تولیدات گیاهی (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۸ شماره ۳، پاییز ۹۴

تأثیر پتاسیم بر توزیع و انباشت کادمیوم در اندام های مختلف دو رقم گندم دوروم

ساره لرکی[۱]، افراسیاب راهنما [۲]*و امیر آینه بند[۳]

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲*- **نویسنده مسوول:** استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز
(a.rahnama@scu.ac.ir)

۳- استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۲۶

چکیده

درک ساز و کارهای مؤثر بر جذب، انتقال و انباشت کادمیوم در دانه می‌تواند موفقیت برنامه‌های به‌نژادی را با هدف ایجاد ژنوتیپ‌های دارای انباشت پایین کادمیوم بهبود ببخشد. به منظور بررسی نقش پتاسیم در جذب کادمیوم به وسیلهٔ ریشه، انتقال به اندام هوایی و انباشت آن در دانهٔ دو رقم گندم دوروم (بهرنگ و یاواروس)، آزمایشی گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ بلوک کامل تصادفی در سه تکرار تحت سطوح تیماری مختلف (شاهد، ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (از نوع کلرید کادمیوم)، ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک به همراه دو سطح ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم و دو سطح ۳۰ و ۴۵ میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک از منبع نانوکلات پتاسیم ۲۷ درصد اجرا گردید. کادمیوم به طور متفاوتی سبب کاهش غلظت پتاسیم ریشه، برگ و دانه در هر دو رقم گردید، ولی غلظت کادمیوم اندام مذکور را افزایش داد. بالاترین غلظت کادمیوم در ریشه و کمترین آن در دانه مشاهده شد. کاربرد پتاسیم همراه با کادمیوم از طریق رقابت منجر به کاهش غلظت کادمیوم در مقایسه با تیمار کادمیوم در ریشه، برگ و دانه در هر دو رقم گردید ولی غلظت پتاسیم را افزایش داد. براساس یافته‌های این پژوهش، پتاسیم نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت دانه از طریق افزایش غلظت پتاسیم و کاهش غلظت کادمیوم دانه‌ها داشت.

کلید واژه‌ها: کادمیوم، جذب و انتقال، دسترسی زیستی

مقدمه

گیاهان از نظر جذب فلزات سنگین و توزیع آن در بافت‌های خود متفاوت هستند. عوامل محیطی مانند برهم کنش فلز سنگین با عناصر غذایی ضروری نیز می‌توانند بر میزان جذب این فلزات به‌وسیله‌ی گیاهان مؤثر باشند. جذب و توزیع کادمیوم در گیاه حتی می‌تواند باعث برهم خوردن تعادل عناصر غذایی ضروری و کاهش باروری گیاهان گردد (دودکا و همکاران[۱]، ۱۹۹۶). کادمیوم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات سنگین سمّی در طبیعت به شمار می‌رود که از طریق زنجیرهٔ غذایی در بدن انسان انباشت می‌شود (ژائو و همکاران[۲]، ۲۰۰۳). وجود کادمیوم به‌طور سریع به‌وسیله‌ی گیاه حس می‌شود و جذب آن از طریق ناقلین آهن و روی رخ می‌دهد که دارای میل ترکیبی پایینی با کادمیوم هستند (لی و کاپلان[۳]،۱۹۹۸). بنابراین، جلوگیری از جذب کادمیوم به وسیله‌ی ریشه، به عنوان اولین مکان دسترسی به فلزات سنگین در کل پیکرهٔ گیاه، می‌تواند یک رهیافت مهم در

1- Dudka *et al.*

2- Zhao *et al.*

3- Li & Kaplan

به حداقل رساندن اثرات نامطلوب بیولوژیکی این عنصر باشد. عوامل متعددی تجمع و انتقال کادمیوم را در سیستم‌های خاک و گیاه تحت تأثیر قرار می‌دهند که می‌توان به غلظت کادمیوم در خاک و میزان دسترسی به آن، pH خاک، پتانسیل اکسیداسیون و احیا، تغییر شکل آن در حضور سایر مواد آلی، نوع گونهٔ گیاهی و غلظت سایر عناصر اشاره کرد (مک لافلین و همکاران[1]، ۱۹۹۴). کادمیوم از طریق تغییر سینتیک جذب و ظرفیت بافری و توزیع پتاسیم بین فرم‌های مختلف، قابلیت جذب پتاسیم را کاهش می‌دهد (یانگ و اسکوجلی[2]، ۲۰۰۸).

کودهای شیمیایی می‌توانند با تغییر خواص خاک و یا واکنش با یون‌های فلزات سنگین، قابلیت دسترسی زیستی به کادمیوم را برای گیاهان تغییر دهند. به‌علاوه، خصوصیات خاک بر میزان تحرک شیمیایی و آزاد سازی این فلزات در محلول خاک مؤثر است (جوست و سولیدا[3]، ۱۹۸۸). کودهای پتاسیم بسته به آنیون همراه آن میزان جذب کادمیوم گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برخی تحقیقات نشان داده‌اند که مصرف پتاسیم سبب کاهش غلظت کادمیوم (لیو و همکاران[4]، ۲۰۱۲) و افزایش مادهٔ خشک در گیاهان در معرض کادمیوم می‌گردد (سو و همکاران[5]، ۲۰۱۲). هرچه فراهمی عناصر غذایی برای گیاه متعادل‌تر باشد، کاهش اثر تنش بر عملکرد مشهودتر خواهد بود. از فراهمی پتاسیم می‌توان به‌عنوان راهکاری برای کاهش سمیّت کادمیوم در گیاهان استفاده کرد و این امر مستلزم تعیین نسبت مطلوب پتاسیم به کادمیوم برای گونه‌های گیاهی مختلف و شرایط رشدی خاص است.

گندم دوروم بیشتر از سایر غلات تمایل به انباشت غلظت‌های نسبتاً بالای این فلز سمّی در بافت‌های خود دارد (هارت و همکاران[6]، ۲۰۰۶) و از نظر پاسخ به کادمیوم و تجمع آن در دانه دارای تنوع ژنتیکی است (کلارک و همکاران[7]، ۲۰۰۲). از آنجایی‌که کادمیوم موجود در مواد غذایی به دلیل مصرف بی‌رویهٔ کودهای فسفاته در اراضی کشاورزی، تهدیدی جدی برای سلامت مصرف کنندگان محسوب می‌شود، لذا سازمان‌های تجارت بین‌الملل به دنبال محدودکردن غلظت‌های مجاز کادمیوم در مواد غذایی عرضه شده در بازارهای بین المللی هستند. این امر لزوم توسعهٔ ارقام گندم دوروم دارای انباشت پایین کادمیوم و عملیات مدیریتی مناسب مزرعه‌ای در جهت کاهش انتقال کادمیوم از خاک به گیاه را نشان می‌دهد (هریس و تیلر[8]، ۲۰۰۴).

به‌نژادی ژنوتیپ‌های جدید با قابلیت انباشت پایین کادمیوم در دانه، یکی از شیوه‌های نوید بخش کاهش انباشت کادمیوم در دانه است (کلارک و همکاران، ۲۰۰۲) و در این راستا، از وجود تنوع زنتیکی بالا در انباشت کادمیوم می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی بهره برد. بنابراین، کشف سازوکارهای کنترل‌کننده‌ی انباشت کادمیوم در بخش‌های مورد تغذیهٔ گیاهان زراعی مهم بوده و درک سازوکارهای مؤثر بر جذب ریشه‌ای کادمیوم، انتقال از ریشه به اندام هوایی و انباشت آن در دانه می‌تواند موفقیت‌های برنامه‌های به‌نژادی را با هدف ایجاد ژنوتیپ‌های دارای انباشت پایین کادمیوم بهبود ببخشد. لذا این پژوهش به منظور بررسی تأثیر نوع و مقدار پتاسیم بر کاهش فراهمی زیستی و توان جذب کادمیوم به‌وسیله‌ی ریشه، انتقال به اندام هوایی و انباشت آن در دانهٔ دو رقم گندم دوروم صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

شرایط رشدی گیاه و تیمارها

به منظور اجرای این پژوهش، آزمایشی گلدانی در گلخانهٔ تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز در پاییز ۱۳۹۱، به صورت فاکتوریل با طرح پایهٔ بلوک کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد. برای این

1- Mclaughlin *et al.*
2- Yang & Skogley
3- Juste & Solida
4- Liu *et al.*
5- Su *et al.*
6- Hart *et al.*
7- Clarke *et al.*
8- Harris & Taylor

منظور، فاکتور اول در ۶ سطح تیماری، شامل شاهد (C)، ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک (Cd)، ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم برکیلوگرم خاک به همراه ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم (به ترتیب CdTK1 و CdTK2)، و ۳۵ و ۴۵ میلی‌گرم نانو پتاس بر کیلوگرم خاک از منبع نانوکلات پتاسیم ۲۷ درصد (به‌ترتیب CdNK1 و CdNK2) و فاکتور دوم شامل دو رقم گندم دوروم بهرنگ و یاواروس در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد آلودگی فلز سنگین در خاک، عنصرکادمیوم به صورت نمک مورد نظر ($CdCl_2. H_2O$) برای آلوده کردن وزن مشخصی از خاک محاسبه شد. سپس وزن محاسبه شدهٔ نمک به خاک مورد نظر اسپری شد وکاملاً با آن مخلوط گردید. خاک آلوده تا رطوبت اشباع آبیاری شد و برای ایجاد برهم‌کنش کادمیوم و خاک به‌مدت یک ماه رها شد تا شرایط آلودگی به کادمیوم تاحد امکان طبیعی‌تر شود.

نیازهای کودی خاک با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و حدود بحرانی نیتروژن، فسفر و پتاسیم تأمین گردید. جهت تأمین پتاسیم، با توجه به میزان پتاسیم قابل تبادل خاک (۱۳۵ میلی‌گرم درکیلوگرم)، مقدار کمبود کود تیمار شاهد و تیمار کادمیوم (Cd) تا سطح مورد نظر (۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از منبع سولفات پتاسیم تأمین شد. جهت تأمین پتاسیم تیمارهای ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم سولفات پتاسیم و ۳۰ و ۴۵ میلی‌گرم نانو پتاس بر کیلوگرم خاک از منبع نانو کلات پتاس ۲۷ درصد نیز همانند روش قبلی میزان پتاسیم لازم تا رسیدن به سطح تیمار مورد نظر محاسبه و به خاک گلدان‌های حاوی کادمیوم اضافه شد. بذرهای یکنواخت پس از ضدعفونی توسط قارچ‌کش ویتاواکس (غلظت یک در هزار) در گلدان‌های پلاستیکی (۳۰ سانتی‌متر قطر و ارتفاع) کشت شدند. برای هر واحد آزمایشی ۵ عدد گلدان در نظر گرفته شد. پس از استقرار گیاهچه‌ها، پنج عدد بوته‌ها در هر گلدان نگهداری شد و گلدان‌ها به هوای آزاد و در شرایط نوری طبیعی منتقل شدند.

اندازه‌گیری پارامترها

به منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه، میزان انباشت کادمیوم و پتاسیم در ریشه، برگ پرچم و دانهٔ گیاه، نمونه‌برداری در پایان فصل رشد صورت گرفت. غلظت کادمیوم به‌وسیلهٔ دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (Shimadzu AA ۶۳۰۰) و غلظت پتاسیم به‌وسیلهٔ دستگاه فلم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (راول[1]، ۱۹۹۴). اندازه‌گیری‌ها بر روی سه بوته از هر واحدآزمایشی انجام شد. پس از رسیدگی فیزیولوژیک دانه نیز ۱۵ بوته از هر واحد آزمایشی نمونه‌برداری و به‌مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای ۷۲ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد و عملکرد دانه محاسبه گردید.

محاسبات آماری

تجزیه‌واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخهٔ ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها به‌روش LSD، و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مورد بررسی بر عملکرد دانه، غلظت کادمیوم و پتاسیم ریشه، برگ پرچم و دانه در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت. تفاوت ارقام نیز از لحاظ عملکرد و غلظت کادمیوم دانه به ترتیب در سطح پنج ویک درصد معنی‌دار بود. بر هم‌کنش بین فاکتورهای مورد بررسی نیز تنها برای غلظت کادمیوم دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

عملکرد دانه

وجود فلزات سنگین مانند کادمیوم از عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاه محسوب می‌گردد. در این تحقیق نیز عملکرد دانه در پاسخ به حضور کادمیوم به تنهایی و کادمیوم همراه با پتاسیم به طور معنی‌داری در هر دو رقم گندم کاهش یافت (جدول ۳). کاربرد هردو نوع پتاسیم در شرایط حضور کادمیوم و در هر دو سطح

1- Rowell

سبب بهبود عملکرد هر دو رقم در مقایسه با تیمار کادمیوم بدون کاربرد پتاسیم شد. به هر روی، با کاربرد پتاسیم در حضور کادمیوم، میزان جذب پتاسیم نیز به دلیل افزایش مقدار آن در خاک افزایش یافته است و منجر به بهبود عملکرد دانه در حضور کادمیوم گردیده است (جدول ۳). کادمیوم با آسیب به غشاهای زیستی و از طریق جذب غیر قابل کنترل وارد گیاه می‌شود و با تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر و تخریب ملکول‌های زیستی و اندامک‌های سلولی به سرعت به اندام‌های هوایی منتقل می‌شود. علاوه بر این، گیاهان ممکن است کادمیوم را به مقدار قابل توجهی در قسمت‌های مختلف خود حتی بدون کاهش قابل توجه عملکرد تجمع دهند (دری و همکاران[1]، ۲۰۰۷).

انباشته شدن کادمیوم در محیط رشد ریشه سبب کاهش جذب و انتقال آب از طریق تغییر در فعالیت کانال‌های پروتئینی انتقال آب می‌شود و با کاهش فتوسنتز، تنفس و تعرق سبب کاهش رشد می‌گردد (چنگ و هانگ[2]، ۲۰۰۶). از آنجاکه تنش آب ناشی از حضور کادمیوم سبب کاهش انتقال موادغذایی از برگ-ها و سایر قسمت‌های گیاه به دانه می‌گردد و نیز سبب تسریع رسیدگی دانه‌ها می‌شود، بنابراین علاوه بر کاهش فتوسنتز در شرایط تنش، منجر به کاهش عملکرد دانه نیز گردیده است. تیمارهای کاربرد پتاسیم نیز احتمالاً به دلیل نقش عمومی و شناخته شدهٔ پتاسیم در برقراری تعادل بار الکتریکی در بافت‌های گیاهی و نیز حفظ تورژسانس سلولی سبب بهبود عملکرد گیاه شده است. مارچیول و همکاران[3] (۱۹۹۶) اظهار داشتند که پتاسیم ازطریق افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، میزان کلروفیل، سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، فعالیت فتوسنتزی و انتقال مواد حاصل از فتوسنتز، سبب افزایش عملکرد ماده خشک می‌شود.

1- Dheri *et al.*
2- Cheng & Huang *et al.*
3- Marchiol *et al.*

غلظت کادمیوم ریشه

غلظت کادمیوم ریشهٔ هر دو رقم در شرایط حضور کادمیوم در سطح یک درصد در مقایسه با شاهد حدود ۴۲ برابر افزایش یافت، اگرچه با کاربرد پتاسیم به طور معنی‌داری کاهش یافت (جدول ۳). انباشت کادمیوم در ریشهٔ هردو رقم تفاوت چندانی نداشت (جدول ۳).

جذب فلزات‌سنگین به‌درون سلول‌های گیاهی از طریق ویژگی‌های ذاتی گیاه مانند ظرفیت نگهداری فلزات سنگین در ریشه‌ها تنظیم می‌شود (اسکوتزندوبل و پل[4]، ۲۰۰۲). همان طور که مشاهده می‌شود غلظت کادمیوم ریشه چندین برابر غلظت آن در برگ پرچم و دانه است (جدول ۳). انباشت کادمیوم در ریشه یکی از سازوکارهای تحمل برخی گونه‌ها محسوب می‌شود و بخش زیادی از کادمیوم جذبی به صورت متصل به دیوارهٔ سلولی باقی‌می‌ماند (مارشنر[5]، ۱۹۹۵؛ هارت و همکاران، ۱۹۹۸). کادمیوم غیر اتصالی نیز ممکن است در واکوئل سلول‌های ریشه ذخیره و یا به اندام هوایی منتقل شود (سالت و واگنر[6]، ۱۹۹۳). فیتوکلاتین‌های ریشه ممکن است نقش مهمی در اتصال، ذخیره‌سازی و تحرک کادمیوم ایفا کنند (هارت و همکاران، ۲۰۰۵).

در حضور کادمیوم به‌نظر می‌رسد انتقال آب به اندام هوایی گیاه کاهش یابد و تنها در حدود ۱۰ درصد از این عنصر به اندام هوایی منتقل شده و بیشتر آن در ریشه‌ها انباشت گردد (واسیلیو و همکاران[7]، ۱۹۹۹).

دسترسی زیستی به کادمیوم بستگی به حضور سایر فلزات دارد (مک لافلین و همکاران[8]، ۱۹۹۴). چن و همکاران[9] (۲۰۰۶) بیان کردند که افزایش جذب کادمیوم با کاربرد سولفات پتاسیم بر اثر افزایش سولفات به خاک بوده است. اگرچه سو و همکاران[10] (۲۰۰۷) نشان دادند

4- schutzendubel & Polle
5- Marschner
6- Salt & Vanger
7 - Vassilev *et al.*
8- Mclaughlin *et al.*
9- Chen *et al.*
10- Su *et al.*

جدول ۱ـ نتایج مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت

موادآلی (درصد)	پتاسیم (میلی‌گرم درکیلوگرم)	فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم)	نیتروژن (درصد)	اسیدیته	هدایت‌الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	بافت –
۰/۵۳	۱۳۵	۱۱/۸	۰/۰۳۸	۷/۵	۲/۲۷	شنی

جدول ۲- تجزیه واریانس غلظت کادمیوم و پتاسیم ریشه، برگ پرچم و دانهٔ دو رقم گندم دوروم در شرایط حضور کادمیوم همراه با نوع و مقادیر مختلف پتاسیم

		میانگین مربعات						
			غلظت کادمیوم			غلظت پتاسیم		
	درجه آزادی	عملکرددانه	ریشه	برگ پرچم	دانه	ریشه	برگ پرچم	دانه
ارقام								
بلوک	۲	۰/۰۰۰۰۴ ns	۰/۰۴۷ ns	۰/۱۹۸ ns	۰/۰۴ ns	۰/۳۰۶ ns	۰/۴۱۹ ns	۰/۰۹ ns
رقم	۱	۰/۰۱۰ *	۰/۰۲۲ ns	۰/۰۲۴ ns	۰/۳۸ **	۰/۰۷۹ ns	۰/۹۴۷ ns	۰/۱۹ ns
سطوح پتاسیم	۵	۰/۲۰۱ **	۲۷۵۵/۴ **	۱۴۱/۵ **	۱۲/۲ **	۲۲/۷۲ **	۴۷۳/۶ **	۷/۶۶ **
رقم×سطوح پتاسیم	۵	۰/۰۰۰۷ ns	۳/۰۹ ns	۱/۷۴ ns	۰/۰۲۱ *	۰/۱۷ ns	۱/۲ ns	۰/۰۷ ns
خطای آزمایشی	۲۲	۰/۰۰۲	۲/۷۹	۱/۴۶	۰/۰۰۸	۰/۲۳	۲/۶۶	۰/۱۷
ضریب تغییرات (٪)		۸/۸۴	۳/۸۰	۱۱/۸۴	۲/۹۷	۸/۹۶	۷/۱۱	۱۱/۵۴

*، **: به ترتیب معنی دار در سطح ۵ و ۱ ٪، ns : غیر معنی‌دار

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت کادمیوم و پتاسیم ریشه، برگ پرچم و دانهٔ دو رقم گندم دوروم در شرایط حضور کادمیوم همراه با نوع و مقادیر مختلف پتاسیم

		غلظت کادمیوم			غلظت پتاسیم		
ارقام	عملکرددانه (گرم در سنبله اصلی)	ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم)	برگ پرچم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	دانه (میلی‌گرم در کیلوگرم)	ریشه (گرم در کیلوگرم)	برگ پرچم (گرم در کیلوگرم)	دانه (گرم در کیلوگرم)
بهرنگ	۰/۵۲ b	۴۳/۹ a	۸/۲ a	۳/۰۸ b	۴/۶۳ a	۲۲/۷۶ a	۴/۰۸ a
یاواروس	۰/۵۵ a	۴۱/۵a	۱۰/۲ a	۳/۷۵a	۴/۷۸ a	۲۳/۰۸ a	۴/۲۳ a
تیمارها							
C	۰/۷۹ a	۱/۴۵d	۰/۵۶ d	۰/۳۲e	۳/۲۱ c	۱۴/۲۱ c	۴/۰۳ c
Cd	۰/۲۲ d	۶۱/۲۲a	۱۳/۸۷ a	۴/۲a	۱/۳۹ d	۹/۵۴ d	۱/۹۲ d
CdTK1	۰/۵۶ bc	۴۷/۷۵c	۱۱/۰۲ c	۳/۴۸d	۵/۸۳ ab	۲۷/۰۲ b	۴/۶۱ b
CdTK2	۰/۵۱ c	۵۲/۵۵b	۱۲/۳۶ bc	۳/۸۷b	۶/۰۳ a	۲۹/۶۲ a	۵/۰۱ a
CdNK1	۰/۵۹ b	۴۶/۷۰c	۱۰/۹۶ c	۳/۴۶ d	۵/۴۶ b	۲۵/۸۶ b	۴/۵۰ b
CdNK2	۰/۵۲ c	۵۳/۷۲ b	۱۲/۵۹ b	۳/۷۴c	۶/۱۶ a	۳۱/۲۵ a	۵/۲۸ a

*میانگین‌های دارای حرف مشترک هر صفت در هر ستون و هر فاکتور آزمایشی با استفاده ازآزمون LSD در سطح احتمال ۵ ٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ٤- مقایسه میانگین نسبت غلظت کادمیوم بین اندام‌های مختلف ریشه، برگ پرچم و دانهٔ دو رقم گندم دوروم در شرایط حضور کادمیوم همراه با نوع و مقادیر مختلف پتاسیم

	نسبت کادمیوم		
ارقام	برگ پرچم به ریشه	دانه به ریشه	دانه به برگ پرچم
بهرنگ	۰/۱۸۶ **b**	۰/۰۷۰ **b**	۰/۳۷۵ **a**
یاواروس	۰/۲۴۵ **a**	۰/۰۹۰ **a**	۰/۳۶۷ **a**
تیمارها			
C	۰/۳۸۶ **a**	۰/۲۲۰**a**	۰/۵۷۱ **a**
Cd	۰/۲۲۶ **b**	۰/۰۶۸ **b**	۰/۳۰۲ **b**
CdTK1	۰/۲۳۰ **b**	۰/۰۷۲ **b**	۰/۳۱۵ **b**
CdTK2	۰/۲۳۵ **b**	۰/۰۷۳ **b**	۰/۳۱۳ **b**
CdNK1	۰/۲۳۱ **b**	۰/۰۷۴ **b**	۰/۳۱۵ **b**
CdNK2	۰/۲۳۴ **b**	۰/۰۶۹ **b**	ز ۰/۲۹۷

*میانگین‌های دارای حرف مشترک هر صفت در هر ستون و هر فاکتور آزمایشی با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ ٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

که پتاسیم سبب کادمیوم محلول خاک می‌شود و دسترسی زیستی ریشهٔ گندم به کادمیوم را کاهش می‌دهد. کاربرد نانوپتاس به احتمال زیاد می‌تواند در پاییز سبب افزایش نگهداری آن در خاک و آزادسازی تدریجی آن در بهار شود و نیاز گیاه را تأمین کند. همچنین با نگاهی اکولوژیک به نتایج این پژوهش می‌توان کاهش معنی‌دار جذب کادمیوم از خاک را در حضور پتاسیم به ویژه نانو پتاس (به‌میزان ده درصد مقدار مصرف سولفات پتاسیم) دلیلی بر قابل توصیه بودن این راهکار مدیریتی جهت افزایش کارایی کود و کاهش مصرف نهاده‌ها دانست. از جمله عوامل مؤثر بر دسترسی زیستی به کادمیوم می‌توان به اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه اشاره کرد. این مواد می‌توانند به کادمیوم متصل شده و مانع از تحرک آن در خاک شوند و این سازوکاری محافظتی در برابر کادمیوم است (لیائو و زی[1]، ۲۰۰۴). بنابراین این امکان وجود دارد که پتاسیم، انتشار ترشحات ریشه را افزایش دهد و از این طریق سمیّت کادمیوم را کاهش دهد.

کاربرد پتاسیم در شرایط تنش باعث گسترش رشد ریشه، افزایش جذب آب و در نتیجه افزایش تولید زیست‌توده می‌گردد (فریک و همکاران[2]، ۲۰۰۴) و به دلیل اثر رقیق‌کنندگی[3] سبب کاهش غلظت بالای کادمیوم برای غشاهای سلولی می‌گردد و در نتیجه کاهش سمیّت کادمیوم را به همراه خواهد داشت.

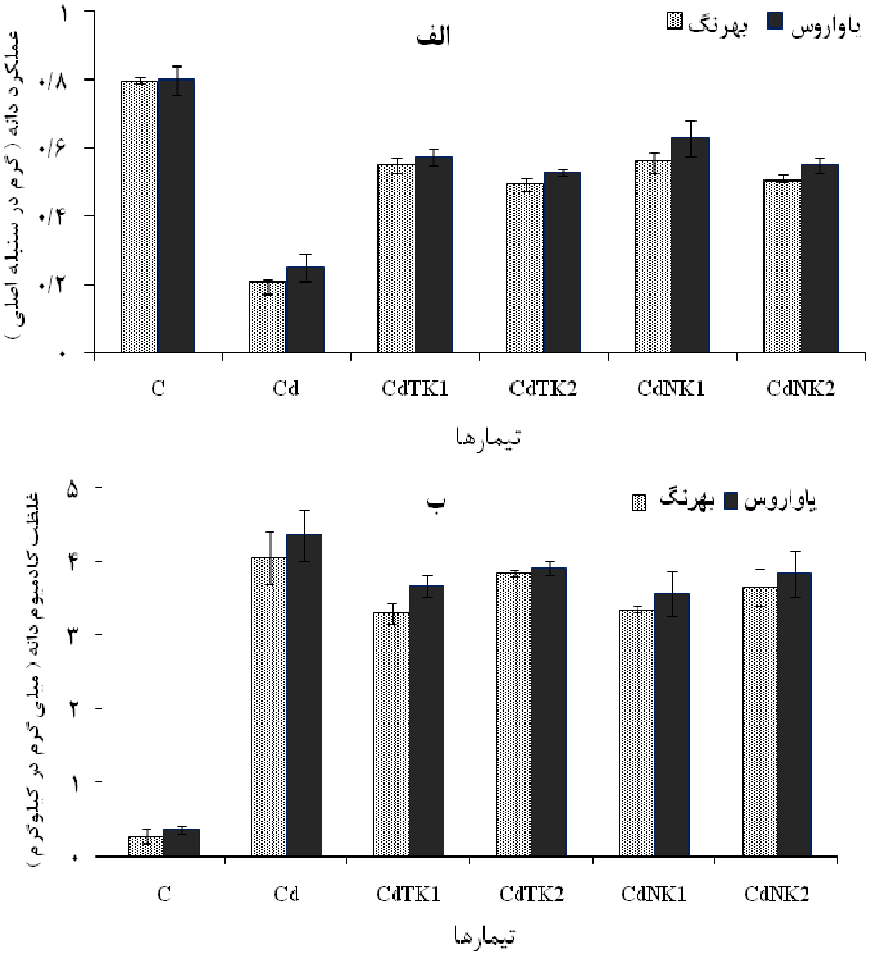
غلظت کادمیوم برگ پرچم

براساس نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها غلظت کادمیوم برگ پرچم هر دو رقم در حضور کادمیوم در سطح یک درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (حدود ۲۵ برابر)، و کاربرد تیمارهای پتاسیم انباشت کادمیوم برگ پرچم را به طور قابل توجهی کاهش داد (جدول ۲ و ۳).

1 - Liao & Xie

2- Fricke *et al.*

3- Dilution effect



شکل ۱- تأثیر کادمیوم (Cd) همرا با سطوح مختلف نانوپتاس (CdNK) و سولفات پتاسیم (CdTK) بر عملکرد دانه (الف) و غلظت کادمیوم دانه (ب) دو رقم گندم دوروم (نشانگرهای میله‌ای بیانگر مقادیر خطای معیار استاندارد میانگین سه تکرار است).

انباشت و سمیّت کادمیوم در برگ غلات در مقایسه با علوفهٔ دام و سبزیجات برگی که به مصرف مستقیم انسان می‌رسند از اهمیت کمتری برخوردار است، ولی بحث انتقال مجدد کادمیوم از برگ به دانه حائز اهمیت است. با ورود فلزات‌سنگین به سلول‌های ریشه، مقادیری از آن در ریشه باقی می‌ماند و بخشی دیگر به سلول‌های مجاور و یا از طریق آوندها و جریان تعرق به سمت بالا منتقل می‌شود و در اندام هوایی تجمع می‌یابد (سو و همکاران، ۲۰۰۷). انباشت کادمیوم به‌وسیله‌ی کمپلکس کادمیوم- فیتوکلاتین در واکوئل سلول‌های ریشه می‌تواند منجر به انباشت کمتر کادمیوم در برگ ها و در نهایت دانه شود که این امر صفتی ژنتیکی است و در ژنوتیپ‌های گندم ممکن است متفاوت باشد (استولت و همکاران[1]، ۲۰۰۳).

در این پژوهش، محتوای کادمیوم برگ با محتوای کادمیوم دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد (نتایج نشان داده نشده است). این امر می‌تواند برای تعیین تنوع محتوای کادمیوم در برگ‌ها و بر این اساس پیش بینی کادمیوم در دانهٔ گندم استفاده شود. اگرچه در آفتابگردان بین غلظت کادمیوم دانه و برگ در مرحله‌ی گیاهچه‌ای ارتباط چندانی مشاهده نشده است، ولی در مرحلهٔ گرده افشانی این همبستگی زیاد بود (لی و

4- Stolt *et al.*

همکاران، ۱۹۹۷). به نظر می‌رسد در مرحلهٔ گلدهی تعیین محتوای برگ می‌تواند برآوردی از مقدار کادمیوم دانه‌ها باشد (لی و همکاران، ۱۹۹۷).

منطبق با نتایج سایر تحقیقات در برنج (لیو و همکاران، ۲۰۱۲) و گندم (سو و همکاران، ۲۰۰۷)، کاربرد پتاسیم انباشت کادمیوم اندام هوایی را به طور قابل‌توجهی کاهش داد. با وجود حساسیت متفاوت گونه‌ها و ارقام گیاهی نسبت به آلاینده‌های فلزی، موضوع آشکار آن است که پتاسیم از طریق افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان کلروفیل و سطح برگ (منگل و کیرکبی[1]، ۱۹۸۷) به کاهش سمیّت کادمیوم و بقای گیاه کمک شایانی کرده است.

غلظت کادمیوم دانه

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها حاکی از افزایش قابل‌توجه غلظت کادمیوم دانهٔ هر دو رقم در شرایط حضور کادمیوم در مقایسه با شاهد (حدود ۱۳ برابر افزایش) بود (جدول ۳). مشخص شده که ژنوتیپ‌های گندم تتراپلویید غلظت کادمیوم بالاتری نسبت به ژنوتیپ‌های هگزاپلویید در خود انباشت می‌کنند (کرالجویک- بالالیک و همکاران[2]، ۲۰۰۹) و این تفاوت ممکن است ناشی از تفاوت در ظرفیت نگهداری کادمیوم در ریشه و یا بارگیری متفاوت آوند چوبی (هینسلی و همکاران[3]، ۱۹۸۲) و یا حتی انتقال مجدد بالای کادمیوم از برگ‌ها به دانه‌ها در طی مرحلهٔ پرشدن دانه باشد (هریس و تیلور[4]، ۲۰۰۱). کلارک و همکاران[5] (۲۰۰۲) نیز تنوع ژنتیکی را برای غلظت کادمیوم دانه در بین گندم‌های دوروم گزارش کردند. قابلیت دسترسی بالا به کادمیوم در گندم دوروم ممکن است یک دلیل مهم منجر به جذب بالای کادمیوم در این دو رقم باشد. هریس و تیلور (۲۰۰۴) نشان دادند که علیرغم انباشت یکسان کادمیوم در ریشه گیاهچه‌ی لاین‌های گندم دوروم، میزان انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی در بعضی لاین‌ها بالاتر از سایر لاین‌ها بود، که بیانگر تفاوت در انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی بود. عدم ارتباط بین جذب کادمیوم ریشه و غلظت کادمیوم بذر در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (هریس و تیلور، ۲۰۰۴؛ هارت و همکاران، ۲۰۰۵).

حداکثر غلظت مجاز کادمیوم در دانه گندم ۰/۱۲- ۰/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد و کاربرد تیمارهای پتاسیم، انباشت کادمیوم در دانه را تا حدودی کاهش داد (شکل ۱ ب). نتایجی نیز وجود دارد مبنی بر این که با مصرف کودهای پتاسیم، انباشت کادمیوم در بخش‌های مختلف گندم بهاره (ریشه، ساقه و دانه) کاهش (سو و همکاران، ۲۰۰۷) و یا افزایش (گرانت و همکاران[6]، ۱۹۹۹) می‌یابد.

کاربرد پتاسیم می‌تواند با افزایش فتوسنتز سبب افزایش تولید زیست تودهٔ گیاه شود، در نتیجه غلظت کادمیوم در دانهٔ گندم به دلیل اثر رقیق‌کنندگی کاهش می‌یابد. به عبارتی پتاسیم از طریق افزایش طول دورهٔ پرشدن دانه و دوام سطح برگ و تغذیهٔ بیشتر با مواد فتوسنتزی سبب افزایش وزن تک دانه شده و در نتیجه سبب رقیق‌شدن کادمیوم در دانه‌ها می‌شود (اولیور و همکاران[7]، ۱۹۹۴). البته گزارش گرانت و بیلی[8] (۱۹۹۷) مبنی بر همبستگی مثبت بین عملکرد دانه و غلظت کادمیوم نشان داد که افزایش تولید ماده خشک لزوماً منجر به رقیق‌شدن کادمیوم نمی‌شود. میزان کادمیوم، مدیریت کود مورد استفاده و نوع رقم از ملاحظات مهم در این مورد هستند. نظر و همکاران[9] (۲۰۱۲) نیز بیان داشتند که مواد مغذی از طریق تولید فیتوکلاتین‌ها به انباشت کادمیوم در اندام رویشی کمک می‌کنند و از انباشت کادمیوم در دانه‌ها اجتناب می‌نمایند. مطالعهٔ

1- Mengel & Kirkby
2- Kraljevic-Balalic *et al.*
3- Hinesly *et al.*
4- Harris & Taylor
5- Clarke *et al.*
6 - Grant *et al.*
7- Oliver *et al.*
8- Grant & Bailey
9- Nazar *et al.*

حاضر به وضوح نشان می‌دهد که مدیریت کود پتاسیم می‌تواند غلظت کادمیوم دانه را تحت تأثیر قرار دهد.

در این تحقیق، رقم بهرنگ با غلظت کادمیوم دانهٔ کمتر (۳/۰۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) بر رقم یاواروس (۳/۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) تاحدودی برتری داشت و دلیل آن احتمالاً توانایی متفاوت انتقال مجدد مواد به دانه می‌باشد. زیرا علیرغم غلظت بالای کادمیوم ریشه در رقم بهرنگ (جدول ۳)، نسبت کادمیوم دانه به ریشه در این رقم پایین تر از رقم یاواروس بود (جدول ۴).

غلظت پتاسیم ریشه

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت پتاسیم ریشهٔ هر دو رقم در شرایط حضور کادمیوم در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت (۵۷ درصد کاهش) (جدول ۳). کاربرد پتاسیم، انباشت پتاسیم ریشه را افزایش داد، اگرچه غلظت پتاسیم ریشهٔ دو رقم تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳).

پتاسیم از عناصر ضروری و پر مصرف برای گیاهان است که جذب آن توسط گیاه از هر عنصر مغذی پس از نیتروژن تقریباً بیشتر است و شواهد مبنی بر افزایش میزان پتاسیم ریشهٔ گندم (ژائو[1]، ۲۰۰۳) با افزایش میزان پتاسیم خاک نیز قبلاً گزارش شده است.

نکته قابل توجه این است که در شرایط عدم مصرف پتاسیم و یا سطوح پایین آن، میزان جذب پتاسیم از خاک به‌وسیله گیاه کاهش می‌یابد، و این امر ممکن است باعث کاهش پتاسیم ریشه در حضور کادمیوم شده باشد. همچنین با توجه به میزان بالای پتاسیم در سطوح دوم تیمارهای پتاسیم، بالابودن میزان پتاسیم ریشه در این تیمارها امری بدیهی به نظر می‌رسد. اگرچه ممکن است به‌علت سهل‌الوصول بودن نانو پتاس جذب بیشتری به‌وسیله گیاه صورت گرفته باشد، ولی براساس نتایج این پژوهش تیمار نانوپتاس تفاوت چندانی با سولفات پتاسیم نداشت.

1- Zhu *et al.*

غلظت پتاسیم برگ

براساس نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها غلظت پتاسیم برگ پرچم هر دو رقم در حضور کادمیوم در سطح یک درصد در مقایسه با شاهد کاهش یافت (۳۳ درصد کاهش)، و کاربرد تیمارهای پتاسیم سبب افزایش انباشت پتاسیم در برگ پرچم گردید و سطوح دوم نانوپتاس و سولفات پتاسیم دارای بیشترین میزان پتاسیم برگ بود (جدول ۲ و ۳). افزایش عملکرد و افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم برگ همراه با مصرف کود پتاسیم قبلاً نیز گزارش شده است (گرو و همکاران[2]، ۱۹۸۷). در این رابطه ظاهراً فراهمی پتاسیم خاک، عامل مؤثر بر افزایش پتاسیم برگ می‌باشد. ما و همکاران[3] (۲۰۰۰) افزایش پتاسیم در بخش‌های هوایی و دانه را شاخصی از تنظیم اسمزی گیاه دانستند. گوگرسنا و همکاران[4] (۲۰۰۲) بیان کردند که کادمیوم می‌تواند جذب سطحی پتاسیم را کاهش داده و گیاه را با کمبود پتاسیم مواجه سازد. بنابراین، افزایش پتاسیم در خاک به رشد ریشه نیز کمک شایانی می‌کند و جذب بهتر پتاسیم را برای گیاه به‌دنبال دارد. در این پژوهش، با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین منابع مختلف پتاسیم، استفاده از نانوپتاس با مقادیر مصرفی کمتر از سولفات پتاسیم ارزشمند به نظر می‌رسد.

غلظت پتاسیم دانه

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نیز کاهش غلظت پتاسیم دانهٔ هر دو رقم را در شرایط حضور کادمیوم در مقایسه با شاهد (حدود ۵۳ درصد کاهش) نشان داد که ممکن است به علت فراهمی کم پتاسیم قابل جذب در حضور کادمیوم (گوگرسنا و همکاران، ۲۰۰۲) باشد (جدول۲ و ۳). کاربرد پتاسیم منطبق با کاهش انباشت کادمیوم، منجر به افزایش غلظت پتاسیم دانه با برتری سطوح دوم تیمار پتاسیم گردید، به طوری که سطوح پتاسیم دانه حتی از مقادیر شاهد نیز بیشتر بود

2-Grove *et al.*
3- Ma *et al.*
4- Gogorcena *et al.*

(جدول ۳). در واقع با کاربرد کود پتاسیم میزان پتاسیم دانه افزایش یافت. افزایش پتاسیم دانه همراه با افزایش سطوح تیماری پتاسیم می‌تواند به دلیل قابلیت افزایش رشد و توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه در اثر مصرف پتاسیم باشد، به طوری‌که باعث افزایش سطح جذبی و بنابراین افزایش جذب عناصر می‌شود. بنابراین با افزایش کود پتاسیم در خاک، میزان پتاسیم دانه نیز افزایش می‌یابد (کال و گرو[1]، ۱۹۹۱). بنابرین، می‌توان گفت که تغذیهٔ مناسب برای کاهش سمیّت کادمیوم در گیاهان در معرض کادمیوم نسبتاً ارزان بوده و باعث صرفه جویی در زمان می‌شود و رویکرد مناسبی برای جلوگیری از ورود آلودگی‌های کادمیومی به زنجیرهٔ غذایی فراهم می‌سازد.

نتیجه گیری

از نتایج این پژوهش چنین استنباط می‌شود که تنش کادمیوم عملکرد دانه و برخی از پارامترهای مرتبط با کیفیت دانه مانند غلظت کادمیوم دانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین منجر به انباشت متفاوت کادمیوم در ریشه‌ها، اندام‌هوایی و دانه‌ها می‌گردد. کاربرد پتاسیم به دلیل دارا بودن اثرات آنتاگونیستی با کادمیوم می‌تواند بر جذب و انباشت کادمیوم تأثیر بگذارد و توزیع و انباشت آن را به‌ویژه در دانه کاهش دهد و این امر در جهت دستیابی به هدف کاهش بیشتر غلظت کادمیوم در دانه‌ها و افزایش سلامت آن بود، اگرچه غلظت کادمیوم دانه همچنان بیشتر از غلظت مجاز آن در دانه (۰/۱۲– ۰/۱۰) بود. البته در همین راستا شناخت کافی از عوامل منجر به کاهش سلامت مواد غذایی از نظر ورود نانوکودها به زنجیره غذایی امری ضروری است. در پایان نیز پیشنهاد می‌شود که جهت استفادهٔ عملی از سایر مواد شیمیایی در برنامه‌های به زراعی جهت انباشت کمتر این فلز سنگین در دانهٔ گیاه، انجام آزمایش‌ها در شرایط متغیر مزرعه نیز مورد توجه قرار گیرد.

5- Coal & Grove

منابع

1. Chen, S.B., Zhu, Y.G., and Ma, Y.B. 2006. The effect of grain size of phosphate amendment on metal immobilization in contaminated soils. Hazardous Materials, 134: 74–79.

2. Cheng, S., and Huang, C. 2006. Influence of cadmium on growth of root vegetable and accumulation of cadmium in the edible root. International Journal of Applied Science and Engineering, 3: 243-252.

3. Clarke, J.M., Norvell, W.A., Clarke, F.R., and Buckley, W.T. 2002.Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenicdurum lines. Canadian Journal of Plant Science, 82:27-33.

4. Coal, F.J., and Grove, J.H. 1991. Potassium utilization by no-till full-season and double-crop soybean. Agronomy Journal, 83: 190-194.

5. Dheri, G.S., Brar, M.S., and Malhi, S.S. 2007. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two Cd contaminated soils. Plant Nutrition and Soil Science, 170: 495-499.

6. Dudka, S., Piotrowska, M., and Terelak, H. 1996. Transfer of cadmium, lead and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: A field study. Environmental Pollution, 94: 181-188.

7. Fricke, W., Akhiyarova, G., Veselov, D., and Kudoyarova, G. 2004. Rapid and tissue-specific changes in ABA and in growth rate in response to salinity in barley leaves. Journal of Experimental Botany, 55: 1115-1123.

8. Gogorcena, Y., Lucena, J., and Abadia, J. 2002. Effects of Cd and Pb in sugar beets plantsgrown in nutrient solution: Induced Fe deficiency and growth inhibition. Functional PlantBiology, 29: 1453-1464.

9. Grant, C.A., and Bailey, L.D. 1997. Effect of phosphorus and zinc fertilizer management on cadmium accumulation in flax seed. Science of Food and Agriculture, 73: 307-314.

10. Grant, C.A., Baily, L.D., and McLaughlin, M.J. 1999. Management factors which influence cadmium concentrationsin crops. In: McLaughlin, M.J., and Singh, B.R. (Eds). Cadmium in soils and plants (pp. 151–198). Dordrecht, the Netherlands: Kluwer AcademicPublishing.

11. Grove, J.H., Thom, W.O., Murdock, L.W., and Herbek, J.H. 1987. Soybean response to available potassium in three silt loam soils. Soil Science Society of American Journal, 51: 1231-1238.

12. Harris, N.S., and Taylor, G.J. 2001. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation. BMC Plant Biology, 52:1473-1481.

13. Harris, N.S., and Taylor, G.J. 2004. Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain Cd accumulation. BMC Plant Biology, 4: 4-10.

14. Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A., and Kochian, L.V. 2006. Characterization of cadmium uptake, translocation and storage in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration. New Phytologist, 172: 261–271.

15. Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A., Clarke, J.M., and Kochian, L.V. 2005. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration. American Journal of Physiology, 167: 391-401.

16. Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A., Kochian, L.V. 2002. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. Physiologia Plantarum, 116: 73–78.

17. Hinesly, T.D., Redborg, K.E., Ziegler, E.L., and Alexander, J.D. 1982. Effect of soil exchange capacity on the uptake of Cd by corn. Soil Science Society of American Journal, 46: 490-497.

18. Juste, C., and Solida, P. 1988. Influence de laddition de differentes matieres fertilisantes sur la biodisponibilite du cadmium, du manganese, du nickel et du zinc contenus dans un sol sableux amende par des boues de station d epuration. Agronomy Journal, 8: 897-904.

19. Kraljevic-Balalic, M., Mladenov, N., Balalic, I., and zoric, M. 2009. Variability of leaf cadmium content in tetraploid and hexaploid wheat. Genetica Journal, 41 (1): 1-10.

20. Liao, M., and Xie, X. M. 2004. Cadmium release in contaminated soils due to organic acids. Pedosphere, 14(2): 223-228.

21. Li, Y.M., Chaney, R.L., Schneiter, A.A., Miller, J.F., Elias, E.M., and Hammond, J.J. 1997. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Euphytica, 94: 23-30.

22. Li, L., and Kaplan, J. 1998. Defects in the yeast high affinity iron transport system result in increased metal sensitivity because of the incressed expression of transporters with a broad transition metal specificity. Biological Chemistry, 273: 22181-22187.

23. Liu, C.H., Dar Huang, W., and Kao, C.H. 2012. The decline in potassium concentration is associated with cadmium toxicity of rice seedlings. Acta Physiologiae Plantarum, 34(2): 495-502.

24. Ma, J.F, Hiradate, S., and Norvell, P. 2000. Form of cadmium for uptake and translocation in durum wheat under salty condition. Biologia Plantarum, 211: 355-360.

25. Marchiol, L., Letia, L., Marti, M., Pperssotti, A., and Zerbi, G. 1996. Physiological responses of two soybean cultivarsto cadmium. Environmental Quality, 25: 562-566.

26. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd Edition, Academic press.

27. McLaughlin, M.J., Williams, C.M.J., McKay, A., Kirkham, R., Gunton, J., Jackson, K.J., Thompson, R., and et al. 1994. Effect of cultivar on uptake of cadmium by potato tubers. Australian Journal of Agricultural Research, 45: 1483-1495.

28. Mengel, K., and Kirkby, E.A. 1987. Principles of Plant Nutrition. International Potash Institute, Switzerland. International Potash Institute, Bern, Switzerland.pp: 1-687.

29. Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A.R., Khan, M.I., Syeed, S., and Khan, N.A. 2012. Cadmium Toxicity in Plants and Role of Mineral Nutrients in Its Alleviation. American Journal of Plant Sciences, 3: 1476-1489.

30. Oliver, D.P., Hannam, R., Tiller, K.G., Wilhelm, N.S., Merry, R.H., and Cozens, G.D. 1994. Heavy metals in the environment: The effect of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. Environmental Quality, 23: 705-711.

31. Rowell, D.L. 1994. Soil Science, Methods and Applications. Longman Scientific and Technical, Harlow.

32. Salt, D.E., and Wagner, G.J. 1993. Cadmium transport across tonoplast of vesicles from oat roots. Evidence for a Cd^{2+}/H^{+} antiport activity. Biological Chemistry, 268: 12297-12302.

33. Schutzendubel, A., and Polle, A. 2002. Plant response to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. Journal of Experimental Botany, 53 (372): 1351-1365.

34. Stolt, J.P., Sneller, F.E.C., Bryngelsson, T., Lundborg, T., and Schat, H. 2003. Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat. Environmental and Experimental Botany, 49: 21-28.

35. Su, C., Lina, S., Tieheng, S., Lei, C., and Guanlin, G. 2012. Interaction between cadmium, lead and potassium fertilizer (K_2SO_4) in a soil- plant system. Environmental Geochemistry and Health, 29(5): 435-446.

36. Vassilev, A., Tsonev, T., and Yordanov, I. 1999. Physiological response of barley (*Hordeum vulgare*) to cadmium containing soil during ontogensis. Environment pollution, 103: 287-293.

37. Yang, J., and Skogley, E. 2008. Copper and cadmium effects on potassium adsorption and buffering capacity. Soil Science Society of America, 54: 739-744.

38. Zhao, Z.Q., Zhu, Y.G., Li, H.Y., Smith, S.E., and Smith, A.F. 2003. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars ofspring wheat (*Triticum aestivum* L.). Environment International, 29: 973-978.

39. Zhu, E., Liu, D., Li, J.G., Li, T.Q., Yang, X. E., He, Z. L., and Stoffella, P. J. 2011. Effect of Nitrogen Fertilizer on Growth and Cadmium Accumulation in Sedum alfredii Hance. Journal of Plant Nutrition, 34: 115-126.