که غلظت این رنگ‌دانه در گیاهانی که در معرض صفر یا پنج میلی‌گرم کادمیم قرار داشتند و هم‌زمان ۰/۵ میلی‌گرم سلنیم نیز دریافت کردند در مقایسه با گیاهانی که سلنیم دریافت نکردند به‌طور جزئی افزایش داشت لکن این افزایش ازنظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱A). برخلاف کلروفیل *a*، اثر مثبت سلنیم بر غلظت کلروفیل *b* در گیاهان در معرض تنش کادمیم مشهود بود. بر اساس شکل ۱B، در غیاب کادمیم، مصرف ۰/۵ میلی‌گرم سلنیم باعث افزایش غلظت کلروفیل *b* نسبت به شاهد گردید. بااین‌وجود در شرایطی که گیاه در معرض سطح متوسط کادمیم (۵ میلی‌گرم) قرار گرفت میزان بیشتری از سلنیم (یک میلی‌گرم) لازم بود تا غلظت رنگ‌دانه *b* نسبت به تیمار شاهد مربوطه

[1] Scavenging capability

افزایش یابد (شکل 1B). در نقطه مقابل، در سطوح بالای کادمیم (۱۵ میلی‌گرم)، سلنیم تأثیر مثبتی بر افزایش کلروفیل *b* نداشت.

مقایسه میانگین اثرات ساده تیمار سلنیم بر غلظت کاروتنوئید نشان داد که مقدار ۴ میلی‌گرم سلنیم سبب کاهش غلظت این رنگ‌دانه در گیاه گردید (جدول ۳)؛ اما به دلیل آن‌که اثر متقابل سلنیم × کادمیم نیز بر غلظت کاروتنوئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲) لذا برای ارزیابی شدت و یا نحوه تأثیر سلنیم بر میزان کاروتنوئید گیاه باید میزان کادمیم خاک را نیز مدنظر قرار داد. مقایسه میانگین مربوط به برهمکنش این دو عنصر نشان داد گیاهانی که با سطح سلنیم ۴ و کادمیم صفر و یا با سطح سلنیم ۴ و کادمیم متوسط (۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) تیمار شدند غلظت کاروتنوئید آن‌ها نسبت به گیاهان شاهد مربوطه (سلنیم صفر)، حدود ۱۶ درصد کاهش داشت ولی گیاهانی که در همین سطح سلنیم با کادمیم زیاد (۱۵ میلی-گرم بر کیلوگرم خاک) تیمار شدند غلظت کاروتنوئید آن‌ها در مقایسه با گیاهان شاهد مربوطه (سلنیم صفر)، ۲۳ درصد کاهش داشت (شکل2A). به‌عبارت‌دیگر، تأثیر منفی سطح بالای سلنیم (۴ میلی‌گرم) بر کاهش غلظت کاروتنوئید در شرایطی که در گیاه در معرض سطوح بالاتر کادمیم قرار

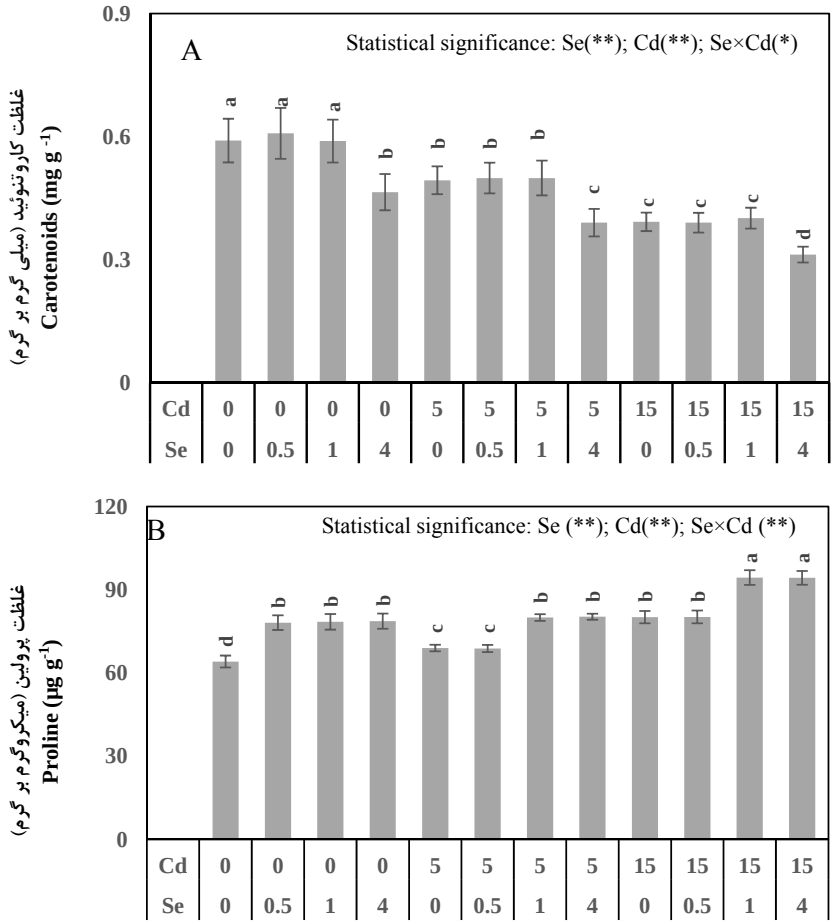


شکل ۱. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سلنیم و کادمیم بر غلظت کلروفیل a (A) و b (B). میانگین‌هائی که دارای حروف مشابه نیستند بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری دارند. غلظت تیمارهای سلنیم و کادمیم بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد.

Fig. 1. Chlorophyll a (A) and b (B) content induced by selenium under cadmium stress conditions. Se 0, 0.5, 1, 4 and Cd 0, 5, 15 indicate mg selenium and cadmium added to kg soil. Mean (±SD) was calculated from three replicates for each treatment. Means followed by different letters are significantly different (P<5%) according to Tukey's LSD test. Significant effects for the main factors and for interaction between them are indicated with asterisks.

داشت در مقایسه با شرایطی که گیاه در غیاب کادمیم رشد کرد، شدیدتر بود. ضمناً گیاهانی که در توأماً در معرض بالاترین سطح کادمیم و سلنیم رشد کردند دارای کمترین میزان کاروتنوئید در بافت خود بودند. در مقابل، گیاهانی که در غیاب کادمیم، در معرض ۰، ۰/۵ و ۱ میلی‌گرم سلنیم قرار داشتند به‌طور مشترک بالاترین میزان کاروتنوئید را دارا بودند و تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت (شکل۲A).

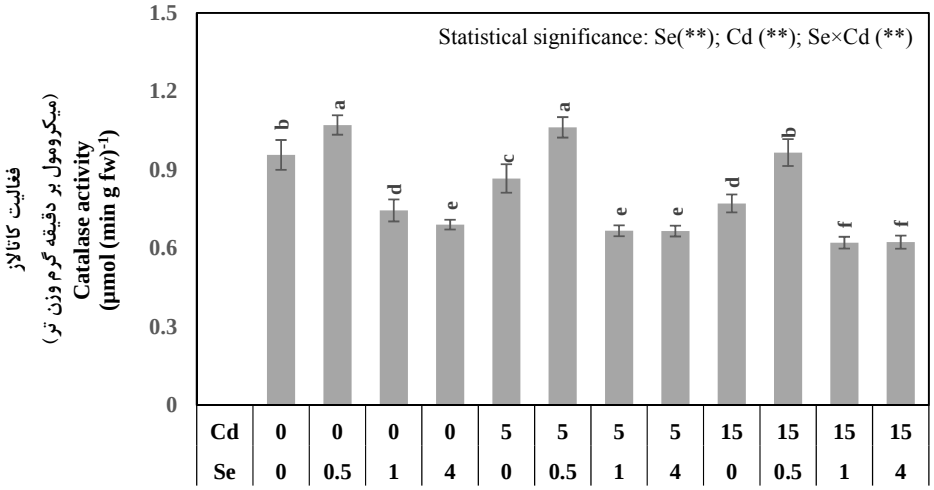
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش سلنیم و کادمیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر محتوی پرولین داشت (جدول ۲). اگرچه نتایج مقایسات میانگین اثرات ساده سلنیم نشان داد که مصرف ۰/۵ میلی‌گرم سلنیم کافی بود تا اثر این عنصر بر افزایش میزان پرولین نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار شود (جدول ۳) ولی نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سلنیم × کادمیم نشان داد که در گیاهانی که در معرض سطوح بالاتر کادمیم رشد کردند مقدار سلنیم بیشتری (۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) لازم بود تا میزان پرولین نسبت به گیاهان شاهد مربوطه افزایش معنی-داری را تجربه کند (شکل B2). ضمناً مصرف بیش از یک میلی‌گرم سلنیم در هیچ‌کدام از تیمارها تغییری در میزان پرولین گیاهان ایجاد نکرد.



شکل ۲. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سلنیم و کادمیم بر غلظت کاروتنوئید (A) و پرولین (B). میانگین‌هائی که دارای حروف مشابه نیستند بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری دارند. غلظت تیمارهای سلنیم و کادمیم بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد.

Fig. 2. Carotenoids (A) and proline (B) content induced by selenium under cadmium stress conditions. Se 0, 0.5, 1, 4 and Cd 0, 5, 15 indicate mg selenium and cadmium added to kg soil. Mean (±SD) was calculated from three replicates for each treatment. Means followed by different letters are significantly different (P<5%) according to Tukey's LSD test. Significant effects for the main factors and for interaction between them are indicated with asterisks.

برهمکنش سلنیم × کادمیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم کاتالاز داشت (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات متقابل این دو عنصر نشان داد حداکثر فعالیت آنزیمی در سطح ۰/۵ میلی‌گرم سلنیم با کادمیم صفر یا ۵ حاصل شد (شکل ۳). حداقل میزان فعالیت کاتالاز نیز به‌طور مشترک مربوط به گیاهانی بود که با کادمیم ۵ یا ۱۵ میلی‌گرم تیمار شدند و هم‌زمان مقادیری بیش از ۰/۵ میلی-گرم سلنیم دریافت کردند.



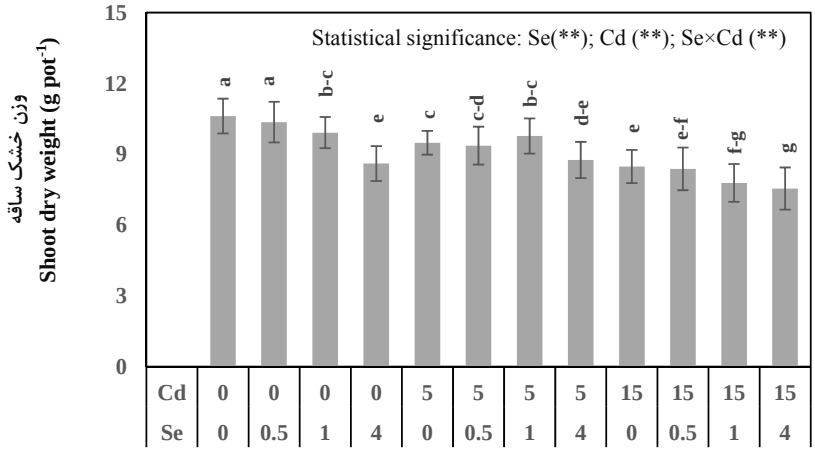
شکل ۳. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سلنیم و کادمیم بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز. میانگین‌هائی که دارای حروف مشابه نیستند بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری دارند. غلظت تیمارهای سلنیم و کادمیم بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد.

Fig. 3. Activity of catalase induced by selenium under cadmium stress conditions. Se 0, 0.5, 1, 4 and Cd 0, 5, 15 indicate mg selenium and cadmium added to kg soil. Mean (±SD) was calculated from three replicates for each treatment. Means followed by different letters are significantly different (P<5%) according to Tukey's LSD test. Significant effects for the main factors and for interaction between them are indicated with asterisks.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش سلنیم و کادمیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک ساقه داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سلنیم × کادمیم نشان داد که در هیچ‌کدام از سطوح کادمیم، سلنیم سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ساقه نگردید (شکل ۴). هم‌راستا با این نتایج، حاجی‌بلند و همکاران (Hajiboland et al., 2014) در خصوص تأثیر سلنیم بر عملکرد گندم گزارش کردند که این عنصر گرچه باعث بهبود شاخص‌های آنتی‌اکسیدانتی در گندم گردید ولی عملکرد را تحت تأثیر قرار نداد. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه سلنیم جزء عناصر ضروری برای گیاهان محسوب نمی‌شود نباید انتظار داشت با مصرف آن عملکرد افزایش معنی‌داری داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان اظهار داشت که تنش کادمیم، پارامترهای فیزیولوژیکی گندم را به‌طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب کاهش محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی و وزن خشک ساقه این گیاه می-گردد. در مقابل سلنیم تأثیر دوگانه بر این پارامترها دارد به‌طوری‌که غلظت کلروفیل *b* و فعالیت آنزیمی گیاهانی که در معرض تنش کادمیم قرار داشتند در صورت تیمار با غلظت‌های کم سلنیم، بهبود پیدا کرد. بااین‌وجود، سلنیم حتی در غلظت‌های کم نیز تأثیر مثبتی بر غلظت کلروفیل *a*، کاروتنوئید و وزن خشک ساقه نداشت. در مقابل، غلظت‌های زیاد سلنیم نه‌تنها تأثیر سودمندی بر صفات موردبررسی نداشت بلکه باعث کاهش غلظت رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیمی و وزن خشک ساقه گندم نیز گردید.



شکل ۴. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سلنیم و کادمیم بر وزن خشک ساقه. میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه نیستند بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌داری دارند. غلظت تیمارهای سلنیم و کادمیم برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است.

Fig. 4. Shoot dry weight induced by selenium under cadmium stress conditions. Se 0, 0.5, 1, 4 and Cd 0, 5, 15 indicate mg selenium and cadmium added to kg soil. Mean (±SD) was calculated from three replicates for each treatment. Means followed by different letters are significantly different (P<5%) according to Tukey's LSD test. Significant effects for the main factors and for interaction between them are indicated with asterisks.

منابع

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Murtaza, G., 2017. Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. Environmental Science and Pollution Research. 25, 25668-25680.

Ahmad, R., Waraich, E.A., Nawaz, F., Ashraf, M. Y., Khalid, M., 2016. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants–a myth or fact? Journal of the Science of Food and Agriculture. 96, 372-380.

Arshad, M., Ali, S., Noman, A., Ali, Q., Rizwan, M., Farid, M., Irshad, M. K., 2016. Phosphorus amendment decreased cadmium (Cd) uptake and ameliorates chlorophyll contents, gas exchange attributes, antioxidants, and mineral nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under Cd stress. Archives of Agronomy and Soil Science. 62, 533-546.

Asgharipour, M., Khatamipour, M., Razavi-Omrani, M., 2011. Phytotoxicity of cadmium on seed germination, early growth, proline and carbohydrate content in two wheat varieties. Advances in Environmental Biology. 5, 559-565.

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

Chapman, H., Pratt, P., 1961. Methods of Analysis of Soil, Plants and Water. University of California, Division of Agricultural. Science, USA.

Chen, F., Wu, F., Dong, J., Vincze, E., Zhang, G., Wang, F., Huang, Y., Wei, K., 2007. Cadmium translocation and accumulation in developing barley grains. Planta. 227, 223-232.

Dere, Ş., Gunes, T., Sivaci, R., 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll-A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. Turkish Journal of Botany. 22, 13-18.

De Santiago, A., Quintero, J. M., Avilés, M., Delgado, A., 2011. Effect of Trichoderma asperellum strain T34 on iron, copper, manganese, and zinc uptake by wheat grown on a calcareous medium. Plant and Soil. 342, 97-104.

Dong, J., Wu, F., Zhang, G., 2006. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato

seedlings (*Lycopersicon esculentum*). Chemosphere. 64, 1659-1666.

Feng, R., Wei, C., Tu, S., Ding, Y., Song, Z., 2013. A dual role of Se on Cd toxicity: evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice. Biological trace element research. 151, 113-121.

Gallego, S.M., Pena, L.B., Barcia, R.A., Azpilicueta, C. E., Iannone, M. F., Rosales, E. P., Zawoznik, M.S., Groppa, M.D., Benavides, M. P., 2012. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. Environmental and Experimental Botany. 83, 33-46.

Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods. 383-411.

Guerrero, B., Llugany, M., Palacios, O., Valiente, M., 2014. Dual effects of different selenium species on wheat. Plant Physiology and Biochemistry. 83, 300-307.

Gupta, M., Gupta, S., 2017. An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. Frontiers in Plant Science. 7, 1-14.

Hajiboland, R., Keivanfar, N., 2012. Selenium supplementation stimulates vegetative and reproductive growth in canola (*Brassica napus* L.) plants. Acta Agriculturae Slovenica. 99, 13-19.

Hajiboland, R., Sadeghzadeh, N., Sadeghzadeh, B., 2014. Effect of Se application on photosynthesis, osmolytes and water relations in two durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes under drought stress. Acta Agriculturae Slovenica. 103, 167-179.

Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., Fujita, M., 2011. Selenium-induced up-regulation of the antioxidant defense and methylglyoxal detoxification system reduces salinity-induced damage in rapeseed seedlings. Biological trace element research. 143, 1704-1721.

Hawrylak-Nowak, B., 2009. Beneficial effects of exogenous selenium in cucumber seedlings subjected to salt stress. Biological Trace Element Research. 132, 259-269.

Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S., Wójcik, M., 2014. Selenium affects physiological parameters and phytochelatins accumulation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants grown under cadmium exposure. Scientia Horticulturae. 172, 10-18.

Huang, B., Xin, J., Dai, H., Zhou, W., 2017. Effects of interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) system. Journal of Agriculture and Food Chemistry. 65, 9537–9546.

Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J., Wang, H., Li, D., 2017. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na+ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. Scientific Reports. 7, 1-14.

Jing, D., Fei-bo, W., Guo-ping, Z., 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. Journal of Zhejiang University-Science B. 6, 974-980.

Kabata-Pendias, A. 2010. Trace elements in soils and plants. CRC press.

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.

Kong, L., Wang, M., Bi, D., 2005. Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seedlings under salt stress. Plant Growth Regulation. 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, 343-351.

Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal. 42, 421-428.

Maleki, A., Zazoli, M.A., Shokrzadeh, M., 2009. Investigation of cadmium content in Iranian rice (*Oryza Sativa*). Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 11, 101-105.

Mann, A., Singh, A., Oza, S., Goswami, N., Mehta, D., Chaudhari, V., 2017. Effect of iron source on iron deficiency induced chlorosis in groundnut. Legume Research: An International Journal. 40, 241-249.

Martínez-Alcalá, I., Bernal, M.P., de la Fuente, C., Gondar, D., Clemente, R., 2016. Changes in the heavy metal solubility of two contaminated soils after heavy metals phytoextraction with

Noccaea caerulescens. Ecological Engineering. 89, 56-63.

Molnárová, M., Fargašová, A., 2009. Se (IV) phytotoxicity for monocotyledonae cereals (*Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L.) and dicotyledonae crops (*Sinapis alba* L., *Brassica napus* L.). Journal of Hazardous Materials. 172, 854-861.

Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta. 27, 31-36.

Nagajyoti, P., Lee, K., Sreekanth, T., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environmental Chemistry Letters. 8, 199-216.

Olsen, S., Sommers, L., Page, A., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus. ASA Monograph. 9, 403-430.

Peng, A., Xu, Y., Liu, J., Wang, Z., 2000. Study on the dose-effect relationship of selenite with the growth of wheat. Biological Trace Element Research. 76, 175-181.

Qutab, S., Iqbal, M., Rasheed, R., Ashraf, M.A., Hussain, I., Akram, N. A., 2017. Root zone selenium reduces cadmium toxicity by modulating tissue-specific growth and metabolism in maize (*Zea mays* L.). Archives of Agronomy and Soil Science. 63, 1900-1911.

Rascio, N., Dalla Vecchia, F., La Rocca, N., Barbato, R., Pagliano, C., Raviolo, M., Gonnelli, C., Gabbrielli, R., 2008. Metal accumulation and damage in rice (cv. *Vialone nano*) seedlings exposed to cadmium. Environmental and Experimental Botany. 62, 267-278.

Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I., Raskin, I., 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Nature biotechnology. 13, 468-474.

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

Shekari, L., Kamelmanesh, M.M., Mozafariyan, M., Hasanuzzaman, M., Sadeghi, F., 2017. Role of selenium in mitigation of cadmium toxicity in pepper grown in hydroponic condition. Journal of Plant Nutrition. 40, 761-772.

Sida-Arreola, J.P., Sánchez, E., Ávila-Quezada, G.D., Zamudio-Flores, P.B., Acosta-Muñiz, C. H., 2015. Can Improve Iron Biofortification Antioxidant Response, Yield and Nutritional Quality in Green Bean? Agricultural Sciences. 6, 1324.

Soltanpour, P. a., Schwab, A., 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro-and micro-nutrients in alkaline soils 1. Communications in Soil Science & Plant Analysis. 8, 195-207.

Sun, H., Wang, X., Wang, Y., Wei, Y., Wang, G., 2016. Alleviation of cadmium toxicity in cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings by the application of selenium. Spanish Journal of Agricultural Research. 14, 1-12.

Turakainen, M. 2007. Selenium and its effects on growth, yield and tuber quality in potato. Ph.D dissertation, University of Helsinki, Finland.

Tobiasz, A., Walas, S., Filek, M., Mrowiec, H., Samsel, K., Sieprawska, A., Hartikainen, H., 2014. Effect of selenium on distribution of macro-and micro-elements to different tissues during wheat ontogeny. Biologia plantarum. 58, 370-374.

Vassilev, A., Lidon, F.C., Matos, M.D.C., Ramalho, J.C., Yordanov, I., 2002. Photosynthetic performance and content of some nutrients in cadmium-and copper-treated barley plants. Journal of Plant Nutrition. 25, 2343-2360.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37, 29-38.

Wang, Y., Jiang, X., Li, K., Wu, M., Zhang, R., Zhang, L., Chen, G., 2014. Photosynthetic responses of *Oryza sativa* L. seedlings to cadmium stress: physiological, biochemical and ultrastructural analyses. Biometals. 27, 389-401

Wu, F., Zhang, G., Yu, J., 2003. Interaction of cadmium and four microelements for uptake and translocation in different barley genotypes. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 34, 2003-2020.

Wu, Z., Wang, F., Liu, S., Du, Y., Li, F., Du, R., Wen, D., Zhao, J., 2016. Comparative responses to silicon and selenium in relation to

cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. utilis) under cadmium stress. Environmental and Experimental Botany. 131, 173-180.

Yan, H., Filardo, F., Hu, X., Zhao, X., Fu, D., 2016. Cadmium stress alters the redox reaction and hormone balance in oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves. Environmental Science and Pollution Research. 23, 3758-3769.

Yao, X., Chu, J., He, X., Ba, C., 2011. Protective role of selenium in wheat seedlings subjected to enhanced UV-B radiation. Russian Journal of Plant Physiology. 58, 283-289.

Yao, X., Chu, J., Wang, G., 2009. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress. Biological Trace Element Research. 130, 283-290.