به‌زراعی کشاورزی
دوره ۱۷ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۳۹۴
صفحه‌های ۴۱-۲۷

# تأثیر کادمیوم بر غلظت عناصر مس، آهن، منگنز و روی در اندام هوایی ارقام مختلف گندم

ایمان جوادزرین[۱] ، بابک متشرع‌زاده[۲]*

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۸

## چکیده

هدف پژوهش حاضر، بررسی میانگین غلظت ریزمغذی‌ها شامل مس، آهن، منگنز و روی در اندام هوایی ارقام مختلف گندم نان (*Triticum aestivum*) در مرحلهٔ به ساقه رفتن در خاک آلوده به کادمیوم بود. تیمارهای آزمایش به‌ترتیب شامل سه سطح کادمیوم صفر (تیمار شاهد ($Cd_0$)، ۴۰ ($Cd_{40}$) و ۸۰ ($Cd_{80}$) میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) و ۱۴ رقم گندم (‘بهار’، ‘نیک‌نژاد’، ‘مرودشت’، ‘پارسی’، ‘سیوند’، ‘شیراز’، ‘روشن’، ‘پیشتاز’، ‘آزادی’، ‘شهریار’، ‘پیشگام’، ‘امید’، ‘الوند’ و ‘نوید’) بود. تأثیر کادمیوم بر غلظت ریزمغذی‌ها در سطح ۱ درصد معنادار بود. با افزایش سطح کادمیوم، غلظت مس در اندام هوایی همهٔ ارقام کاهش یافت. به‌جز دو رقم ‘پیشگام’ و ‘امید’ که در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد افزایش غلظت آهن را نشان دادند، غلظت آهن در ارقام دیگر کاهش یافت. بیشترین و کمترین غلظت کادمیوم در تیمار $Cd_{40}$ به‌ترتیب برای دو رقم ‘نیک‌نژاد’ (۷ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم وزن خشک) و ‘پارسی’ (دو میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم وزن خشک) ثبت شد. همچنین بیشترین و کمترین غلظت کادمیوم در تیمار $Cd_{80}$ به‌ترتیب در ارقام ‘پیشگام’ (۲۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم وزن خشک) و **‘نوید’** (۶ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد. درمجموع دو رقم ‘نیک‌نژاد’ و ‘پیشگام’ بیشترین قابلیت برداشت کادمیوم را داشتند، همچنین کمترین قابلیت برداشت کادمیوم در دو رقم ‘پارسی’ و ‘نوید’ مشاهده شد.

**کلیدواژه‌ها:** ایمنی غذایی، سمیت، عناصر ریزمغذی، فلزات سنگین.

*نویسنده مسئول
Email: moteshare@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

## ۱. مقدمه

آلودگی ناشی از فلزات سنگین مشکلی جهانی است. در اراضی کشاورزی، کاربرد کودهای فسفاته، آفت‌کش‌ها و لجن فاضلاب از مهم‌ترین منابع آلوده‌کنندهٔ این اراضی است که منشأ انسانی[1] دارد [۶۳]. کودهای فسفاته می‌توانند تا ۱۷۰ میلی‌گرم کادمیوم به‌ازای هر کیلوگرم کود مصرفی به اراضی کشاورزی اضافه کنند [۳۳]. به‌عنوان مثال، در اراضی کشاورزی کشور طی ۴۰ سال گذشته به‌طور متوسط بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم کود فسفاته به‌ازای هر هکتار مصرف شده است که مقدار کادمیوم استخراج‌شده توسط اسید نیتریک به‌ازای هر کیلوگرم فسفر حاصل از این کود، ۵۰ میلی‌گرم بوده است [۳۱]، به‌عبارت دیگر، در طی چهار دههٔ گذشته به‌ازای هر هکتار از اراضی کشاورزی، بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ گرم کادمیوم تنها از طریق کاربرد کودهای فسفاته به ناچار وارد خاک‌های زراعی شده است.

یون‌های فلزی از طریق جذب سطحی توسط ذرات معدنی خاک، اتصال به هوموس و واکنش‌های ترسیب در خاک‌ها باقی می‌مانند [۱۱]. ورود کادمیوم از خاک‌ها به زنجیرهٔ غذایی انسان و دام سبب بروز بیماری‌ها و اختلالات زیستی بسیاری از قبیل بیماری ایتای-ایتای[2] می‌شود [۱۲]. از طرف دیگر، این عنصر یکی از فلزات سمی برای گیاه و حیوان محسوب می‌شود. گیاهان برای رشد و تولیدمثل به این عنصر نیازی ندارند، اما شاخص تجمع زیستی[3] کادمیوم زیاد و از بسیاری از عناصر ضروری فراتر است [۳۳]. کادمیوم اغلب به‌صورت یون $Cd^{2+}$ جذب گیاه می‌شود [۱۳].

عوامل بسیار متعددی از قبیل اسیدیتهٔ خاک، وضعیت اکسیداسیون و احیای خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، گونهٔ گیاه و کاربرد کودهای شیمیایی بر انتقال و تجمع کادمیوم در سامانهٔ خاک-گیاه مؤثرند [۱۹]. زرد شدن برگ‌ها، اختلال در متابولیسم گیاه از قبیل فتوسنتز و تنفس و برهمکنش با سایر عناصر در درون گیاه از جمله تأثیرات شناخته‌شدهٔ کادمیوم است [۵۴، ۵۲]. این تأثیرات به کمبود یا عدم توازن عناصر غذایی در بافت گیاه منجر می‌شود [۲۴]. به‌عنوان مثال، غلظت عناصر آهن، منگنز و مس در اندام هوایی برنج در حضور کادمیوم کاهش می‌یابد [۲۷] که دلیل آن، تشابه خواص فیزیکی و شیمیایی کادمیوم و کاتیون‌های دوظرفیتی است [۸]. از طرف دیگر، این عنصر بر صفات رویشی گیاه از قبیل ارتفاع بوته، وزن تر، وزن خشک و سطح برگ آثار نامطلوبی دارد [۲۹]. کاهش فتوسنتز در حضور کادمیوم به‌واسطهٔ تأثیرات مخرب این عنصر بر ساختار کلروفیل a و b است [۵۵].

تحقیقات متعددی در زمینهٔ برداشت، انتقال، پراکنش، بروز سمیت برای محصولات زراعی و باغی مختلف و سازوکارهای مربوط به سمیت کادمیوم صورت گرفته است [۳۸، ۳۲]. برداشت و انتقال عناصر ریزمغذی از قبیل مس، آهن، منگنز و روی تحت تنش کادمیوم در محصولات زراعی نظیر سویا، جو و گندم بررسی شده است [۶۵، ۶۰] و بین گونه‌ها و ارقام مختلف یک گونه تفاوت‌های زیادی در واکنش به تنش کادمیوم وجود دارد [۶۴]. در بررسی تأثیر سمیت عناصر سنگین شامل کادمیوم، روی و سرب بر رشد و عملکرد لوبیا در خاک‌های طبیعی آلوده به این عناصر، کادمیوم بیشترین تأثیر را در کاهش عملکرد لوبیا داشته است و پس از آن به‌ترتیب روی و سرب چنین تأثیری داشتند. همچنین بیشتر کادمیوم جذب‌شده توسط لوبیا (۳۴ تا ۷۵ درصد از کل کادمیوم خاک) مربوط به جزء قابل تبادل کادمیوم بود [۶۲].

گندم اهمیت زیادی در تأمین غذا، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و پرجمعیت دارد [۶۳]. هدف پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت شناخت تفاوت ارقام مختلف

1. Anthropogenic
2. Itai-Itai
3. Bioconcentration Factor



Archive of SID
www.SID.ir

گندم از نظر قابلیت برداشت کادمیوم، بررسی توان تولید زیست‌توده و غلظت ریزمغذی‌ها در خاک‌های آلوده به کادمیوم در شرایط گلخانه‌ای بود.

## ۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق در قالب یک آزمایش فاکتوریل، به‌صورت طرح کاملاً تصافی و در سه تکرار در گلخانهٔ تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام گرفت. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح کادمیوم (صفر (تیمار شاهد) ($Cd_0$)، ۴۰ ($Cd_{40}$) و ۸۰ ($Cd_{80}$) میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) و ۱۴ رقم گندم بود. در انتخاب سطوح کادمیوم حد آستانهٔ تحمل گندم مدنظر قرار گرفت. تیمار کادمیوم از طریق افشاندن محلول نمک نیترات کادمیوم ($Cd(NO_3)_2.2H_2O$) به خاک گلدان‌ها اعمال شد. تمامی گلدان‌ها قبل از کشت بذر، به‌مدت سه ماه به‌منظور ایجاد تعادل در خاک، انکوباسیون شدند. فرایند جذب سطحی عناصر مختلف و از جمله کادمیوم بر روی سطوح کلوئیدهای خاک، فرایندی پویا، ولی تدریجی و برگشت‌پذیر است. به‌منظور اینکه مقدار جذب کادمیوم بر روی کلوئیدهای خاک وضعیت به‌نسبت ثابتی داشته باشد و از طرف دیگر، شرایط خاک به حالت طبیعی آن در مزرعه شباهت بیشتری داشته باشد، باید خاک برای مدت به‌نسبت طولانی انکوباسیون شود. ارقام گندم مورد بررسی اغلب مربوط به اقلیم‌های فلات مرکزی سرد کوهستانی و شامل 'بهار'، 'نیک‌نژاد'، 'مرودشت'، 'پارسی'، 'سیوند'، 'شیراز'، 'روشن'، 'پیشتاز'، 'آزادی'، 'شهریار'، 'پیشگام'، 'امید'، 'الوند' و 'نوید' بودند. بذر ارقام مورد بررسی از مؤسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیهٔ بذر و نهال واقع در شهر کرج تهیه شد. برای ضدعفونی کردن بذرها، ابتدا بذرها به‌مدت ۳۰ ثانیه در الکل اتیلیک ۹۶ درصد غوطه‌ور شدند و سپس ۱۵ ثانیه در محلول آب اکسیژنه قرار گرفتند و در نهایت با آب مقطر شسته شدند. قبل از کشت، خاک زراعی از مزرعهٔ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن براساس روش‌های استاندارد تعیین شد (جدول ۱) [۲].

**جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش**

| خصوصیات | مقدار |
|---|---|
| کلاس بافت خاک | لومی – رسی |
| اسیدیته خاک | ۸/۱ |
| قابلیت هدایت الکتریکی ($dSm^{-1}$) | ۱/۵۵ |
| ظرفیت تبادل کاتیونی ($Cmol_c kg^{-1}$) | ۱۲/۲ |
| پتاسیم قابل جذب (mg/Kg) | ۱۷۳/۰۰ |
| فسفر قابل جذب (mg/Kg) | ۱۷/۰۰ |
| کربنات کلسیم معادل (٪) | ۸/۰۷ |
| مس (mg/Kg) | ۴/۳۸ |
| آهن (mg/Kg) | ۵/۶۶ |
| منگنز (mg/Kg) | ۳/۳۳ |
| روی (mg/Kg) | ۲/۶۹ |
| کادمیوم (mg/Kg) | ۰/۷۵ |



Archive of SID
www.SID.ir

کودهای لازم براساس نتایج آزمون خاک پیش از کشت به گلدان‌ها افزوده شد. واحدهای آزمایشی شامل گلدان های یک کیلوگرمی بود و ۱۰ بذر در آنها کاشته شد که پس از ۱۰ روز پنج گیاهچه در هر گلدان نگهداری شد. شرایط دمایی گلخانه بین ۲۵ تا ۳۰ درجهٔ سلسیوس حفظ شد. آبیاری گلدان‌ها به‌مدت ۳۵ روز با آب مقطر به‌روش وزنی صورت گرفت. پس از ۳۵ روز اندام هوایی همهٔ ارقام برداشت شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد در داخل آون قرار داده شدند و وزن خشک آنها با ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر مس، آهن، منگنز، روی و کادمیوم در اندام هوایی همهٔ ارقام با استفاده از دستگاه جذب اتمی (شیمادزو AA-6800[1]) اندازه‌گیری شد [۲]. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخهٔ ۱۹) تجزیه‌وتحلیل شد و مقایسهٔ میانگین تأثیرات اصلی و متقابل در سطح ۵ درصد با آزمون توکی صورت گرفت. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

## ۳. نتایج و بحث

با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس، اثر سطوح مختلف کادمیوم، اثر رقم و اثر متقابل کادمیوم × رقم در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن خشک اندام هوایی معنادار شد (جدول ۲).

بیشترین و کمترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در ارقام 'الوند' (۱/۳۶ گرم مادهٔ خشک) و سیوند (۰/۵۴ گرم مادهٔ خشک) مشاهده شد. در تیمار $Cd_{80}$ ارقام 'آزادی' (۰/۶۷ گرم مادهٔ خشک) و 'شیراز' (۰/۳۳ گرم مادهٔ خشک) به‌ترتیب بیشترین و کمترین وزن خشک اندام هوایی را نسبت به تیمار شاهد نشان دادند (شکل ۱). این احتمال وجود دارد که تولید مادهٔ خشک بیشتر توسط ارقام 'الوند' و 'آزادی' در سطوح مختلف کادمیوم، مربوط به مقاومت بیشتر این دو رقم به سمیت کادمیوم باشد. از طرف دیگر، توانایی تولید زیست‌توده در دو رقم 'الوند' و 'آزادی' در تیمار شاهد نیز بیش از ارقام دیگر بود. رقم 'شیراز' در شرایط بدون تنش کادمیوم (تیمار شاهد) توانایی تولید زیست‌تودهٔ زیادی داشت، اما این توانایی در حضور کادمیوم به‌شدت کاهش یافت (شکل ۱).

**جدول ۲. نتایج تجزیهٔ واریانس عناصر غذایی و کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**

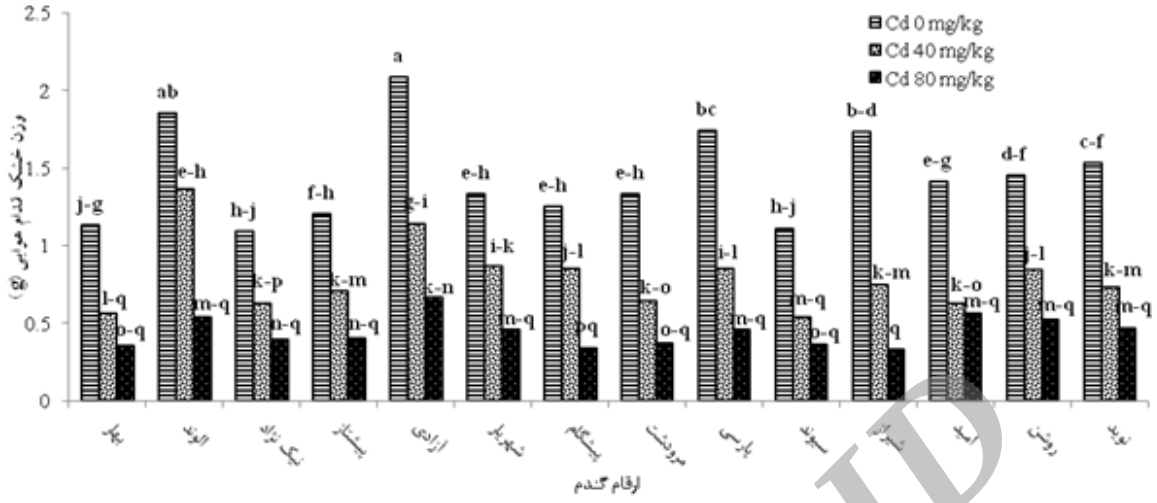
| منابع تغییرات | درجهٔ آزادی | میانگین مربعات MS | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | مس | آهن | منگنز | روی | کادمیوم | وزن خشک اندام هوایی |
| کادمیوم | ۲ | ۲۲۲۶۸/۵۰** | ۱۲۴۳۱۶/۳۴** | ۲۰۹۴۶/۲۰** | ۲۵۲۰۳۲/۸۹** | ۱۶۴۶/۹۶** | ۱۰/۸۷** |
| رقم | ۱۳ | ۶۶۶/۸۵** | ۵۶۱۶/۰۹** | ۱۰۵۳/۰۲** | ۹۱۴۷/۵۸** | ۲۶/۴۱** | ۰/۳۳** |
| کادمیوم × رقم | ۲۶ | ۲۱۴/۷۹** | ۴۱۲۶/۹۱** | ۷۳۵/۹۲** | ۷۲۱۳/۱۴** | ۲۱/۵۲** | ۰/۰۶** |
| ضریب تغییرات | – | ۱۷/۰۰ | ۲۹/۴۱ | ۳۰/۰۶ | ۳۸/۱۵ | ۳۳/۳۵ | ۹/۸۵ |

** : معنادار در سطح ۱ درصد

1. Shimadzu



Archive of SID
www.SID.ir




**شکل ۱. تغییرات وزن خشک اندام هوایی در ارقام مختلف گندم در سطوح مختلف کادمیوم**

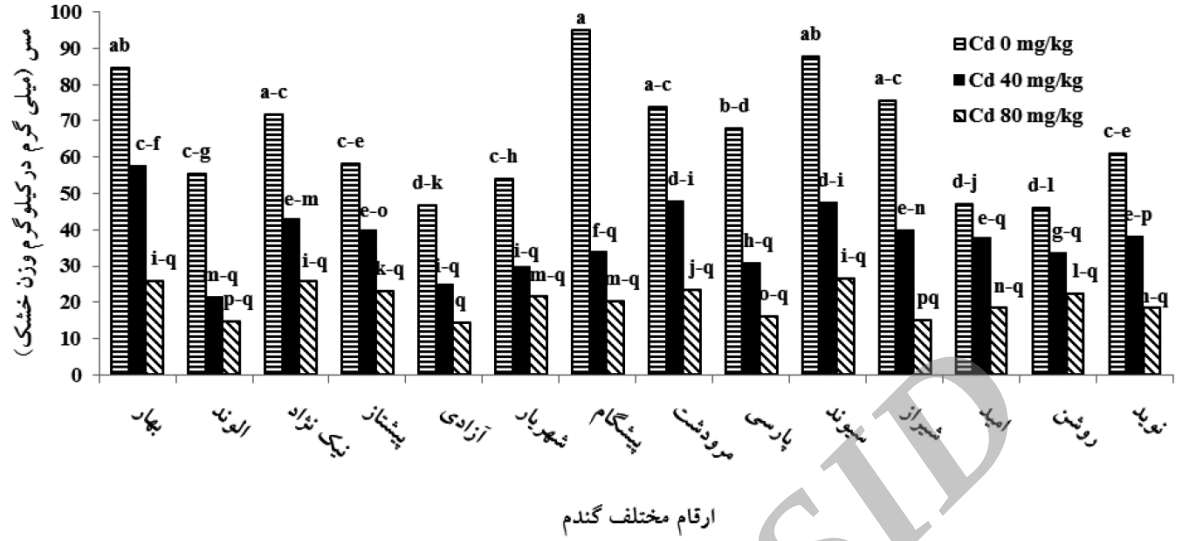
برخلاف ارقام 'آزادی'، 'الوند' و 'شیراز'، رقم 'سیوند'، در تیمار شاهد نیز توانایی کمتری برای تولید زیست‌توده داشت (شکل ۱). توانایی بیشتر دو رقم 'الوند' و 'آزادی' در تولید بیشتر زیست‌توده در حضور کادمیوم در محیط رشد، مربوط به کارایی بیشتر آنزیم‌های چرخهٔ احیای کربن در این دو رقم است [۵۱].

کاهش وزن خشک اندام هوایی در حضور کادمیوم در ارقام مختلف برنج [۳۷]، جو [۵۳]، سویا [۱۷] و ذرت [۳۵] نیز مشاهده شد. توقف رشد ناشی از کادمیوم مربوط به تأثیرات بازدارندگی این عنصر بر تقسیم سلولی و کاهش سرعت اتساع سلول‌هاست [۳۳]. به‌طور کلی، کاهش وزن خشک زیست‌توده بر اثر کادمیوم را می‌توان ناشی از حساسیت آنزیم‌های چرخهٔ احیای کربن در طی فرایند فتوسنتز نسبت به کادمیوم دانست [۵۱].

با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس، اثر سطوح مختلف کادمیوم، اثر رقم و اثر متقابل کادمیوم × رقم در سطح احتمال ۱ درصد بر غلظت مس در اندام هوایی معنادار شد (جدول ۲). بیشترین و کمترین غلظت مس در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در ارقام 'بهار' (میانگین ۵۷/۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'الوند' (میانگین ۲۱/۴۷ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد. در تیمار $Cd_{80}$ بیشترین و کمترین غلظت مس در ارقام 'سیوند' (میانگین ۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و رقم 'آزادی' (میانگین ۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد (شکل ۲). دو رقم 'بهار' و 'سیوند' در تیمار شاهد نیز کارایی زیادی در جذب مس نشان دادند. از طرفی در ارقام 'الوند' و 'آزادی' در تیمار شاهد نسبت به سایر ارقام غلظت مس کمتر بود (شکل ۲). به‌نظر می‌رسد که بین ارقام مختلف از نظر کارایی ریشه در برداشت مس در شرایط بدون تنش کادمیوم نیز تفاوت‌های زیادی وجود داشت (شکل ۲). هرچند در تیمار شاهد بیشترین غلظت مس در اندام هوایی مربوط به رقم 'پیشگام' بود؛ اما در حضور کادمیوم غلظت مس در رقم 'پیشگام' به‌شدت کاهش یافت؛ از دلایل احتمالی آن می‌توان به اشغال جایگاه کوفاکتور آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز توسط کادمیوم، کاهش تولید گلوکز و کاهش جذب فعال مس اشاره کرد [۴۷، ۷]. کادمیوم و مس دارای برهمکنش منفی‌اند که از مهم‌ترین دلایل آن، هم‌ظرفیت بودن این دو عنصر است که موجب رفتار شیمیایی مشابه کادمیوم و مس در طبیعت می‌شود [۲۶]. به‌واسطهٔ چنین



Archive of SID
www.SID.ir




**شکل ۲. تغییرات غلظت مس در سطوح مختلف کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**

تشابهی در رفتار شیمیایی، این دو عنصر برای مکان‌های پیوندی در غشای پلاسمایی و انتقال از طریق غشا رقابت می‌کنند [۱۴]. مس در ارگانیسم‌های فتوسنتزکننده، حامل الکترون است و همچنین کوفاکتور[1] در ساختار آنزیم‌ها به‌شمار می‌رود [۷]. کادمیوم به‌دلیل تمایل شدید به حضور در ساختمان ترکیبات دارای گروه عاملی -SH با این عنصر بر سر چنین جایگاه‌هایی رقابت می‌کند [۴۷]. افزودن کادمیوم به محیط رشد اسفناج، غلظت مس را کاهش داد [۳]. نتایج مشابهی از برهمکنش بین مس و کادمیوم نیز مشاهده شده است [۵۹، ۱۰].

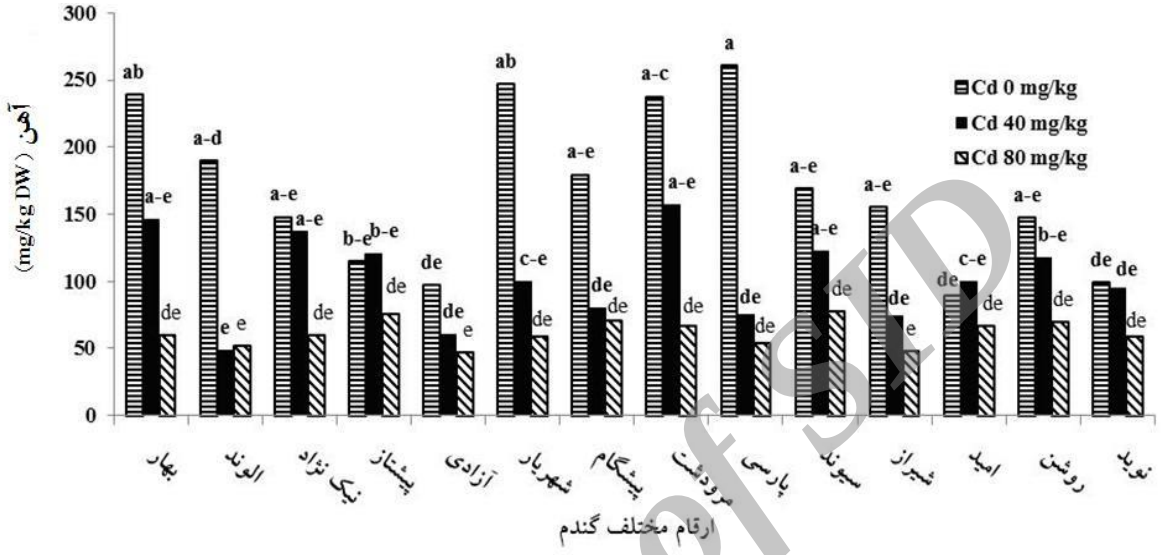
نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که تأثیرات اصلی سطوح مختلف کادمیوم و رقم و همچنین اثر متقابل کادمیوم × رقم بر غلظت آهن در اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۲). به‌طور کلی، در ارقام مورد بررسی با افزایش سطح کادمیوم خاک غلظت آهن کاهش یافت. در تیمار $Cd_{40}$ بیشترین و کمترین غلظت آهن نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در ارقام 'مرودشت' (میانگین ۱۵۶/۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'الوند' (میانگین ۴۸/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد. در تیمار $Cd_{80}$ بیشترین غلظت آهن نسبت به تیمار شاهد در رقم 'سیوند' با ۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک و کمترین غلظت آهن نسبت به تیمار شاهد در رقم 'آزادی' با ۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک مشاهده شد (شکل ۳). ازاین‌رو خاصیت آنتاگونیستی[1] کادمیوم با عناصر کم‌مصرف سبب این پدیده می‌شود [۵۵]. افزایش غلظت آهن در دو رقم 'پیشتاز' و 'امید' را می‌توان مربوط به رقابت آهن و عناصر مس و منگنز برای جذب شدن دانست [۵۰]. کادمیوم غلظت مس و منگنز در دو رقم 'پیشتاز' و 'امید' را کاهش داده است که این امر ممکن است باعث افزایش غلظت آهن در این دو رقم شده باشد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). ترشح سیدروفور در حضور کادمیوم بیشتر می‌شود [۴۵]. این احتمال وجود دارد که مقدار ترشح سیدروفور دو رقم 'پیشتاز' و 'امید' بیش از دیگر ارقام باشد. کادمیوم با دخالت در برداشت عناصر ریزمغذی و از جمله آهن از طریق اثرگذاری بر غشای پلاسمایی ریشه، موجب اختلال در جذب و توزیع این عناصر در اندام‌های مختلف گیاه می‌شود [۵۶]. بعضی

1. Cofactor

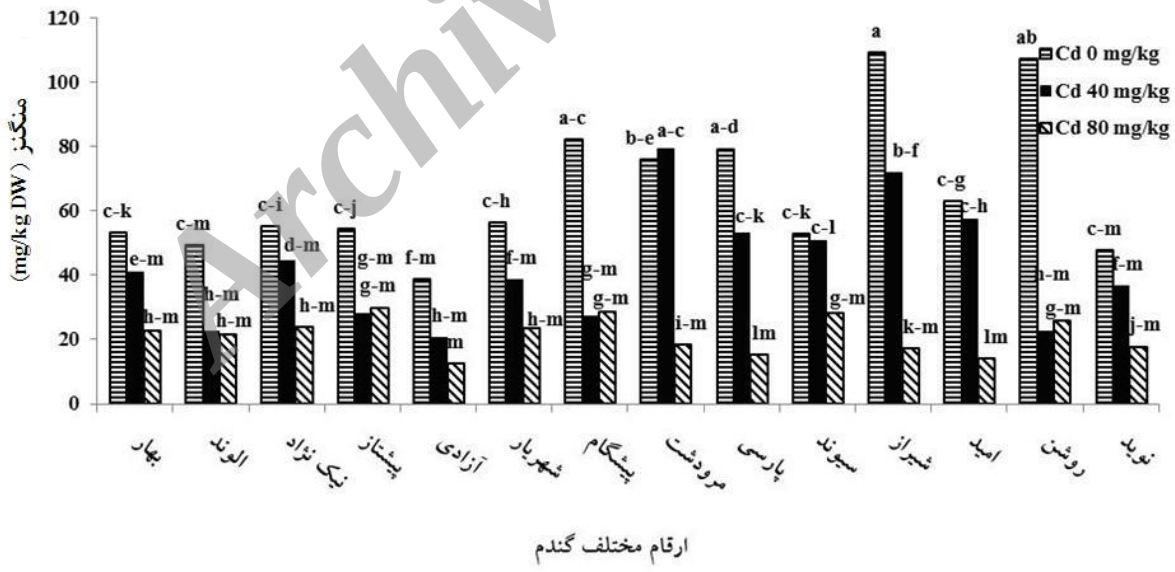


Archive of SID
www.SID.ir

محققان کاهش غلظت آهن در حضور کادمیوم را مربوط به تأثیرات آنتاگونیستی این دو عنصر می‌دانند [۵۷]. در بررسی آثار کمبود آهن در جذب کادمیوم در نخود مشخص شده است که کمبود آهن غلظت کادمیوم در ریشه‌های نخود را افزایش داد که دلیل آن افزایش فعالیت پمپ هیدروژن ($H^+$) غشای پلاسمایی در پاسخ به تجمع فلزات سنگین است [۲۲]. همچنین کاهش غلظت آهن در حضور کادمیوم مشاهده شده است [۱۰، ۳۴].




**شکل ۳. تغییرات غلظت آهن در سطوح مختلف کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**



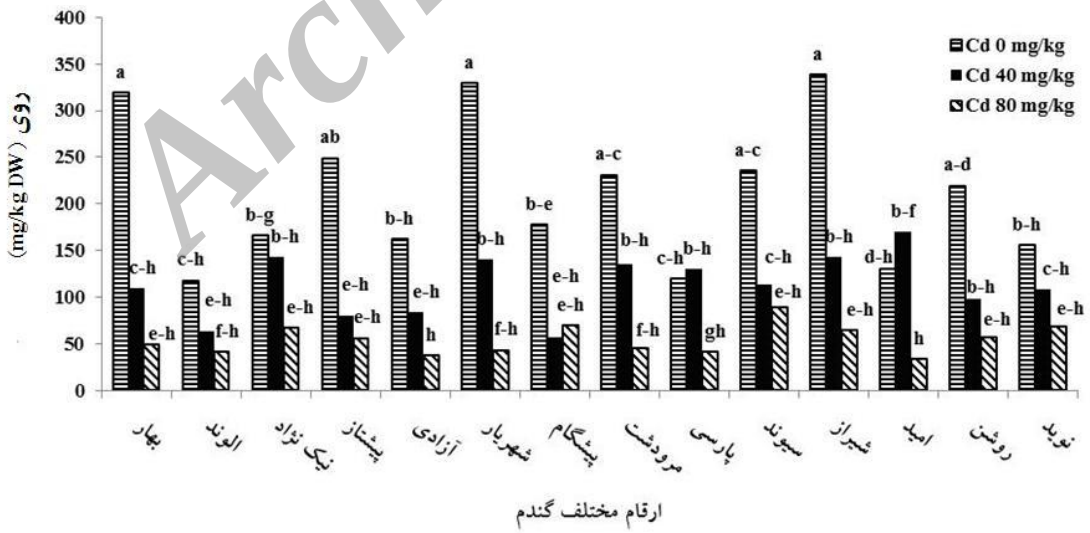

**شکل ۴. تغییرات غلظت منگنز در سطوح مختلف کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**

1. Antagonist



Archive of SID
www.SID.ir

اثر سطوح مختلف کادمیوم، اثر رقم و اثر متقابل کادمیوم × رقم بر غلظت منگنز اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۲). با توجه به نتایج مقایسهٔ میانگین، در ارقام مورد بررسی به استثنای رقم 'مرودشت' که در تیمار $Cd_{40}$ افزایش غلظت منگنز نسبت به تیمار شاهد نشان داد (۴ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد)، در دیگر ارقام کاهش غلظت منگنز نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. بیشترین و کمترین غلظت منگنز در بین ارقام مورد بررسی در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب مربوط به دو رقم 'مرودشت' (میانگین ۷۹ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'آزادی' (میانگین ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) بود. در تیمار $Cd_{80}$ بیشترین و کمترین غلظت منگنز نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در ارقام 'پیشگام' (میانگین ۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'آزادی' (میانگین ۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مادهٔ خشک) مشاهده شد (شکل ۴). این احتمال وجود دارد که کاهش شدید غلظت منگنز در دو رقم 'روشن' و 'پیشگام' مربوط به انتقال بیشتر کادمیوم از طریق پروتئین‌های ناقل در غشای سلولی در مقایسه با منگنز باشد [۵۰]. با توجه به غلظت منگنز در تیمار شاهد به‌نظر می‌رسد که کارایی ارقام 'بهار'، 'الوند'، 'نیک‌نژاد'، 'آزادی'، 'شهریار'، 'نوید' و 'سیوند' برای برداشت منگنز به‌طور کلی اندک باشد (شکل ۳). افزایش غلظت منگنز در رقم 'مرودشت' در تیمار $Cd_{40}$ را می‌توان مربوط به کاهش غلظت عناصر مس، روی و آهن توسط کادمیوم و در نتیجه جذب راحت‌تر منگنز دانست (شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵). کادمیوم با منگنز برای انتقال از طریق پروتئین‌های ناقل در غشای سلولی رقابت می‌کند [۵۰]. نتایج مشابهی در زمینهٔ کاهش غلظت منگنز در حضور کادمیوم در اندام هوایی ذرت مشاهده شده است [۳۵]. غلظت منگنز در حضور کادمیوم در لوبیای سفید کاهش داشت [۶۷]. بین ارقام مختلف برنج در سطوح مختلف کادمیوم از نظر برداشت منگنز تفاوت معناداری مشاهده شد [۳۷]. کاهش غلظت منگنز در حضور کادمیوم در گیاه سویا نیز گزارش شده است [۱۷]. عملکرد پروتئین‌های ناقل در غشای پلاسمایی ممکن است تحت تنش کادمیوم دچار اختلال شود که همین مسئله نفوذپذیری غشا را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴۱].




**شکل ۵. تغییرات غلظت روی در سطوح مختلف کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**



Archive of SID
www.SID.ir

در گیاهان تیمارشده با کادمیوم این احتمال وجود دارد که در طول فرایند همگن‌شدگی[1]، کادمیوم آزاد در درون سلول در واکوئل‌ها، سیتوپلاسم یا آپوپلاست طی فرایند تبادل کاتیونی جایگزین منگنز شود، به‌هرحال، بیشتر کادمیوم در جزء محلول در پیوند با ترکیباتی با وزن مولکولی زیاد است [۳۹].

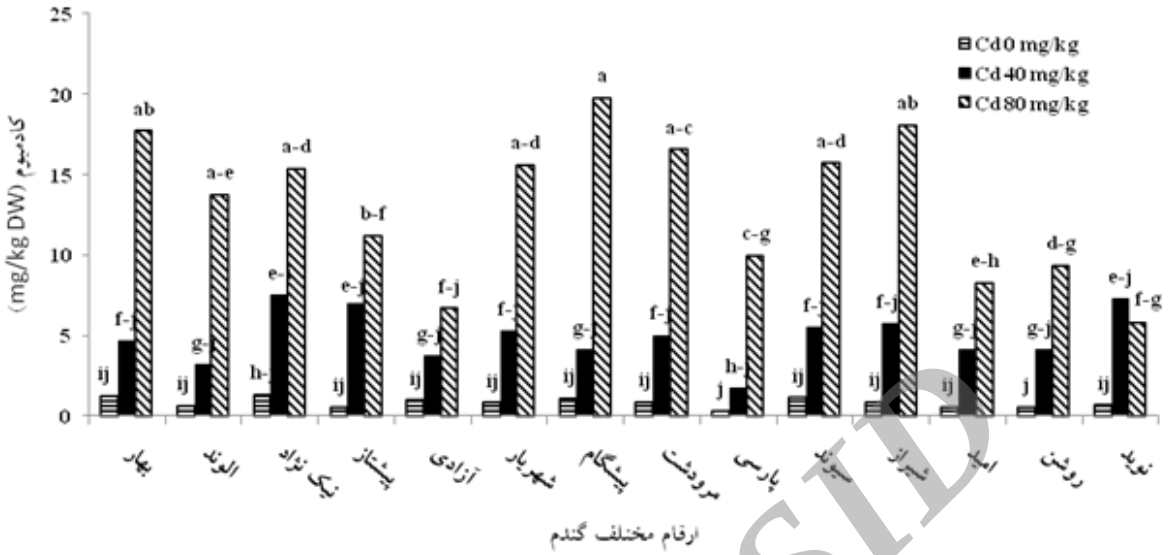
با توجه به نتایج تجزیهٔ واریانس، اثر سطوح مختلف کادمیوم، اثر رقم و اثر متقابل کادمیوم × رقم در سطح احتمال ۱ درصد بر غلظت روی در اندام هوایی معنادار شد (جدول ۲). غلظت روی در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد در دو رقم 'امید' و 'پارسی' برخلاف سایر ارقام به‌ترتیب افزایشی ۳۲ و ۸ درصد نشان داد. تأثیرات متقابل روی و کادمیوم در بسیاری از تحقیقات بررسی شده است و همچنان یکی از موضوعات بحث‌برانگیز است و بستگی بسیار زیادی به گونهٔ گیاه، شرایط رشد (کشت در خاک یا کشت هیدروپونیک[2]، آزمایش‌های مزرعه‌ای یا گلخانه‌ای) و سطوح کادمیوم استفاده‌شده در آزمایش دارد [۴۵، ۲۰، ۱۸]. بیشترین غلظت روی در تیمار $Cd_{40}$ در رقم 'امید' (میانگین ۱۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد، این در حالی بود که رقم 'پیشگام' با میانگین ۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک، کمترین غلظت روی را داشت. بیشترین و کمترین غلظت روی در تیمار $Cd_{80}$ به‌ترتیب مربوط به ارقام 'سیوند' (میانگین ۸۹ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'امید' (میانگین ۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) بود (شکل ۵). کاهش شدید غلظت روی در ارقام 'بهار' و 'پیشگام' در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد، مربوط به ترشح بیشتر سیدروفورها از ریشهٔ این ارقام در شرایط کمبود روی است [۴۵] که به برداشت بیشتر کادمیوم و کاهش شدیدتر روی در دو رقم 'بهار' و 'پیشگام' منجر شده است. گزارش‌های زیادی در مورد تأثیرات آنتاگونیستی و سینرژیستی[3] کادمیوم و روی وجود دارد [۸، ۲۰،۱۸]. تأثیرات کادمیوم زمانی شدیدتر می‌شود که گیاهان در معرض کمبود روی باشند، در چنین وضعیتی ترشح سیدروفورها از ریشهٔ گیاهان دچار کمبود روی افزایش می‌یابد که به برداشت و انتقال بیشتر کادمیوم از ریشه به اندام هوایی منجر شده و به دنبال آن علائم سمیت کادمیوم تشدید می‌شود [۴۵]. بعضی محققان کاهش برداشت کادمیوم توسط سیدروفورها را مشاهده کردند [۴۹]. کاهش غلظت روی با افزایش غلظت کادمیوم در گیاه ذرت مشاهده شده است [۴۴]. دیگر محققان نتایج مشابهی را در گیاه نخود و فلفل گزارش کرده‌اند [۲۵]. ژن بیان‌کنندهٔ پروتئین ناقل روی در حضور کادمیوم فعال شده و سبب جابه‌جایی کادمیوم در درون گیاه می‌شود [۳۶].

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که اثر سطوح مختلف کادمیوم، اثر رقم و اثر متقابل کادمیوم × رقم بر غلظت کادمیوم اندام هوایی در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۲). در تیمار $Cd_{40}$ بیشترین و کمترین مقدار جذب کادمیوم نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب توسط دو رقم 'نیک‌نژاد' (میانگین ۷ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'پارسی' (میانگین ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) صورت گرفت. از طرف دیگر، در تیمار $Cd_{80}$ بیشترین و کمترین غلظت کادمیوم به‌ترتیب در اندام هوایی ارقام 'پیشگام' (میانگین ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'نوید' (میانگین ۶ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد (شکل ۶). در حضور کادمیوم، به‌دلیل رقابت این عنصر با سایر کاتیون‌های دوظرفیتی برای جذب شدن و با توجه به اثر رقت، گیاهان تحت تنش شروع به ترشح سیدروفور به‌منظور جبران کمبود دیگر عناصر غذایی

1.Homogenizition
2 . Hydroponic
3 . Synergist



Archive of SID
www.SID.ir




**شکل ۶. تغییرات غلظت کادمیوم در سطوح مختلف کادمیوم در اندام هوایی ارقام مختلف گندم**

می‌کنند که همین امر موجب جذب بیشتر کادمیوم توسط ریشه و انتقال آن به اندام هوایی می‌شود [۴۱]. مقدار کل کادمیوم خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقدار کادمیوم گیاهان رشدکرده در خاک‌های آلوده است [۶]. پتانسیل سمیت فلزات سنگین در محیط زیست، به غلظت آن در محلول خاک بستگی دارد، هرقدر غلظت فلزات در فاز محلول بیشتر باشد، جذب آنها توسط گیاه نیز بیشتر خواهد بود [۱۵]. با افزایش سطوح کادمیوم در خاک، غلظت کادمیوم در اندام هوایی هویج و کلم افزایش یافت [۴۸]. نتایج مشابهی در گیاه تربچه نیز مشاهده شد [۴]. براساس نتایج تحقیق حاضر، ارقام مطالعه‌شدهٔ گندم دارای تفاوت معناداری در تجمع کادمیوم در اندام هوایی خود بودند. در بین ارقام بررسی‌شده، در تیمار $Cd_{40}$ رقم ‘نیک‌نژاد’ مقدار بیشتری کادمیوم در اندام هوایی خود تجمع داده بود، درحالی که در تیمار $Cd_{80}$ بیشترین مقدار کادمیوم در اندام هوایی رقم ‘پیشگام’ ملاحظه شد. به‌نظر می‌رسد کارایی بیشتر ارقام ‘نیک‌نژاد’ و ‘پیشگام’ در تجمع بیشتر کادمیوم، مربوط به سازگاری این ارقام با تجمع کادمیوم در سلول‌های خود باشد [۲۱]. گیاهان سازوکارهای مختلفی از قبیل جلوگیری از تجمع عناصر، سمیت‌زدایی[1] و مقاومت متابولیسمی برای مقابله با سمیت عناصر سنگین دارند [۲۱]. بنابراین به‌نظر می‌رسد کارایی بیشتر ارقام ‘نیک‌نژاد’ و ‘پیشگام’ در تجمع بیشتر کادمیوم، به‌دلیل سمیت‌زدایی کادمیوم در سلول‌ها باشد. از طرف دیگر، کادمیوم با تولید گونه‌های فعال اکسیژن[2] سبب بروز تنش اکسیداتیو[3] در گیاهان می‌شود [۴۳]. برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن، گیاهان در طول تکامل مجهز به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان[4] (نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پروکسیداز) شده‌اند [۴۳]. می‌توان احتمال داد که کارایی سامانهٔ آنتی‌اکسیدان ارقام ‘نیک‌نژاد’ و ‘پیشگام’ بیش از دیگر ارقام بررسی‌شده بوده است. هر چند اثبات این موضوع به اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های مذکور در ارقام ‘نیک‌نژاد’، ‘پیشگام’ و دیگر ارقام بررسی‌شده در حضور کادمیوم نیاز دارد.

1 . Detoxification
2 . Reactive Oxygen Species (ROS)
3 . Oxidative Stress
4 . Antioxidant



Archive of SID
www.SID.ir

## ۴. نتیجه‌گیری

براساس نتایج تحقیق حاضر مشخص شد که در بین ارقام مورد مطالعه، تفاوت زیادی از نظر وزن خشک، غلظت عناصر ریزمغذی و غلظت کادمیوم اندام هوایی در حضور کادمیوم در محیط رشد وجود داشت. افزایش غلظت کادمیوم خاک از یک طرف سبب کاهش وزن خشک اندام هوایی و از طرف دیگر، موجب افزایش غلظت کادمیوم اندام هوایی در همهٔ ارقام شد. در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد، بیشترین و کمترین وزن خشک به‌ترتیب مربوط به ارقام 'الوند' (۱/۳۶ گرم وزن خشک) و 'سیوند' (۰/۵۴ گرم وزن خشک) بود. بیشترین و کمترین وزن خشک در تیمار $Cd_{80}$ نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب در ارقام 'آزادی' (۰/۶۷ گرم وزن خشک) و 'شیراز' (۰/۳۳ گرم وزن خشک) مشاهده شد. ارقام 'نیک‌نژاد' و 'سیوند' به‌ترتیب با دارا بودن ۲۶ و ۲۷ میلی‌گرم مس در کیلوگرم وزن خشک بیشترین غلظت مس را در تیمار $Cd_{80}$ نسبت به تیمار شاهد داشتند. بیشترین و کمترین مقدار جذب کادمیوم در تیمار $Cd_{40}$ نسبت به تیمار شاهد، به‌ترتیب در اراقام 'نیک‌نژاد' (میانگین ۷ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'پارسی' (میانگین ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد. از طرف دیگر، بیشترین و کمترین غلظت کادمیوم در تیمار $Cd_{80}$ نسبت به تیمار شاهد، به‌ترتیب در اندام هوایی ارقام 'پیشگام' (میانگین ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و 'نوید' (میانگین شش میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) مشاهده شد. با توجه به مقدار مادهٔ خشک ارقام بررسی‌شده در سطوح مختلف کادمیوم به‌نظر می‌رسد که مقاومت ارقام 'آزادی' و 'الوند' بیش از دیگر ارقام در خاک‌های آلوده به کادمیوم باشد. از طرف دیگر، با توجه به غلظت کادمیوم اندام هوایی در ارقام 'نیک‌نژاد' و 'پیشگام' می‌توان گفت این دو رقم قابلیت زیادی در برداشت کادمیوم داشتند.

## منابع


۱. آهنگری ع، رسولی م و نادری م (۱۳۸۶) بررسی صفات مؤثر در مقاومت به تنش خشکی در گندم. مجموعه مقالات کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات، سازمان جهاد کشاورزی استان مرکزی.

۲. امامی ع (۱۳۷۵) روش‌های تجزیه گیاه. مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب، نشریه فنی شماره ۹۸۲، جلد اول.

۳. رجایی م و کریمیان ن ع (۱۳۸۵) اثر کادمیم اضافه شده و زمان خواباندن بر شکل‌های شیمیایی کادمیم، رشد و ترکیب شیمیایی اسفناج در دو بافت خاک. مجموعه مقالات همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، انتشارات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران: ۳۲۲-۳۲۱.

۴. محمدی م، شیروانی س، فتوت ا و حق‌نیا غ ح (۱۳۸۵) مقایسه جذب روی و کادمیم در تربچه و شاهی و بررسی اثرات متقابل آنها. مجموعه مقالات همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، انتشارات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران: ۳۱۸-۳۱۷.

5. Abdel-Sabour MF, Mortvedt JJ and Keelson JJ (1988) Cadmium-Zinc interaction in plants and extractable cadmium and zinc fractions in soil. Soil Science. 145(6): 426-431.

6. Alloway BJ (1990) Soil processes and the behavior of metals. Chap 2 in Alloway BJ (Ed.) Heavy Metals in Soils Blackie Academic and Professional. Glasgow: 7-28.

7. Andrade LR, Farina M and Amado GM (2004) Effects of copper on *Enteromorpha flexuosa* (Chlorophyta) *in vitro*. Ecotoxicolology Environment Safety. 58: 117-125.




Archive of SID
www.SID.ir

8. Aravind P and Prasad MNV (2005) Cadmium–zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17: 3-20.

9. Assche F and Clijsters Van H (1990) Effects of metals on enzyme activity in plants. Plant Cell Environment. 13: 195-206.

10. Aydin H and Coker C (2001) *In vivo* Interaction between Cadmium and Essential Trace Elements Copper and Zink in Rats. Journal of Medical Science. 31: 127-129.

11. Baird C and Cann M (2005) Environmental chemistry 3rd Ed. New York: WH Freeman: 652.

12. Basta NT, Raun WR and Gavi F (1998) Wheat grain cadmium under long-term fertilization and continuous winter wheat production. Better Crops. 82(19): 5-14.

13. Benavides MPS, Gallego M and Tomaro ML (2005) Cadmium toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17(1): 21-34.

14. Blazka ME and Shaikh ZA (1992) Cadmium and mercury accumulation in rat hepatocytes: interactions with other metal ions. Toxicology Applied Pharmacology. 113: 118-125.

15. Buffle J (1988) Complexation Reactions in Aquatic Systems, an Analytical Approach, John Wiley and Sons, Chi Chester.

16. Burzynski M (1988) The uptake and accumulation of phosphorous and nitrates and the activity of nitrate reductase in cucumber seedlings treated with Pb and Cd. Acta Society Botany Pol. 57: 349-359.

17. Cataldo DA, Garland TR and Wildung RE (1983) Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. Plant Physiology. 73: 844-848.

18. Chakravarty B and Srivastava S (1997) Effect of cadmium and zinc interaction on metal uptake and regeneration of tolerant plants in linseed. Agriculture, Ecosystems and Environment. 61: 45-50.

19. Chaney RL and Hornick SB (1978) Accumulation and effects of cadmium on crops Cadmium 77. Proc 1st Int Cadmium Conf, San Francisco. London: Metal Bulletin. Pp. 40-125.

20. Chaoui A, Ghorbal MH and El Ferjani E (1997) Effects of cadmium–zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Plant Science. 126: 21-28.

21. Cobbett CS (2000) Phytochelation biosynthesis and function in heavy-metal detoxification: Current opinion. Plant Biology. 3: 211-216.

22. Cohen CK, Fax TC, Garvin DF and Kochian LV (1998) The role of iron deficiency stress responses in stimulating heavy metal transport in plants. Plant Physiology. 116: 1063-1072.

23. Costa G and Morel JL (1994) Efficiency of H-ATPase activity on cadmium uptake by four cultivars of lettuce. Journal of Plant Nutrition. 17: 627-637.

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

25. Goergia A, Angle J, Chaney R and Van Berkum P (1997) Heavy metals in the environment: sewage sludge and heavy metal effects on nodulation and nitrogen fixation of vegetables. Environmental Quality. 24: 1199-1204.

26. Gonçalves JF, Fabiane G, Antes J, Maldaner L, Belmonte P, Luciane A, Tabaldi R, Rauber L, Veronica R, Dilson A, Bisognin V, Luiz D, E´rico M, Moraes F and Fernando T (2009) Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in



Archive of SID
www.SID.ir

two different experimental culture conditions. Plant Physiology and Biochemistry. 47: 814-821.

27. Gussarson M, Asp H, Adalsteinsson S and Jensen P (1996) Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of Birth (*Betula pendula*) by buthionine sulphoximine (BSO). Experimental Botany. 47: 211-215.

28. Hart JJ, Welch RM, Norvell WA and Kochian LV (2002) Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. Physiolia Plantarum. 116: 73-78.

29. Hassan MJZ, Zhu B and Ahmad Mahmood Q (2006) Influence of cadmium toxicity on rice genotypes as affected by zinc, sulfur and nitrogen fertilizers. Caspian Journal of Environmental Science. 4(1): 1-8.

30. Honma Y and Hirata H (1978) A noticeable increase in Cd absorption by Zn deficient rice plants. Soil Sci. Plant Nutrition. 24: 295-297.

31. 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.

32. Juwarkar AA, Nair A, Dubey KV, Singh SK and Devotta S (2007) Bio surfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. Chemosphere. 68: 1996-2002.

33. Kabata-Pendias A and Pendias H (2001) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, New York, USA.

34. Keck RW (1978) Cadmium alternation of root physiology and potassium ion fluxes. Plant Physiology. 62: 94-96.

35. Lagriffoul AB, Mocquot M and Mench 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.

36. Lasat MM, Pence NS, Garvin DF, Ebbs SD and Kochian LV (2000) Molecular phys-iology of zinc transport in the Zn hyper accumulator Thlaspi caerulescens. Experimental Botany. 51: 71-79.

37. 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. Environmental Sciences. 22(7): 1067-1072.

38. Liu JG, Liang JS, Li KQ, Zhang ZJ, Yu BY, Lu XL, Yang JC and Zhu QS (2003) Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. Chemosphere. 52: 1467-1473.

39. Lozano-Rodrı´guez E LE, Hernandez P and Bonay Carpena-Ruiz RO (1997) Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: physiological disturbances. Experimental Botany. 48: 123-128.

40. Madyima S, Chimbari M, Nyamangara J and Bangira C (2002) Cumulative effects of sewage sludge and effluent mixture application on soil properties of a sandy soil under a mixture of star and kikuyu grasses in Zimbabwe. Physical Chemistry of Earth. 27: 747-53.

41. Meharg AA (1993) the role of the plasmalemma in metal tolerance in angiosperms. Physiologia Plantarum. 88: 191-198.

42. Mermut AR, Jain JC, Song L, Kerrich R, Kozak L and Jana S (1996) Trace element concentrations of selected soils and fertilizers in Saskatchewan, Canada. Journal of Environmental Quality. 25: 845-53.

43. Nagajyoti PC, Lee KD and Sreekanth TVM



Archive of SID
www.SID.ir

(2010) Heavy metals occurrence and toxicity for plants: a review. Environmental Chemistry Letter. 8: 189-216.

44. Naier D and Singh A (1989) Toxicity of heavy metals (Zn. Cu, Cd, Pb) to vascular plants. A literature review. Water, Air and Soil Pollution. 47: 287-319.

45. Oliver DP, Wilhelm NS, McFarlane JD, Tiller KG and Cozens GD (1997) Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain. Australian Journal Experimental Agriculture. 37: 677-681.

46. Pagliano C, Raviolo M, Vecchia FD, Gabbrielli R, Gonnelli C, Rascio N, Barbato R and Rocca NL (2006) Evidence for PSII donor-side damage and photoinhibition induced by cadmium treatment on rice (*Oryza sativa* L.). Photochemical Photobiology B: Biology. 84: 70-78.

47. Qian H, Li J, Sun L, Chen W, Sheng G, Liu W and Fu Z (2009) Combined effect of copper and cadmium on Chlorella vulgaris growth and photosynthesis-related gene transcription. Aquatic Toxicology. Pp. 56-61.

48. Sauerbeak DR (1991) Plant element and soil properties governing plant uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. Water, Air & Soil Pollution. 227: 57-58.

49. Schenker M, Fan TWM and Crowley DE (2001) Phytosiderophores influence on cadmium mobilization and uptake by wheat and barley plants. Environmental Quality. 30: 2091-2098.

50. Sharma R, Agrawal KM and Agrawal SB (2008) Interactive effects of cadmium and zinc on carrots: Growth and biomass accumulation. Plant Nutrition. 31: 19-34.

51. Sheoran IH and Singal 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.

52. Singh SP and Yadava V (1993) Cadmium induced inhibition of nitrate uptake in *Anacyctis nidulans*: interaction with other divalent cations. General Applied Microbiology. 29: 297-304.

53. Tiryakioglu MS, Eker F, Ozkutlu S and Husted Cakmak I (2006) Antioxidant defense system and cadmium uptake in barley genotypes differing in cadmium tolerance. Trace Element Medicinal Biology. 20: 181-189.

54. Trivedi S and Erdei L (1992) Effects of cadmium and lead on the accumulation of Ca and K, and on the influx and translocation of K in wheat of low and high K status. Physiologia Plantarum. 84: 94-100.

55. Vassilev A and Yordanov I (1997) Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium–treated plants: A review. Plant Physiology. 23(3-4): 114-133.

56. Wang C, Sun Q and Wang L (2009) Cadmium toxicity and phytochelatins production in a rooted-submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* exposed to low concentrations of cadmium. Environmental Toxicology. 24: 271-278.

57. Wong MK, Chuah GK, Koh LL, Ang KP and Hew CS (1984) The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. Environmenal and Experimental Botany 24: 189-195.

58. Wu FB, Dong J, Jia GX, Zheng SJ and Zhang GP (2006) Genotypic difference in the responses of seedling growth and Cd toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). Agricultural Science China. 5: 68-76.

59. Wu FB, Wu HG, Zhang GP and Bachir MLD (2004) Differences in growth and yield in response to cadmium toxicity in cotton genotypes. Plant Nutrition. 167: 85-90.



Archive of SID

www.SID.ir

60. Wu FB and Zhang GP (2002) Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors. Plant Nutrition. 25: 1163-1173.

61. Wu QT, Chen L and Wang GS (1999) Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism. Acta Ecological Silence. 19: 104-107.

62. Xian X (1988) Response of kidney bean to concentration and chemical form of cadmium, zinc, and lead in polluted soils. Environmental Pollution. 57: 127-137.

63. Yanai J, Yabutani M, Yumei K, Biao H, Guobao L and Kosaki T (1998) Heavy metal pollution of agricultural soils and sediments in Liaoning Province, China. Soil Science Plant Nutrition. 44: 367-375.

64. Yang MJ, Lin XY and Yang XE (1998) Impact of Cd on growth and nutrient accumulation of different plant species. Chinese Journal of Applied Ecology. 9: 89-94.

65. Zhang GP, Fukami M and 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. 4079: 1-7.

66. Zhao BH, Zhang HX, Xi LL, Zhu QS and Yang JC (2006) Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice. Chinese Journal of Rice Science. 20: 306-312.

67. Zornoza PS, Vazquez E, Esteban M, Fernandez P and Carpena R (2002) Cadmium-stress in nodulated white lupin: strategies to avoid toxicity. Plant Physiologia Biochemistry. 40: 1003-1009.

Archive of SID



www.SID.ir