

بررسی سطوح مختلف کادمیم و گوگرد بر عملکرد و غلظت کادمیم و برخی عناصر کم مصرف در برگ و ریشه ذرت (*Zea Mays L.*) در شرایط گلخانه‌ای

هاجر تاجی^{۱*} و احمد گلچین^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۴)

چکیده

به منظور بررسی کارایی ذرت در پاک‌سازی کادمیم از خاک و تأثیر سطوح مختلف گوگرد به عنوان تشدید کننده جذب بر عملکرد اندام هوایی و ریشه و غلظت برخی عناصر کم مصرف در ذرت، آزمایشی گلخانه‌ای در دانشگاه زنجان در سال ۱۳۸۷ به مدت ۶۰ روز انجام شد. در یک آزمایش فاکتوریل و در طرح کامل تصادفی با سه تکرار در هر تیمار، سه سطح گوگرد (صفر، ۱ و ۲ تن گوگرد در هکتار) از منبع گوگرد عنصری و شش سطح کادمیم (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) از منبع سولفات کادمیم به گلدان‌ها اضافه شد و سپس بذر ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در آن کشت گردید. نتایج آزمایش نشان داد که تأثیر سطوح مختلف کادمیم و مقدار افزودنی گوگرد بر غلظت کادمیم، وزن تر و خشک و غلظت روی، آهن، منگنز و مس در اندام هوایی و ریشه گیاه معنی‌دار ($P < 0.01$) بود. با افزایش سطح کادمیم در خاک، غلظت کادمیم در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه ذرت افزایش ولی وزن تر و خشک گیاه کاهش یافت. کاربرد گوگرد باعث افزایش غلظت کادمیم در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه ذرت شد، ولی وزن این قسمت‌ها را کاهش داد. غلظت روی، آهن، مس و منگنز اندام‌های هوایی با کاربرد گوگرد و کادمیم کاهش یافت. در مجموع، به نظر می‌رسد مصرف گوگرد با کاهش اسیدیت محیط ریشه می‌تواند باعث جذب بیشتر کادمیم توسط ریشه شود.

واژه‌های کلیدی: گیاه‌پالایی، ذرت، کادمیم، گوگرد، روی، آهن، مس، منگنز

مقدمه

می‌تواند به سطحی برسد که امنیت غذایی بشر را تهدید نماید. یون‌های فلزات سنگین زمانی که در مقادیر زیاد در محیط وجود داشته باشند، به وسیله ریشه گیاهان جذب و به اندام هوایی منتقل می‌شوند که این امر موجب اختلال در سوخت و ساز گیاه و کاهش رشد می‌گردد (۱۱). علاوه بر این، وجود مقادیر زیاد فلزات سنگین در خاک، فعالیت‌های زیستی و حاصلخیزی خاک را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش عملکرد، افت

هم‌زمان با پیشرفت و توسعه صنایع، استخراج معادن، ذوب فلزات و مصرف کودهای شیمیایی حاوی عناصر سنگین، آلودگی خاک به فلزات سنگین به یکی از مشکلات زیست محیطی عمده در جوامع بشری تبدیل شده است (۳). تجمع عناصر سنگین مانند کادمیم، نیکل و کروم در خاک، به ویژه در زمین‌های کشاورزی، امری تدریجی بوده و غلظت عناصر

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد خاک‌شناسی دانشگاه زنجان

۲. استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hagartagi@ymail.com

کیفیت محصولات و افزایش غلظت آنها در تولیدات کشاورزی می‌شود که برای سلامتی انسان یا دام مصرف کننده خطرناک می‌باشد (۱۰). در بین فلزات سنگین، کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا به راحتی توسط سیستم گیاه جذب شده و سمیت آن برای گیاه ۲-۲۰ برابر سایر فلزات سنگین می‌باشد. در اراضی کشاورزی، کادمیم موجود در کودهای فسفوری یکی از منابع عمده آلودگی خاک با این عنصر سمی است. نقش کودهای فسفوری در آلودگی خاک با کادمیم و سمیت آن در گیاه در تحقیقات متعددی گزارش شده است (۱). گلچین و شفيعی (۲) در تحقیقی با بررسی تأثیر کارخانجات سرب و روی زنجان بر آلودگی محصولات زراعی و باغی به فلزات سنگین گزارش دادند که نمونه‌های گیاهی برداشت شده از مزارع اطراف کارخانه دارای غلظت زیاد روی، سرب و کادمیم بودند که این امر می‌تواند باعث به مخاطره افتادن سلامت دام و در نتیجه انسان گردد. نوربخش (۴) در بررسی اثرات بافت و کادمیم خاک بر رشد گندم، کاهو و تربچه گزارش داد که غلظت بیشتر از ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم سبب کاهش رشد گردید. از اینرو گسترش روش‌های سازگار با محیط زیست و کم هزینه برای اصلاح مکان‌های آلوده به فلزات سنگین، می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد. در سال‌های اخیر گیاه‌پالایی به عنوان یک روش مطلوب برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفته است (۳). گیاه‌پالایی، فناوری استفاده از گیاهان برای پالایش آلودگی از محیط زیست است که روشی مؤثر، ارزان قیمت و دوستدار محیط زیست می‌باشد. در این روش از گیاهان سبز و ارتباط آنها با ریزجانداران خاک برای کاهش آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (۶). این فناوری می‌تواند برای رفع انواع آلاینده‌های خاک یعنی آلاینده‌های معدنی و آلی به کار رود. گیاهانی مانند خردل هندی، آفتابگردان، تنباکو، چاودار و ذرت دارای این توانایی هستند که آلودگی عناصر سنگین را کاهش دهند (۱۹). در پروژه گیاه‌پالایی، زیست فراهمی فلزات سنگین فاکتور مهمی است. یکی از روش‌های عمده افزایش زیست فراهمی فلزات سنگین در خاک‌ها و افزایش تحرک آنها

در داخل گیاه، کاهش پ- هاش (اسیدیته) خاک است (۸ و ۲۷). کاهش پ- هاش خاک از طریق استفاده از اسیدهای آلی یا معدنی یا اسیدهای تولید شده توسط کودهای شیمیایی از جمله آمونیوم کلراید امکانپذیر است (۱۴). ولی استفاده از این روش‌ها به دلیل اثرات منفی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک و امکان آلودگی آب‌های زیرزمینی طی آب‌شویی دارای محدودیت‌هایی است. برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از گوگرد عنصری برای کاهش پ- هاش خاک و افزایش حلالیت فلزات سنگین در خاک پیشنهاد شده است (۱۵). در مطالعه انجام شده توسط کوی و همکاران (۹)، مشخص شد که با کاربرد گوگرد، غلظت روی در ریشه و اندام هوایی ذرت به ترتیب ۴/۵ و ۲/۳ برابر در مقایسه با شاهد افزایش یافت. کایزر و همکاران (۱۵) گزارش کردند که با کاربرد گوگرد، غلظت کادمیم در ریشه و اندام هوایی ذرت به ترتیب ۲/۹ و ۲/۲ برابر افزایش یافته است. با افزایش گوگرد، گروهی از باکتری‌های اسید دوست خاک (به‌ویژه تیوباسیلوس‌ها)، گوگرد را اکسید کرده و آن را به اسید سولفوریک تبدیل می‌کنند که باعث کاهش پ- هاش خاک شده و به افزایش جذب فلزات کمک می‌کنند. مک لافلین و همکاران (۲۰) گزارش کردند که افزایش یون سولفات در خاک می‌تواند غلظت کادمیم ساقه را در نخود افزایش دهد. لذا با توجه به اهمیت پاکسازی خاک‌های آلوده و لزوم شناسایی راهکارهای افزایش کارایی گیاه‌پالایی، این پژوهش با اهداف بررسی توان ذرت در جذب عنصر کادمیم و امکان استفاده از این گیاه جهت گیاه‌پالایی، بررسی تأثیر گوگرد بر جذب فلزات سنگین توسط گیاه ذرت و افزایش کارایی گیاه‌پالایی، بررسی نحوه توزیع فلزات سنگین در بافت‌های مختلف گیاه و تعیین حد تحمل گیاه ذرت به آلودگی کادمیم در خاک به مرحله اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

این بررسی در یک خاک آهکی منطقه زنجان و در شرایط گلخانه در اردیبهشت ۱۳۸۷ به مدت ۶۰ روز اجرا شد. در

جدول ۱. نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت

خصوصیت	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	واکنش گل اشباع	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)
مقدار	۳۵/۴	۳۴/۳	۳۰/۳	لوم سیلتی رسی	۱/۴	۷/۶	۰/۷۵	۰/۱
خصوصیت	فسفر قابل جذب *	پتاسیم قابل جذب **	آهن قابل جذب ***	منگنز قابل جذب	روی قابل جذب	مس قابل جذب	کادمیم قابل جذب	
مقدار	۱۰/۱	۱۸۰	۶/۲۸	۷/۲۴	۱/۱	۱/۰۶	۰/۱	

*: روش اولسن (میلی‌گرم در کیلوگرم)

** : روش آمونیوم استات (میلی‌گرم در کیلوگرم)

*** : عناصر کم مصرف و کادمیم با روش DTPA (میلی‌گرم در کیلوگرم)

و داده‌های به‌دست آمده به عنوان پاسخ‌های گیاهی با نرم‌افزار MSTATC مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. گروه‌بندی میانگین‌ها به روش آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی آورده شده است. این خاک از نظر بافت متوسط (لوم سیلتی رسی)، فاقد مشکل شوری یا قلیائیت با مواد آلی کم و خاکی آهکی می‌باشد و از نظر کادمیم مورد استفاده نیز در سطح پائین بوده و برای اعمال تیمارها مناسب به نظر می‌رسد.

در جداول ۲ و ۳ اثر مصرف توأم کادمیم و گوگرد بر وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه آورده شده است که از نظر آماری در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. با مصرف کادمیم، وزن تر اندام‌های هوایی از ۶۹/۵۹ گرم در گلدان در تیمار Cd₀ به ۱۸/۲۳ گرم در گلدان در تیمار Cd₂₅₀ کاهش یافت. هم‌چنین، وزن خشک اندام‌های هوایی با ۸۶٪ کاهش از ۱۲/۷۳ گرم در گلدان به ۱/۷۳ گرم در گلدان کاهش یافت. افزایش میزان مصرف گوگرد باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام‌های هوایی شد ($P < 0.01$). منسأه و همکاران (۲۲) نتایج مشابهی را در کاهو گزارش کردند. گوگرد با کاهش پ- هاش خاک، باعث افزایش حلالیت کادمیم و در نتیجه جذب بیشتر آن توسط گیاه می‌شود. کادمیم، باعث کاهش فعالیت هورمون

آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، شش سطح کادمیم (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از منبع سولفات کادمیم و سه سطح گوگرد (صفر، ۱ و ۲ تن در هکتار) از منبع گوگرد عنصری روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ اعمال گردید. برای هر گلدان سه کیلوگرم خاک توزین و در کیسه‌های نایلونی ریخته شد. پس از اعمال تیمارها و مصرف سایر عناصر غذایی با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱)، خاک گلدان‌ها کاملاً مخلوط گردید و در هر گلدان ۵ بذر جوانه‌دار ذرت کشت گردید. آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر بر اساس رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) انجام شد. پس از گذشت زمان لازم و رشد گیاهان، برگ و ریشه گیاهان به‌طور جداگانه برداشت و پس از اندازه‌گیری وزن تر و شست و شو با آب مقطر در داخل پاکت‌های مخصوص قرار داده شدند و در آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. پس از خشک شدن نمونه‌ها در آون، وزن خشک آنها یادداشت گردید. سپس نمونه‌های برگ و ریشه برای تجزیه و اندازه‌گیری غلظت عناصر آسایاب گردید و از هر نمونه یک گرم توزین و در کوره الکتریکی خاکستر شد. عصاره‌گیری با اضافه نمودن ۱۰ میلی‌لیتر کلریدریک اسید ۲ مولار و عبور دادن محلول از کاغذ صافی واتمن ۴۲ انجام گرفت (۳۱). در عصاره‌های به‌دست آمده غلظت عناصر کادمیم، روی، آهن، منگنز و مس با دستگاه جذب اتمی (مدل Avian, AA20) اندازه‌گیری شد. نتایج

جدول ۲. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد برون تر و خشک اندام‌های هوایی ذرت

سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)				سطوح گوگرد (تن در هکتار)	میانگین
۰	۱	۲			
وزن تر اندام‌های هوایی (گرم)					
Cd0	۷۱/۰۵a	۶۵/۶۰b	۶۰/۱۳c	۶۵/۵۹	
Cd50	۳۲/۲۲d	۲۶/۳۳fg	۲۳/۱۸h	۲۷/۲۴	
Cd100	۲۹/۵۷e	۲۳/۳۱h	۲۰/۶۴j	۲۴/۵۰	
Cd150	۲۷/۰۴f	۲۱/۶۸ij	۱۸/۳۲kl	۲۲/۳۴	
Cd200	۲۵/۴۹g	۱۸/۷۵k	۱۷/۱۱lm	۲۰/۴۵	
Cd250	۲۲/۸۰hi	۱۶/۸۹m	۱۵/۰۰n	۱۸/۲۳	
میانگین	۳۴/۶۹	۲۸/۷۶	۲۵/۷۳	۲۹/۷۲	
وزن خشک اندام‌های هوایی (گرم)					
Cd0	۱۳/۹۶a	۱۳/۶۹a	۱۰/۵۴b	۱۲/۷۳	
Cd50	۵/۴۵c	۵/۳۲c	۳/۷۰d	۴/۸۲	
Cd100	۳/۷۲d	۲/۶۳e	۲/۵۷e	۲/۹۷	
Cd150	۲/۴۹ef	۲/۵۳e	۲/۲۵ef	۲/۳۸	
Cd200	۲/۱۸ef	۱/۹۱ef	۱/۶۷ef	۱/۹۲	
Cd250	۲/۱۲ef	۱/۶۵ef	۱/۴۲f	۱/۷۳	
میانگین	۴/۹۹	۴/۵۹	۳/۶۹	۴/۴۲	

* : میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد برون تر و خشک ریشه ذرت

سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)				سطوح گوگرد (تن در هکتار)
۰	۱	۲	میانگین	
وزن تر ریشه (گرم)				
۷۱/۷۵a	۶۷/۴۸b	۶۲/۲۱c	۶۷/۱۴	Cd0
۳۸/۸۳d	۳۱/۹۱f	۲۸/۶۲g	۳۳/۱۲	Cd50
۳۵/۱۳e	۲۸/۵۶g	۲۶/۸۴h	۳۰/۱۷	Cd100
۳۱/۵۳f	۲۶/۵۶h	۲۴/۹۰ij	۲۷/۶۶	Cd150
۲۹/۱۱g	۲۴/۲۲j	۲۱/۸۱k	۲۵/۰۴	Cd200
۲۶/۱۱hi	۲۰/۲۴l	۱۹/۳۸l	۲۱/۹۱	Cd250
۳۸/۷۴	۳۳/۱۶	۳۰/۶۲	۳۴/۱۷	میانگین
وزن خشک ریشه (گرم)				
۸/۲۹a	۷/۹۴a	۷/۳۹a	۷/۸۷	Cd0
۴/۷۲b	۴/۵۳b	۴/۲۹bc	۴/۵۱	Cd50
۴/۲۴bc	۳/۲۳cd	۳/۰۱de	۳/۴۹	Cd100
۳/۳۱cd	۳/۰۵de	۲/۸۵de	۳/۰۷	Cd150
۲/۸۳de	۲/۰۵ef	۱/۷۲f	۲/۲۰	Cd200
۱/۹۷ef	۱/۷۱f	۱/۶۱f	۱/۷۷	Cd250
۴/۲۳	۳/۷۵	۳/۴۸	۳/۸۲	میانگین

* : میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد بر غلظت کادمیم اندام‌های هوایی و ریشه

سطوح کادمیم			
سطوح گوگرد (تن در هکتار)			
۰	۱	۲	میانگین
غلظت کادمیم اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
Cd0	۱۳/۹i	۲۲/۷۹i	۲۷/۲۴i
Cd50	۸۷/۲۹h	۱۰۶/۷۵gh	۱۱۳/۹۸g
Cd100	۱۴۱/۷۸f	۱۴۶/۷۸f	۱۶۰/۶۸ef
Cd150	۱۷۲/۳۶e	۱۷۸/۴۷de	۲۱۴/۰۶c
Cd200	۱۹۴/۰۴cd	۲۱۱/۲۸c	۲۵۱/۸۶ab
Cd250	۲۰۲/۹۴c	۲۴۴/۰۸b	۲۶۷/۹۹a
میانگین	۱۳۵/۳۸	۱۵۱/۶۹	۱۷۲/۶۳
غلظت کادمیم ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
Cd0	۱۶/۶۸m	۵۵/۶۰l	۶۱/۱۶l
Cd50	۱۷۲/۴k	۲۱۱/۳j	۲۵۵/۸i
Cd100	۲۷۲/۴i	۳۱۱/۴h	۳۷۸/۱g
Cd150	۳۱۱/۴h	۳۶۷g	۴۴۴/۸de
Cd200	۴۰۰/۳fg	۴۷۸/۲cd	۲۵۰/۴bc
Cd250	۴۳۳/۷ef	۵۱۷/۱b	۵۶۷/۱a
میانگین	۲۶۷/۸۰	۳۲۳/۴۰	۳۶۷/۸۸

* : میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

۳۱۹/۶۹ میلی گرم در کیلوگرم بود. به عبارت دیگر، میانگین غلظت کادمیم در ریشه ۲/۰۸ برابر غلظت آن در اندام‌های هوایی شد.

تجمع بیشتر کادمیم در ریشه‌ها، نسبت به ساقه، معمولاً در غلات، گیاهان نیمه مقاوم از جمله سورگوم (۲۶) و در گیاهان حساس از جمله لوبیا (۲۴) دیده می‌شود. کاهش انتقال کادمیم از ریشه به اندام‌های هوایی می‌تواند ناشی از غیر متحرک شدن این عنصر در دیواره سلولی یا اتصال کادمیم به ترکیبات آلی موجود در ریشه (فیتوکلاتین) باشد (۲۸). هم‌چنین مصرف گوگرد باعث افزایش غلظت کادمیم ریشه و اندام‌های هوایی شد. با افزایش میزان مصرف گوگرد، غلظت کادمیم از ۱۳۵/۳۸ میلی گرم در کیلوگرم در تیمار S₀ به ۱۷۲/۶۳ میلی گرم در کیلوگرم در تیمار S₂ افزایش یافت. سوربک (۲۹)

سیتوکنین می‌شود که تأثیر به سزایی در تکثیر سلول و رشد گیاه دارد (۲۳). پیرسون و کرکهام (۲۵)، کاهش وزن ریشه با افزایش غلظت کادمیم را در گیاه گندم گزارش کردند. حضور کادمیم منجر به کاهش سرعت رشد، تبخیر و تعرق و جذب یون توسط گیاه می‌شود و با کاهش جذب آب و غلظت سایر یون‌ها، مانع از انجام فعالیت ریشه می‌گردد (۳۰).

جدول ۴ اثر مصرف توأم کادمیم و گوگرد را بر غلظت کادمیم اندام‌های هوایی و ریشه همراه با گروه بندی میانگین‌ها نشان می‌دهد. بر این اساس، اثر اصلی و متقابل کادمیم و گوگرد بر غلظت کادمیم ریشه و اندام‌های هوایی معنی‌دار شد. با مصرف کادمیم، غلظت کادمیم در ریشه و اندام‌های هوایی افزایش معنی‌داری در سطح ۱٪ یافت. میانگین غلظت کادمیم در اندام‌های هوایی ۱۵۳/۲۳ میلی گرم در کیلوگرم و در ریشه

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد بر غلظت روی اندام‌های هوایی و ریشه

سطوح کادمیم				(میلی گرم در کیلوگرم)
سطوح گوگرد (تن در هکتار)				
۰	۱	۲	میانگین	
غلظت روی اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
۸۷/۲۹a	۵۷/۸۲c	۵۴/۴۸c	۶۶/۵۳	Cd0
۷۹/۵۰a	۵۵/۰۴c	۴۹/۴۸cde	۶۱/۳۴	Cd50
۶۸/۳۸b	۴۴/۴۸def	۴۲/۸۱efg	۵۱/۸۹	Cd100
۵۸/۹۳c	۴۱/۱۴efgh	۳۷/۸۰fgh	۴۵/۹۶	Cd150
۵۵/۶۰c	۳۸/۳۶fgh	۳۶/۱۴fgh	۴۳/۳۶	Cd200
۵۳/۳۷cd	۳۴/۴۷gh	۳۲/۲۴h	۴۰/۰۳	Cd250
۶۷/۱۸	۴۵/۲۲	۴۲/۱۶	۵۱/۵۲	میانگین
غلظت روی ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
۱۰۹/۵۳a	۸۲/۸۴bc	۷۵/۶۲de	۸۹/۳۳	Cd0
۸۸/۹۶b	۷۱/۱۷ef	۶۶/۷۲fg	۶۱/۷۵	Cd50
۸۳/۴۰bc	۶۶/۷۴fg	۵۸/۹۴hi	۶۸/۶۹	Cd100
۷۹/۵۱cd	۶۲/۲۷gh	۵۵/۰۴ij	۶۰/۶۵	Cd150
۷۲/۲۸ef	۵۵/۰۴ij	۵۲/۲۶ij	۵۹/۸۶	Cd200
۶۵/۶۱fgh	۵۱/۷۱ij	۴۸/۹۳j	۵۵/۴۱	Cd250
۸۳/۲۱	۶۴/۹۵	۵۹/۵۸	۶۹/۲۴	میانگین

* : میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

در هویج و کلم نتایج مشابهی را گزارش کرده است. کاهش پ- هاش خاک و افزایش حلالیت کادمیم، احتمالاً دلیل این پدیده می‌باشد (۲۹).

بر اساس نتایج جداول ۵ تا ۸، مصرف کادمیم و گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت آهن، روی، منگنز و مس در اندام‌های هوایی در سطح ۱٪ شد. در یک بررسی انجام شده در مورد گندم مشخص شد که با افزایش غلظت کادمیم، غلظت روی اندام‌های هوایی کاهش یافت. کادمیم و روی از نظر شیمیایی مشابهند. از اینرو کادمیم رفتارهای مشابهی با عنصر ضروری روی نشان می‌دهد و این دو عنصر در جذب با یکدیگر رقابت می‌کنند.

ونگ و همکاران (۳۲) کاهش غلظت آهن با افزایش غلظت کادمیم را ناشی از اثرات آنتاگونیسمی این دو عنصر گزارش

کردند. کک (۱۶) در تربیتکاله، و ونگ و همکاران (۳۲) در ذرت به نتایج مشابهی دست یافتند. در مطالعه انجام شده توسط گوارسون (۱۲) روی ذرت مشخص شد که کاربرد گوگرد، با کاهش پ- هاش و افزایش حلالیت کادمیم، غلظت آهن اندام‌های هوایی را به‌طور معنی‌داری کاهش داد.

به نظر می‌رسد که در انتقال یونی، رقابت شدیدی بین کادمیم و مس وجود دارد و با افزایش غلظت کادمیم، از جذب مس توسط گیاه جلوگیری می‌شود (۱۸). آیدین و همکاران (۵)، نتایج مشابهی را در تربچه گزارش کردند.

با مصرف کادمیم و گوگرد، غلظت منگنز اندام‌های هوایی به‌طور معنی‌داری کاهش، ولی غلظت منگنز ریشه افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط لاگریفول و همکاران (۱۷) در اندام‌های هوایی ذرت گزارش شده است. به‌طور کلی، کادمیم در جذب و

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد بر غلظت آهن اندام‌های هوایی و ریشه

سطوح کادمیم			میانگین
سطوح گوگرد (تن در هکتار)			
۰	۱	۲	
غلظت آهن اندام‌های هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
۵۸۹/۳۶a	۴۵۵/۳۶abcdef	۴۱۴/۷۷bcdef	Cd0
۵۵۶ab	۴۴۲/۰۲abcdef	۴۰۹/۲۱bcdef	Cd50
۵۳۲/۰۹abc	۴۱۷bcdef	۳۹۴/۲۰cdef	Cd100
۵۱۹/۳۰abcd	۳۷۹/۷۴cdef	۳۸۵/۶۲def	Cd150
۵۱۰/۴۰abcde	۳۷۰/۸۵def	۳۷۴/۱۸ef	Cd200
۴۵۳/۱۴abcdef	۳۵۵/۲۸ef	۳۴۲/۴۹f	Cd250
۵۲۶/۷۱	۴۰۳/۳۷	۳۸۲/۲۵	میانگین
غلظت آهن ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
۳۱۱۰/۸۲a	۲۷۷۴/۹۹bc	۲۶۲۸/۷۶c	Cd0
۲۸۶۰/۰۶b	۲۳۶۹/۱۱e	۲۳۰۰/۷۲ef	Cd50
۲۵۹۷/۰۷cd	۲۲۰۵/۰۹efg	۲۱۰۵/۰۱fgh	Cd100
۲۴۰۳/۵۸de	۱۹۳۵/۹۹hi	۱۸۹۲/۶۲hij	Cd150
۲۲۸۲/۹۳ef	۱۸۰۳/۶۶ij	۱۷۱۱/۹۲ijk	Cd200
۲۰۳۱/۰۶gh	۱۶۹۱/۳۵jk	۱۵۰۳/۹۸k	Cd250
۲۵۴۷/۵۹	۲۱۳۰/۰۳	۲۰۲۳/۸۴	میانگین

*: میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

جدول ۷. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد بر غلظت مس اندام‌های هوایی و ریشه

سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)				سطوح گوگرد (تن در هکتار)			
				۰	۱	۲	میانگین
غلظت مس اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)							
Cd0	۱۲/۰۷a	۱۱/۶۸ab	۱۰/۲۴abcd	11/33			
Cd50	۱۱/۴۴abcd	۱۰/۲۴abcd	۹/۱۱bcde	10/26			
Cd100	۱۰/۸۴abcde	۹/۴۴bcde	۸/۰۵def	9/44			
Cd150	۹/۵۴bcde	۹/۱۱bcde	۷/۶۳ef	8/76			
Cd200	۸/۷۵def	۸/۱۰def	۷/۰۵gh	7/96			
Cd250	۷/۶۳ef	۷/۰۵gh	۶/۸۴g	7/17			
میانگین	۱۰/۰۴	۹/۲۷	8/16	۹/۱۵			
غلظت مس ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)							
Cd0	۱۴/۴۶a	۱۲/۷۹ab	۱۰/۵۶abcd	۱۲/۶۰			
Cd50	۱۳/۲ab	۱۱/۶۸abc	۱۰/۰۱bcde	۱۱/۶۳			
Cd100	۱۲/۷۹ab	۱۰/۶۸abcd	۸/۳۴cde	۱۰/۶۰			
Cd150	۱۱/۶۸abc	۱۰/۰۱bcde	۷/۷۸cde	۹/۸۲			
Cd200	۱۰/۵۶abcd	۸/۳۴cde	۷/۲۲de	۸/۷۰			
Cd250	۸/۸۹bcde	۷/۲۲de	۶/۱۱e	۷/۴۰			
میانگین	۱۱/۹۳	۱۰/۱۲	۸/۳۳	۱۰/۱۲			

*: میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

جدول ۸. مقایسه میانگین‌های اثرات اصلی و متقابل سطوح کادمیم و گوگرد بر غلظت منگنز اندام‌های هوایی و ریشه

سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)	۰	۱	۲	میانگین
غلظت منگنز اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
Cd0	۷۷/۸۴a	۵۱/۷۰cd	۴۹/۴۸cde	۵۹/۶
Cd50	۶۴/۴۹b	۴۶/۱۴defg	۴۲/۸۱efgh	۵۱/۱۵
Cd100	۶۱/۱۶b	۴۲/۲۵fgh	۳۸/۹۲hi	۴۷/۴۴
Cd150	۵۳/۳۷c	۴۰/۵۸ghi	۳۴/۴۷ij	۴۲/۸۱
Cd200	۴۸/۹۲cdef	۳۸/۹۲hi	۳۱/۱۳jk	۳۹/۶۴
Cd250	۴۸/۴۴efgh	۳۴/۴۷ij	۲۷/۸۰k	۳۵/۸۵
میانگین	۵۹/۰۳	۴۲/۳۴	۴۳/۳۷	۴۸/۲۴
غلظت منگنز ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
Cd0	۹۶/۱۸e	۱۰۲/۳۰e	۱۸۹/۵۹bcde	۱۲۹/۳۵
Cd50	۹۵/۰۷e	۱۱۶/۲۰e	۲۳۲/۴۰abcd	۱۴۷/۸۹
Cd100	۱۳۲/۳۲e	۱۳۷/۸۸e	۲۳۹/۶۳abc	۱۶۹/۹۴
Cd150	۱۴۰/۶۶de	۱۵۰/۱۲cde	۲۵۷/۹۸ab	۱۸۲/۹۲
Cd200	۱۴۷/۳۴cde	۱۸۱/۲۵bcde	۲۶۴/۶۵ab	۱۹۷/۷۴
Cd250	۱۵۰/۶۷cde	۲۳۷/۴۱abc	۳۱۵/۸۰a	۲۳۴/۶۲
میانگین	۱۲۷/۰۴	۱۵۴/۱۹	۲۵۰	۱۷۷/۰۷

* : میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، فاقد اختلاف آماری معنی‌دار در سطح ۱٪ آزمون دانکن می‌باشند.

فتوستتزر را برعهده دارند دانسته‌اند.

نتیجه‌گیری

بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که با کاربرد افزودنی‌های مناسب می‌توان جذب فلزات سنگین توسط ذرت را افزایش داد. اما از آنجایی که مقادیر استفاده از افزودنی‌ها تأثیر زیادی بر اثرات آن دارد، باید گوگرد به مقدار مناسب و محاسبه شده مصرف شود، زیرا استفاده زیاد از این عنصر اثر منفی بر گیاه‌پالایی دارد. با افزایش سطوح آلودگی در خاک، غلظت عناصر سنگین در اندام‌های هوایی و

انتقال طبیعی عناصر غذایی در گیاه تداخل ایجاد می‌کند و بخشی از اثرات سوء آن مربوط به برهم زدن تعادل عناصر غذایی و تداخل در جذب عناصر ضروری است. با افزایش غلظت کادمیم، غلظت منگنز ریشه ۴۵ درصد افزایش یافت. افزایش غلظت منگنز در گیاه نخود، با افزایش غلظت کادمیم خاک، توسط هرناندز و همکاران (۱۳) گزارش شده است. کاهش پ-هاش خاک و کاهش غلظت آهن ناشی از افزایش غلظت کادمیم، احتمالاً دلیل این پدیده است. بیکر و سیمپسون (۷) دلیل افزایش غلظت منگنز را نوعی مکانیسم دفاعی گیاه جهت جلوگیری از تجمع کادمیم در قسمت‌هایی که عمل

و برای جلوگیری از کاهش بیش از حد زیست‌توده تولیدی گیاه، بهینه‌سازی شرایط کودی و تغذیه‌ای مؤثر می‌باشد.

سپاسگزاری

از کلیه عزیزانی که به هر نحو در اجرای این پژوهش همکاری نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

ریشه گیاه ذرت افزایش ولی وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه کاهش یافت. کاربرد افزودنی‌های مختلف باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه ذرت شد، ولی وزن تر و خشک این قسمت‌ها را کاهش داد. از آنجا که گیاه ذرت توانایی جذب غلظت‌های زیاد فلزات سنگین را دارد، می‌توان از آن برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده استفاده کرد

منابع مورد استفاده

۱. کریمیان، ن. ۱۳۷۷. پیامدهای زیاده‌روی در مصرف کودهای شیمیایی فسفوری. مجله خاک و آب ۱۲(۴): ۱-۱۴.
۲. گلچین، ا. و س. شفیع. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر کارخانجات سرب و روی زنجان بر آلودگی محصولات زراعی و باغی به فلزات سنگین. مجموعه مقالات همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، انتشارات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، صفحات ۲۱-۲۲.
۳. متشع زاده، ب. ۱۳۸۷. بررسی امکان افزایش کارایی گیاه‌پالایی خاک آلوده به فلزات سنگین توسط عوامل زیستی. پایان‌نامه دکترای خاکشناسی، دانشگاه تهران.
۴. نوربخش، ش. ۱۳۸۵. بررسی اثرات بافت و کادمیم خاک بر روی رشد چند گیاه. مجموعه مقالات همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، انتشارات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، صفحات ۱۸۳-۱۸۴.
5. Aydin, H. H., C. Coker and B. Ersoz. 2001. In vivo interaction between cadmium and essential trace elements copper and zinc in rats. Turk. J. Med. Sci. 31: 127-129.
6. Baker, A., S. P. McGrath, R. D. Reeves and J. A. C. Smith. 2000. Metal hyper accumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal polluted soils. PP. 85-107. In: Terry, N. and Banuelos, G. (Eds.), Phytoremediation of Contaminated Soil and Water, CRC Press LLC, USA.
7. Baker, R. and F. S. Simpson. 1998. Cleanup Order Issued to Chroma Crankshaft. California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control, Sacramento, CA.
8. Blaylock, M. J., D. E. Salt, S. Doschenkov, O. Zakhrova, C. Gussman, Y. Kapulnik, B. D. Ensley and I. Raskin. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. Environ. Sci. Technol. 31: 860-865.
9. Cui, Y., Y. Dong, H. Li and Q. Wang. 2004. Effect of elemental sulphur on solubility of soil heavy metals and their uptake by maize. J. Environ. International 30(3): 323-328.
10. Das, P., S. Samantary and R. Rout. 1998. Studies on cadmium toxicity in plants: A review. Environ. Pollut. 98: 29-36.
11. Frossard, R. 1993. Contaminant uptake by plants. PP. 7-24. In: Schulen, R. et al. (Eds.), Soil Monitoring, Birkhauser Verlag, Basel.
12. Guwarsson, M. 2006. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of Betula Pendula seedlings: The significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. J. Plant Nutr. 17: 2151-2163.
13. Hernandez, L. E., R. Carpenaruez and A. Garate. 1996. Alternation in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium. J. Plant Nutr. 19: 1581-1598.
14. Huang, J. W. and S. D. Cunningham. 1997. Lead phytoextraction species variation in lead uptake and translocation. New Phytologist 134: 75-84.
15. Kayser, A., K. Wenger, A. Keller, W. Attinger, H. R. Felix, S. K. Gupta and R. Schulen. 2000. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil: The use of NTA and sulfur amendments. Environ. Sci. Technol. 34: 1778-1783.
16. Keck, R. W. 1978. Cadmium alternation of root physiology and potassium ion fluxes. Plant Physiol. 62: 94-96.
17. Lagriffoul, A., B. Mocquot, M. Mench and J. Vangronsveld. 1998. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). J. Plant and Soil 200: 241-250.
18. Liu, X., T. Jin, G. F. Nordberg, M. Sjostrom and Y. Zhou. 1994. Influence of zinc and copper administration on

- metal disposition in rats with cadmium metallothionein induced nephrotoxicity. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 126: 84-90.
19. Luo, C., Zh. Shen and X. Li. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* 59(1): 1-11.
20. McLaughlin, M. G., R. M. Lambrechts, E. Smolders and M. K. Smart. 1998. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard. II. Effects due to sulfate addition to soil. *Plant Soil* 22: 202-217.
21. Mengel, K. and E. A. Kirkby. 2004. Principles of plant nutrition. 5th Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 849 p.
22. Mensah, E., H. E. Allen., R. Shoji, S. N. Odai and N. Keyi- Baffour. 2008. Cadmium and lead concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation water in Ghana. *J. Agric. Res.* 3(4): 243-251.
23. Mok, M. 1994. Cytokinins and plant development- An overview. PP. 155-166. *In: Mok, D. and M. Mok (Eds.), Cytokinins: Chemistry, Activity, and Function*, CRC Press, Boca Raton, FL.
24. Obata, H. and M. Umebayashi. 1997. Effect of cadmium on mineral nutrient concentration in plant differing in tolerance for cadmium. *J. Plant Nutr.* 20: 97-105.
25. Pearson, C. and K. Kirkham. 1981. Water relation of wheat cultivars grown with cadmium. *J. Plant Nutr.* 3: 309-318.
26. Peterson, P. J. 1996. Plant adaptation to environmental stress: Metal pollutant tolerance. PP. 171-188. *In: Fowden, L., Mansfield, T. and Stoddard, J. (Eds.), Plant Adaptation to Environmental Stress*, Chapman and Hall, New York.
27. Salt, D., R. Price, I. Pickering and I. Raskin. 1995. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.* 109: 1427-1433.
28. Sanitadi Toppi, L. and R. Gabrielli. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environ. Exp. Bot.* 41: 105-113.
29. Sauerbeck, D. R. 1991. Plant element and soil properties governing plant uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. *Water Air Soil Pollut.* 227: 57-58.
30. Veselov, D., G. Kuudoyarova, M. Syymonyan and S. T. Veselov. 2003. Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Plant Physiol.* 117: 353-359.
31. Westerman, R. E. L. 1990. Soil testing and plant analysis. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
32. Wong, M. K., G. K. Chuah, L. L. Koh, K. P. Ang and C. S. Hew. 1984. The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. *Environ. Exp. Bot.* 24: 189-195.