نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۴۷۷-۴۶۰

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 460-477

اثر متقابل کادمیم و روی بر رشد و ترکیب شیمیایی ذرت

سیروس صادقی[1*] – شاهین اوستان[2] – نصرت اله نجفی[3] – مصطفی ولیزاده[4] –حسن منیری‌فر[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵

چکیده

دو فلز Zn وCd رفتار ژئوشیمیایی مشابهی دارند؛ از اینرو، اثر Zn بر تجمع Cd در گیاهان حائز اهمیت است. در این تحقیق، برای بررسی اثر متقابل Cd و Zn بر رشد و ترکیب شیمیایی ذرت (*Zea mays* cv. single cross 704)، آزمایش گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور Cd در هشت سطح (صفر، ۰/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ mg kg^{-1}) از منبع $3CdSO_4.8H_2O$ و Zn در هشت سطح (صفر، ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ mg kg^{-1}) از منبع $ZnSO_4.7H_2O$، در سه تکرار با کشت گیاه ذرت در یک خاک شن لومی اجرا شد. بعد از ۶۰ روز، وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت‌های Cd ، Zn ، Fe، Mn و Cu در این دو بخش اندازه‌گیری شدند. در سطوح ۰/۵، ۲/۵، ۲۰ و ۸۰ mg Cd kg^{-1} (به استثنای تیمار Cd0.5-Zn25)، کاربرد ۵ تا ۵۰ mg Zn kg^{-1} در مقایسه با سطح صفر Zn باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی شده و در سطوح بالاتر Zn، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطوح ۵ و ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ تا ۱۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی شده و در سطوح بالاتر Zn، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطح ۴۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ تا ۲۰۰ mg Zn kg^{-1}، باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی شد و با کاربرد ۴۰۰ mg Zn kg^{-1}، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطح ۰/۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد تمامی سطوح Zn باعث افزایش غلظت Cd بخش هوایی شد؛ اما در سطح ۸۰ mg Cd kg^{-1}، مصرف ۵ تا ۲۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت Cd بخش هوایی شد. در همین سطح Cd، مصرف ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت Cd بخش هوایی گردید. با توجه به نتایج، در سطوح پایین Cd، مصرف Zn در هر سطح باعث افزایش غلظت Cd بخش هوایی و ریشه شد، اما در سطوح بالای Cd، مصرف سطوح پایین Zn باعث کاهش غلظت Cd بخش هوایی و ریشه گردید و با مصرف سطوح بالای Zn، افزایش این صفت مشاهده شد. به‌طور کلی، در تمامی سطوح Cd، کاربرد مقادیر متوسط Zn از انباشت Cd در بخش هوایی جلوگیری کرد، ولی مصرف مقادیر کم و زیاد Zn باعث تشدید این انباشت گردید.

واژه‌های کلیدی: انباشت، Cd، Zn، وزن خشک بخش هوایی و ریشه

مقدمه

آلودگی فلزات سنگین نه‌تنها به‌طور مستقیم بر ویژگی‌های شیمیایی، فراهمی عناصر غذایی و فعالیت‌های زیستی خاک اثر می‌گذارد، بلکه خطر جدی برای سلامتی انسان از طریق ورود به زنجیره غذایی محسوب می‌شود (۱۰). کادمیم یک فلز سنگین غیرضروری بوده و برای گیاه به‌شدت سمّی است. این فلز باعث مهار رشد و حتی مرگ گیاه می‌شود. فرآیندهای متابولیکی مانند فتوسنتز و تنفس سلولی بر اثر سمّیت Cd مختل می‌شوند (۵۳). جلوگیری از جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه، کاهش رشد ریشه، زردی، بافت‌مردگی (تغییر رنگ برگ از سبز به قرمز قهوه‌ای)، تغییر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و افت عملکرد از نشانه‌های سمّیت Cd در گیاه می‌باشند (۳۹). مهار ریداکتاز آهن (III) توسط Cd که منجر به کمبود Fe(II) و اختلال در فتوسنتز می‌گردد، گزارش شده است (۲). جذب، انتقال و مصرف چندین عنصر غذایی (P، K، Ca و Mg) و آب در گیاه تحت تأثیر Cd قرار می‌گیرد (۱۷). در بین فلزات سنگین، Zn از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا این فلز یکی از عناصر غذایی ضروری است که در بسیاری از فرآیندهای زیستی نظیر فتوسنتز، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت[6]، تشکیل پروتئین‌ها، فعالیت هورمونی و غیره

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه مراغه
(*- نویسنده مسئول: Email: sirossadeghi@yahoo.com)
۲ و ۳- استاد و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز
۴- استاد گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشگاه تبریز
۵- دانشیار گروه اصلاح نباتات ژنتیک، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان‌شرقی

DOI: 10.22067/jsw.v31i3.50980

6- Antioxidants

Archive of SID
www.SID.ir

نقش دارد (۶۴). غلظت زیاد Zn در خاک برخی فرآیندهای متابولیکی گیاه را مهار نموده، در نتیجه رشد عقب افتاده و باعث پیری زودرس می‌شود (۲۲). سمّیت Zn باعث بروز رنگ قرمز متمایل به ارغوانی در برگ‌ها می‌شود که به کمبود P بر اثر غلظت زیاد Zn، نسبت داده می‌شود (۴۱). جایگزینی Zn به‌جای Fe(II)، باعث ایجاد زردی در گیاهان می‌شود (۴۳). غلظت بیش از حد Zn در خاک می‌تواند موجب کمبود Fe و Mn در بخش هوایی گیاهان گردد. چنین کمبودی به ممانعت از انتقال این دو فلز از ریشه به بخش هوایی نسبت داده می‌شود که نتیجه آن تجمع Fe و Mn در ریشه است (۲۰). به‌دلیل شباهت رفتار شیمیایی Cd و Zn، اثر متقابل این دو فلز مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است (۷، ۱۶، ۲۶ و ۶۳). Zn نقش مهمی را در جذب، انتقال و تجمع Cd در گیاهان روییده در خاک‌های آلوده ایفا می‌کند (۷)؛ این نقش بسته به نوع گیاه، نوع بافت و غلظت این دو فلزدر محیط متفاوت است (۱۳). برای Cd و Zn، سیستم انتقال مشترکی در غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه وجود دارد. لذا، جذب Cd توسط Zn و برعکس جذب Zn توسط Cd مهار می‌شود (۲۹). Zn می‌تواند با جلوگیری از انتقال Cd از طریق آوندهای آبکش، توزیع Cd در گیاه را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، افزایش غلظت Zn بخش هوایی می‌تواند انتقال Cd از برگ‌ها به دانه را محدود نماید (۱۲). با این حال، گائو و گرنت (۲۳) ارتباطی را بین غلظت Cd و Zn در بذر گندم دوروم مشاهده نکردند. گزارش شده است که سمّیت Cd برای گیاهانی که در معرض کمبود Zn قرار گیرند، چندین برابر افزایش می‌یابد (۳۶ و ۵۱). اثر متقابل Cd و Zn توسط اسمیلد و همکاران (۵۸) در کاهو، اسفناج، گندم بهاره، کاسنی فرنگی و ذرت ناهمسازی (آنتاگونیستی) و توسط نان و همکاران (۴۸) در دو گیاه گندم بهاره و ذرت همافزایی (سینرژیستی) گزارش گردید. آلووی (۴) این اثر متقابل را در بخش هوایی آنتاگونیستی و در ریشه‌ها سینرژیستی بیان نمود. مک‌کنا و همکاران (۴۴) اثر آنتاگونیستی Zn بر Cd را فقط در غلظت‌های کم Cd گزارش کردند. در تعداد کمی از مقالات به تأثیر تیمار ترکیبی Zn و Cd بر غلظت عناصر کم مصرف گیاه پرداخته شده است. در تحقیق حاضر، آزمایش گلخانه‌ای با کشت ذرت برای بررسی تأثیر Zn بر سمّیت Cd در سطوح نسبتاً گسترده‌ای از این دو فلز با مطالعه رشد و ترکیب شیمیایی بخش هوایی و ریشه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز و در گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی در طی ماه‌های مرداد و شهریور سال ۱۳۹۳ انجام شد. در طی زمان آزمایش، دمای گلخانه حداقل ۱۸ و حداکثر ۳۴ درجه سلسیوس بود و شدت نور حداقل ۱۵ و حداکثر ۲۵ مول بر متر مربع در روز ($mol\ m^{-2}.day^{-1}$) بود. خاک مورد استفاده در آزمایش که دارای مقادیر کم Zn و ناچیز Cd قابل‌جذب (کم‌تر از ۱ $mg\ Zn\ kg^{-1}$ و کم‌تر از $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۰/۰۶) بود (۱۵ و ۴۶)، از ایستگاه خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) با طول جغرافیایی (″۳۹/۲۷ ′۲۳ °۴۶) شرقی و عرض جغرافیایی (″۵۰/۳۹ ′۱ °۳۸) شمالی تهیه شد. برخی از ویژگی‌های خاک شامل بافت خاک (۲۴)، رطوبت ظرفیت زراعی (۳۴)، pH سوسپانسیون ۱:۱ (۴۵)، EC عصاره سوسپانسیون ۱:۱ (۳۳)، کربن آلی (۵۰)، کربنات کلسیم معادل (CCE) (۳)، P قابل‌جذب (۳۷)، K قابل‌جذب (۳۵)، Zn، Cd، Fe، Mn و Cu قابل‌جذب (۴۰) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (۱۰) اندازه‌گیری شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور Cd در هشت سطح (صفر، ۰/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۸۰ از منبع سولفات کادمیم ($3CdSO_4.8H_2O$) و Zn در هشت سطح (صفر، ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۸۰۰ از منبع سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$) در سه تکرار با کشت گیاه ذرت (*Zea mays* cv. Single cross 704) اجرا شد. تیمارها به‌صورت Cdx-Zny (x سطح Cd، y سطح Zn) کدگزاری شدند. سطوح Cd و Zn براساس منابع دویس و همکاران (۱۸)، گیلمور و همکاران (۲۵)، مک‌نیکل و بکت (۴۲)، ورلو و همکاران (۶۲) و بورتون و همکاران (۱۱۱) تعیین شدند. ابتدا ۶۴ ظرف پلاستیکی ۲۰ کیلویی تهیه و داخل هر یک ۱۲ کیلوگرم خاک ریخته شد. برای آلوده‌سازی خاک‌ها، ۱۲۰۰ میلی‌لیتر از محلول‌های حاوی غلظت‌های مختلف Cd و Zn (بر حسب نوع تیمار) تا رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی مه‌پاشی شده و کاملاً مخلوط گردیدند. خاک‌ها به‌مدت یک ماه نگهداری شده و در این مدت چند چرخه خشک و مرطوب شدن اعمال شد. بعد از پایان یک ماه، با توجه به نتایج آزمون خاک، ۱۸۰ میلی‌گرم N به‌شکل اوره ($(NH_2)_2CO$) در سه نوبت (قبل از کاشت، ۲۰ و ۴۰ روز بعد از کاشت)، ۵۰ میلی‌گرم P به‌شکل سوپرفسفات تریپل ($Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$)، ۱۰۰ میلی‌گرم K به‌شکل سولفات پتاسیم (K_2SO_4)، ۱۰ میلی‌گرم Fe به‌شکل سولفات آهن ($FeSO_4.7H_2O$)، ۱۰ میلی‌گرم Mn به‌شکل سولفات منگنز ($MnSO_4.H_2O$)، ۵ میلی‌گرم Cu به‌شکل سولفات مس ($CuSO_4.H_2O$) و ۲ میلی‌گرم B به‌شکل اسید بوریک (H_3BO_3) به هر کیلوگرم خاک به‌صورت محلول اضافه و به‌خوبی مخلوط شد. استفاده از شکل سولفاتی برای کودهای مختلف برای حذف اثر سولفات همراه Cd و Zn و قرار دادن غلظت سولفات خاک در دامنه کفایت انجام پذیرفت (۸). در نهایت خاک‌های تیمار شده در گلدان‌های ۴ کیلویی (۳ g±) ریخته شدند. ۷ بذر جوانه زده گیاه ذرت در گلدان‌ها کشت شدند. برای جوانه‌دار کردن بذرها از ۳۶ ساعت

Archive of SID

www.SID.ir

خیساندن در آب مقطر در دمای اتاق استفاده شد (۲۷). آبیاری گلدان‌ها با آب شهری برای در حد ظرفیت زراعی در طول رشد گیاه انجام شد. رطوبت خاک گلدان‌ها به‌صورت وزنی کنترل گردید. پس از ۶۰ روز گیاهان برداشت شدند. سپس گیاهان از طوقه قطع شده و ریشه‌ها از خاک خارج گردیدند. بخش هوایی بعد از آبکشی با آب شهری و سپس آب مقطر، با استفاده از کاغذ خشک‌کن نم‌گیری شدند. ریشه‌ها نیز بعد از آبکشی با آب شهری، به‌مدت ۵ دقیقه در محلول ۰/۰۰۱ مولار EDTA غوطه‌ور شده (۳۰) و بعد ازآبکشی با آب مقطر، با استفاده از کاغذ خشک‌کن نم‌گیری شدند. سپس، نمونه‌های گیاهی به‌مدت ۳ روز در دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک شدند. وزن خشک بخش هوایی و ریشه با ترازوی حساس (g ۰/۰۰۱±) اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌های گیاهی به‌روش هضم تر (اسید نیتریک غلیظ) عصاره‌گیری شدند (۱۹). غلظت Cd، Zn، Fe، Mn و Cu با استفاده از دستگاه جذب اتمی (ساخت شرکت شیمادزو ژاپن مدل AA-6300) اندازه‌گیری شد. تجزیه آماری داده‌ها با نرم‌افزارهای MSTATC و SPSS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. خاک مورد استفاده درشت بافت، کمی قلیایی، غیرشور و غیرآهکی با غلظت‌های به‌ترتیب کم و ناچیز Zn و Cd قابل‌جذب بود. در مرحله بعد از جوانه‌زنی نشانه‌های سمّیت Zn و Cd در تیمارهای سطح mg kg^{-1} ۸۰۰ Cd به‌صورت کاهش رشد، زردی و بافت‌مردگی در لبه برگ‌ها مشاهده شد. گیاهان این تیمارها ۱۰ تا حداکثر ۲۰ روز پس از جوانه‌زنی از بین رفتند. تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی Cd و Zn و نیز اثر متقابل این دو بر وزن خشک بخش هوایی (SDW) و وزن خشک ریشه (RDW) در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول‌های ۲ و ۳). مقایسه میانگین‌های وزن خشک بخش هوایی برای اثر متقابل Cd و Zn (شکل ۱) نشان داد که در سطوح ۰/۵، ۲/۵، ۲۰ و ۸۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ تا mg Zn kg^{-1} ۵۰ باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی به‌میزان ۳۱ درصد در تیمار Cd80-Zn5 تا ۱۳۹ درصد در تیمار Cd0.5-Zn50 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و در مقادیر بیش‌تر، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطوح ۵ و ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ تا mg Zn kg^{-1} ۱۰۰ باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی به‌میزان ۸۲ درصد در تیمار Cd10-Zn5 تا ۱۷۵ درصد در تیمار Cd5-Zn100 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و در مقادیر بیش‌تر، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطح mg Cd kg^{-1} ۴۰، کاربرد ۵ تا mg Zn kg^{-1} ۲۰۰ باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی به‌میزان ۹ درصد در تیمار Cd40-Zn5 تا ۲۲۲ درصد در تیمار Cd40-Zn200 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و کاربرد mg Zn kg^{-1} ۴۰۰، باعث کاهش وزن خشک بخش هوایی شد.

در مورد وزن خشک ریشه، در سطوح ۰/۵ تا mg Cd kg^{-1} ۲۰، کاربرد ۵ تا mg Zn kg^{-1} ۵۰ باعث افزایش وزن خشک ریشه به‌میزان ۲۷ درصد در تیمار Cd20-Zn5 تا ۱۱۵ درصد در تیمار Cd0.5-Zn50 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و در مقادیر بیش‌تر، کاهش این صفت مشاهده شد. در سطح mg Cd kg^{-1} ۴۰، کاربرد mg Zn kg^{-1} ۵ باعث کاهش وزن خشک ریشه شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش گلخانه‌ای

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil used in the greenhouse experiment

بافت خاک Soil Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	SP	FC	pH (1:1)	EC (1:1) (dS m^{-1})	CEC ($cmol_c$ kg^{-1})	CCE	کربن آلی O.C	نیتروژن کل Total Nitrogen
	(%)									(%)	
شن لومی Sandy Loam	70	18	12	32	10	7.63	1.1	8.2	ناچیز*	0.13	0.08

*عدم مشاهده جوشش با اسید کلریدریک ۰/۱ مولار(۶).

ادامه جدول ۱- غلظت عناصر قابل‌جذب خاک

Table 1- (Continued) The concentration of soil available nutients

P	K	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd
(mg kg^{-1})							
5.7	250	108.8	1.8	1.1	0.85	1.3	0.02

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر Zn و Cd بر وزن خشک و ترکیب شیمیایی بخش هوایی

Table 2- Analysis of variance of the effects of Zn and Cd on shoot dry weight (SDW) and Chemical composition

Source of variation	df	میانگین مربعات (MS)					
		SDW	Cd	Zn	Fe	Mn	Cu
Cd	7	1.63**	38737**	202**	117310**	3470**	36.6**
Zn	6	3.18**	3069**	15595**	178712**	12916**	230**
Cd×Zn	42	0.31**	686**	54.2**	14530**	40**	0.35**
Error	110	0.01	6.7	0.40	15.03	2.85	0.008
C.V (%)		11.1	5.49	0.95	0.87	1.84	0.74

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنادار، معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **, non-significant, significant at the 5 and 1% level of probability, respectively

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر Zn و Cd بر وزن خشک و ترکیب شیمیایی ریشه

Table 3- Analysis of variance of the effects of Zn and Cd on root dry weight (RDW) and Chemical composition

Source of variation	df	میانگین مربعات (MS)					
		RDW	Cd	Zn	Fe	Mn	Cu
Cd	7	0.98**	198063**	1429**	5045888**	33903**	10890**
Zn	6	1.42**	7179**	106783**	1270047**	84654**	7476**
Cd×Zn	42	0.22**	723**	839**	38442**	388**	104**
Error	110	0.006	5.58	7.67	819	11.8	3.49
C.V (%)		12.07	2.21	2.62	1,02	2.57	2.01

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنادار، معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and **, non-significant, significant at the 5 and 1% level of probability, respectively

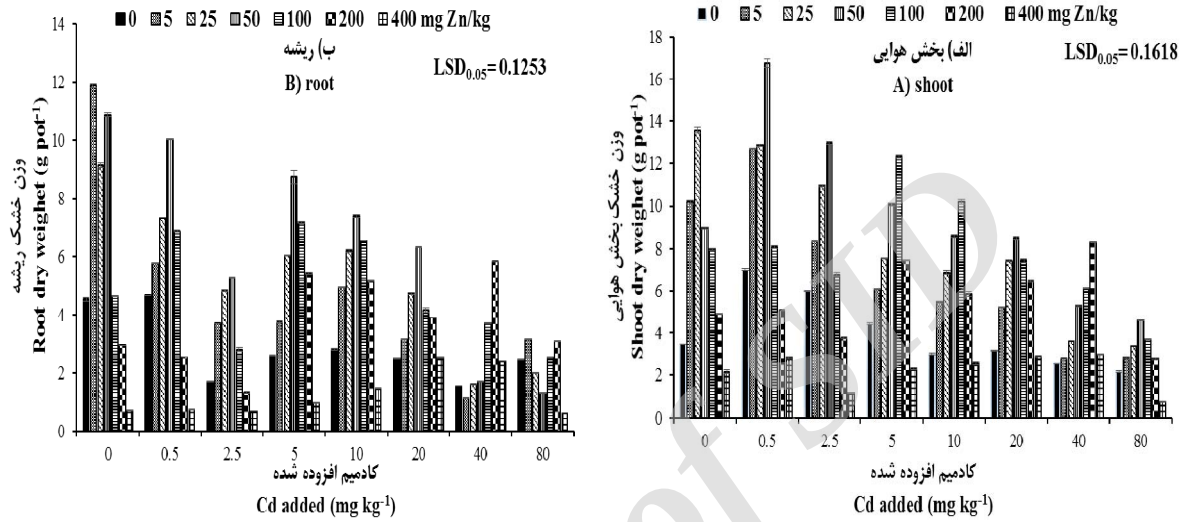
در همین سطح، کاربرد ۲۵ تا ۲۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک ریشه به‌میزان ۳ درصد در تیمار Cd40-Zn25 تا ۲۷۵ درصد در تیمار Cd40-Zn200 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و کاربرد ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش وزن خشک ریشه شد. در سطح ۸۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک ریشه به‌میزان ۲۹ درصد شده و کاربرد ۲۵ و ۵۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش وزن خشک ریشه گردید. در همین سطح، کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ mg Zn kg^{-1} به‌میزان ۲ درصد در تیمار Cd80-Zn100 تا ۲۶ درصد در تیمار Cd80-Zn200 در مقایسه با سطح صفر Zn شده و کاربرد ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش وزن خشک ریشه شد.

بیش‌ترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۱۶/۷۴ و ۱/۶۹۶ g pot^{-1} در تیمارهای Cd0.5-Zn50 و Cd0-Zn5 و کم‌ترین آن ۰/۷۷ و ۰/۶۲ g pot^{-1} بود که هر دو در تیمار Cd80-Zn400 مشاهده شد. با توجه به نتایج، اثر Cd بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه به سطح Zn مصرفی بستگی داشت؛ به‌طوری‌که، افزایش سطح Zn ابتدا سبب افزایش و سپس کاهش وزن خشک گردید. با این حال، ناروال و همکاران (۴۹) تأثیر معناداری از کاربرد Zn بر عملکرد ذرت را در هیچ یک از سطوح Cd گزارش نکردند. رحیمی و رونقی (۵۵) گزارش دادند که در سطوح ۵، ۱۰ و ۲۰ mg Cd kg^{-1} و عدم مصرف Zn، افت وزن خشک بخش هوایی اسفناج در مقایسه با شاهد (Cd0-Zn0) رخ داد، ولی در همین سطوح Cd، مصرف ۵، ۱۰ و ۲۰ mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش وزن خشک بخش هوایی شد. چریف و همکاران (۱۴) مشاهده نمودند که در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1}، وزن خشک بخش هوایی گوجه فرنگی در مقایسه با شاهد کاهش یافت، اما در همین سطح Cd، کاربرد ۱۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی شده و کاربرد ۵۰ تا ۱۵۰ mg Zn kg^{-1} وزن خشک بخش هوایی را کاهش داد. اردم و همکاران (۲۱) گزارش کردند که در سطوح ۲/۵ و ۱۰ mg Cd kg^{-1} وزن خشک بخش هوایی دو رقم گندم نان و گندم دوروم کاهش یافت. کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش وزن خشک بخش هوایی در سطح ۲/۵ mg Cd kg^{-1} شد، در حالی که همین سطح Zn در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1} منجر به کاهش وزن خشک بخش هوایی گردید. ولیزاده و

Archive of SID

www.SID.ir

همکاران (۶۱) نیز دریافتند که در سطح ۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ و ۱۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی برنج شد. همین سطوح Zn در سطح ۱۰mg Cd kg^{-1} کاهش وزن خشک بخش هوایی را به‌دنبال داشتند. در مورد ریشه، در سطح mg Cd kg^{-1} ۵، کاربرد ۵ و ۱۰ mg Zn kg^{-1}، وزن خشک ریشه را افزایش داده ولی در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش و کاربرد ۱۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش وزن خشک ریشه گردید. جمالی و همکاران (۳۲) گزارش کردند که کاربرد Zn در سطح صفر Cd باعث کاهش وزن خشک بخش هوایی و ریشه *Matthiola flavida* شده و در سطوح بالاتر Cd ، ابتدا افزایش و سپس کاهش وزن خشک هر دو بخش مشاهده شد.



شکل ۱- اثر متقابل Cd و Zn بر وزن خشک الف) بخش هوایی و ب) ریشه

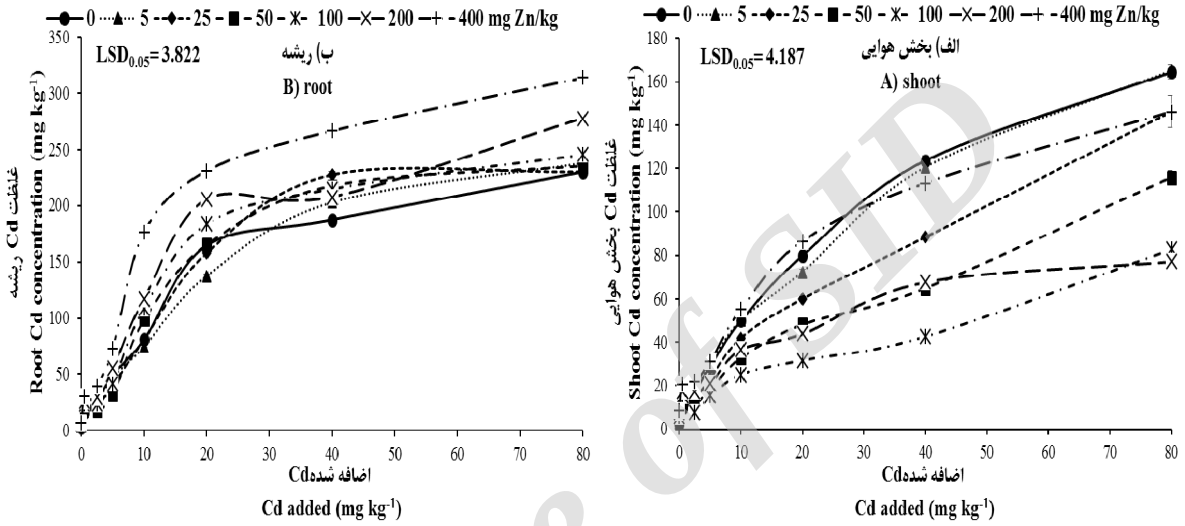
Figure 1- The effects if Cd and Zn interactions on the dry weight A) shoot and B) root

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی Cd و Zn و اثر متقابل این دو بر غلظت Cd ، Zn، Fe، Mn و Cu در بخش هوایی و ریشه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول‌های ۲ و ۳). اثر متقابل Zn و Cd بر غلظت Cd بخش هوایی و ریشه در شکل ۲ نشان داده شده است. در سطح ۰/۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد تمامی سطوح Zn باعث افزایش غلظت Cd بخش هوایی شد. در سطوح ۲/۵ تا ۴۰ mg Cd kg^{-1} ، کاربرد ۵ تا ۱۰۰ mg Zn kg^{-1} (به استثنای تیمار Cd2.5-Zn5) باعث کاهش غلظت Cd بخش هوایی به‌میزان ۱۸ درصد در تیمار Cd2.5-Zn25 تا ۶۶ درصد در تیمار Cd40-Zn100 در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطوح Cd، کاربرد ۲۰۰ و ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش غلظت Cd بخش هوایی شد، اما در سطح ۸۰ mg Cd kg^{-1}، مصرف ۵ تا ۲۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت Cd بخش هوایی به‌میزان ۱۱ درصد در تیمار Cd80-Zn25 تا ۵۳ درصد در تیمار Cd80-Zn200 در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطح Cd ، مصرف ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت Cd بخش هوایی گردید. در مورد ریشه در سطح ۰/۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد تمامی سطوح Zn باعث افزایش غلظت Cd ریشه شد. در سطوح ۲/۵ تا ۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ تا ۵۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت Cd ریشه به‌میزان ۵ درصد در تیمار Cd2.5-Zn5 تا ۳۶ درصد در تیمار Cd5-Zn50 در مقایسه با سطح صفر Zn و کاربرد ۱۰۰ تا ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش این صفت شد، اما در سطوح ۱۰ و ۲۰ mg Cd kg^{-1}، مصرف mg Zn kg^{-1} ۵ کاهش و مصرف ۲۵ تا ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} افزایش غلظت Cd ریشه را به‌دنبال داشت. در سطح ۴۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ و ۲۵ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت Cd ریشه شد. در همین سطح Cd، کاربرد ۵۰ تا ۲۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت Cd ریشه و کاربرد ۴۰۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش این صفت شد. در سطح ۸۰ mg Cd kg^{-1}، مصرف ۵ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت Cd ریشه شد و کاربرد ۲۵ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش این صفت گردید. در همین سطح Cd، کاربرد ۵۰ تا ۴۰۰ mg Zn kg^{-1}، باعث افزایش غلظت Cd ریشه شد. بیش‌ترین غلظت Cd بخش هوایی mg kg^{-1} ۱۶۴/۹ در تیمار Cd80-Zn5 و بیش‌ترین غلظت Cd ریشه mg kg^{-1} ۳۱۳/۶ در تیمار Cd80-Zn400 بود. کم‌ترین غلظت Cd بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۲/۳۹۷ و ۳/۱۹ mg kg^{-1} در تیمار Cd0-Zn0 مشاهده شد. اردم و همکاران (۲۰) مشاهده کردند که در سطوح ۲/۵ و ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} غلظت Cd بخش هوایی گندم نان و گندم دوروم را کاهش داد. چریف و همکاران (۱۳) گزارش کردند که در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۱۰ تا mg Zn kg^{-1}

Archive of SID

www.SID.ir

۱۵۰ باعث کاهش غلظت Cd برگ‌های گوجه فرنگی شد. ژانگ-کیو و همکاران (۶۵) تأثیر Zn بر جذب Cd توسط گندم بهاره در کشت هیدروپونیک را در بلند مدت (یک ماه) و کوتاه مدت (۲۴ ساعت) مطالعه و گزارش کردند که غلظت Cd بخش هوایی و ریشه تا سطح ۲۰۰μM Zn تغییر معناداری نکرد، ولی در سطوح بالاتر از آن کاهش یافت. در مقابل، رحیمی و رونقی (۵۵) مشاهده کردند که در سطح ۲۰ mg Cd kg^{-1}، استفاده از ۲۰ mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش غلظت Cd بخش هوایی اسفناج شد. آدیلوقلو و همکاران (۱) در سطوح ۱۰ و ۲۰ mg Cd kg^{-1}، با کاربرد ۱۰ mg Zn kg^{-1} افزایش چند برابری غلظت Cd بخش هوایی ذرت را گزارش کردند. نارووال و همکاران (۴۹) نیز تشدید جذب Cd توسط ذرت در حضور Zn را گزارش کردند. یکی از دلایل مشاهده چنین نتایج متناقضی می‌تواند تعداد کم سطوح Cd و Zn در آزمایش باشد. در تحقیق حاضر به‌دلیل تعداد بیش‌تر سطوح Cd و Zn هر دو اثر آنتاگونیستی و سینرژیستی ملاحظه گردید.



شکل ۲- اثر متقابل Cd و Zn بر غلظت Cd الف) بخش هوایی و ب) ریشه

Figure 2- The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Cd A) shoot and B) **r**oot

معادلات رگرسیونی برای برآورد غلظت Cd بخش هوایی و ریشه در سطوح مختلف Cd و Zn در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند؛ به‌طوری که ملاحظه می‌شود برای بخش هوایی معادله خطی و برای ریشه معادله چند جمله‌ای درجه دوم بهتر برازش یافتند. اثر متقابل Cd و Zn بر مقادیر فاکتور انتقال Cd در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط فاکتور انتقال Cd و Zn برای کلیه تیمارها به‌ترتیب ۰/۵۵۲ و ۰/۸۵۲ برآورد گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاکتور انتقال Cd کم‌تر از فاکتور انتقال Zn بود که توسط نان و همکاران (۴۸) نیز گزارش شده است. بیش‌ترین مقادیر فاکتور انتقال Cd در سطح صفر این فلز مشاهده شد. در این سطح، فاکتور انتقال این فلز با افزایش کاربرد Zn افزایش یافت. علت افزایش فاکتور انتقال Cd در سطوح بالای Zn، افزایش بیش‌تر غلظت Cd در بخش هوایی نسبت به ریشه، به‌دلی نقش روی در انتقال Cd از ریشه به بخش هوایی بود. علت کوچک بودن فاکتور انتقال Cd در تیمار Cd0-Zn0، غلظت زیاد Cd ریشه (۳/۱۹ mg Cd kg^{-1}) بود. گزارش شده است که وقتی گیاه با کمبود Zn مواجه است رهاسازی سایدروفورها برای افزایش جذب Zn افزایش می‌یابد (۳۶ و ۵۱)؛ لذا، همزمان تجمع Cd در ریشه نیز تشدید می‌شود. در سطح صفر Cd، با مصرف Zn به‌میزان mg Zn kg^{-1} ۵، انتقال Cd به بخش هوایی به‌طور معناداری افزایش یافت. در سطح mg Cd kg^{-1} ۰/۵، فاکتور انتقال Cd، با افزایش کادمیم به‌شدت کاهش یافت، ولی با افزایش کاربرد Zn افزایش نشان داد. هان و همکاران (۲۸) گزارش کردند که حضور Zn، انتقال Cd از ریشه به برگ‌ها و ساقه را تحریک کرد. در سطوح بالاتر Cd، با افزایش کاربرد Zn، فاکتور انتقال Cd ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت.

کاهش فاکتور انتقال Cd در سطوح پایین Zn حاکی از تجمع Cd در ریشه و مهار انتقال آن به بخش هوایی بود. اما در سطوح بالاتر Zn، این فلز رهاسازی Cd از ریشه و انتقال آن به بخش هوایی را سبب شد. با افزایش سطح کاربرد Zn، فاکتور انتقال این فلز افزایش یافته و سپس کاهش یافت. بیشترین فاکتور انتقال Zn در سطح mg Zn kg^{-1} ۵ مشاهده شد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٤- معادلات برآورد غلظت Cd بخش هوایی (mg kg^{-1}) در سطوح صفر تا ۲۰ mg Cd kg^{-1} در سطوح مختلف Zn

Table 4- **E**quations **for estimating shoot** Cd concentration (**mg kg^{-1}**) at zero to 20 **mg Cd kg^{-1}** and different levels of Zn

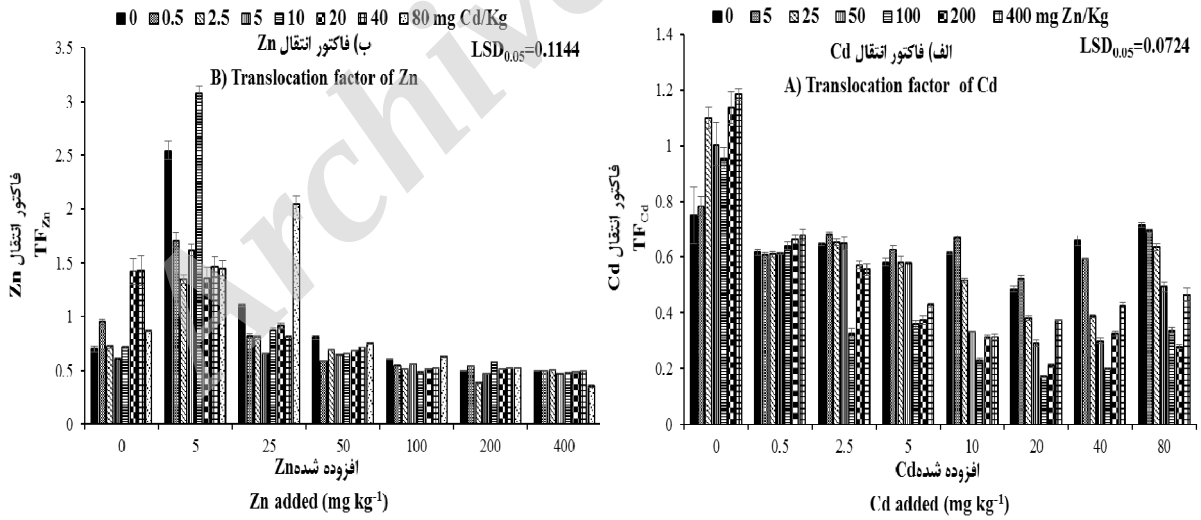
Zn (mg kg^{-1})	معادله Equation	r^2
0	Cd_s=2.0289Cd+19.473	0.9262**
5	Cd_s=2.0163Cd+18.697	0.9425**
25	Cd_s=1.7192Cd+14.822	0.9741**
50	Cd_s=1.3266Cd+12.384	0.9772**
100	Cd_s=0.8953Cd+10.574	0.9728**
200	Cd_s=0.8481Cd+19.156	0.8631**
400	Cd_s=1.697Cd+26.863	0.8916**

جدول ٥- معادلات برآورد غلظت Cd ریشه (mg kg^{-1}) در سطوح صفر تا ۲۰ mg Cd kg^{-1} در سطوح مختلف Zn

Table 5- **E**quations **for estimating root** Cd concentration (**mg kg^{-1}**) at zero to 20 **mg Cd kg^{-1}** and different levels of Zn

Zn (mg kg^{-1})	معادله Equation	r^2
0	Cd_r=-0.0569Cd^2+7.2142Cd+13.053	0.9900**
5	Cd_r=-0.0531Cd^2+7.0752Cd+10.172	0.9977**
25	Cd_r=-0.0716Cd^2+8.5275Cd+5.6356	0.9940**
50	Cd_r=-0.0701Cd^2+8.4238Cd+7.2387	0.9837**
100	Cd_r=-0.0703Cd^2+8.4649Cd+13.896	0.9851**
200	Cd_r=-0.0635Cd^2+8.1906Cd+21.566	0.9866**
400	Cd_r=-0.087Cd^2+10.421Cd+29	0.9815**

تاثیر Cd بر فاکتور انتقال Zn در سطوح پایین Zn معنادار ولی نامنظم بود. همچنین، این تاثیر در سطوح بالای Zn معنادار نبود. در سطوح ۵۰ تا ۴۰۰ mg Zn kg^{-1}، سطوح Cd تغییرات کمی را در فاکتور انتقال Zn ایجاد کرد. این امر حاکی از این است که در سطوح بالای Zn، Cd نقش چندانی در توزیع Zn بین بخش‌های مختلف ندارد.



شکل ۳- اثر متقابل Cd و Zn بر فاکتور انتقال الف) Cd و ب) Zn

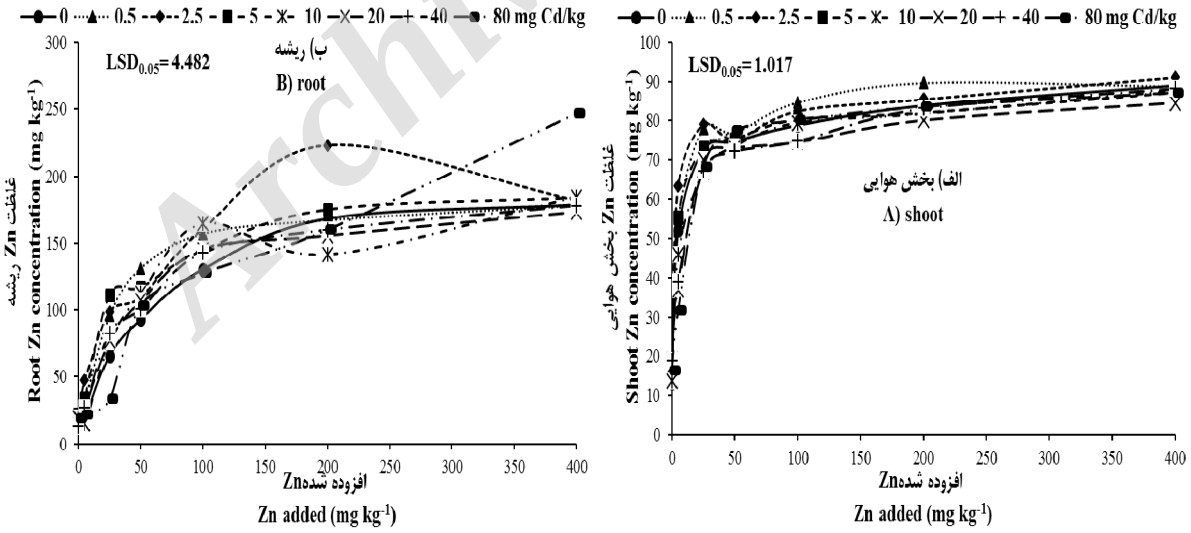
Figure 3- **The effects of Cd and Zn interactions on translocation factor A) Cd** and B) Zn

مقایسه میانگین‌های اثر متقابل Zn و Cd بر غلظت Zn بخش هوایی در شکل ۴ نشان داده شده است. در سطوح ۵ و ۲۵ mg Zn kg^{-1}، کاربرد سطوح ۰/۵ و ۲/۵ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn بخش هوایی (حداکثر ۲۱ درصد در تیمار Cd2.5-Zn5) در مقایسه با سطح صفر Cd شد که نشانگر اثر هم‌افزایی (سینرژیستی) بود. در همین سطوح Zn، کاربرد سطوح بالاتر Cd باعث کاهش غلظت Zn

Archive of SID

www.SID.ir

بخش هوایی گردید که حاکی از اثر ناهمسازی (آنتاگونیستی) بود. در سطح 50 mg Zn kg^{-1}، کاربرد $0/5$ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn بخش هوایی شده و کاربرد $2/5$ تا 40 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش آن گردید. در همین سطح Zn، کاربرد 80 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn بخش هوایی به‌میزان ۴ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در سطوح 100 و 200 mg Zn kg^{-1}، کاربرد $0/5$ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn بخش هوایی (حداکثر ۹ درصد در تیمار Cd0.5-Zn200) در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطوح Zn، مصرف $2/5$ تا 20 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت Zn بخش هوایی شده و مصرف سطوح بالاتر Cd باعث افزایش آن گردید. در سطح 400 mg Zn kg^{-1}، کاربرد $2/5$ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn بخش هوایی به‌میزان ۲ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطح Zn، کاربرد 20 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت Zn بخش هوایی گردید و مصرف سایر سطوح Cd تأثیر معناداری بر غلظت Zn بخش هوایی نداشت و اثر متقابلی بین این سطح Zn و دیگرسطوح Cd مشاهده نشد. در مورد ریشه در سطح 5 mg Zn kg^{-1}، کاربرد سطوح $0/5$ و $2/5$ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn ریشه به‌میزان ۱۳۰ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطح Zn، کاربرد سطوح ۵ و 10 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش این صفت شد که نشانگر اثر هم‌افزایی در سطوح پایین Cd و اثر ناهمسازی در سطوح بالاتر Cd بود. در سطح 25 mg Zn kg^{-1}، کاربرد سطوح $0/5$ تا 5 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn ریشه به‌میزان ۷۰ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطح Zn، کاربرد ۱۰ و 80 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش شدید غلظت Zn ریشه شد که بیانگر اثر ناهمسازی بین Cd و Zn بود. در سطح 50 mg Zn kg^{-1}، با مصرف $0/5$ mg Zn kg^{-1} افزایش غلظت Zn ریشه به‌میزان ۴۱ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطح Zn، مصرف $2/5$ mg Cd kg^{-1} باعث کاهش و مصرف mg 5 Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn ریشه شد. در همین سطح Zn، کاربرد سطوح بالاتر Zn باعث کاهش غلظت Zn ریشه و بروز اثر ناهمسازی بین Cd و Zn شد. در سطح 100 mg Zn kg^{-1}، کاربرد $0/5$، $2/5$ و 10 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn ریشه (حداکثر ۲۶ درصد) در مقایسه با سطح صفر Cd شد. در همین سطح Zn، کاربرد 80 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت Zn ریشه گردید. در سطح 200 mg Zn kg^{-1}، مصرف $2/5$ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش شدید غلظت Zn ریشه به‌میزان ۳۲ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد و کاربرد 10 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت Zn ریشه گردید. در سطح 400 mg Zn kg^{-1}، مصرف 80 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش نسبتاً زیاد غلظت Zn ریشه به‌میزان ۳۸ درصد در مقایسه با سطح صفر Cd شد. بیش‌ترین اثر هم‌افزایی Cd و Zn در دو تیمار Cd2.5-Zn200 و Cd80-Zn400 در ریشه مشاهده شد. بیش‌ترین غلظت Zn بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۹۱/۱ و $246/9$ mg kg^{-1} در تیمارهای Cd2.5-Zn400 و Cd80-Zn400 مشاهده شد. کم‌ترین غلظت Zn در بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۱۳/۱۷ و mg $13/46$ kg^{-1} در تیمارهای Cd0-Zn0 و Cd40-Zn0 مشاهده شد.



شکل ٤- اثر متقابل Cd و Zn بر غلظت Zn الف) بخش هوایی و ب) ریشه

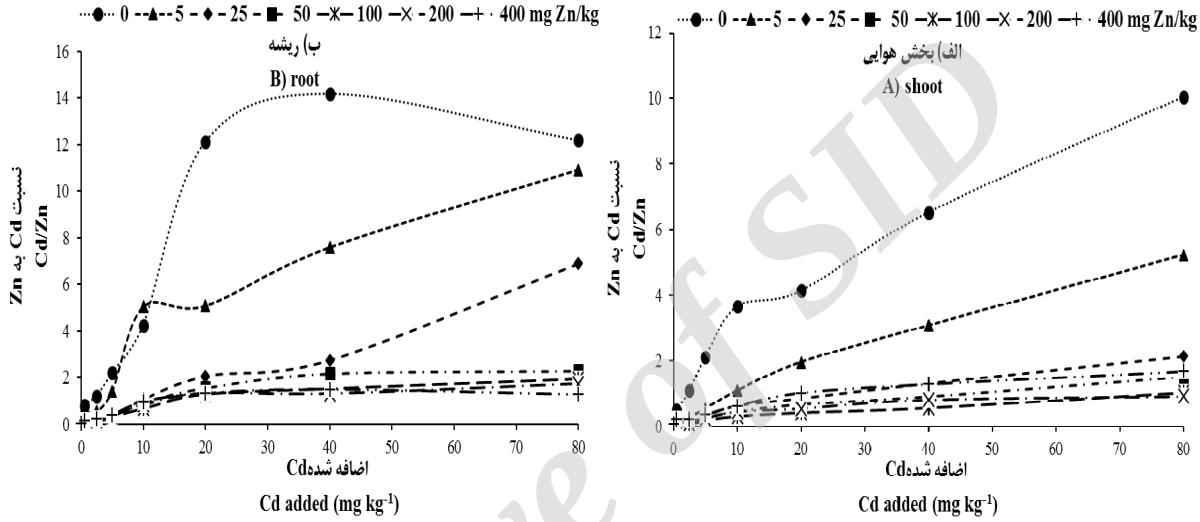
Figure 4- **The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Zn A) shoot** and B) **r**oot

رحیمی و رونقی (۵۵) مشاهده کردند که در سطوح ۵، ۱۰ و mg 20 Zn kg^{-1}، سطوح ۵، ۱۰ و 20 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت

Archive of SID

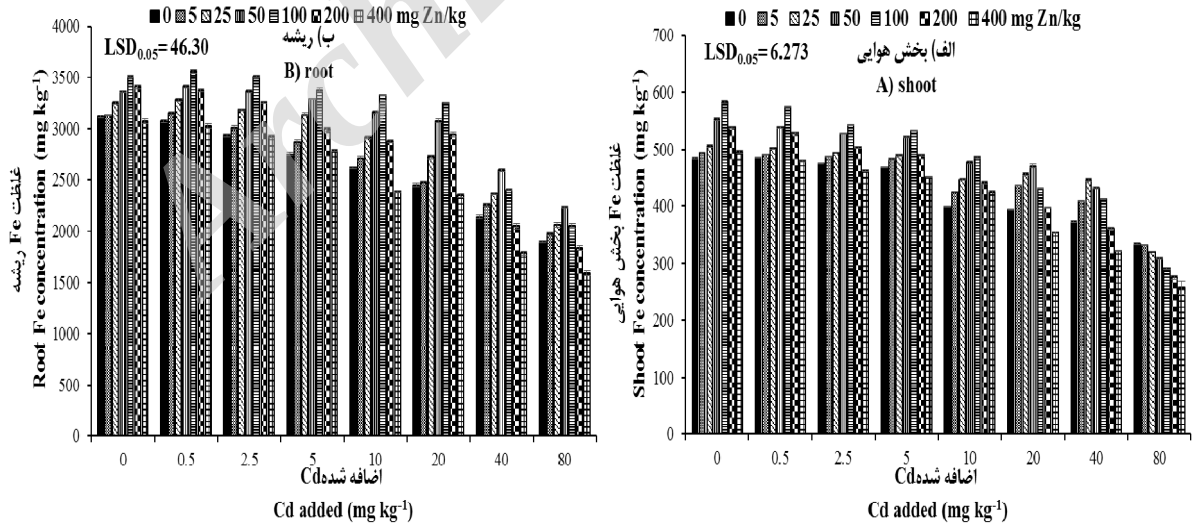
www.SID.ir

Zn بخش هوایی اسفناج شدند. چریف و همکاران (۱۳) گزارش کردند کـه در سـطوح ۱۰ تـا ۱۵۰ mg Zn kg^{-1}، سـطح ۱۰ mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت Zn در برگ‌های گوجه فرنگـی شـد. ادیلوقلـو و همکاران (۱) گزارش کردنـد کـه در سـطوح ۱۰ و ۲۰ mg Cd kg^{-1}، غلظت Zn بخش هوایی ذرت کاهش یافـت. در همـین سـطوح Cd، مصرف ۱۰ mg Zn kg^{-1} غلظـت Zn بخـش هـوایی را افـزایش داد. اردم و همکاران (۲۱) مشاهده کردنـد کـه در سـطوح ۲/۵ و mg Cd ۱۰ kg^{-1}، غلظت Zn بخش هوایی گندم نـان و گنـدم دوروم کـاهش یافته و با کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} افزایش یافت. اثر متقابـل Cd و Zn بر نسبت Cd به Zn (Cd/Zn) در بخش هـوایی و ریشـه در شـکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سـطح صـفر Zn، Cd/Zn بخش هوایی و ریشه برای تمامی سطوح Cd ، بـیش‌تـر از سایر سطوح Zn بود. در سطوح مختلف Cd، کـاربرد ۲۵ و mg Zn ۵۰ kg^{-1}، نسبت Cd/Zn را به‌طور قابل ملاحظه‌ای به‌ترتیب در بخش هوایی و ریشه کاهش داد.. موستاکاس و همکاران (۴۷) نیـز گـزارش کردند کـه کـاربرد Zn در کلیـه سـطوح Cd ، باعـث کـاهش نسـبت Cd/Zn گردید.



شکل ۵- اثر متقابل Cd و Zn بر نسبت Cd به Zn الف) بخش هوایی و ب) ریشه

Figure 5- **The effects of Cd and Zn interactions on the ratio of Cd to Zn A) shoot** and B) root



شکل ٦- اثر متقابل Cd و Zn برغلظت Fe الف) بخش هوایی و ب) ریشه

Figure 6- **The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Fe A) shoot** and B) **r**oot

اثر متقابل Zn و Cd بر غلظت Fe بخش هوایی و ریشه در شکل ۶ نشان داده شده است؛ به‌طوری که ملاحظه می‌شود تـا سـطح mg

Archive of SID

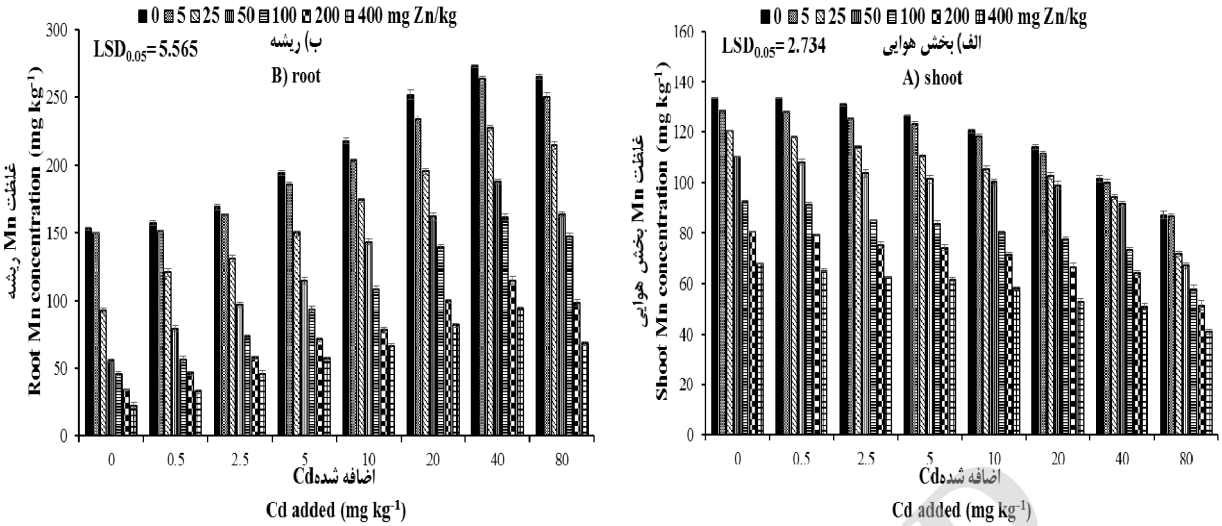
www.SID.ir

$mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، کاربرد ۵ تا $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰۰ باعث افزایش غلظت Fe بخش هوایی (حداکثر ۲۲ درصد در تیمار Cd10-Zn100) در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطوح Cd، کاربرد ۲۰۰ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۴۰۰ منجر به کاهش غلظت Fe بخش هوایی شدند. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۲۰، مصرف ۵ تا $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵۰ باعث افزایش غلظت Fe بخش هوایی به‌میزان ۲۰ درصد در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطح Cd، کاربرد سطوح بالاتر Zn باعث کاهش غلظت Fe بخش هوایی شد. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۴۰، مصرف ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۲۵ باعث افزایش غلظت Fe بخش هوایی به‌میزان ۲۰ درصد در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطح Cd، کاربرد سطوح بالاتر Zn باعث کاهش غلظت Fe بخش هوایی شد. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۸۰ با کاربرد کلیه سطوح Zn، کاهش غلظت Fe بخش هوایی مشاهده شد. در مورد ریشه، تا سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۲۰، کاربرد ۵ تا $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰۰ باعث افزایش غلظت Fe ریشه (حداکثر به‌میزان ۳۳ درصد در تیمار Cd20-Zn100) در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطوح Cd، کاربرد ۲۰۰ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۴۰۰ منجر به کاهش غلظت Fe ریشه شدند. در سطوح ۴۰ و $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۸۰، مصرف ۵ تا $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵۰ باعث افزایش غلظت Fe ریشه (حداکثر به‌میزان ۲۱ درصد در تیمار Cd40-Zn50) در مقایسه با سطح صفر Zn شد. در همین سطوح Cd، کاربرد ۱۰۰ تا $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۴۰۰ موجب کاهش غلظت Fe ریشه شد. بیش‌ترین غلظت Fe در بخش هوایی $mg\ kg^{-1}$ ۵۸۳ در تیمار Cd0-Zn100 و در ریشه $mg\ kg^{-1}$ ۳۵۶۳ در تیمار Cd0.5-Zn100 بود. کم‌ترین غلظت Fe در بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۲۵۷ و $mg\ kg^{-1}$ ۱۵۸۷، هر دو در تیمار Cd80-Zn400 بود. با توجه به نتایج، کاربرد Zn در سطوح پایین باعث افزایش غلظت Fe بخش هوایی و ریشه شده و در سطوح بالا آن را کاهش داد. با توجه به افزایش ماده خشک بخش هوایی و ریشه در سطوح پایین Zn، به‌نظر می‌رسد که کاربرد Zn در این سطوح باعث افزایش جذب Fe شده است. به همین ترتیب، سطوح بالاتر Zn کاهش جذب Fe را در پی داشته است. Fe دارای متوسط فاکتور انتقال معادل ۰/۱۶ بود. Fe از طریق ایجاد پایداری در ساختار پروتئین های پیچیده و کلروپلاست ها تنش Cd را کاهش می‌دهد (۵۴). با این حال، پورتمن (۵۲) گزارش کرد که حضور Zn بر غلظت Fe بذر گندم در شرایط تنش Cd تأثیر معناداری نداشت. برخی محققان (۵۶) اثر منفی Cd بر غلظت Fe بخش هوایی را گزارش کرده و برخی دیگر (۵۵) آن را مشاهده نکردند. اثر مثبت (۵۷) Cd بر غلظت Fe ریشه و عدم تأثیر آن (۵۶) نیز گزارش شده است. ولیزاده و همکاران (۶۰) مشاهده کردند که غلظت Fe بخش هوایی برنج در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، با کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵ افزایش و با کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ کاهش یافت. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵ باعث کاهش و کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث افزایش غلظت Fe بخش هوایی گردید. در مورد ریشه، در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، مصرف ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث کاهش غلظت Fe ریشه گردید و در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، کاربرد هر دو سطح Zn منجر به افزایش غلظت Fe ریشه شد. اثر متقابل Zn و Cd بر غلظت Mn بخش هوایی و ریشه در شکل ۷ نشان داده شده است؛ به‌طوری که ملاحظه می‌شود، در تمامی سطوح Cd ، کاربرد Zn (به استثنای تیمارهای Cd40-Zn5 و Cd80-Zn5) باعث کاهش معنادار غلظت Mn بخش هوایی شد. اثر متقابل Cd و Zn بر غلظت Mn ریشه مشابه بخش هوایی بود، به‌طوری‌که در تمامی سطوح Cd ، کاربرد Zn باعث کاهش غلظت Mn ریشه و افزایش شدید فاکتور انتقال Mn گردید. ممکن است Zn باعث آزاد شدن Mn از ریشه و انتقال آن به بخش هوایی شده باشد. Mn در بین فلزات مورد بررسی در این تحقیق دارای بیش‌ترین میانگین فاکتور انتقال (۰/۸۹) بود. بیش‌ترین غلظت Mn در بخش هوایی $mg\ kg^{-1}$ ۱۳۴ در تیمار Cd0.5-Zn0 و در ریشه $mg\ kg^{-1}$ ۲۷۳ در تیمار Cd40-Zn0 بود. کم‌ترین غلظت Mn در بخش هوایی $mg\ kg^{-1}$ ۴۱ در تیمار Cd80-Zn400 و در ریشه $mg\ kg^{-1}$ ۲۳ در تیمار Cd0-Zn400 مشاهده شد.

گزارش شده است که Cd غلظت Mn بخش هوایی گیاه را کاهش داد (۱۵، ۳۸ و ۵۶). نتایج مشابهی نیز برای غلظت Mn ریشه مشاهده شده است (۵۶). با این حال، ولیزاده و همکاران (۶۰) دریافتند که غلظت Mn بخش هوایی برنج در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، با کاربرد سطوح ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ کاهش و در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، با کاربرد سطوح ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ کاهش یافت. آنان گزارش نمودند که در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، مصرف ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث کاهش غلظت Mn ریشه و در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، مصرف ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث افزایش غلظت Mn ریشه شد. اثر متقابل Zn و Cd بر غلظت Cu بخش هوایی و ریشه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در تمامی سطوح Cd، کاربرد سطوح مختلف Zn باعث کاهش غلظت Cu در هر دو بخش هوایی و ریشه شد. این امر را می‌توان با توجه به روند افزایشی ماده خشک به اثر رقت و یا ممانعت Zn از جذب Cu توسط ذرت نسبت داد (۴۳). سطوح پایین Zn فاکتور انتقال Cu را در تمامی سطوح Cd افزایش دادند، ولی سطوح بالای Zn این فاکتور انتقال Cu را در تمامی سطوح Cd کاهش دادند. میانگین فاکتور انتقال Cu برای کلیه تیمارها ۰/۴۱۰ بود که کم‌ترین میزان فاکتور انتقال در بین فلزات مورد مطالعه در این تحقیق بود.

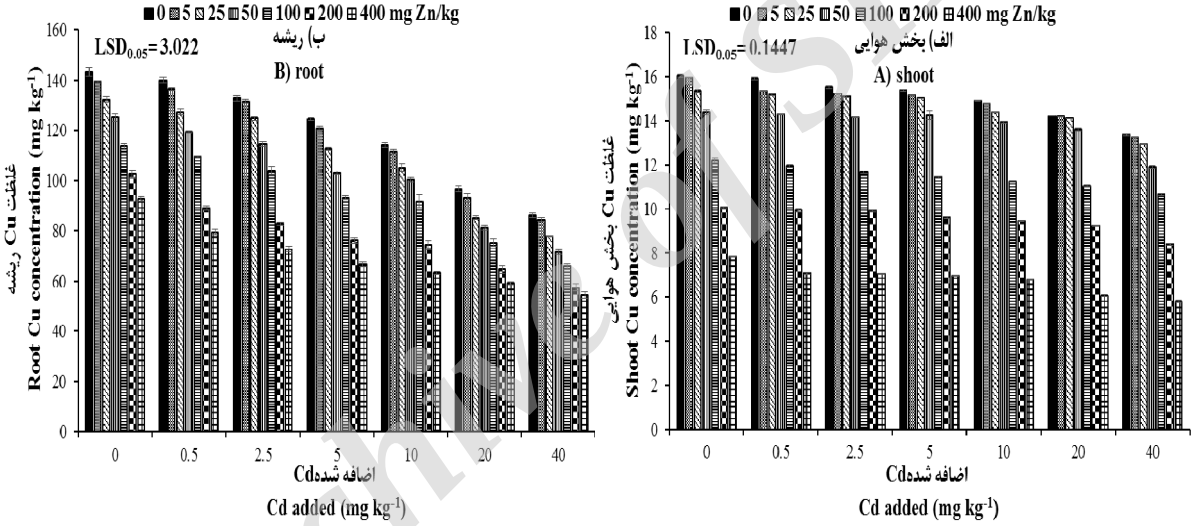
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۷- اثر متقابل Cd و Zn بر غلظت Mn الف) بخش هوایی و ب) ریشه

Figure 7- **The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Mn A) shoot** and B) root



شکل ۸- اثر متقابل Cd و Zn بر غلظت Cu الف) بخش هوایی و ب) ریشه

Figure 8- **The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Cu A) shoot** and B) **r**oot

بیش‌ترین غلظت Cu در بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۱۶ و mg kg^{-1} ۱۴۳ بود که هردو مربوط به تیمار شاهد بودند. کم‌ترین غلظت Cu در بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۴/۵ و $mg\ kg^{-1}$ ۴۵ بود که هر دو مربوط به تیمار Cd80-Zn400 بودند. برخی محققان کاهش غلظت Cu بخش هوایی (۳۸) و ریشه (۵۶) گیاه را در حضور Cd گزارش کردند. در مقابل، در برخی تحقیقات نیز اثر معناداری مشاهده نگردید (۵۷). اثر مثبت Cd بر غلظت Cu بخش هوایی ذرت نیز گزارش شده است (۴۸). ولیزاده و همکاران (۶۰) مشاهده کردند که در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، کاربرد ۵ و $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث کاهش غلظت Cu بخش هوایی برنج شد. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰ نیز کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵ باعث کاهش غلظت Cu بخش هوایی برنج گردید. با این حال، در این سطح Cd ، کاربرد $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ باعث افزایش غلظت Cu بخش هوایی شد. آنان همچنین گزارش نمودند که در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۵، مصرف $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۵ منجر به کاهش غلظت Cu ریشه شده و مصرف $mg\ Zn\ kg^{-1}$ ۱۰ منجر به افزایش آن گردید. در سطح $mg\ Cd\ kg^{-1}$ ۱۰، کاربرد هر دو سطح Zn باعث کاهش غلظت Cu ریشه شد. ایمتیاز و همکاران (۳۱) گزارش نمودند که با کاربرد ۵ تا $mg\ Zn\ L^{-1}$ ۲۰، غلظت Cu بخش هوایی گندم در مرحله اول کاهش یافت، اما در ریشه در مرحله اول رشد غلظت Cu کاهش یافت. همچنین آنان مشاهده کردند که در طی مرحله دوم رشد غلظت Cu بخش هوایی و ریشه با کاربرد ۵ و $mg\ Zn\ L^{-1}$ ۱۰ افزایش و با کاربرد ۱۵ و $mg\ Zn\ L^{-1}$ ۲۰ کاهش یافت.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٤- ضریب همبستگی پیرسون بین وزن خشک و ترکیب شیمیایی بخش هوایی و ریشه

Table 4. Pearson correlation coefficients between shoot and root dry weight and chemical composition

ریشه Root						بخش هوایی Shoot							
Cu	Mn	Fe	Zn	Cd	DW	Cu	Mn	Fe	Zn	Cd	DW		
0.599**	-0.168*	0.600**	-0.081	-0.500**	0.803**	0.528**	0.547**	0.581**	0.172*	-0.555**	1	DW	بخش هوایی Shoot
-0.670**	0.588**	-0.847**	-0.165*	0.863**	-0.465**	-0.338**	-0.837**	-0.850**	-0.230**	1		Cd	
-0.396**	-0.746**	0.190*	0.086**	0.013	0.077	-0.604**	-0.654**	-0.137	1			Zn	
0.713**	-0.404**	0.869**	0.037	0.899**	0.478**	0.740**	0.484**	1				Fe	
0.895**	0.449**	0.389**	-0879**	-0.571**	0.442**	0.969**	1					Mn	
0.833**	0.506**	0.386**	-0.873**	-0.501**	0.542**	1						Cu	
0.520	-0.127	0.502**	-0.148	-0.431**	1							DW	ریشه Root
-0.825**	0.389**	-0.837**	0.089	1								Cd	
-0.511**	-0.819**	0.106	1									Zn	
0.641**	-0.469**	1										Fe	
0.043	1											Mn	
1												Cu	

*و** به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

* and **, significant at the 5 and 1% level of probability, respectively

Archive of SID

www.SID.ir

آنان مشاهده نمودند که بیش‌ترین غلظت Cu در شرایط عدم مصرف Zn رخ داد. غلظت Cu در ریشه بیش‌تر از اندام هوایی بود. ولیزاده و همکاران (۶۰) مشاهده کردند که در سطح ۵ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ و ۱۰ mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت Cu بخش هوایی برنج شد و در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد ۵ mg Zn kg^{-1} باعث ادامه روند کاهشی در غلظت Cu و کاربرد ۱۰ mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت Cu بخش هوایی شد. همچنین آنان گزارش نمودند که در ریشه برنج در سطح ۵ mg Cd kg^{-1}، مصرف ۵ mg Zn kg^{-1} منجر به کاهش و مصرف ۱۰ mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش غلظت Cu ریشه برنج شد ولی در سطح ۱۰ mg Cd kg^{-1}، کاربرد هر دو سطح Zn باعث کاهش غلظت Cu ریشه شد.

در جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون بین وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت عناصر در بخش هوایی و ریشه آورده شده است. وزن خشک بخش هوایی با غلظت Fe، Mn، Cu و Zn بخش هوایی و نیز وزن خشک و غلظت Fe و Cu ریشه همبستگی مثبت معنادار داشت. همین صفت با غلظت Cd بخش هوایی و غلظت Cd، Zn و Mn ریشه همبستگی منفی معنادار نشان داد. ولیزاده (۵۹) نیز گزارش کرد که وزن خشک بخش هوایی برنج با غلظت Zn بخش هوایی و وزن خشک و غلظت Zn ریشه همبستگی مثبت و با غلظت Cd بخش هوایی همبستگی منفی داشت. غلظت Cd بخش هوایی با غلظت Cd و Mn ریشه همبستگی مثبت داشت. همین صفت با غلظت Fe، Mn، Cu و Zn بخش هوایی و وزن خشک، غلظت Fe، Cu و Zn ریشه همبستگی منفی داشت. ولیزاده (۵۹) نیز مشاهده کرد که غلظت Cd بخش هوایی برنج با غلظت Cd ریشه همبستگی مثبت و با غلظت Zn ریشه همبستگی منفی داشت. غلظت Zn بخش هوایی با غلظت Fe و Zn ریشه همبستگی مثبت داشت. همین صفت با غلظت Mn و Cu بخش هوایی و غلظت Mn و Cu ریشه همبستگی منفی نشان داد. ولیزاده (۵۹) نیز گزارش کرد که غلظت Zn بخش هوایی برنج با غلظت Zn ریشه همبستگی مثبت و با غلظت Cd ریشه همبستگی منفی داشت. غلظت Fe بخش هوایی با غلظت Mn و Cu بخش هوایی و وزن خشک، غلظت Fe و Cu ریشه همبستگی مثبت داشت. همین صفت با غلظت Cd و Mn ریشه همبستگی منفی نشان داد. غلظت Mn بخش هوایی با غلظت Cu بخش هوایی و وزن خشک، غلظت Fe و Cu ریشه همبستگی مثبت داشت. همین صفت با غلظت Cd ، Zn و Mn ریشه همبستگی منفی نشان داد. غلظت Cu بخش هوایی با وزن خشک، غلظتFe، Mn و Cu ریشه همبستگی مثبت داشت. همین صفت با غلظت Cd و Zn ریشه همبستگی منفی داشت. وزن خشک ریشه با غلظت Fe و Cu ریشه همبستگی مثبت نشان داد.

همین صفت با غلظت Cd ریشه همبستگی منفی داشت. غلظت Cd ریشه همبستگی منفی را با غلظت Fe و Cu ریشه نشان داد. غلظت Zn ریشه با غلظت Mn و Cu ریشه همبستگی منفی داشت. غلظت Fe ریشه با غلظت Cu ریشه همبستگی مثبت نشان داد. همین صفت با Mn ریشه همبستگی منفی داشت. غلظت Mn ریشه با غلظت Cu ریشه همبستگی مثبت نشان داد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که آستانه تحمل اکولوژیکی ذرت mg $Zn\ kg^{-1}$ ۸۰۰ بود. همچنین، سطحی از Zn که بر وزن خشک بخش هوایی ذرت در معرض Cd تأثیر مثبت داشت، با افزایش سطح Cd ، افزایش یافت. در تمامی سطوح Cd، کاربرد مقادیر متوسط Zn از انباشت Cd در بخش هوایی جلوگیری کرد، ولی مصرف مقادیر کم و زیاد Zn باعث تشدید این انباشت گردید. انباشت Cd در ریشه با افزایش سطح کاربرد Zn افزایش یافت. غلظت Zn بخش هوایی و ریشه با افزایش سطح آن تا ۱۰۰ mg Zn kg^{-1} افزایش یافته و سپس ثابت ماند. فاکتور انتقال Cd در عدم مصرف آن دارای بیشترین مقدار بود. فاکتور انتقال Zn با افزایش سطح آن ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. مصرف Zn در کلیه سطوح Cd، ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش غلظت Fe بخش هوایی و ریشه گردید. درحالی‌که، کاربرد Zn در کلیه سطوح Cd باعث کاهش غلظت Mn و Cu بخش هوایی و ریشه شد. به طور کلی، Zn در غلظت‌های کم از اثرات سمّیتی و انباشت Cd کاست، اما در غلظت‌های بالاتر نه تنها باعث مهار Cd نشد، بلکه اثرات منفی نشان داد.

منابع

1- Adiloglu A., Adiloglu S., Gonulsuz E., and Oner N. 2005. Effect of zinc application on cadmium uptake of maize grown in zinc deficient soil, Pakistan Journal of Biological Sciences, 8(1): 10-12.

2- Alcantara E., Romera F.J., Canete M., and De la Guardia M.D. 1994. Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe (III) reductase in Fe-deficient cucumber (*Cucumis sativus L.*) Plants, Journal of Experimental Botany. 45(12): 1893-1898.

3- Allison L.E., and Moodie C.D. 1965. Carbonate. p. 1379-1396. In C.A. Black et al. (ed.) Methods of Soil analysis. Part 2, Agron. Monogr 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Archive of SID

www.SID.ir

4- Alloway B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd ed. Blackie Academic & Professional Publishers, London.
5- Alloway B.J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. 2nd ed. Published by IZA and IFA, France.
6- Anonymous. 2008. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. Madison, WI.
7- Aravind P., and Prasad M.N.V. 2003. Zinc alleviates cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: a free floating freshwater macrophyte, Plant Physiology and Biochemistry, 41: 391–397.
8- Benton Jones J. 1997. Hydroponics a Practical Guide for the Soilles Grower, St. Lucie Press., Florida.
9- Boisson J., Ruttens A., Mench M., and Vangronsveld J. 1999. Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils, Part 1. Influence of hydroxyapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation. Environmental Pollution, 104(2): 225-233.
10- Bower C.A., Reitemeier R.F., and Fireman M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils, Soil Science, 73(4): 251-261.
11- Burton K.W., King J.B., and Morgan E. 1986. Chlorophyll as an indicator of the upper critical tissue concentration of cadmium in plants, Water, Air and Soil pollution, 27(1): 147-154.
12- Cakmak I., Welch R.M., Erenoglu B., Römheld V., Norvell W.A., and Kochian L.V. 2000. Influence of varied zinc supply on re-translocation of Cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings, Plant and Soil, 219(1): 279-284.
13- Cataldo D.A., and Wildung R.E. 1978. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants, Environmental Health Perspective, 27: 149-159.
14- Cherif J., Mediouni C., Ammar W.B., and Jemal F. 2011. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solsnum lycopresicum*), Journal of Environmental Sciences. 23(5): 837-844.
15- Chizzola R. 2001. Micronutrient composition of *Papaver somniferum* L. grown under low cadmium stress conditions, Journal of Plant Nutrition, 24(11): 1663–1677.
16- Ciecko Z., Kalembasa S., Wyszkowski M., and Rolka E. 2004. Effect of soil contamination by cadmium on potassium uptake by plants, Polish Journal of Environmental Studies, 13(3): 333-337.
17- Das P., Samantaray S., and Rout G.R. 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: A review, Environmental Polluttion, 98(1): 29-36.
18- Davis R.D., and Beckett P.H.T. 1978. Upper critical levels of toxic elements in plant. II. Critical levels of copper in young barley, wheat, rape, lettuce and ryegrass, and of nickel and zinc in young barley and ryegrass, New Phytologist, 80: 23-32.
19- Dong J., Wu F., and Zhang G. 2006. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*), Chemosphere, 64(10): 1659-1666.
20- Ebbs S.D., and Kochian L.V. 1997. Toxicity of zinc and copper to brassica species: implications for phytoremediation, Journal Environmental Quality, 26: 776–781.
21- Erdem H., Tosun Y.K., and Ozturk M. 2012. Effect of cadmium-zinc interactions on growth and Cd-Zn concentration in durum and bread wheats, Fresenius Environmental Bulletin, 21(5): 1046-1051.
22- Fontes R.L.S., and Cox F.R. 1998. Zinc toxicity in soybean grown at high iron concentration in nutrient solution, Journal of Plant Nutrition, 21(8): 1723–1730.
23- Gao X., and Grant C.A. 2012. Cadmium and zinc concentration in grain of durum wheat in relation to phosphorus fertilization, crop sequence and tillage management, Applied and Environmental Soil Science, 2012: 1-10.
24- Gee, G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. ASA and SSSA, Madison, WI.
25- Gilmor, J.T., and Kittrick J.A. 1979. Solubility and equilibria of zinc in a flooded soil, Soil Science Society of America Journal, 43(5): 890-892.
26- Goyer R.A. 1997. Toxic and essential metal interactions, Annual Review of Nutrient, 17: 37–50.
27- Hafeez U.R., Faroog M., and Afzal I. 2007. Late sowing of wheat seed priming, Available in www.DAWN.com.
28- Han S.H., Kim D.H., and Lee J.C. 2010. Cadmium and zinc interaction and phytoremediation potential of seven *salix caprea* clones, Journal of Ecology and Field Biology. 33(3): 245-251.
29- Hart J.J., Welch R.M., Norvell W.A., and Kochia L.V. 2002. Transport Interaction between cadmium and zinc in roots of bread wheat and durum wheat seedlings, Physiologia Plantarum, 116(1): 73-78.
30- Herren T., and Feller U. 1997. Transport of cadmium via xylem and phloem in maturing wheat shoots: Comparison with the translocation of zinc, strontium and rubidium, Annals of Botany, 80(5): 623-628.
31- Imtiaz M., Alloway B.J., Shah K.H., Siddiqui S.H., Memon M.Y., Aslam M., and Khan P. 2003. Zinc nutrition of wheat: II: Interaction of zinc with other trace elements, Asian Journal of Plant Sciences, 2(2): 156-160.
32- Jamali N., Ghaderian S.M., and Karimi N. 2014. Effects of cadmium and zinc on growth and metal accumulation of *Mathiola flavida* boiss, Environmental Engineering and Management Journal, 13(12): 2937-2944.
332- Jones B.J. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis, CRC Press LLC, USA.
34- Klute A. 1986. Water retention: laboratory methods. p. 635-660. In A. Klute. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. ASA and SSSA, Madison, WI.

Archive of SID

www.SID.ir

35- Knudsen D., Peterson G.A., and Pratt P.F. 1982. Lithium, sodium, and potassium, p. 225-246. In A.L. Page et al. (ed.) Method of Soil Analysis. Part2. 2nd ed. Agron. Monger. 9. ASA and SSSA, Madison. WI.
36- Koleli N., Eker S., and Cakmak I. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat in zinc deficient soil, Environmental Pollution, 131: 453-459.
37- Kuo S. 1996. Phosphorus. p. 869-919. In D.L. Sparks (ed.) Methods of Soil Analysis, Part 3. 3rd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
38- Kurana M.P.S., and Jhanji S. 2014. Influence of cadmium on dry matter yield, micronutrient content and its uptake in some soils, Journal of Environmental Biology, 35: 865-870.
39- Lagriffoul A., Mocquot B., Mench M., and Vangronsveld J. 1998. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll content, and activities of stressing related enzymes in young maize plants (Zea mays), Plant and Soil, 200: 241-250.
40- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper, Soil Science Society of America, 42(3): 421-428.
41- Liu W.J., Zhu Y.G., and Smith F.A. 2005. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings *(Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenate, Plant and Soil, 277: 127–138.
42- Macnicol R.D., and Beckett P.H.T. 1985. Critical tissue concentration of potentially toxic elements, Plant and Soil, 85: 107-129.
43- Marschner H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants, Academic press, Germany.
44- McKenna I.M., Chaney R.L., and Williams F.M. 1993. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach, Environmental Pollution, 79(2): 113-120.
45- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, p. 199-224. In A.L. Page et al. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. ASA and SSSA, Madison, WI.
46- McBride M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils, Oxford University Press. Oxford.
47- Moustakas N.K., Akoumianaki-Ioannidou A., and Barouchas P.E. 2011. The effects of cadmium and zinc interactions on the concentration of cadmium and zinc in pot marigold (*Calendula officinalis* L.), Australian Journal of Crop Science, 5(3): 277-282.
48- Nan Z., Li J., Zhang J., and Clieng G. 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system wider actual field, Science of the Total Environment, 285(1-3): 187-195.
49- Narwal R.P., Singh M., Singh J.P., and Dahiya D.J. 1993. Cadmium-zinc interaction in maize grown on sewer water irrigated soil, Arid Soil Reserch Rehabilitation. 7(2): 125-131.
50- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter, p. 539-579. In A.L. Page et al. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. ASA and SSSA, Madison, WI.
51- Oliver D.P., Wilhelm N.S., McFarlane J.D., Tiller K.G., and Cozens G.D. 1997. Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentrations in wheat grain, Australian Journal of Experimental Agriculture, 37(6): 677-681.
52- Portman D. 2012. Cadmium and zinc uptake in wheat as affected by nitrogen fertilization and agricultural management, Master thesis. Supervised by. Dr. Susan Tandy. Prof. Dr. Rainer Schulin.
53- Poschenrieder C.H., and Barceló J. 1999. Water relations in heavy metal stressed plants, p. 207-230. In M.N.V. Prasadet al. (ed.) Heavy Metal Stress in Plants. Springer-Verlag, Heidelberg.
54- Qureshi M.I., D'Amici G.M., Fagioni M., Rinalducci S., and Zolla L. 2010. Iron stabilizes thylakoid protein-pigment complexes in Indian mustard during Cd-phytoremediation as revealed by BN-SDS-PAGE and ESI-MS/MS, Journal of Plant Physiology, 167(10): 761-770.
55- Rahimi T., and Ronaghi E. 2012. Effect of different sources of zinc on the concentration of cadmium and some trace elements in spinach in a calcareous soil, Science and Technology of Greenhouse Cultures, 10: 101-111. (in Persian)
56- Safarzadeh, S., Ronaghi A., and Karimian N. 2013. Effect of cadmium toxicity on micronutrient concentration, uptake and partitioning in seven rice cultivars, Archives Agronomy and Soil Science, 59(2): 231-245.
57- Skrebsky E.C., Tabaldi L.A., Pereira L.B., Rauber R., Maldaner J., Cargnelutti D., Gonçalves J.F., Castro G.Y., Shetinger M.R.C., and Nicoloso F.T.. 2008. Effect of cadmium on growth, micronutrient concentration, and δ-aminolevulinic acid dehydratase and acid phosphatase activities in plants of Pfaffia glomerata, Brazilian Journal of Plant Physiology, 20(4): 285-294.
58- Smilde K.W., Van Luit B., and Van Driel W. 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium, Plant and Soil, 143: 233-238.
59- Valizadeh Fard F. 2011. The combined effect of Zn and Cd on two varieties of rice (Vandana and Hashemi) in flooded and non-waterlogged conditions, Thesis, University of Tabriz. (in Persian with English abstract).
60- Valizadeh Fard F., Rihani Tabar A., Najafi N., and Oustan S. 2012_a. The combined effect of cadmium and zinc in a calcareous soil on the uptake of phosphorus, copper, iron and manganese by two varieties of rice in flooded and

www.SID.ir

non-waterlogged conditions, Journal of Soil and Water Research, 1(43): 207-219.
61- Valizadeh Fard F., Rihani Tabar A., Najafi N., and Oustan S. 2012_b. The combined effects of cadmium and zinc on the growth characteristics of rice and zinc, cadmium, iron, manganese and non-waterlogged waterlogged soil moisture conditions, Journal of Soil and Water Research, 3(43): 195-205.
62- Verloo M., Willaert G., and Cottenie A. 1986. Determination of the upper critical levels of heavy metals in plant and soils, Studies in Environmental Science, 29:207-215.
63- Verougstraete V., Lison D., and Hotz P. 2003. Cadmium, lung and prostate cancer: a ystematic review of recent epidemiological data, Journal of Toxicology and Environmental Health, part B: Critical Review, 6: 227-255.
64- Zhao Z.Q., Zhu Y.G., Kneer R., and Smith S.E. 2005. Effect of zinc on cadmium toxicity induced oxidative stressing winter wheat seedlings, Journal of Plant Nutrition, 28(11): 1947-1959.
65- Zhong-qiu Z., Yong-guan Z., and Yun-long C. 2005. Effect of zinc on cadmium uptake by spring wheat (*Triricum aestivum,* L.): long-time hydroponic study and short-time ^{109}Cd tracing study, Journal Zhejiang University Science, 6A(7): 643-648.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 460-477

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۴۷۷-۴۶۰

Effects of Cadmium and Zinc Interactions on Growth and Chemical Composition of Corn (*Zea mays* cv. single cross)

S. Sadeghi[1*]- S. Ostan[2]- N. Najafi[3]- M. Valizadeh[4]- H. Monirifar[5]

Received: 25-11-2015
Accepted: 05-12-2016

Introduction: Heavy metal contamination not only adversely affects the chemical properties, availability of nutrients and biological activity of the soils, but also causes serious risk to the human health from entering the food chain. Cadmium as an unnecessary heavy metal is highly toxic to plants. Cadmium toxicity inhibits plant growth and even death. Metabolic processes such as photosynthesis and cellular respiration are disturbed due to cadmium toxicity. Among the heavy metals, zinc is an important nutrient in many biological processes such as photosynthesis, activity of antioxidant enzymes, proteins, hormones and other activities. Because of the similar chemical behavior of cadmium and zinc, interaction between the two metals is of interest to many researchers.

Materials and Methods: In this study, to investigate the interaction effects of cadmium and zinc on shoot and root dry matter and chemical composition of corn (*Zea mays* cv. single cross 704), a factorial experiment as a randomized complete block design in triplicate with eight levels of cadmium (zero, 0.5, 2.5, 5, 10, 20, 40 and 80 mg Cd kg^{-1}) and eight levels of zinc (zero, 5, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 mg Zn kg^{-1}) was conducted in a loamy sand soil under greenhouse conditions. After 60 days, the plants were harvested and dry weights of shoots and roots were determined. Moreover, after wet digestion, the concentrations of cadmium, zinc, iron, manganese and copper in these tissues were determined by flame atomic absorption spectrometry (Shimadzu-6300).

Results and Discussion: Treatments with 800 mg Cd kg^{-1} showed symptoms of cadmium and or zinc toxicity at early stages of the growth. These plants died after 10 to 20 days of germination. The results showed that the cadmium and zinc interactions on shoot and root dry weights were significant. At 0.5, 2.5, 20 and 80 mg Cd kg^{-1} (except for Cd0.5-Zn25), application of 5 to 50 mg Zn kg^{-1} increased shoot dry weight. Higher levels of zinc supplementation exhibited adverse effects. At 5 and 10 mg Cd kg^{-1}, supply of 5 to 100 mg Zn kg^{-1} was associated with an increase in shoot dry weight, but shoot growth was reduced at higher zinc levels. At 40 mg Cd kg^{-1}, application levels of 5 to 200 mg Zn kg^{-1} increased shoot dry weight, whereas 400 mg Zn kg^{-1} showed adverse effects. Moreover, the cadmium and zinc interactions on chemical composition of corn were significant. Based on the results, at low levels of cadmium, zinc supplementation at each level increased the shoot and root cadmium concentrations, while at high levels of cadmium, low and high zinc supply caused a decrease and increase in the shoot as well as root cadmium concentrations, respectively. The concentration of a particular trend was observed on the shoot and root. Supplementation of zinc at each level of cadmium (except for 80 mg Cd kg^{-1}), first increased and then decreased the iron concentration of shoots and roots. Application of zinc at each level of cadmium decreased manganese and copper concentrations in shoots and roots.

Conclusions: According to the results, the ecological tolerance of corn to zinc was found to be 800 mg Zn kg^{-1}. Also, the application level of zinc with positive effect on shoot dry weight increased with an increase in cadmium level. At all levels of cadmium, supplementation of zinc at medium levels prevented the accumulation of cadmium in shoots, while high and low levels of zinc intensified the cadmium accumulation. The highest accumulation of cadmium in roots was occurred at highest level of zinc. Zinc supplementation at each level of cadmium first increased and then decreased iron concentration in shoots and roots. However, zinc supply at each level of cadmium decreased copper and manganese concentrations in shoots and roots. As a conclusion, zinc at low levels diminished toxic effects and accumulation of cadmium, meanwhile high levels of zinc not only did not control cadmium but showed deleterious effects. The critical level of poisoning for cadmium in aerial parts of both plants in lower density in the soil (up to 90 mg kg^{-1}) showed very little changes, but in higher density, it

1- Assistant Professor, Department of Soil Science, University of Maragheh
(*- Corresponding Auther Email: Sirossadeghi@yahoo.com)
2 and 3- Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, University of Tabriz
4- Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, University of Tabriz
5- Associate Professor, Genetic and Crop Product, East Azarbayjan Agriculture and Natural Resources Research Center

Archive of SID

www.SID.ir

decreased in *brassica napus* and increased in *zea mays*. The critical level of poisoning on the aerial parts of both plants showed very little change with increasing the total density of cadmium in the soil.

Keywords: Accumulation, Cadmium, Shoot and root dry weights, Zinc

Archive of SID

www.SID.ir