

بررسی جذب پتاسیم و کادمیوم در ارقام مختلف گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش کادمیوم

ایمان جوادزین^۱، بابک متشرع زاده^۲، مهدی تفویضی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۹

چکیده

آگاهی از اثرات مخرب کادمیوم بر مقدار پتاسیم در ارقام مختلف گندم، به‌عنوان محصولی راهبردی در تأمین امنیت غذایی کشور اهمیت دارد. هدف از این تحقیق، بررسی وضعیت تغذیه‌ای پتاسیم در ارقام مختلف گندم تحت تنش کادمیوم بود. برای این منظور آزمایشی فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح کادمیوم (صفر (شاهد) (Cd₀), 40 (Cd₄₀)) و ۸۰ (Cd₈₀) میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) و ۱۴ رقم گندم (بهار، نیک نژاد، مرودشت، پارسی، سیوند، شیراز، روشن، پیشناز، آزادی، شهریار، پیشگام، امید، الوند و نوید) بود. بیشترین و کمترین مقدار جذب پتاسیم در بخش هوایی در تیمار Cd₄₀ نسبت به تیمار Cd₀ به ترتیب در ارقام الوند (۲/۰۸ درصد) و بهار (۰/۸۱ درصد) مشاهده شد. در تیمار Cd₈₀ بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم بخش هوایی نسبت به تیمار Cd₀ به ترتیب در ارقام شهریار (۱/۱ درصد) و پیشناز (۰/۵۴ درصد) مشاهده شد. در تیمار Cd₄₀ بیشترین و کمترین مقدار جذب کادمیوم به ترتیب توسط رقم نیک نژاد (هفت میلی‌گرم بر کیلوگرم) و رقم پارسی (دو میلی‌گرم بر کیلوگرم) صورت گرفته بود. از طرفی در تیمار Cd₈₀ بیشترین و کمترین مقدار کادمیوم به ترتیب در بخش هوایی ارقام پیشگام (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوید (شش میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. در مجموع، دو رقم نیک نژاد و پیشگام بیشترین قابلیت برداشت کادمیوم را داشتند، همچنین کمترین قابلیت برداشت کادمیوم در دو رقم پارسی و نوید مشاهده شد. از طرف دیگر ارقام الوند و شهریار بیشترین و ارقام بهار و پیشناز کمترین مقدار پتاسیم در بخش هوایی را داشتند.

واژه‌های کلیدی: عناصر سنگین، امنیت غذایی، وضعیت تغذیه‌ای، آلودگی اراضی.

مقدمه

یک انسان معادل یک میکروگرم کادمیوم به ازای هر کیلوگرم از وزن بدن است (FAO, 1989). کادمیوم به‌صورت مجزا در طبیعت وجود ندارد، بلکه در اکثر موارد به‌صورت فلز همراه در کانی‌های حاوی سرب و روی یافت می‌شود (Baker et al., 1990). دامنه غلظت کادمیوم در فاز محلول خاک‌های غیر آلوده بین ۰/۰۴ تا ۰/۳۲ میکرومولار متغیر است (Wagner, 1993). مهم‌ترین خصوصیت اثرگذار خاک بر مقدار برداشت کادمیوم توسط گیاهان، pH خاک است، به‌طوری‌که با کاهش pH مقدار

استفاده گسترده از کودهای فسفاته منجر به افزایش تدریجی کادمیوم طی دهه‌های گذشته در اراضی کشاورزی شده است (Pinto et al., 2004). از طرفی کادمیوم به دلیل سمیت زیاد و تحرک بالا در خاک، امنیت غذایی انسان و دام را تهدید می‌کند (Bertin and Averbeck, 2006). سمیت کادمیوم در گیاهان منجر به آسیب رساندن به نوک ریشه، کاهش فتوسنتز، بروز پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در همه بخش‌های گیاه و جلوگیری از رشد گیاه می‌شود (Das et al., 1997). حد مجاز ورود روزانه کادمیوم به بدن

فلزات سنگین (به‌عنوان مثال مس) به نظر نمی‌رسد که به‌طور مستقیم باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن شود (Salin, 1988).

گیاهان در سطح سلولی با استفاده از سیستم‌های دفاعی با تنش کادمیوم مقابله می‌کنند، از جمله می‌توان به غیر متحرک کردن کادمیوم توسط دیواره سلولی (Nishizono et al., 1989) و کربوهیدرات‌های برون سلولی از قبیل موسیلاژ (Verkleij et al., 1991)، دفع و جلوگیری از ورود کادمیوم به سیتوسول به دلیل وجود غشای پلاسمایی به‌ویژه از طریق کانال‌های ورود کلسیم در غشای پلاسمایی در مراحل اولیه جوانه‌زنی (Rivetta et al., 1997)، ترشح فیتوکلات‌ها به‌ویژه توسط سامانه‌های مرتبط با متابولیسم گوگرد به‌محض ورود کادمیوم به سیتوسول (De Knecht et al., 1995)، نگهداری کادمیوم در حفره‌های آوند آبکش توسط فیتوکلات‌هایی با وزن مولکولی پایین (Vogeli-Lange and Wagner, 1996)، ایجاد کمپلکس با متالوتیونین‌ها (Kägi, 1991)، تولید پروتئین‌های استرس (Czarnecka et al., 1988)، سنتز اتیلن (Führer, 1982) و تولید مولکول‌های هشداردهنده تنش از قبیل سالیسیلیک اسید، جاسمونیک اسید و نیتریک اکسید (Popova, 2012) اشاره کرد.

گندم اهمیت زیادی در تأمین غذا، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه و پرجمعیت دارد (Yanai et al., 1998). در اراضی کشاورزی کشور طی چهل سال گذشته به‌طور متوسط سالانه بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم کود فسفات به ازای هر هکتار مصرف شده است که مقدار کادمیوم استخراج شده توسط اسید نیتریک به ازای هر کیلوگرم فسفر حاصل از این کود، ۵۰ میلی‌گرم بوده است (Jalali and Khanlari, 2008)، به‌عبارت‌دیگر، در طی چهار دهه گذشته به ازای هر هکتار از اراضی کشاورزی، بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ گرم کادمیوم تنها از طریق کاربرد کودهای فسفات به‌ناچار وارد خاک‌های زراعی شده است. با توجه به اهمیت آگاهی از اثرات سوء کادمیوم بر وضعیت تغذیه‌ای پتاسیم در ارقام مختلف گندم، به‌عنوان محصولی راهبردی در تأمین امنیت غذایی کشوری مانند ایران که در آن گندم نقش دروازه ورودی هرم غذایی جامعه را دارد، این تحقیق در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

جذب کادمیوم توسط گیاهان افزایش می‌یابد (Kirkham, 2006)، اما از طرفی نیز با افزایش pH خاک، همیشه مقدار برداشت کادمیوم کاهش نمی‌یابد (Singh et al., 1995).

به‌محض ورود کادمیوم به ریشه گیاه، این عنصر از طریق مسیر آپوپلاستی وارد آوند چوبی می‌شود (Salt and Wagner, 1993) و در مسیر حرکت خود با لیگاندهای مختلف از قبیل اسیدهای آلی و یا فیتوکلات‌ها کمپلکس ایجاد می‌کند (Cataldo et al., 1988; Senden et al., 1994). تحقیقات نشان داده که کادمیوم در آوند چوبی از طریق جریان آب به بخش هوایی گیاه منتقل می‌شود (Greger and Landberg, 1995). کادمیوم با جلوگیری از فعالیت آنزیم نیترات رداکتاز، جذب و انتقال نیترات از ریشه به بخش هوایی گیاه را کاهش می‌دهد (Hernandez et al., 1996). این عنصر تعادل آب در درون گیاه را مختل می‌کند (Costa and Morel, 1994) و سبب آسیب رساندن به سیستم فتوسنتز کننده و مسیر فتوسیستم I و II می‌شود (Siedlecka and Krupa, 1996). نتایج تحقیق لارسن و همکاران (Larsson et al., 1998) نشان داد که کادمیوم سبب کاهش مقدار کلروفیل و کارتنوئید در گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) شده بود. همچنین فلز کادمیوم می‌تواند باز و بسته شدن روزنه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد که دلیل آن را به اثرات کادمیوم بر جابه‌جایی یون‌های پتاسیم و کلسیم و مولکول آبسیزیک اسید در سلول‌های نگهبان روزنه نسبت می‌دهند (Barcelo and Poschenrieder, 1990). این عنصر اثرات مخرب زیادی بر رشد و توسعه گیاهان دارد، به‌عنوان مثال می‌توان به جلوگیری از تشکیل ریشه‌های جانبی و سفت شدن و پیچ‌خوردگی ریشه‌های اصلی (Krantev et al., 2008; Rascio and Navari, 2011; Yadav, 2010) کاهش مقدار کلروفیل و جلوگیری از فتوسنتز (Miyadate et al., 2011) و دخالت در برداشت عناصر غذایی و انتقال آب در گیاه (Das et al., 1997) اشاره نمود. در تحقیقی مشخص گردید که کادمیوم با کاهش فعالیت آنزیم‌های ATP_{ase} و فریک رداکتاز موجب کاهش جذب پتاسیم در گیاه نخود شده است (Sandalio et al., 2001). یومار و همکاران (Umar et al., 2008) نیز به اثرات آنتاگونیسمی بین کادمیوم و پتاسیم در تحقیق خود اشاره کرده‌اند.

کادمیوم همچنین سبب بروز تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Hendry et al., 1992) اما در مقایسه با سایر

مواد و روش‌ها

به‌منظور ایجاد تعادل در خاک انکوباسیون شدند. بذر ارقام از موسسه تحقیقات تهیه بذر و نهال کرج تهیه شد. جهت ضد عفونی کردن بذر، ابتدا بذر، ابتدا بذر، به مدت ۳۰ ثانیه در الکل اتیلیک ۹۶ درصد غوطه‌ور شده سپس برای ۱۵ ثانیه در محلول آب‌اکسیژنه قرار گرفتند و در نهایت با آب مقطر شسته شدند.

واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌های یک کیلوگرمی بود و تعداد ۱۰ بذر در آن کاشته شد که پس از ۱۰ روز تعداد پنج گیاهچه از آن‌ها تنک گردید. شرایط دمایی گلخانه بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد حفظ شد. در طول دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها به‌صورت وزنی و بر اساس ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه با آب مقطر انجام گردید، پس از ۳۵ روز بخش هوایی همه ارقام برداشت شد. سپس اقدام به اندازه‌گیری درصد پتاسیم و غلظت کادمیوم بخش هوایی ارقام مورد بررسی شد (Erwin and Victor, 2004). داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS Version 19 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه میانگین اثرات اصلی و متقابل در سطح ۵ درصد با آزمون توکی صورت گرفت.

این تحقیق در قالب یک آزمایش فاکتوریل، به‌صورت طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام شد. قبل از کشت، خاک زراعی از مزرعه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه و صفات فیزیکی و شیمیایی آن بر اساس روش‌های استاندارد (Erwin and Victor, 2004) تعیین گردید (جدول ۱). کود موردنیاز (شامل ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم از منبع کلرید پتاسیم) بر اساس نتایج آزمون خاک قبل از کشت به گلدان‌ها افزوده شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح کادمیوم (صفر (شاهد) (Cd_0), Cd_{40} (40) و Cd_{80}) میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) و چهارده رقم گندم (بهار، نیک نژاد، مرودشت، پارس، سیوند، شیراز، روشن، پیشتان، آزادی، شهریار، پیشگام، امید، الوند و نوید) بود. تیمار کادمیوم از طریق اسپری نمودن نمک نترات کادمیوم ($Cd(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$) به خاک گلدان‌ها اعمال شد (Motesharezadeh et al., 2008). خاک گلدان‌ها قبل از کشت بذر، به مدت سه ماه

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش.

Table 1. Physical and chemical properties of soils tested.

Properties	خصوصیت	Content	مقدار
Soil texture class	کلاس بافت خاک	لومی رسی Clay-loam	
Sand (%)	شن (درصد)	33	
Silt (%)	سیلت (درصد)	37	
Clay (%)	رس (درصد)	30	
Soil pH	واکنش خاک	8.1	
Field capacity moisture (%)	رطوبت ظرفیت مزرعه (درصد)	20	
Electrical conductivity (dSm^{-1})	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	1.55	
CEC ($Cmol\ kg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم)	12.2	
Potassium ($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	173	
Cadmium ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	0.75	

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی بر صفات مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. اثرات اصلی و متقابل کادمیوم و رقم بر درصد پتاسیم و غلظت کادمیوم بخش هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. ($p \leq 0.01$)

اثر آلودگی کادمیوم بر درصد پتاسیم بخش هوایی

بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم در بخش هوایی در تیمار Cd_0 نسبت به تیمار Cd_0 به ترتیب در ارقام الوند (۲/۰۸ درصد) و بهار (۰/۸۱ درصد) مشاهده شد. در تیمار Cd_{80} بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم بخش هوایی نسبت به تیمار Cd_0 به ترتیب در ارقام شهریار (۱/۱ درصد) و پیش‌تاز (۰/۵۴ درصد) مشاهده شد (شکل ۱).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، آلودگی کادمیوم بر میزان جذب پتاسیم اثر بازدارنده داشت که با نتایج یومار و همکاران (Umar et al., 2008) مطابقت داشت. به نظر می‌رسد که کادمیوم با برخی عناصر غذایی از جمله پتاسیم برای جذب از طریق ناقل‌های غشایی رقابت دارد (Rivetta et al., 1997). جذب پتاسیم توسط گیاه انتخابی است و همبستگی بالایی با فعالیت‌های متابولیسم گیاه دارد (Malakooti et al., 2005). از طرفی سمیت کادمیوم در محیط ریشه و ایجاد اختلال در متابولیسم گیاه سبب تغییر

فعالیت آنزیم‌هایی می‌شود که به نحوی با پتاسیم در ارتباط هستند (Zhang et al., 2002). نارول و همکاران (Narwal et al., 1993) کاهش مقدار جذب پتاسیم در حضور کادمیوم در ذرت را گزارش داده‌اند. هرچند بعضی محققان افزایش جذب پتاسیم توسط بخش هوایی در گیاه ذرت تحت تنش کادمیوم را گزارش کرده‌اند (Ciecko et al., 2004). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2002) مشاهده نمودند که با افزودن کادمیوم به محیط رشد ارقام مختلف گندم، مقدار پتاسیم بخش هوایی کاهش و مقدار آن در ریشه افزایش یافت، این محققان دلیل آن را تجمع پتاسیم در ریشه و جلوگیری از انتقال آن به بخش هوایی بیان کردند. نادا و همکاران (Nada et al., 2007) مشاهده کردند که با افزایش سطح کادمیوم، مقدار پتاسیم بخش هوایی کاهش نشان داد. این در حالی است که گارسیا و همکاران (Garcia et al., 2006) زمانی که گیاهچه‌های آفتابگردان را با محلول کادمیوم به غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای ۴۰ روز آبیاری کردند، مقدار پتاسیم در ساقه آفتابگردان افزایش یافت. زورنوزا و همکاران (Zornoza et al., 2002) گزارش کردند که در بخش هوایی گیاهچه‌های لوبیای سفید که برای ۳۵ روز به محلول غذایی آن‌ها ۱۸ و ۴۵ میکرومولار کادمیوم اضافه شده بود، مقدار پتاسیم کاهش یافته بود.

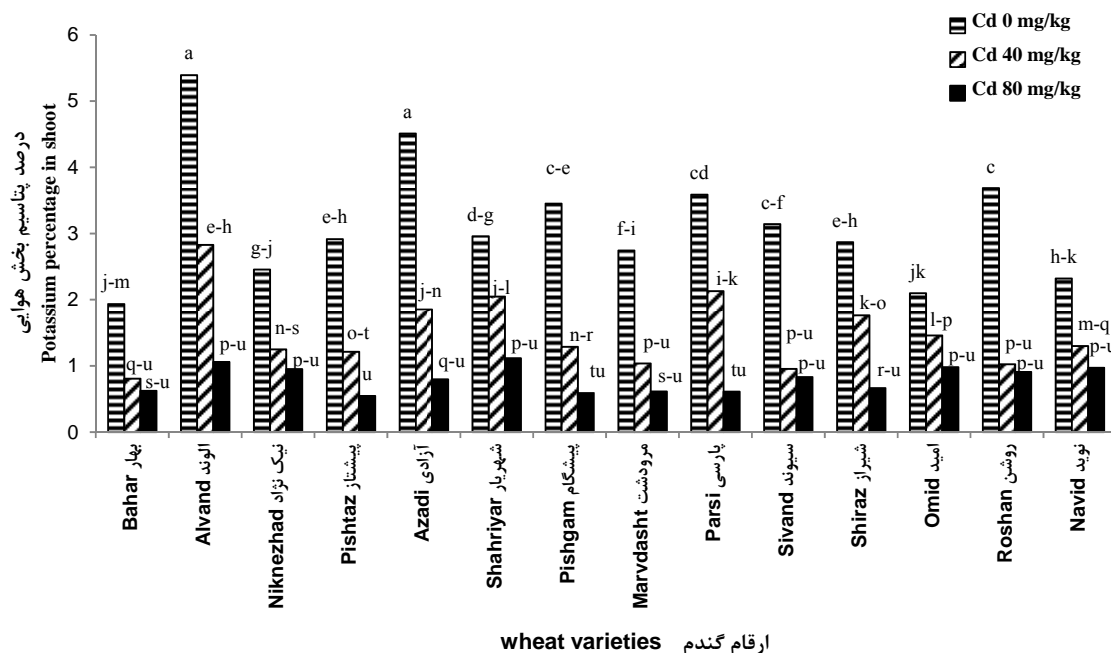
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس مقدار پتاسیم و کادمیوم بخش هوایی در ارقام مختلف گندم در سطوح مختلف کادمیوم.

Table 2. Analysis of variance potassium and cadmium content in the shoot of different wheat cultivars at different levels of cadmium.

منابع تغییر Sources of Variance	درجه آزادی Degrees of freedom	(Mean-squares (MS		
		پتاسیم بخش هوایی Potassium of Shoot	کادمیوم بخش هوایی Cadmium of Shoot	میانگین مربعات Shoot Dry Weight
کادمیوم Cadmium	2	**60.87	**1646.95	**10.87
رقم Cultivar	13	**2.11	**26.41	**0.33
کادمیوم×رقم Cadmium* Cultivar	26	**0.81	**21.52	**0.06

** : معنی‌دار در سطح یک درصد

** : Significant in $p < 0.01$



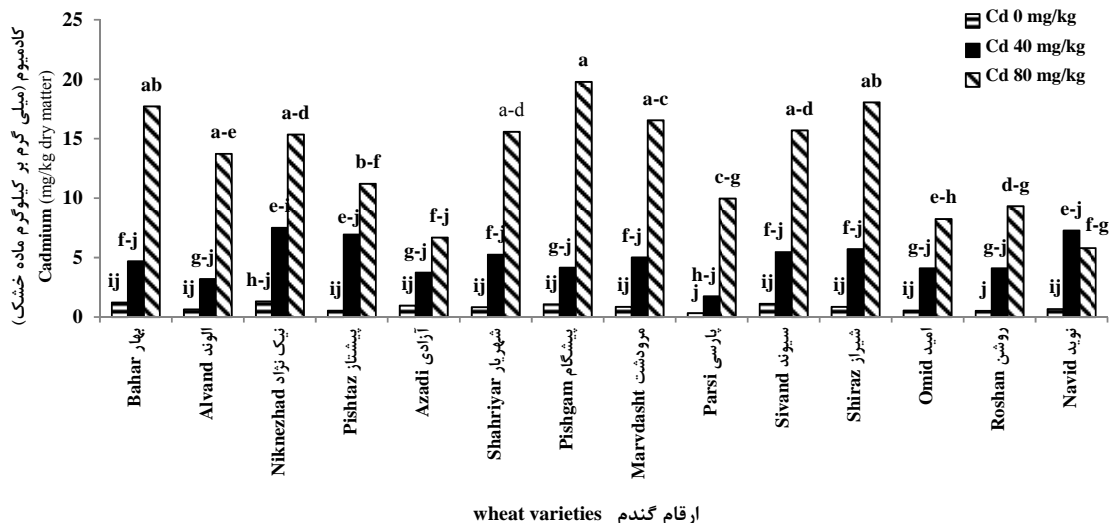
شکل ۱. اثر سطوح مختلف کادمیوم بر درصد پتاسیم بخش هوایی در ارقام مختلف گندم
 Fig. 1. Effect of different levels of cadmium on potassium percent in shoot of different wheat cultivars.

بیشتر باشد، جذب آن‌ها توسط گیاه نیز بیشتر خواهد بود (Buffle, 1988). سایر محققین گزارش کرده‌اند که با افزایش سطوح کادمیوم در خاک، غلظت کادمیوم در اندام هوایی هویج و کلم افزایش یافت (Cobbett, 2000). بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان گفت که ارقام مطالعه شده گندم دارای تفاوت معنی‌داری از نظر تجمع کادمیوم در بخش هوایی خود بودند. در بین ۱۴ رقم بررسی‌شده، در تیمار Cd₄₀ رقم نیک نژاد مقدار بیشتری کادمیوم در بخش هوایی خود تجمع داده بود، درحالی‌که در تیمار Cd₈₀ بیشترین مقدار کادمیوم در بخش هوایی رقم پیشگام مشاهده گردید. به نظر می‌رسد که مقاومت بالای ارقام نیک نژاد و پیشگام در تجمع بیشتر کادمیوم مربوط به خصوصیات ژنتیکی و سازگاری این ارقام با تجمع کادمیوم در سلول‌های خود باشد. گیاهان سازوکارهای مختلفی از قبیل جلوگیری از تجمع عناصر، سمیت زدایی و مقاومت متابولیسمی برای مقابله با سمیت عناصر سنگین دارند (Cobbett, 2000)؛ بنابراین به نظر می‌رسد که مقاومت بالاتر ارقام نیک نژاد و پیشگام به دلیل سمیت زدایی کادمیوم در سلول‌ها باشد. از طرف دیگر کادمیوم با تولید

اثر آلودگی کادمیوم بر غلظت کادمیوم بخش هوایی در تیمار Cd₄₀ بیشترین و کمترین مقدار جذب کادمیوم به ترتیب توسط رقم نیک نژاد (هفت میلی‌گرم بر کیلوگرم) و رقم پارسی (دو میلی‌گرم بر کیلوگرم) صورت گرفته بود. از طرفی در تیمار Cd₈₀ بیشترین و کمترین غلظت کادمیوم به ترتیب در بخش هوایی ارقام پیشگام (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نوید (شش میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (شکل ۲). در حضور کادمیوم، به دلیل رقابت این عنصر با سایر کاتیون‌های دو ظرفیتی برای جذب شدن و با توجه به اثر رقت، گیاهان تحت تنش شروع به ترشح سیدروفور به‌منظور جبران کمبود سایر عناصر غذایی از قبیل آهن، روی و مس می‌کنند که همین امر موجب جذب بیشتر کادمیوم توسط ریشه و انتقال آن به بخش هوایی می‌شود (Meharg, 1993). مقدار کل کادمیوم خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقدار کادمیوم گیاهان رشد کرده در خاک‌های آلوده به این فلز می‌باشد (Alloway, 1990). پتانسیل سمیت فلزات سنگین در محیط‌زیست، بستگی به غلظت آن در محلول خاک دارد، هر چه غلظت فلزات در فاز محلول

گونه‌های فعال اکسیژن سبب بروز تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود (Nagajyoti et al., 2010). برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن، گیاهان در طول تکامل مجهز به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (آنزیم‌های از قبیل سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پروکسیداز) شده‌اند

(Nagajyoti et al., 2010). می‌توان احتمال داد که کارایی سامانه آنتی‌اکسیدان ارقام نیک نژاد و پیشگام بیش از سایر ارقام مورد بررسی بوده است. هرچند اثبات این موضوع نیاز به اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های مذکور در ارقام نیک نژاد، پیشگام و سایر ارقام مورد بررسی در حضور کادمیوم دارد.



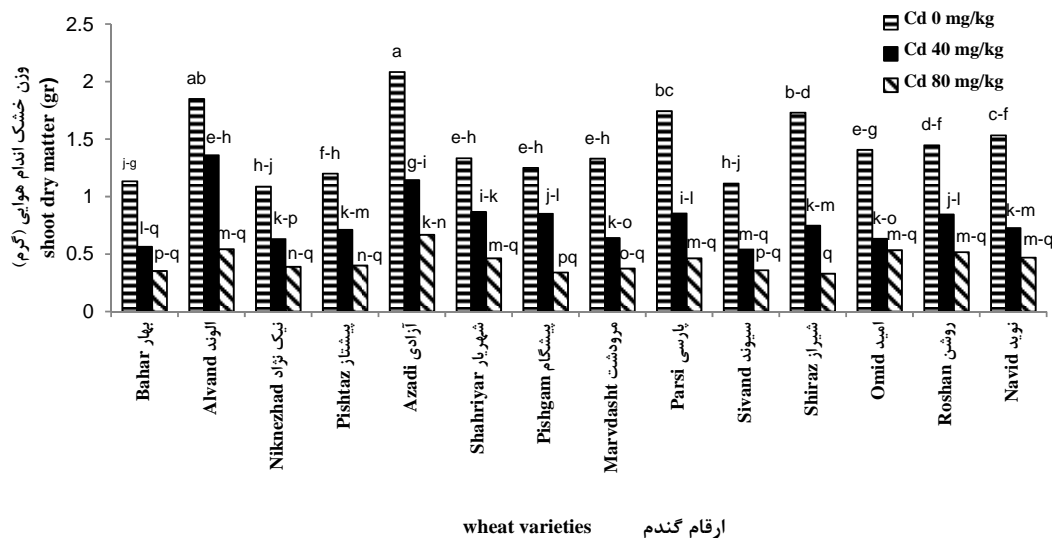
شکل ۲. اثر سطوح مختلف کادمیوم بر غلظت کادمیوم بخش هوایی در ارقام مختلف گندم.

Fig. 2. Effect of different levels of cadmium on cadmium concentration in shoot of different wheat cultivars.

توانایی بیشتر دو رقم الوند و آزادی در تولید بیشتر زیست‌توده در حضور کادمیوم در محیط رشد، مربوط به کارایی بیشتر آنزیم‌های چرخه احیای کربن در این دو رقم باشد (Sheoren et al., 1990).

کاهش وزن خشک اندام هوایی در حضور کادمیوم در ارقام مختلف برنج (Liu et al., 2010)، جو (Tiryakioglu et al., 2006) و ذرت (Lagriffoul et al., 1998) نیز گزارش شده است. توقف رشد ناشی از کادمیوم مربوط به اثرات بازدارندگی این عنصر بر تقسیم سلولی و کاهش سرعت اتساع سلول‌ها است (Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

اثر آلودگی کادمیوم بر وزن خشک بخش هوایی بیشترین و کمترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار Cd₄₀ نسبت به تیمار شاهد به ترتیب در ارقام الوند (۱/۳۶ گرم ماده خشک) و سیوند (۰/۵۴ گرم ماده خشک) مشاهده شد. در تیمار Cd₈₀ ارقام آزادی (۰/۶۷ گرم ماده خشک) و شیراز (۰/۳۳ گرم ماده خشک) به ترتیب بیشترین و کمترین وزن خشک اندام هوایی را نسبت به تیمار شاهد نشان دادند (شکل ۳). این احتمال وجود دارد که تولید ماده خشک بیشتر توسط دو رقم الوند و آزادی در سطوح مختلف کادمیوم، مربوط به مقاومت بالاتر این دو رقم به سمیت کادمیوم باشد. از طرفی توجه به این نکته نیز ضروری است که توانایی تولید زیست‌توده در دو رقم الوند و آزادی در تیمار شاهد نیز بیش از سایر ارقام بود. به نظر می‌رسد که



شکل ۳. اثر سطوح مختلف کادمیوم بر وزن خشک بخش هوایی در ارقام مختلف گندم.
Fig. 3. Effect of different levels of cadmium on shoot dry weight of different wheat cultivars.

۱۴ رقم موردبررسی، رقم امید از نظر وضعیت تغذیه‌ای پتاسیم در مقایسه با سایر ارقام شرایط بهتری داشت. از طرفی دو رقم روشن و پارسی کمترین مقدار پتاسیم را در بین ارقام موردبررسی به خود اختصاص دادند. در مجموع می‌توان گفت که از دیدگاه گیاه‌شناسی، رقم نیک نژاد مقاوم‌ترین و از دیدگاه امنیت غذایی رقم نوید مناسب‌ترین رقم در شرایط آلودگی اراضی کشاورزی به کادمیوم هستند، هرچند انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه به‌ویژه بررسی کارایی سیستم‌های آنتی اکسیداتیو و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ارقام موردبررسی ضروری است.

با آلودگی روزافزون اراضی کشاورزی به فلزات سنگین و از جمله کادمیوم، دستیابی به محصولی سالم و باکیفیت که تضمین‌کننده امنیت و سلامت غذایی جامعه باشد، به چالشی روزافزون تبدیل شده است، از طرفی گندم به‌عنوان محصولی راهبردی در سبد غذایی خانوارهای ایرانی از دیرباز نقشی برجسته داشته است. از این‌رو توجه به وضعیت تغذیه‌ای این محصول مهم به‌ویژه در شرایطی که کشت آن در اراضی کشاورزی که کم‌وبیش آلوده به فلزات سنگین هستند و گاهی به دلیل کمبود زمین اجتناب‌ناپذیر می‌شود، اهمیت دارد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که از بین

منابع

- Alloway B.J., 1990. Soil processes and the behavior of metals. In: Alloway, B.J. (eds.), Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional. Glasgow. pp. 7-28.
- Baker, A.J.M., Ewart, K., Hendry, G.A.F., Thorpe, P.C., Walker, P.L., 1990. The evolutionary basis of cadmium tolerance in higher plants. In: 4th International Conference on Environmental Contamination, Barcelona, pp. 23-29.
- Barcelo, J., Poschenrieder, C., 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. *Journal of Plant Nutrition*. 13, pp. 1-37.
- Bertin, G., Averbek, D., 2006. Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review). *Biochimie* 88, pp. 1549-1559.
- Buffle, J. 1988. *Complexation Reactions in Aquatic Systems, an Analytical Approach*, John Wiley and Sons, Chi Chester.
- Cataldo, D.A., McFadden, K.M., Garland, T.R., Wildung, R.E., 1988. Organic constituents

- and Complexation of nickel, iron, cadmium and plutonium in soybean xylem exudates. *Plant Physiology*. 86, pp. 734–739.
- Ciecko, Z., S. Kalembasa, M. Wyszowski and E. Rolka. 2004. Effect of soil contamination by cadmium on potassium uptake by plants. *Polish Journal of Environmental Studies*. 13, pp. 333-337.
- Cobbett, C.S. 2000. Phytochelation biosynthesis and function in heavy-metal detoxification: Current opinion. *Plant Biology*. 3, 211-216.
- Costa, G., and Morel, J.L., 1994. Water relations, gas exchange and amino acid content in Cd-treated lettuce. *Plant Physiology and Biochemistry*. 32, pp. 561–570.
- Czarnecka, E., Nagao, R.T., Key, J.L., Gurley, W.B., 1988. Characterization of gmhsp26-A, a stress gene encoding a divergent heat shock protein of soybean: heavy-metal-induced inhibition of intron processing. *Molecular and Cellular Biology*. 8, 1113–1122.
- Das P, Samantaray, S. and Rout, GR. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: A review. *Environmental Pollution*. 98, 29–36.
- De Knecht, J.A., van Baren, N., Ten Bookum, W.T., Wong Fong Sang, H.W., Koevoets, P.L.M., Schat, H., and Verkleij, J.A.C., 1995. Synthesis and degradation of phytochelatin in cadmium-sensitive and cadmium-tolerant *Silene vulgaris*. *Plant Science*. 106, 9–18.
- Erwin, T. Victor, H, 2004. *Plant and Soil Analysis Procedures*, Second Edition. Kluwer Academic Publishers.
- FAO/WHO. 1989 Evaluation of certain food additives and contaminants. Thirty-third report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives. WHO Technical Report Series 776. Geneva: WHO.
- Fuhrer, J., 1982. Ethylene biosynthesis and cadmium toxicity in leaf tissue of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Physiology*. 70, 162–167.
- Garcia, J.S. P.L. Grataño, R.A. Azevedo, and Arruda, M.A.Z. 2006. Metal contamination effects on sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth and protein expression in leaves during development, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54, 8623–8630.
- Greger, M., Landberg, T., 1995. Analys av kadmiumhalten i *Salix* relaterat till kadmiumhalten i jorden. Rapport from Vattenfall Utveckling AB:9 (In Swedish).
- Hendry, G.A.F., Baker, A.J.M., Ewart, C.F., 1992. Cadmium tolerance and toxicity, oxygen radical processes and molecular damage in cadmium-tolerant and cadmium-sensitive clones of *Holcus lanatus*. *Acta Botanica Neerlandica*. 41, 271–281.
- Hernandez, L.E., Carpena-Ruiz, R., Garate, A., 1996. Alterations in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium. *Journal of Plant Nutrition*. 19, 1581–1598.
- Jalali, M. and Khanlari, ZV. 2008. Cadmium Availability in Calcareous Soils of Agricultural Lands in Hamadan, Western Iran. *Soil and Sediment Contamination*. 17, 256-268.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, New York, USA.
- Ka'gi, J.H.R., 1991. Overview of metallothionein. *Methods in Enzymology*. 205, 613–626.
- Kirkham, M.B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*. 137, 19–32.
- Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G. and Popova, L. 2008. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology*. 165, 920–931.
- Lagriffoul, AB., Mocquot, M., Mench, and Vangronsveld, J. 1998. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* 200, 241–250.
- Larsson, E.H., Bornman, J.F., Asp, H., 1998. Influence of UV-B radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. *Journal of Experimental Botany*. 49, 1031–1039.
- Liu, J., Cao, C., Wong, M., Zhang, Z. and Chai, Y. 2010. Variations between rice cultivars in iron and manganese plaque on roots and the relation with plant cadmium uptake. *Journal of Environmental Sciences* 22(7), 1067–1072.
- Malakooti, M.J., Shahaabi, A.A., and Bazargaan K., 2005. Potassium in Iran's Agriculture.

- Senaa Publication, Tehran, pp. 108-110. [In Persian].
- Meharg, A.A., 1993. The role of the plasmalemma in metal tolerance in angiosperms, *Physiologia Plantarum*. 88, 191–198.
- Miyadate, H., Adachi S., Hiraizumi, A., Tezuka, K., Nakazawa, N., Kawamoto, T., Katou K., Kodama, I., Sakurai, K., Takahashi, H., Satoh-Nagasawa, N., Watanabe, A., Fujimura, T., Akagi, H. 2011. OsHMA3, a P18-type of ATPase affects root-to-shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles. *New Phytologist*. 189, 190–199.
- Motesharezadeh, B. Savaghebi-Firozabadi, G. R. Alikhani, H. A. Mirseyed Hosseini, H. 2008. Effect of Sunflower and Amaranthus Culture and Application of Inoculants on Phytoremediation of the Soils Contaminated with Cadmium. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*., 4 (1), 93-103
- Nada, E. B.A. Ferjani, R. Ali, B.R. Bechir, M. Imed, and Makki, B. 2007. Cadmium-induced growth inhibition and alteration of biochemical parameters in almond seedlings grown in solution culture. *Acta Physiologiae Plantarum* 29, 57–62.
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Sreekanth, T.V.M., 2010. Heavy metals occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 8, 189–216.
- Narwal, R., Mahendra Singh, P., Singh, M., 1993. Effect of cadmium and zinc application on quality of maize. *Indian Journal of Plant Physiology*. 36, 170-173.
- Nishizono, H., Kubota, K., Suzuki, S., Ishii, F., 1989. Accumulation of heavy metals in cell walls of *Polygonum cuspidatum* roots from metalliferous habitats. *Plant and Cell Physiology*. 30, 595–598.
- Pinto, A.P., Mota, A.M., de Varennes, A., Pinto, F.C. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Science of the Total Environment*. 326, 239–247.
- Popova, LP., Maslenkova, LT., Ivanova, AP., Stoinova, Z. 2012. Role of Salicylic Acid in Alleviating Heavy Metal Stress. In: Ahmad, P., Prasad, M.N.V. (eds.), *Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change*, pp. 441–466. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer.
- Rascio, N., Navari-Izzo, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science* 180, 169–181.
- Rivetta, A., Negrini, N., and Cocucci, M., 1997. Involvement of Ca^{2+} -calmodulin in Cd^{2+} toxicity during the early phases of radish (*Raphanus sativus* L.) seed germination. *Plant and Cell Environment*. 20, 600–608.
- Salin, M.L., 1988. Toxic oxygen species and protective systems of the chloroplasts. *Physiologia Plantarum*. 72, 681–689.
- Salt, D.E., Wagner, G.J., 1993. Cadmium transport across tonoplast of vesicles from oat roots. *The Journal of Biological Chemistry*. 268, 12297–12302.
- Sandalio, L.M., Dalurzo, H.C., Gomez, M., Romero-Puertas, M.C., del-Rio, L.A., 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *The Journal of Experimental Botany*. 52(364), 2115-2126.
- Senden, M.H.M.N., Van der Meer, A.J.G.M., Verburg, T.G., Wolterbeek, H.T., 1994. Effects of cadmium on the behavior of citric acid in isolated tomato xylem cell walls *The Journal of Experimental Botany*. 45, 597–606.
- Sheoran, I., Singal H., Singh, R., 1990. Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and the enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Photosynthesis Research*. 23, 345–351.
- Siedlecka, A., Krupa, Z., 1996. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiology and Biochemistry*. 34, 833–841.
- Singh, B., Narwan, B., Jen, A., Almas, A., 1995. Crop uptake and extractability of cadmium in soils naturally high in metals at different pH levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26, 2123–2142.
- Umar, S., I. Diva, N.A. Anjum, and Iqbal. M. 2008. Potassium nutrition reduces cadmium accumulation and oxidative burst in mustard (*Brassica campestris* L.). *Electric International Fertilization Correspondent* 16, 6-10.

- Verkleij, J.A.C., Lolkema, P.C., De Neeling, A.L., Harmens, H. 1991. Heavy metal resistance in higher plants: biochemical and genetic aspects. In: Rozema, J., Verkleij, J.A.C. (Eds.), *Ecological Responses to Environmental Stresses*. Kluwer, Dordrecht, pp. 8–19.
- Vogeli-Lange, R., Wagner, G.J., 1996. Relationship between cadmium, glutathione and cadmium-binding peptides (phytochelatins) in leaves of intact tobacco seedlings. *Plant Science*. 114, 11–18.
- Wagner, G.J., 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Advances in Agronomy*. 51, 173–212.
- Yadav, SK. 2010. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*. 76, 167–179.
- Yanai, J., Yabutani, M., Yumei, K., Biao, H., Guobao, L., Kosaki, T., 1998. Heavy metal pollution of agricultural soils and sediments in Liaoning Province, China. *Soil Science and Plant Nutrition*. 44, 367–375.
- Zhang, G., Fukami, M., Sekimoto, H., 2002. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. *Field Crops Research*. 77, 93–98.
- Zornoza, P. S. Va'zquez, E. Esteban, M. Fernandez-Pascual, Carpena, R. 2002 Cadmium-stress in nodulated white lupin: strategies to avoid toxicity, *Plant Physiological Biochemistry* 40, 1003–1009.