

## 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<sup>۱\*</sup> و احمد گلچین<sup>۲</sup>

(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 میلی‌گرم 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 اسیدیته 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 میلی‌گرم 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، زیست‌فراهمی فلزات سنگین فاکتور مهمی است. یکی از روش‌های عمده افزایش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک‌ها و افزایش تحرک آنها

در داخل گیاه، کاهش پ- هاش (اسیدپته) 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 (%)	نیترژن 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 ***	مگنیز قابل جذب	روی قابل جذب	مس قابل جذب	کادمیم قابل جذب	مقدار
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 Cd<sub>0</sub> به ۱۸/۲۳ گرم در گلدان در تیمار Cd<sub>250</sub> 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 ( $P < 0/01$ ). منساه 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 آسیاب 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، مگنیز و مس با دستگاه جذب اتمی (مدل Avian, AA20) اندازه‌گیری شد. نتایج

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

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

\*: 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 بروزن تر و خشک ریشه ذرت

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

میانگین	سطوح گوگرد (تن در هکتار)			سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
	۲	۱	۰	
غلظت کادمیم اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
۲۱/۳۱	۲۷/۲۴i	۲۲/۷۹i	۱۳/۹i	Cd0
۱۰۲/۶۷	۱۱۳/۹۸g	۱۰۶/۷۵gh	۸۷/۲۹h	Cd50
۱۴۹/۷۴	۱۶۰/۶۸ef	۱۴۶/۷۸f	۱۴۱/۷۸f	Cd100
۱۸۸/۲۹	۲۱۴/۰۶c	۱۷۸/۴۷de	۱۷۲/۳۶e	Cd150
۲۱۹/۰۶	۲۵۱/۸۶ab	۲۱۱/۲۸c	۱۹۴/۰۴cd	Cd200
۲۳۸/۳۳	۲۶۷/۹۹a	۲۴۴/۰۸b	۲۰۲/۹۴c	Cd250
۱۵۳/۲۳	۱۷۲/۶۳	۱۵۱/۶۹	۱۳۵/۳۸	میانگین
غلظت کادمیم ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)				
۴۴/۴۸	۶۱/۱۶l	۵۵/۶۰l	۱۶/۶۸m	Cd0
۲۱۳/۱۳	۲۵۵/۸i	۲۱۱/۳j	۱۷۲/۴k	Cd50
۳۲۰/۶۲	۳۷۸/۱g	۳۱۱/۴h	۲۷۲/۴i	Cd100
۳۷۴/۳۷	۴۴۴/۸de	۳۶۷g	۳۱۱/۴h	Cd150
۴۵۹/۶۲	۲۵۰/۴bc	۴۷۸/۲cd	۴۰۰/۳fg	Cd200
۵۰۵/۹۶	۵۶۷/۱a	۵۱۷/۱b	۴۳۳/۷ef	Cd250
۳۱۹/۶۹	۳۶۷/۸۸	۳۲۳/۴۰	۲۶۷/۸۰	میانگین

\* : 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 S<sub>0</sub> به ۱۷۲/۶۳ میلی گرم در کیلوگرم در تیمار S<sub>2</sub> افزایش یافت. سوربک (۲۹)

سیتوکنین می‌شود که تأثیر به‌سزایی 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

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

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

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 نتیجه 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

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

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

میانگین	سطوح گوگرد (تن در هکتار)			سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
	۲	۱	۰	
	غلظت آهن اندام‌های هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
۴۸۶/۵	۴۱۴/۷۷bcdef	۴۵۵/۳۶abcdef	۵۸۹/۳۶a	Cd0
۴۶۹/۰۷	۴۰۹/۲۱bcdef	۴۴۲/۰۲bcdef	۵۵۶ab	Cd50
۴۴۷/۷۶	۳۹۴/۲۰cdef	۴۱۷bcdef	۵۳۲/۰۹abc	Cd100
۴۲۴/۴۱	۳۸۵/۶۲def	۳۷۹/۷۴cdef	۵۱۹/۳۰abcd	Cd150
۴۱۳/۲۹	۳۷۴/۱۸ef	۳۷۰/۸۵def	۵۱۰/۴۰abcde	Cd200
۳۸۳/۶۴	۳۴۲/۴۹f	۳۵۵/۲۸ef	۴۵۳/۱۴abcdef	Cd250
۴۳۷/۴۴	۳۸۲/۲۵	۴۰۳/۳۷	۵۲۶/۷۱	میانگین
	غلظت آهن ریشه (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک)			
۲۸۳۸/۱۹	۲۶۲۸/۷۶c	۲۷۷۴/۹۹bc	۳۱۱۰/۸۲a	Cd0
۲۵۰۹/۹۶	۲۳۰۰/۷۲ef	۲۳۶۹/۱۱e	۲۸۶۰/۰۶b	Cd50
۲۳۰۲/۳۹	۲۱۰۵/۰۱fgh	۲۲۰۵/۰۹efg	۲۵۹۷/۰۷cd	Cd100
۲۰۷۷/۴۰	۱۸۹۲/۶۲hij	۱۹۳۵/۹۹hi	۲۴۰۳/۵۸de	Cd150
۱۹۳۲/۸۴	۱۷۱۱/۹۲ijk	۱۸۰۳/۶۶ij	۲۲۸۲/۹۳ef	Cd200
۱۷۴۲/۱۳	۱۵۰۳/۹۸k	۱۶۹۱/۳۵jk	۲۰۳۱/۰۶gh	Cd250
۲۲۳۳/۸۲	۲۰۲۳/۸۴	۲۱۳۰/۰۳	۲۵۴۷/۵۹	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

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

\*: 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

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

\*: 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 می‌نماییم.

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

1. کریمیان، ن. ۱۳۷۷. پیامدهای زیاده‌روی در مصرف کودهای شیمیایی فسفری. مجله خاک و آب ۱۲(۴): ۱-۱۴.
2. 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.
3. متشع زاده، ب. ۱۳۸۷. بررسی امکان افزایش کارایی گیاه‌پالایی خاک آلوده به فلزات سنگین توسط عوامل زیستی. پایان‌نامه دکترای خاکشناسی، دانشگاه تهران.
4. 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: Schulin, 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. Carpenaruiez 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. Schulin. 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. 5<sup>th</sup> 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. Szymonyan 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.