

اثر متقابل کادمیم و روی بر رشد و ترکیب شیمیایی کلزا (*Brassica napus* cv. Hyola) در یک خاک شن لومی

سیروس صادقی^{*}، شاهین اوستان^۱، نصرت اله نجفی^۲، مصطفی ولی زاده^۳، حسن منیری فر^۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۵/۳۰

^۱-دانشجوی سابق دکتری علوم خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳-استاد گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۴-عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی استان آذربایجان شرقی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sirossadeghi@yahoo.com

چکیده

برای بررسی اثر متقابل کادمیم و روی بر رشد و ترکیب شیمیایی کلزا، آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور کادمیم در هشت سطح (صفر، ۰/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و 80 mg kg^{-1}) و روی در هشت سطح (صفر، ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و 800 mg kg^{-1})، با سه تکرار در یک خاک شن لومی اجرا شد. بعد از ۶۰ روز، وزن خشک بخش‌هوایی و ریشه و غلظت‌های کادمیم، روی، آهن، منگنز و مس در این دو بخش اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که در سطوح ۰/۵ و 2 mg Cd kg^{-1} ، کلیه سطوح روی باعث افزایش وزن خشک بخش‌هوایی و ریشه گردیدند، ولی در سطوح بالاتر کادمیم، کاربرد ۵ و 25 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش این صفات شده و کاربرد سطوح بالاتر روی، کاهش وزن خشک بخش‌هوایی و ریشه را به دنبال داشت. همچنین، در سطوح تا 1 mg Cd kg^{-1} ، حتی کاربرد 50 mg Zn kg^{-1} کاهش غلظت کادمیم بخش‌هوایی را در مقایسه با شاهد سبب شد، در حالی که در سطوح بالاتر کادمیم، این کاهش فقط با کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} حاصل گردید. افزایش سطح کادمیم در هر سطح کاربرد روی باعث کاهش غلظت روی بخش‌هوایی گردید. مصرف روی در هر سطح کادمیم، ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش غلظت آهن بخش‌هوایی و ریشه شد. کاربرد روی در هر سطح کادمیم باعث افزایش غلظت منگنز بخش‌هوایی و کاهش غلظت منگنز ریشه گردید. همچنین، کاربرد روی در هر سطح کادمیم سبب کاهش غلظت مس در هر دو بخش‌هوایی و ریشه شد.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، روی، کادمیم، کلزا، وزن خشک بخش‌هوایی و ریشه

Interaction Effects of Zinc and Cadmium on Growth and Chemical Composition of Canola (*Brassica napus* cv. Hyola) in a Loamy Sand Soil

S Sadeghi^{*1}, S Oustan², N Najafi², M Valizadeh³, H Monirifar⁴

Received: 27 May 2012 Accepted: 20 August 2016

¹Former Ph.D Student, Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³Prof., Dept. of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

⁴Scientific Member of Agriculture Research Institute, Tabriz, East Azerbaijan, Iran

* Correspondent Author, Email: sirossadeghi@yahoo.com

Abstract

To investigate the interaction effect of Cd and Zn on growth and chemical composition of canola, a factorial greenhouse experiment in a randomized complete block design with two factors including Cd at eight levels (0, 5.0, 5.2, 5, 10, 20, 40 and 80 mg kg⁻¹ soil) and Zn at eight levels (0, 5, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 mg kg⁻¹ soil) with three replications was conducted in a loamy sand soil. After 60 days, the dry weights and concentrations of Cd, Zn, Fe, Mn and Cu in shoots and roots were determined. At levels of 2.5 and 0.5 mg Cd per kg of soil, all levels of Zn increased shoot and root dry weights. At higher levels of Cd, applications of 5 and 25 mg Zn per kg of soil increased the shoot and root dry weights, but at higher levels of Zn, a decrease in these parts was observed. Moreover, at levels up to 5 mg Cd kg⁻¹, application of Zn even at level of 25 mg Zn kg⁻¹ decreased Cd concentration in shoots in comparison with control. However, at higher levels of Cd, this decrease was achieved only at 5 mg Zn kg⁻¹. Increasing the level of Cd at any level of Zn decreased the Zn concentration in shoots. Application of Zn at each level of Cd, first increased and then decreased the concentration of iron in shoots and roots. Zn supplementation at each level of Cd increased concentration of Mn in shoots and decreased its concentration in roots. In addition, Zn application at each level of Cd decreased the concentration of Cu in both shoots and roots.

Keywords: Cadmium, Canola, Interaction effect, Shoot and root dry weights, Zinc

مقدمه

کادمیم باعث مهار رشد و حتی مرگ گیاه می‌شود. فرآیندهای متابولیکی مانند فتوسنتز و تنفس سلولی بر اثر سمیت کادمیم مختل می‌شوند (پوشنرایدر و بارسلو ۱۹۹۹). 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 سمیت کادمیم در گیاه می‌باشند (لاگریفول و همکاران ۱۹۹۸).

آلودگی فلزات سنگین نه تنها 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 (بویسون و همکاران ۱۹۹۹). کادمیم یک فلز سنگین غیرضروری بوده و برای گیاه به‌شدت سمی است.

سیستم انتقال مشترکی در غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه وجود دارد. لذا، روی جذب کادمیوم توسط گیاه را مهار می‌کند و برعکس (هارت و همکاران ۲۰۰۲). روی می‌تواند با جلوگیری از انتقال کادمیم از طریق آوندهای آبکش، توزیع کادمیم در گیاه را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، افزایش غلظت روی بخش‌هوایی می‌تواند انتقال کادمیم از برگ‌ها به دانه را محدود نماید (چاکماک و همکاران ۲۰۰۰). باین‌حال، گائو و گرنت (۲۰۱۲) ارتباطی را بین غلظت کادمیم و روی در بذر گندم دوروم گزارش نکردند. گزارش شده است که سمیت کادمیم برای گیاهانی که در معرض کمبود روی قرار گیرند، چندین برابر افزایش می‌یابد (کولی و همکاران ۲۰۰۴، اولیور و همکاران ۱۹۹۷). اثر متقابل کادمیم و روی توسط اسمایلد و همکاران (۱۹۹۲) در کاهو، اسفناج، گندم بهاره، کاسنی فرنگی و نرت ناهمسازی (آنتاگونیستی) و توسط نان و همکاران (۲۰۰۲) در دو گیاه گندم بهاره و نرت هم‌افزایی (سینرژیستی) گزارش گردید. آلووی (۲۰۰۸) این اثر متقابل را در بخش‌هوایی آنتاگونیستی و در ریشه‌ها سینرژیستی بیان نمود. مکنا و همکاران (۱۹۹۳) اثر آنتاگونیستی روی بر کادمیم را فقط در غلظت‌های کم کادمیم گزارش کردند.

در تعداد کمی از مقالات به تأثیر تیمار ترکیبی روی و کادمیم بر غلظت عناصر کم‌مصرف گیاه پرداخته شده است. پژوهش‌های قبلی در مورد اثر متقابل کادمیم و روی بر ویژگی‌های رشد گیاهان در دامنه باریکی از سطوح این فلزات انجام شده است که این امر ممکن است بر نتایج این پژوهش‌ها تأثیر گذار بوده باشد؛ لذا، در پژوهش حاضر، آزمایش گلخانه‌ای با کشت کلزا برای بررسی تأثیر روی بر سمیت کادمیم در سطوح نسبتاً گسترده‌ای از این دو فلز با مطالعه رشد و ترکیب شیمیایی بخش‌هوایی و ریشه انجام شد.

مهار ریداکتاز آهن (III) توسط کادمیم که منجر به کمبود آهن (II) و اختلال در فتوسنتز می‌گردد، گزارش شده است (الکانتارا و همکاران ۱۹۹۴). جذب، انتقال و مصرف چندین عنصر غذایی (فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) و آب در گیاه تحت تأثیر کادمیم قرار می‌گیرد (داس و همکاران ۱۹۹۷).

در بین فلزات سنگین، روی 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^۱، تشکیل پروتئین‌ها، فعالیت هورمونی و غیره نقش دارد (ژائو و همکاران ۲۰۰۵). غلظت زیاد روی در خاک برخی فرآیندهای متابولیکی گیاه را مهار نموده، در نتیجه رشد عقب افتاده و باعث پیری زودرس می‌شود (فونتس و کوکس ۱۹۹۸). سمیت روی باعث بروز رنگ قرمز متمایل به ارغوانی در برگ‌ها می‌شود که به کمبود فسفر بر اثر غلظت زیاد روی، نسبت داده می‌شود (لیو و همکاران ۲۰۰۵). جایگزینی روی به جای آهن (III)، باعث ایجاد زردی در گیاهان می‌شود (مارشنر ۱۹۸۶). غلظت بیش از حد روی در خاک می‌تواند موجب کمبود آهن و منگنز در بخش‌هوایی گیاهان گردد. چنین کمبودی به ممانعت از انتقال این دو فلز از ریشه به بخش‌هوایی نسبت داده می‌شود که نتیجه آن تجمع آهن و منگنز در ریشه است (دیویس و بکت ۱۹۷۸).

به دلیل شباهت رفتار شیمیایی کادمیم و روی، اثر متقابل این دو فلز مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است (سیئکو و همکاران ۲۰۰۴، گویر ۱۹۹۷، پورتمن ۲۰۱۲). روی نقش مهمی را در جذب، انتقال و تجمع کادمیم در گیاهان روییده در خاک‌های آلوده ایفا می‌کند (آراویند و پراساد ۲۰۰۳). این نقش بسته به نوع گیاه، نوع بافت و غلظت این دو فلز در محیط متفاوت است (کاتالدو و ویلدانگ ۱۹۷۸). برای کادمیم و روی،

¹ Antioxidants

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی (طی ماه‌های اردیبهشت و خرداد سال ۱۳۹۳) و گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز انجام شد.

خاک مورد استفاده در آزمایش که دارای غلظت کم روی قابل جذب (کمتر از 1 mg Zn kg^{-1}) و غلظت ناچیز کادمیم قابل جذب (کمتر از $0.06 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) بود (آلوی ۱۹۹۵، مک‌براید ۱۹۹۴)، از ایستگاه خلعت پوشان دانشگاه تبریز (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری) با طول جغرافیایی ($39^{\circ} 27' 23''$ شرقی) و عرض جغرافیایی ($38^{\circ} 1' 50''$ شمالی) تهیه شد. برخی از ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری خاک شامل: بافت خاک (گی و بادر ۱۹۸۶)، رطوبت ظرفیت مزرعه (کلوت ۱۹۸۶)، pH سوسپانسیون ۱:۱ (مکلین ۱۹۸۲)، EC عصاره سوسپانسیون ۱:۱ (جونز ۲۰۰۱)، کربن آلی (نلسون و سامرس ۱۹۸۲)، کربنات کلسیم معادل (CCE) (آلیسون و مودی ۱۹۶۵)، فسفر قابل جذب (کیو ۱۹۹۶)، پتاسیم قابل جذب (نادسن و همکاران ۱۹۸۲)، روی، کادمیم، آهن، منگنز و مس قابل جذب (لیندزی و نورول ۱۹۷۸) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (باور ۱۹۵۲) اندازه‌گیری شدند.

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور کادمیم در هشت سطح (صفر، ۰/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ mg Cd kg^{-1}) از منبع سولفات کادمیم ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) و روی در هشت سطح (صفر، ۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و mg Zn kg^{-1}) از منبع سولفات روی ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) در سه تکرار با کشت گیاه کلزا (*Brassica napus* cv. Hyola 401) اجرا شد. تیمارها به صورت Cdx-Zny (x سطح کادمیم، y سطح روی) کدگذاری شدند. سطوح کادمیم و روی براساس منابع دیویس و بکت (۱۹۷۸)، گیلور و کیتیک (۱۹۷۹)، مکنیکل و بکت (۱۹۸۵)، ورلو و همکاران (۱۹۸۶) و برتون و همکاران (۱۹۸۶) 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 کادمیم و روی (بر حسب نوع تیمار) تا رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه مه‌پاشی شده و کاملاً مخلوط گردیدند. خاک‌ها به مدت یک ماه نگهداری شده و در این مدت چند چرخه خشک و مرطوب‌شدن اعمال شد. بعد از پایان یک ماه، با توجه به نتایج آزمون خاک، ۱۸۰ میلی‌گرم نیتروژن به شکل اوره ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) در سه نوبت (قبل از کاشت، ۲۰ و ۴۰ روز بعد از کاشت)، ۵۰ میلی‌گرم فسفر به شکل سوپر فسفات تریپل ($(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$)، ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم به شکل سولفات پتاسیم (K_2SO_4)، ۱۰ میلی‌گرم آهن به شکل سولفات آهن ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)، ۱۰ میلی‌گرم منگنز به شکل سولفات منگنز ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)، ۵ میلی‌گرم مس به شکل سولفات مس ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) و ۲ میلی‌گرم بور به شکل اسید بوریک (H_3BO_3) به هر کیلوگرم خاک به صورت محلول اضافه و به خوبی مخلوط شد. استفاده از شکل سولفاتی برای کودهای مختلف برای حذف اثر سولفات همراه کادمیم و روی و قرار دادن غلظت سولفات خاک در دامنه کفایت انجام پذیرفت (رونقی و مفتون ۱۳۸۵). در نهایت خاک‌های تیمار شده در گلدان‌های ۴ کیلویی (g) ± 3 ریخته شدند. ۸ بذر جوانه زده گیاه کلزا (*Brassica napus*) رقم هایولا ۴۰۱ در گلدان‌ها کشت شدند. برای جوانه‌دار کردن، بذرها به مدت ۱۲ ساعت در آب مقطر در دمای اتاق خیس‌اندازه شدند (صابر و همکاران ۲۰۱۲). آبیاری گیاهان با آب شهری برای حفظ رطوبت ظرفیت مزرعه خاک‌ها انجام شد. رطوبت گلدان‌ها به صورت وزنی کنترل گردید. در طی دوره کشت، دمای کمینه و بیشینه گلخانه به ترتیب ۱۵ و ۳۲ درجه سلسیوس و شدت نور کمینه و بیشینه به ترتیب $15 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ و ۲۵ بود.

پس از ۶۰ روز گیاهان برداشت شدند. سپس گیاهان از طوقه قطع شده و ریشه‌ها از خاک خارج

استفاده از دستگاه جذب اتمی (ساخت شرکت شیمادزو ژاپن مدل AA-6300) اندازه‌گیری شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد و نمودارها با استفاده از 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 روی و کادمیم قابل‌جذب بود.

گردیدند. بخش‌هوایی بعد از شستشو با آب شهری و سپس آبکشی آب مقطر، با استفاده از کاغذ خشک‌کن نم‌گیری شدند. ریشه‌ها نیز بعد از شستشو و آبکشی، به مدت ۵ دقیقه در محلول ۰/۰۰۱ مولار EDTA غوطه‌ور شده (کرکب و کرامر ۲۰۰۳) و بعد از آبکشی با آب مقطر، با استفاده از کاغذ خشک‌کن نم‌گیری شدند. سپس، نمونه‌های گیاهی به مدت ۳ روز در دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک شدند. وزن خشک بخش‌هوایی ریشه با ترازوی حساس (±۰/۰۰۱ g) اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌های گیاهی به‌روش هضم تر (اسید نیتریک غلیظ) عصاره‌گیری شدند (دوگ و همکاران ۲۰۰۶). غلظت‌های کادمیم، روی، آهن، منگنز و مس با

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

کلاس بافت	شن (%)	رس (%)	SP	FC	pH (۱:۱)	EC (۱:۱) (dS m ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	CCE (%)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)
شن لومی	۷۰	۱۲	۳۲	۱۰	۷/۶۳	۱/۸	۸/۲	ناچیز	۰/۱۳	۰/۰۸

ادامه جدول ۱- غلظت عناصر قابل‌جذب خاک.

Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Na	K	P
(mg kg ⁻¹)							
۰/۰۲	۱/۳	۰/۸۵	۱/۱	۱/۸	۱۰۸/۸	۲۵۰	۵/۷

تمامی سطوح باعث افزایش وزن خشک بخش‌هوایی به میزان ۱۶ درصد در تیمار Cd0.5-Zn5 تا ۴۵ درصد در تیمار Cd2.5-Zn200 در مقایسه با سطح صفر روی گردید. همچنین، در سطوح ۵ تا ۲۰ mg Cd kg⁻¹ کاربرد ۵ و ۲۵ mg Zn kg⁻¹ باعث افزایش این صفت به میزان ۸۷ درصد در تیمار Cd20-Zn0 تا ۱۱۷ درصد در تیمار Cd5-Zn25 شده و در مقادیر بیشتر، وزن خشک بخش‌هوایی کاهش یافت. نتایج مشابهی برای وزن خشک ریشه نیز مشاهده شد. بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک بخش‌هوایی به‌ترتیب ۶/۹۸ و ۲/۲۳ g pot⁻¹ در تیمارهای Cd5-Zn25 و Cd10-Zn0 و بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک ریشه به‌ترتیب ۲/۱۷ و ۰/۸۸ g pot⁻¹ در تیمارهای Cd5-Zn25 و Cd5-Zn0 مشاهده شد.

در مرحله بعد از جوانه‌زنی نشانه‌های سمیت کادمیم و روی در تیمارهای سطوح ۴۰ و ۸۰ mg Cd kg⁻¹ و ۸۰ و ۴۰۰ mg Zn kg⁻¹ به‌صورت کاهش رشد، زردی و بافت‌مردگی در لبه برگ‌ها مشاهده شد. گیاهان این تیمارها ۱۰ تا ۲۰ روز پس از جوانه‌زنی از بین رفتند. تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی کادمیم و روی و نیز اثر متقابل این دو بر وزن خشک بخش‌هوایی (SDW)، وزن خشک ریشه (RDW) و ترکیب شیمیایی این بخش‌ها در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول‌های ۲ و ۳).

مقایسه میانگین‌های وزن خشک بخش‌هوایی برای اثر متقابل کادمیم و روی (شکل ۱) نشان داد که در سطوح ۰/۵ و ۲/۵ mg Cd kg⁻¹ کاربرد روی در

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر روی و کادمیم بر غلظت عناصر و وزن خشک بخش‌هوایی.

میانگین مربعات						درجه آزادی	منبع تغییر
Cu	Mn	Fe	Zn	Cd	SDW		
۱۸/۱**	۶۶۰۷**	۲۸۴۹۵**	۳۸۱**	۳۳۲۲**	۰/۰۸**	۵	کادمیم (Cd)
۱۱۵**	۳۹۱۹۲**	۶۷۸۱**	۵۴۶۴۸**	۷۱/۷**	۰/۱۹**	۵	روی (Zn)
۰/۱۰۲**	۸۷۷**	۶۱۳**	۹۳/۸**	۲۲/۶**	۰/۰۴**	۲۵	Cd×Zn
۰/۰۴	۹/۱۸	۱۳/۴	۴/۱۵	۰/۰۷	۰/۰۰۴	۷۰	خطا
۱/۶۲	۲/۵۴	۲/۰۵	۳/۳۶	۱/۶۶	۱۰/۸		ضریب تغییرات (%)

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنادار، معنادار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر روی و کادمیم بر غلظت عناصر و وزن خشک ریشه.

میانگین مربعات						درجه آزادی	منبع تغییر
Cu	Mn	Fe	Zn	Cd	RWD		
۱۸۲۰**	۳۱۲۴**	۲۴۳۶۳۲۵**	۷۴۸۴**	۵۵۱۵۴**	۰/۰۱**	۵	کادمیم (Cd)
۲۲۶۴**	۴۴۴۲۷**	۸۲۰۵۶۵**	۴۹۷۷۴**	۸۹۱**	۰/۰۲**	۵	روی (Zn)
۲۶/۲**	۶۶۴**	۳۸۸۷۶**	۱۱۰۷**	۲۴۹**	۰/۰۰۲**	۲۵	Cd×Zn
۱/۷۷	۸/۰۵	۳۳۳	۳/۸۷	۲/۴۷	۰/۰۳۴	۷۰	خطا
۴/۱	۲/۵۸	۰/۶۸	۲/۳۸	۳/۴۸	۹/۸		ضریب تغییرات (%)

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنادار، معنادار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

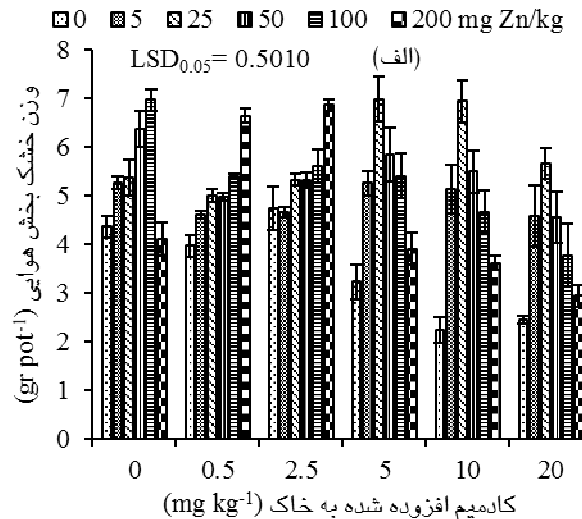
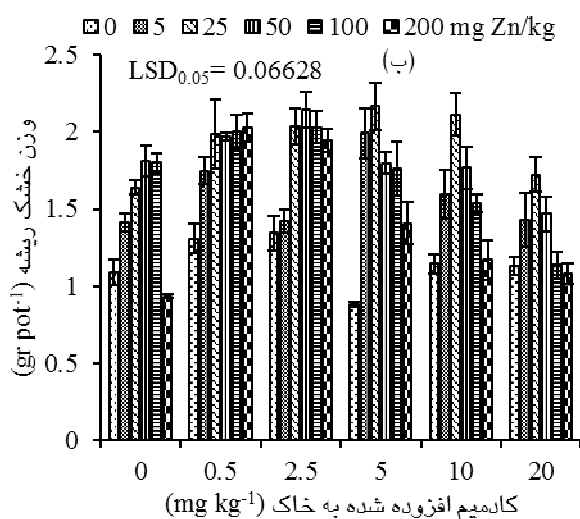
کاربرد 10 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک بخش‌هوایی گوجه فرنگی شده و کاربرد 50 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش وزن خشک بخش‌هوایی گوجه فرنگی گردید. اردم و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که در سطوح $2/5$ و 10 mg Cd kg^{-1} وزن خشک بخش‌هوایی دو رقم گندم نان و گندم دوروم کاهش یافت. کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش وزن خشک بخش‌هوایی در سطح $2/5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ گردید، درحالی‌که همین سطح روی در سطح 10 mg Cd kg^{-1} منجر به کاهش وزن خشک بخش‌هوایی شد. ولیزاده فرد و همکاران (الف ۱۳۹۱) نیز دریافتند که در سطح mg Cd kg^{-1} کاربرد 5 و 10 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش وزن خشک بخش‌هوایی برنج شد. همین سطوح روی در سطح 10 mg Cd kg^{-1} کاهش وزن خشک بخش‌هوایی را به دنبال داشتند.

ولی در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش و کاربرد 10 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش

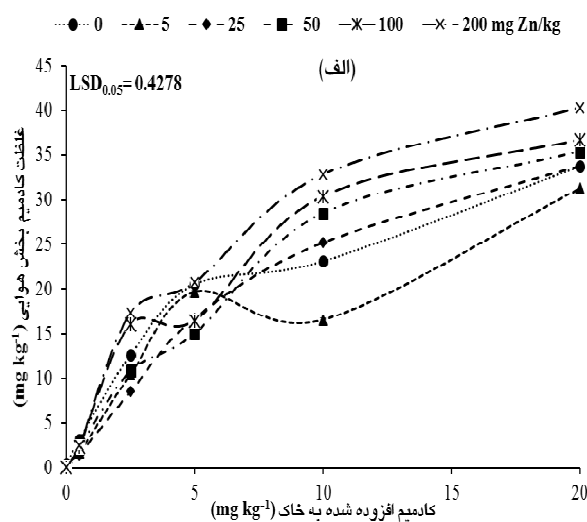
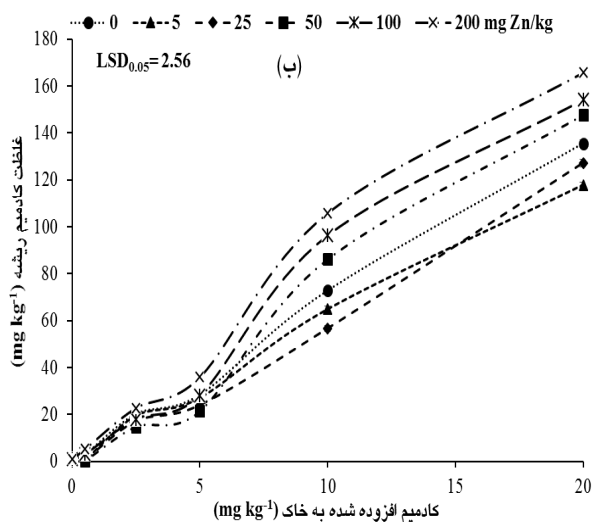
با توجه به نتایج، اثر کادمیم بر وزن خشک بخش‌هوایی و ریشه به سطح روی مصرفی بستگی داشت. به طوری‌که، افزایش سطح روی ابتدا سبب افزایش و سپس باعث کاهش وزن خشک گردید. با این حال، ناروال و همکاران (۱۹۹۳) تأثیر معناداری از کاربرد روی بر عملکرد ذرت را در هیچ‌یک از سطوح کادمیم گزارش نکردند. رحیمی و رونقی (۱۳۹۱) گزارش کردند که در سطوح 5 ، 10 و 20 mg Cd kg^{-1} و عدم مصرف روی، افت وزن خشک در بخش‌هوایی اسفناج در مقایسه با شاهد (Cd0-Zn0) رخ داد، ولی در همین سطوح کادمیم، مصرف 5 ، 10 و 20 mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش وزن خشک بخش‌هوایی اسفناج شد. چریف و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده نمودند که در سطح mg Cd kg^{-1} ، وزن خشک بخش‌هوایی گوجه فرنگی در مقایسه با شاهد کاهش یافت، اما در همین سطح کادمیم، در مورد ریشه، در سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 و 10 mg Zn kg^{-1} وزن خشک ریشه را افزایش داده

flavida شده و در سطوح بالاتر کادمیم، ابتدا افزایش و سپس کاهش وزن خشک هر دو بخش مشاهده شد.

وزن خشک ریشه گردید. جمالی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که کاربرد روی در سطح صفر کادمیم باعث کاهش وزن خشک بخش‌های هوایی و ریشه *Matthiola*



شکل ۱- اثر متقابل کادمیم و روی بر وزن خشک (الف) بخش‌های هوایی و (ب) ریشه.



شکل ۲- اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت کادمیم در (الف) بخش‌های هوایی و (ب) ریشه.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سطوح ۰/۵ تا ۵۰ mg Cd تا ۵۰ mg Zn kg⁻¹ کاربرد ۵ تا ۲۰۰ mg Zn kg⁻¹ باعث کاهش غلظت کادمیم بخش‌های هوایی به میزان ۴ درصد در تیمار Cd5-Zn5 تا ۴۷ درصد در تیمار Cd0.5-Zn5 در مقایسه با سطح صفر روی شد. در همین سطوح کادمیم، کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ mg Zn kg⁻¹ منجر به افزایش غلظت کادمیم

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی کادمیم و روی و اثر متقابل این دو بر غلظت کادمیم، روی، آهن، منگنز و مس در بخش‌های هوایی و ریشه کلزا در سطح احتمال یک درصد معنادار بودند (جدول‌های ۲ و ۳). اثر متقابل روی و کادمیم بر غلظت کادمیم بخش‌های هوایی و ریشه در شکل ۲ نشان داده شده است.

اردم و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که در سطوح ۲/۵ و 10 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} غلظت کادمیم بخش‌هوایی گندم نان و گندم دوروم را کاهش داد. چریف و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد ۱۰ تا $150 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث کاهش غلظت کادمیم برگ‌های گوجه فرنگی شد. ژونگ-کیو و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر روی بر جذب کادمیم توسط گندم بهاره در کشت هیدروپونیک را در بلند مدت (یک ماه) و کوتاه مدت (۲۴ ساعت) مطالعه و گزارش کردند که غلظت کادمیم بخش‌هوایی و ریشه تا سطح روی $200 \mu\text{M}$ تغییر معناداری نکرد، ولی در سطوح بالاتر از آن کاهش یافت. در مقابل، رحیمی و رونقی (۱۳۹۱) مشاهده کردند که در سطح 1 mg Cd kg^{-1} ، ۲۰، استفاده از 20 mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش غلظت کادمیم بخش‌هوایی اسفناج شد. آدیلوقلو و همکاران (۲۰۰۵) در سطوح ۱۰ و 20 mg Cd kg^{-1} ، با کاربرد 10 mg Zn kg^{-1} افزایش چند برابری غلظت کادمیم بخش‌هوایی ذرت را گزارش کردند. ناروال و همکاران (۱۹۹۳) نیز تشدید جذب کادمیم توسط ذرت در حضور روی را گزارش کردند. یکی از دلایل مشاهده چنین نتایج متناقضی می‌تواند تعداد کم سطوح کادمیم و روی در آزمایش باشد. در پژوهش حاضر به دلیل تعداد بیش‌تر سطوح کادمیم و روی هر دو اثر آنتاگونیستی و سینرژیستی ملاحظه گردید. معادلات رگرسیونی برای برآورد غلظت کادمیم بخش‌هوایی و ریشه در سطوح مختلف کادمیم و روی در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. به طوری که ملاحظه می‌شود برای بخش‌هوایی معادله چندجمله‌ای درجه دوم و برای ریشه معادله خطی بهترین برازش را نشان دادند.

بخش‌هوایی گردید، اما در سطوح ۱۰ و 20 mg Cd kg^{-1} ، مصرف 5 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت کادمیم بخش‌هوایی به میزان ۷ درصد در تیمار Cd20-Zn5 تا ۲۸ درصد در تیمار Cd10-Zn5 در مقایسه با سطح صفر روی شد. همچنین، مصرف ۲۵ تا $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث افزایش غلظت کادمیم بخش‌هوایی گردید. در مورد ریشه در سطوح ۰/۵ تا 1 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد ۵ تا 50 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت کادمیم ریشه به میزان ۴ درصد در تیمار Cd5-Zn5 تا ۸۶ درصد در تیمار Cd0.5-Zn50 در مقایسه با سطح صفر روی و کاربرد ۱۰۰ و $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث افزایش آن شد، اما در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، مصرف ۵ و 25 mg Zn kg^{-1} کاهش و مصرف ۵۰ تا $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ افزایش غلظت کادمیم ریشه را به دنبال داشت. در سطح 1 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت کادمیم ریشه شده و در مقادیر بیش‌تر مصرف روی، افزایش غلظت کادمیم ریشه را به دنبال داشت. بیش‌ترین غلظت کادمیم بخش‌هوایی و ریشه به ترتیب ۴۰/۳ و 1 mg kg^{-1} در تیمار Cd20-Zn200 بود. کم‌ترین غلظت کادمیم بخش‌هوایی 0.6 mg kg^{-1} در تیمار Cd0-Zn200 و کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه 0.17 mg kg^{-1} در تیمار Cd0-Zn5 مشاهده شد. نتایج بیانگر آن بود که در تمامی سطوح کادمیم، کاربرد مقادیر کم روی از انباشت کادمیم در بخش‌هوایی جلوگیری کرد، ولی مصرف مقادیر بیش‌تر روی باعث تشدید تجمع کادمیم گردید. در مورد ریشه، در سطوح پایین کادمیم، کاربرد مقادیر زیاد روی قادر به مهار انباشت کادمیم در ریشه بود، ولی در سطوح بالای کادمیم، حتی مقادیر کم روی نیز نه تنها قادر به کاهش انباشت کادمیم در ریشه نبود بلکه آن را تشدید کرد.

جدول ۴- معادلات برآورد غلظت کادمیم بخش‌هوایی (mg kg^{-1}) در سطوح صفر تا 20 mg Cd kg^{-1} و سطوح مختلف روی.

r^2	معادله	Zn (mg kg^{-1})
۰/۹۵۲*	$\text{Cd}_s = -0.0906\text{Cd}^2 + 3.3402\text{Cd} + 2.4919$	۰
۰/۸۸۴*	$\text{Cd}_s = -0.0554\text{Cd}^2 + 2.5032\text{Cd} + 2.4153$	۵
۰/۹۹۷**	$\text{Cd}_s = -0.092\text{Cd}^2 + 3.5077\text{Cd} + 0.2527$	۲۵
۰/۹۹۴**	$\text{Cd}_s = -0.0997\text{Cd}^2 + 3.7414\text{Cd} + 0.4768$	۵۰
۰/۹۶۶**	$\text{Cd}_s = -0.1161\text{Cd}^2 + 4.0755\text{Cd} + 1.4806$	۱۰۰
۰/۹۷۵**	$\text{Cd}_s = -0.1352\text{Cd}^2 + 4.6149\text{Cd} + 1.7294$	۲۰۰

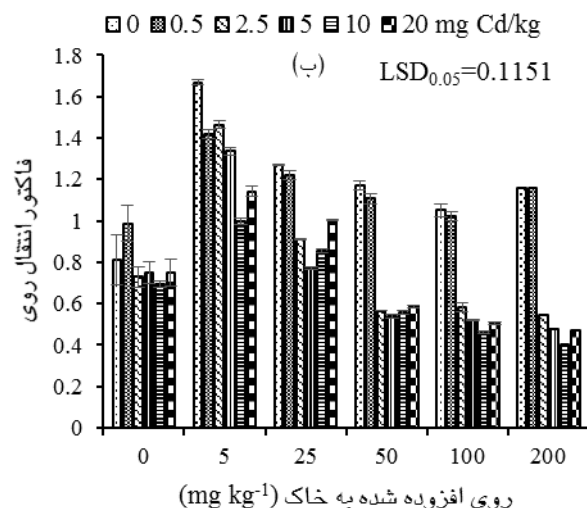
جدول ۵- معادلات برآورد غلظت کادمیم ریشه (mg kg^{-1}) در سطوح صفر تا 20 mg Cd kg^{-1} و سطوح مختلف روی.

r^2	معادله	Zn (mg kg^{-1})
۰/۹۹۵**	$\text{Cd}_r = 6.8049\text{Cd} + 0.4091$	۰
۰/۹۹۵**	$\text{Cd}_r = 5.9509\text{Cd} + 0.7937$	۵
۰/۹۹۸**	$\text{Cd}_r = 6.3304\text{Cd} - 2.4495$	۲۵
۰/۹۷۹**	$\text{Cd}_r = 7.7058\text{Cd} - 3.6406$	۵۰
۰/۹۸۰**	$\text{Cd}_r = 8.0088\text{Cd} - 0.6197$	۱۰۰
۰/۹۸۵**	$\text{Cd}_r = 8.5303\text{Cd} + 2.0509$	۲۰۰

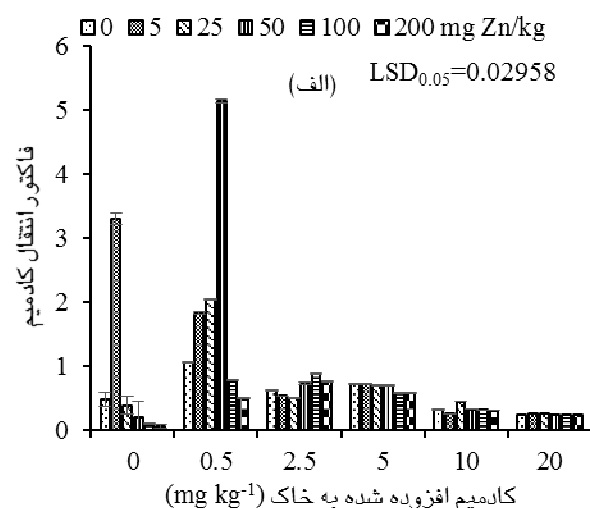
کادمیم گردید. بیش‌ترین مقادیر فاکتور انتقال روی در سطح 5 mg Zn kg^{-1} مشاهده شد. در سطح صفر روی، سطح $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ ، فاکتور انتقال روی را افزایش داد ولی در سطوح بالاتر کادمیم این فاکتور کاهش یافت که اختلاف معناداری با سطح صفر کادمیم نداشت. در سطح 5 mg Zn kg^{-1} ، سطح $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ باعث کاهش فاکتور انتقال روی شده و سطح $2/5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ باعث افزایش فاکتور انتقال روی شد. در همین سطح روی، سطوح ۵ و 10 mg Cd kg^{-1} منجر به کاهش فاکتور انتقال روی و سطح 20 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش این فاکتور شدند. در سطوح ۲۵ و 50 mg Zn kg^{-1} ، سطوح ۰/۵ تا 5 mg Cd kg^{-1} فاکتور انتقال روی را کاهش داد و سطوح بالاتر کادمیم باعث افزایش این فاکتور شدند. در سطوح ۱۰۰ و $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ ، سطوح کادمیم به‌استثنای سطح $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ منجر به کاهش فاکتور انتقال روی شدند و سطح 20 mg Cd kg^{-1} این فاکتور را افزایش داد. به‌طورکلی، حضور کادمیم باعث کاهش فاکتور انتقال روی شد که توسط هان و همکاران

اثر متقابل کادمیم و روی بر مقادیر فاکتور انتقال کادمیم در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط فاکتور انتقال کادمیم و روی برای کلیه تیمارها به‌ترتیب $0.7/1$ و $0.8/79$ برآورد گردید. همان‌طورکه مشاهده می‌شود فاکتور انتقال کادمیم کم‌تر از فاکتور انتقال روی بود که توسط نان و همکاران (۲۰۰۲) نیز گزارش شده است. بیش‌ترین مقادیر فاکتور انتقال کادمیم در سطح 5 mg Cd kg^{-1} مشاهده شد. در سطوح صفر و 5 mg Cd kg^{-1} ، فاکتور انتقال کادمیم با افزایش کاربرد روی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش یافت. هان و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که حضور روی، انتقال کادمیم از ریشه به برگ‌ها و ساقه را تحریک کرد. با مصرف روی در تیمار $\text{Cd}_0\text{-Zn}_5$ ، غلظت کادمیم ریشه کاهش یافته و غلظت کادمیم بخش‌هوایی افزایش یافت، لذا فاکتور انتقال کادمیم در این تیمار خیلی بزرگ‌تر از تیمار $\text{Cd}_0\text{-Zn}_0$ بود. در مقادیر بیش‌تر روی مصرفی، روند کاهش غلظت کادمیم بخش‌هوایی و روند افزایشی غلظت کادمیم ریشه اتفاق افتاد که منجر به کاهش فاکتور انتقال

(کوللی و همکاران ۲۰۰۴، اولیور و همکاران ۱۹۹۷). لذا، همزمان تجمع کادمیم در ریشه نیز تشدید می‌شود. با مصرف روی به میزان 5 mg Zn kg^{-1} از تجمع کادمیم در ریشه کاسته شده ($0.165 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) و انتقال آن به بخش‌هوایی افزایش یافت.



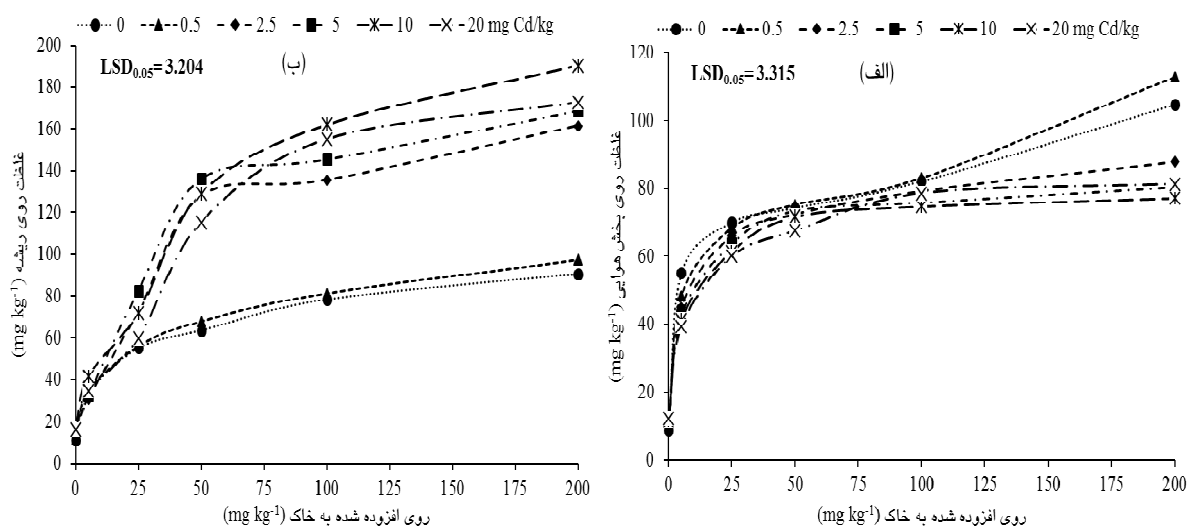
(۲۰۱۰) نیز گزارش شده است. علت کوچک بودن فاکتور انتقال کادمیم در تیمار Cd0-Zn0، غلظت زیاد کادمیم ریشه ($0.908 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) بود. گزارش شده است که وقتی گیاه با کمبود روی مواجه است رهاسازی سایدروفورها برای افزایش جذب روی افزایش می‌یابد



شکل ۳- اثر متقابل کادمیم و روی بر فاکتور انتقال الف) کادمیم و ب) روی.

می‌باشد؛ به طوری‌که، در سطوح مذکور روی، سطوح صفر و $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ بیشترین غلظت روی بخش‌هوایی و کمترین غلظت روی ریشه را در مقایسه با سطوح بالاتر کادمیم نشان دادند. در سطح صفر روی، سطح $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ باعث افزایش غلظت روی بخش‌هوایی شده و در سطوح بالاتر کادمیم تغییرات معنادار نبود. در سطوح ۵ تا 50 mg Zn kg^{-1} ، کلیه سطوح کادمیم (به استثنای $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) باعث کاهش غلظت روی بخش‌هوایی شدند. در سطح $100 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ نیز کلیه سطوح کادمیم (به استثنای $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$) منجر به کاهش غلظت روی بخش‌هوایی شدند، با این تفاوت که در سطح 20 mg Cd kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی افزایش یافت. در سطح $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ ، سطح $0.5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ باعث افزایش غلظت روی بخش‌هوایی شده و سطوح $2/5$ تا 10 mg Cd kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی را کاهش دادند. در سطح 1 mg Cd kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی افزایش یافت.

مصرف مقادیر بیشتر روی باعث کاهش رهاسازی سایدروفورها و ایجاد رقابت در جذب شده و باعث کاهش جذب کادمیم شد. میزان جذب کادمیم در تیمارهای Cd0-Zn5 و Cd0-Zn0 تقریباً یکسان (به طور متوسط $0.370 \mu\text{g pot}^{-1}$) ولی در تیمار Cd0-Zn5 (0.164 pot^{-1}) کمتر از نصف این مقدار بود. در سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، فاکتور انتقال کادمیم در کلیه مقادیر روی مصرفی بیشتر از سطح صفر کادمیم بود که علت اصلی آن افزایش غلظت کادمیم بخش‌هوایی بود. در سطوح بالاتر کادمیم، به دلیل تجمع خیلی زیاد کادمیم در ریشه ($19.72 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ در تیمار Cd2.5-Zn5)، فاکتور انتقال کادمیم در کلیه مقادیر مصرفی روی به شدت کاهش یافت. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل روی و کادمیم بر غلظت روی بخش‌هوایی در شکل ۴ نشان داده شده است. این شکل نشان‌دهنده تأثیر قابل‌ملاحظه سطوح کادمیم بر غلظت روی در $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ در مورد بخش‌هوایی و در 50 mg Zn kg^{-1} در مورد ریشه



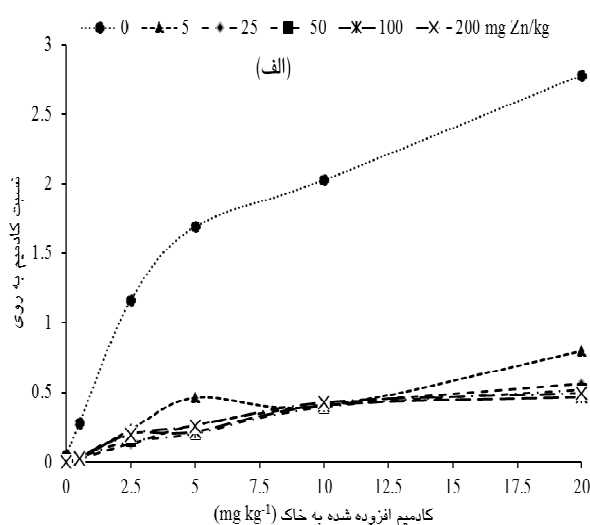
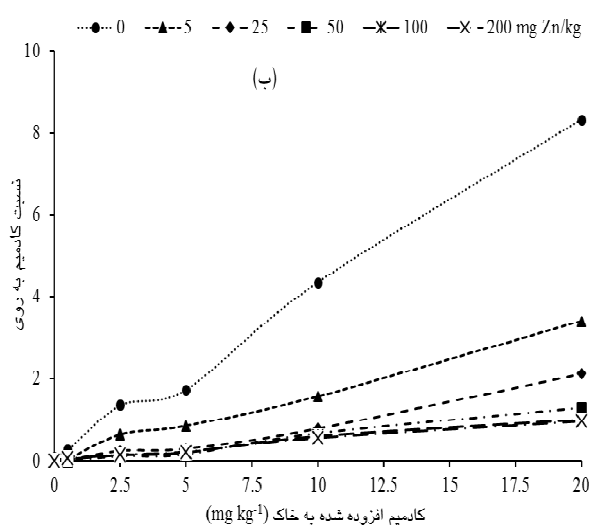
شکل ۴- اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت روی الف) بخش‌هوایی و ب) ریشه.

سطوح ۱۰ تا $150 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ ، سطح 10 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت روی در برگ‌های گوجه فرنگی شد. ادیلوقلو و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که در سطوح 10 mg Cd kg^{-1} و 20 mg Zn kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی نرت کاهش یافت. در همین سطوح کادمیم، مصرف 10 mg Zn kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی را افزایش داد. اردم و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که در سطوح $2/5 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ و 10 mg Zn kg^{-1} غلظت روی بخش‌هوایی گندم نان و گندم دوروم کاهش یافته و با کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} افزایش یافت. اثر متقابل کادمیم و روی بر نسبت کادمیم به روی (Cd/Zn) در بخش‌هوایی و ریشه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سطح صفر روی، نسبت کادمیم به روی بخش‌هوایی و ریشه برای تمامی سطوح کادمیم، بیش‌تر از سایر سطوح روی بود. این تفاوت در بخش‌هوایی به‌مراتب بیش‌تر از ریشه بود. موس‌تاکاس و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند که کاربرد روی در کلیه سطوح کادمیم، باعث کاهش نسبت Cd/Zn گردید. اثر متقابل روی و کادمیم بر غلظت آهن بخش‌هوایی و ریشه در شکل ۶ نشان داده شده است. به‌طوری که ملاحظه می‌شود، تا سطح 1 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد ۵ تا $100 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث افزایش غلظت آهن

در مورد ریشه، در سطح صفر روی، سطح 1 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت روی ریشه شده و در سطوح بالاتر کادمیم تغییرات معنادار نبود. در سطح 5 mg Zn kg^{-1} ، روند منظمی مشاهده نگردید. در سطوح 25 mg Zn kg^{-1} و 50 mg Zn kg^{-1} ، سطح $0/5$ تا 5 mg Cd kg^{-1} باعث افزایش غلظت روی ریشه (بیشینه ۱۱۴ درصد در تیمار Cd5-Zn50) در مقایسه با سطح صفر کادمیم شد. در همین سطوح روی، سطوح 10 و 20 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت روی ریشه شدند. در سطوح 100 و $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ ، سطح $0/5$ تا 10 mg Cd kg^{-1} غلظت روی ریشه را (بیشینه ۱۱۰ درصد در تیمار Cd10-Zn200) در مقایسه با سطح صفر کادمیم افزایش داد. در همین سطوح روی، سطوح 20 mg Cd kg^{-1} منجر به کاهش غلظت روی ریشه شد. بیش‌ترین غلظت روی در بخش‌هوایی و ریشه به‌ترتیب $112/8$ و $190/3 \text{ mg kg}^{-1}$ در تیمارهای Cd0.5-Zn200 و Cd10-Zn200 مشاهده شد. کم‌ترین غلظت روی در بخش‌هوایی و ریشه به‌ترتیب $11/6$ و $11/6 \text{ mg kg}^{-1}$ در تیمارهای Cd2.5-Zn0 و Cd0.5-Zn0 مشاهده شد. رحیمی و رونقی (۱۳۹۱) مشاهده کردند که در سطوح 5 ، 10 و 20 mg Zn kg^{-1} ، سطح 5 و 10 mg Cd kg^{-1} باعث کاهش غلظت روی بخش‌هوایی اسفناج شدند. چریف و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که در

بخش‌هوایی (بیشینه ۴۰ درصد در تیمار Cd5-Zn5) در

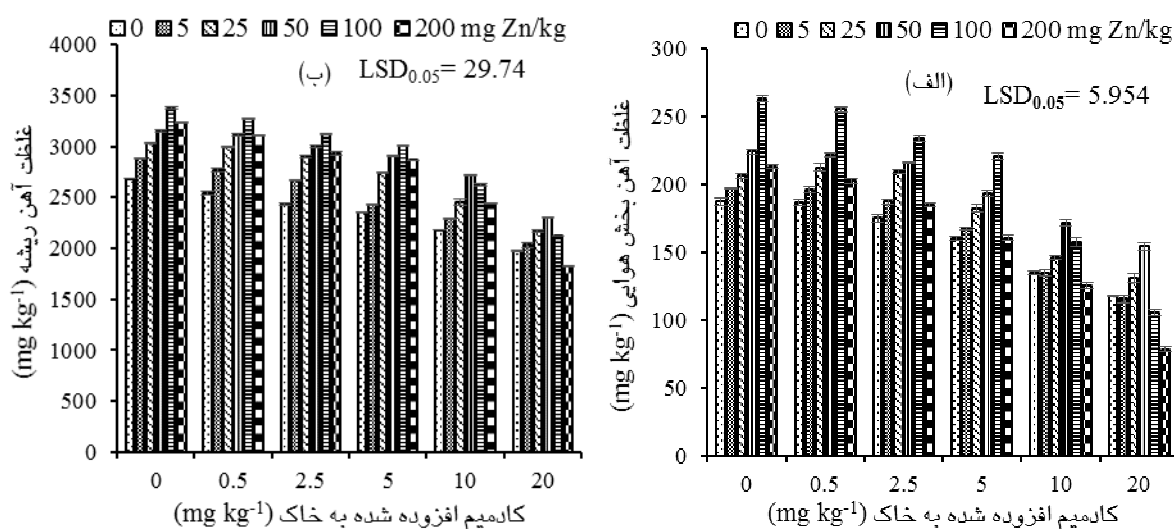
مقایسه با سطح صفر روی شد.



شکل ۵- اثر متقابل کادمیم و روی بر نسبت کادمیم به روی (الف) بخش‌هوایی و (ب) ریشه.

افزایش غلظت آهن ریشه (بیشینه ۲۵ درصد در تیمار Cd10-Zn50) در مقایسه با سطح صفر روی شد. در همین سطح کادمیم، کاربرد ۱۰۰ و $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ موجب کاهش غلظت آهن ریشه شد. بیشترین غلظت آهن در بخش‌هوایی و ریشه به ترتیب 263 mg kg^{-1} و 3378 mg kg^{-1} ، هر دو در تیمار Cd0-Zn100 بود. کمترین غلظت آهن در بخش‌هوایی و ریشه به ترتیب $78/1$ و 1826 mg kg^{-1} ، هر دو در تیمار Cd20-Zn200 بود. با توجه به نتایج، کاربرد روی در سطوح پایین باعث افزایش غلظت آهن بخش‌هوایی و ریشه شده و در سطوح بالا آن را کاهش داد. با توجه به افزایش ماده خشک بخش‌هوایی و ریشه در سطوح پایین روی، به نظر می‌رسد که کاربرد روی در این سطوح باعث افزایش جذب آهن شده است. به همین ترتیب، سطوح بالاتر روی باعث کاهش جذب آهن شده است.

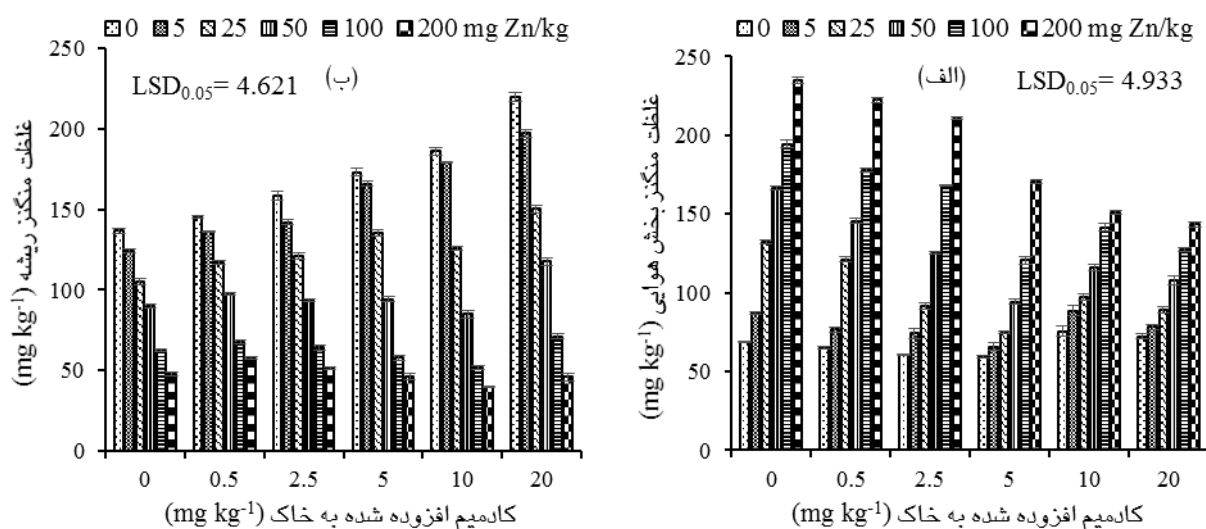
در همین سطوح کادمیم، کاربرد $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ منجر به کاهش غلظت آهن بخش‌هوایی شد. در سطوح 10 mg Cd kg^{-1} و 20 mg Cd kg^{-1} ، مصرف 5 mg Zn kg^{-1} تغییر معناداری در غلظت آهن بخش‌هوایی ایجاد نکرد، اما در همین سطوح کادمیم، مصرف 25 و 50 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت آهن بخش‌هوایی (بیشینه ۲۷ درصد در تیمار Cd10-Zn50) در مقایسه با سطح صفر روی شد. در همین سطوح کادمیم، کاربرد 100 و $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ موجب کاهش غلظت آهن بخش‌هوایی شد. در مورد ریشه، تا سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 تا $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث افزایش غلظت آهن ریشه (بیشینه ۲۶ درصد در تیمار Cd0-Zn100) در مقایسه با سطح صفر روی شد. در همین سطوح کادمیم، کاربرد $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ منجر به کاهش غلظت آهن ریشه شد. در سطوح 10 و 20 mg Cd kg^{-1} ، مصرف 5 تا $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ باعث



شکل ۶- اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت آهن (الف) بخش‌های (ب) ریشه.

ملاحظه می‌شود، در تمامی سطوح کادمیم، کاربرد روی باعث افزایش غلظت منگنز بخش‌های (بیشینه ۲۴۲ درصد در تیمار Cd0-Zn200) در مقایسه با سطح صفر روی شد. با توجه به افزایش ماده خشک در سطوح پایین روی، این افزایش ممکن است به جذب بیشتر منگنز در این سطوح مربوط باشد. ولی در سطوح بالاتر روی که ماده خشک کاهش یافت، علت افزایش غلظت منگنز بخش‌های (ب) را می‌توان اثر تغلیظ دانست. نکته حایز اهمیت این است که با افزایش سطح کادمیم، اثر مثبت کاربرد روی بر افزایش غلظت منگنز بخش‌های (ب) روندی کاهشی داشت. اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت منگنز ریشه برعکس بخش‌های (ب) بود، به طوری که در تمامی سطوح کادمیم، کاربرد روی باعث کاهش غلظت منگنز ریشه و افزایش شدید فاکتور انتقال منگنز گردید. ممکن است روی باعث رهاسازی منگنز از ریشه و انتقال آن به بخش‌های (ب) شده باشد. منگنز در بین فلزات مورد بررسی در این پژوهش دارای بیشترین میانگین فاکتور انتقال (۱/۵۷۹) بود. بیشترین غلظت منگنز در بخش‌های (ب) در تیمار Cd0-Zn200 و در ریشه ۲۳۵ mg kg⁻¹ در تیمار Cd20-Zn0 و در ریشه ۲۱۹ mg kg⁻¹ در تیمار Cd20-Zn0 بود. کمترین غلظت منگنز در بخش‌های (ب) ۵۹/۵ mg kg⁻¹ در تیمار Cd5-Zn0 و در ریشه ۳۹/۹ mg kg⁻¹ در تیمار Cd10-Zn200 مشاهده شد.

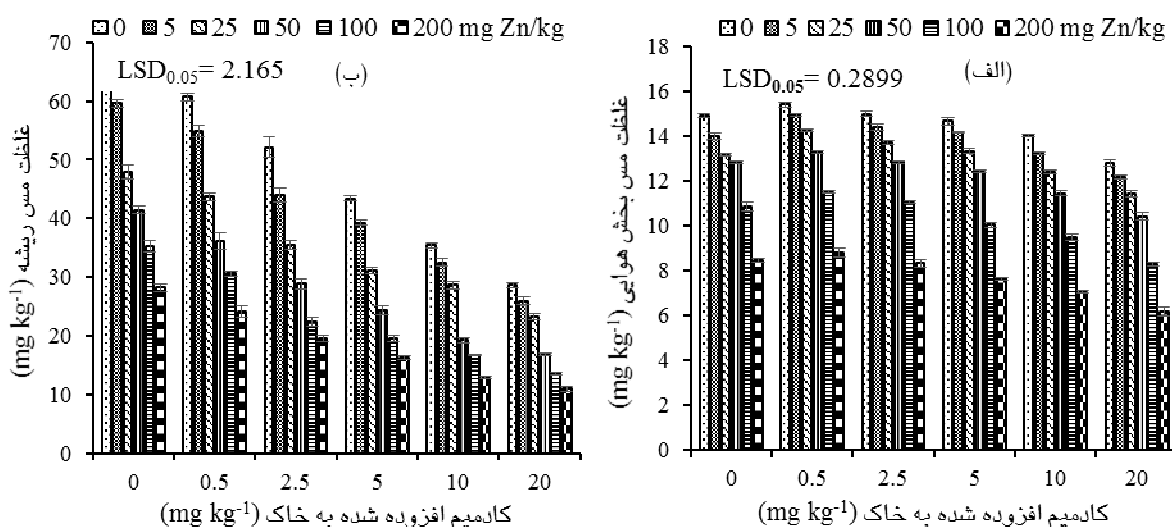
آهن دارای کمترین میانگین فاکتور انتقال (۰/۰۶۶) در بین فلزات مورد بررسی در این پژوهش بود. آهن از طریق ایجاد پایداری در ساختار پروتئین‌های پیچیده و کلروپلاست‌ها تنش کادمیم را کاهش می‌دهد (قریشی و همکاران ۲۰۱۰). پورتمن (۲۰۱۲) گزارش کرد که حضور روی تأثیر معناداری بر غلظت آهن بذر گندم در تنش کادمیم نداشت. برخی پژوهشگران اثر منفی کادمیم بر غلظت آهن بخش‌های (ب) را گزارش کرده (صفرزاده و همکاران ۲۰۱۳) و برخی دیگر آن را مشاهده نکردند (رحیمی و رونقی ۱۳۹۱). اثر مثبت کادمیم بر غلظت آهن ریشه (اسکربسکی و همکاران ۲۰۰۸) و عدم تأثیر آن (صفرزاده و همکاران ۲۰۱۳) نیز گزارش شده است. ولیزاده فرد و همکاران (الف ۱۳۹۱) مشاهده کردند که غلظت آهن بخش‌های (ب) برنج در سطح ۵ mg Cd kg⁻¹، با کاربرد ۵ mg Zn kg⁻¹ افزایش و با کاربرد ۱۰ mg Zn kg⁻¹ کاهش یافت. در سطح ۱۰ mg Cd kg⁻¹، کاربرد ۵ mg Zn kg⁻¹ باعث کاهش و کاربرد ۱۰ mg Zn kg⁻¹ باعث افزایش غلظت آهن بخش‌های (ب) گردید. در مورد ریشه، در سطح ۱۰ mg Cd kg⁻¹ مصرف ۵ mg Zn kg⁻¹ باعث کاهش غلظت آهن ریشه گردید و در سطح ۱۰ mg Cd kg⁻¹ کاربرد هر دو سطح روی منجر به افزایش غلظت آهن ریشه شد. اثر متقابل روی و کادمیم بر غلظت منگنز بخش‌های (ب) ریشه در شکل ۷ نشان داده شده است. به طوری که



شکل ۷- اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت منگنز الف) بخش هوایی و ب) ریشه.

به استثنای $200 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ فاکتور انتقال مس را در تمامی سطوح کادمیم افزایش دادند. میانگین فاکتور انتقال مس برای کلیه تیمارها 0.410 بود. بیشترین غلظت مس در بخش هوایی $15/4 \text{ mg kg}^{-1}$ در تیمار $\text{Cd}0.5\text{-Zn}0$ و در ریشه $60/7 \text{ mg kg}^{-1}$ در تیمار شاهد بود. کمترین غلظت مس در بخش هوایی و ریشه به ترتیب $6/2$ و 11 mg kg^{-1} بود که هر دو مربوط به تیمار $\text{Cd}20\text{-Zn}200$ بودند. برخی پژوهشگران کاهش غلظت مس بخش هوایی (خورانا و جانجی ۲۰۱۴) و ریشه (صفرزاده و همکاران ۲۰۱۳) گیاه را در حضور کادمیم گزارش کردند. در مقابل، در برخی پژوهشها نیز اثر معناداری مشاهده نگردید (اسکربسکی و همکاران ۲۰۰۸). اثر مثبت کادمیم بر غلظت مس بخش هوایی ذرت نیز گزارش شده است (نان و همکاران ۲۰۰۲). ولیزاده فرد و همکاران (ب) ۱۳۹۱ مشاهده کردند که در سطح 5 mg Cd kg^{-1} کاربرد 5 و 10 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت مس بخش هوایی برنج شد. در سطح 10 mg Cd kg^{-1} نیز کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت مس بخش هوایی برنج گردید.

گزارش شده است که کادمیم غلظت منگنز بخش هوایی گیاه را کاهش داد (چیزولا ۲۰۱۱، خورانا و جانجی ۲۰۱۴، صفرزاده و همکاران ۲۰۱۳). نتایج مشابهی نیز برای غلظت منگنز ریشه مشاهده شده است (صفرزاده و همکاران ۲۰۱۳). بالین حال، ولیزاده فرد و همکاران (الف) ۱۳۹۱ دریافتند که غلظت منگنز بخش هوایی برنج در سطح 5 mg Cd kg^{-1} با کاربرد سطوح 5 و 10 mg Zn kg^{-1} کاهش و در سطح 10 mg Cd kg^{-1} با کاربرد سطوح 5 و 10 mg Zn kg^{-1} کاهش یافت. آنان گزارش نمودند در ریشه در سطح 5 mg Cd kg^{-1} مصرف 5 و 10 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت منگنز ریشه و در سطح 10 mg Cd kg^{-1} مصرف 5 و 10 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت منگنز ریشه شد. اثر متقابل روی و کادمیم بر غلظت مس بخش هوایی و ریشه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در تمامی سطوح کادمیم، کاربرد سطوح مختلف روی باعث کاهش غلظت مس هر دو بخش هوایی و ریشه شد. این امر را می توان با توجه به روند افزایشی ماده خشک به اثر رقت و یا ممانعت روی از جذب مس توسط کلزا نسبت داد. کلیه سطوح روی



شکل ۸- اثر متقابل کادمیم و روی بر غلظت مس (الف) بخش‌هوایی و (ب) ریشه.

همچنین گزارش نمودند که در سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، مصرف 5 mg Zn kg^{-1} منجر به کاهش غلظت مس ریشه برنج شده و مصرف 10 mg Zn kg^{-1} این غلظت را افزایش داد، ولی در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد هر دو سطح روی باعث کاهش غلظت مس ریشه شد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که آستانه تحمل اکولوژیکی کلزا به کادمیم و روی به ترتیب 40 mg Cd kg^{-1} و $400 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ بود. همچنین، سطحی از روی که بر وزن خشک بخش‌هوایی گیاهان در معرض کادمیم تأثیر مثبت داشت، با افزایش سطح کادمیم کاهش یافت. در تمامی سطوح کادمیم، کاربرد مقادیر کم روی از انباشت کادمیم در بخش‌هوایی جلوگیری کرد، ولی مصرف مقادیر بیشتر روی باعث تشدید تجمع کادمیم گردید. در سطوح بالای روی، پایین‌ترین سطوح کادمیم بیش‌ترین غلظت روی بخش‌هوایی و کم‌ترین غلظت روی ریشه را در مقایسه با سطوح بالاتر کادمیم نشان دادند. فاکتور انتقال هر دو فلز کادمیم و روی با افزایش سطح آنها ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. مصرف روی در کلیه سطح کادمیم، ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش غلظت آهن بخش‌هوایی گردید. کاربرد روی در

بالین‌حال، در این سطح کادمیم، کاربرد 10 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت مس بخش‌هوایی شد. آنان همچنین گزارش نمودند که در سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، مصرف 5 mg Zn kg^{-1} منجر به کاهش غلظت مس ریشه شده و مصرف 10 mg Zn kg^{-1} منجر به افزایش آن گردید. در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد هر دو سطح روی باعث کاهش غلظت مس ریشه شد. ایمتیاز و همکاران (۲۰۰۳) گزارش نمودند که با کاربرد 5 mg Zn L^{-1} ، غلظت مس بخش‌هوایی گندم در مرحله اول کاهش یافت، اما در ریشه در مرحله اول رشد، غلظت مس کاهش یافت. آنان همچنین مشاهده کردند که در طی مرحله دوم رشد غلظت مس بخش‌هوایی و ریشه با کاربرد 5 و 10 mg Zn L^{-1} افزایش و با کاربرد 15 و 20 mg Zn L^{-1} کاهش یافت. این پژوهشگران مشاهده نمودند که بیش‌ترین غلظت مس در شرایط عدم مصرف روی رخ داد. همچنین، ریشه بیش‌ترین غلظت مس را نسبت به بخش‌هوایی داشت. ولیزاده فرد و همکاران (۱۳۹۱) مشاهده کردند که در سطح 5 mg Cd kg^{-1} ، کاربرد 5 و 10 mg Zn kg^{-1} باعث کاهش غلظت مس بخش‌هوایی برنج شده و در سطح 10 mg Cd kg^{-1} ، با کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} این روند کاهشی ادامه یافت و کاربرد 5 mg Zn kg^{-1} باعث افزایش غلظت مس بخش‌هوایی گردید. آنان

کلیه سطوح کادمیم باعث افزایش غلظت منگنز و کاهش غلظت مس بخش‌های هوایی شد.

منابع مورد استفاده

- رحیمی ط و رونقی ع، ۱۳۹۱. اثر کاربرد منابع مختلف روی بر غلظت کادمیم و برخی عناصر کم مصرف در گیاه اسفناج در یک خاک آهکی. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، جلد ۳، شماره ۱۰، صفحه‌های ۱۰۱ تا ۱۱۱.
- رونقی ع‌ام و مفتون م، ۱۳۸۵. هیدروپونیک: راهنمای عملی برای پرورش‌دهندگان کشت بدون خاک (ترجمه). انتشارات دانشگاه شیراز. شیراز.
- ولیزاده فرد ف، ریحانی تبارع، نجفی ن و اوستان ش، ۱۳۹۱ الف. اثر مصرف توأم کادمیم و روی در یک خاک آهکی بر جذب عناصر فسفر، مس، آهن و منگنز توسط دو رقم برنج در شرایط غرقاب و غیرغرقاب. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۱، شماره ۴۳، صفحه‌های ۲۰۷ تا ۲۱۹.
- ولیزاده فرد ف، ریحانی تبارع، نجفی ن اوستان ش، ۱۳۹۱ ب. تأثیر مصرف توأم کادمیم و روی بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج و غلظت روی، کادمیم، آهن و منگنز خاک در دو شرایط رطوبتی غرقاب و غیرغرقاب. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۳، شماره ۴۳، صفحه‌های ۱۹۵ تا ۲۰۵.
- Adiloglu A, Adiloglu S, Gonulsuz E and Oner N, 2005. Effect of Zn application on Cd uptake of maize grown in Zn deficient soil. *Pakistan J Bio Sci* 8(1): 10-12.
- Alcantara E, Romera FJ, Canete M and De la Guardia MD, 1994. Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe (III) reductase in Fe-deficient cucumber *Cucumis sativus* L. *Plants. J Exp Bot* 45: 1893-1898.
- Allison LE and Moodie CD, 1965. Carbonate. Pp. 1379-1396. In: Black CA (eds.). *Methods of Soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Alloway BJ, 1995. *Heavy Metals in Soils*. 2nd ed. Blackie Academic & Professional Publishers, London.
- Alloway BJ, 2008. *Zn in Soils and Crop Nutrition*. 2nd ed. Published by IZA and IFA, France.
- Aravind P and Prasad MNV, 2003. Zn alleviates Cd-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: A free floating freshwater macrophyte. *Plant Physiol Biochem* 41: 391-397.
- 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. *Environ Pollut* 104(2): 225-233.
- Bower CA, 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci* 73: 251-261.
- Burton KW, King JB and Morgan E, 1986. Chlorophyll as an indicator of the upper critical tissue concentration of Cd in plants. *Water Air Soil Poll* 27: 147-154.
- Cakmak I, Welch RM, Erenoglu B, Römheld V, Norvell WA and Kochian LV, 2000. Influence of varied Zn Supply on re-translocation of Cd (¹⁰⁹Cd) and rubidium (⁸⁶Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings. *Plant Soil* 219: 279-284.
- Cataldo DA and Wildung RE, 1978. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Environ Health Perspect* 27: 149-159.
- Cherif J, Mediouni C, Ammar WB and Jemal F, 2011. Interactions of Zn and Cd toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solsnum lycopersicum*). *J Environ Sci* 23(5): 837-844.
- Chizzola R, 2001. Micronutrient composition of *Papaver somniferum* L. grown under low Cd stress conditions. *J Plant Nutr* 24(11): 1663-1677.
- Ciecko Z, Kalembsa S, Wyszowski M and Rolka E, 2004. Effect of soil contamination by Cd on potassium uptake by plants. *Polish J Environ Studies* 13(3): 333-337.
- Das P, Samantaray S and Rout GR, 1997. Studies on Cd toxicity in crops: A review. *Environ Pollut* 98(1): 29-36.
- Davis RD and Beckett PHT, 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 Zn in young barley and ryegrass. *New phytol* 80: 23-32.
- Dong J, Wu F and Zhang G, 2006. Influence of Cd on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere* 64(10): 1659-1666.
- Erdam H, Tosun YK and Ozturk M, 2012. Effect of Cd-Zn interactions on growth and Cd-Zn concentration in durum and bread wheats. *Fresenius Environ Bulletin* 21(5): 1046-1051.
- Fontes RLF and Cox FR, 1998. Zn toxicity in soybean grown at high iron concentration in nutrient solution. *J Plant Nutr* 21(8): 1723-1730.

- Gao X and Grant CA, 2012. Cd and Zn concentration in grain of durum wheat in relation to phosphorus fertilization, crop sequence and tillage management. *App Environ Soil Sci* 2012: 1-10.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particle-size analysis. Pp. 383-411. In: Klute A (eds). *Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Gilmor JT and Kittrick JA, 1979. Solubility and equilibria of Zn in a flooded soil. *Soil Sci Soc Am J* 43(5): 890-892.
- Goyer RA, 1997. Toxic and essential metal interactions. *Annu Rev Nutr* 17: 37-50.
- Han SH, Kim DH and Lee JC, 2010. Cd and Zn interaction and phytoremediation potential of seven salix caprea clones. *J Ecol Field Biol* 33(3): 245-251.
- Hart JJ, Welch RM, Norvell WA and Kochia LV, 2002. Transport interaction between Cd and Zn in roots of bread wheat and durum wheat seedlings. *Physiol Plant* 116(1): 73-78.
- Imtiaz M, Alloway BJ, Shah KH, Siddiqui SH, Memon MY, Aslam M and Khan P, 2003. Zn nutrition of wheat: II: Interaction of Zn with other trace elements. *Asian J Plant Sci* 2(2): 156-160.
- Jamali N, Ghaderian SM and Karimi N, 2014. Effects of Cd and Zn on growth and metal accumulation of *Mathiola flavida* boiss. *Environ Eng Manag J* 13(12): 2937-2944.
- Jones BJ, 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, LLC, USA.
- Klute A, 1986. Water retention: laboratory methods. Pp. 635-660. In: Klute A (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Knudsen D, Peterson GA and Pratt PF, 1982. Lithium, sodium, and potassium. Pp. 225-246. In: Page AL (eds). *Method of Soil Analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Koleli N, Eker S and Cakmak I, 2004. Effect of Zn fertilization on Cd toxicity in durum and bread wheat in Zn deficient soil. *Environ Pollut* 131(3): 453-459.
- Kerkeb L and Kramer U, 2003. The role of free histidine in xylem loading nickel in *Alyssum lesbiacum* and *Brassica Juncea*. *Plant Physiol* 131: 716-724.
- Kuo S, 1996. Phosphorus. Pp. 869-919. In: Sparks DL (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Khurana MPS and Jhanji S, 2014. Influence of Cd on dry matter yield, micronutrient content and its uptake in some soils. *J Environ Biol* 35: 865-870.
- Lagriffoul A, Mocquot B, Mench M and Vangronsveld J, 1998. Cd toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). *Plant Soil* 200: 241-250.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of a DTPA soil test for Zn, iron, manganese and copper. *Soil Sci Soc Am J* 42(3): 421-428.
- Liu WJ, Zhu YG and Smith FA, 2005. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite. *Plant Soil* 277: 127-138.
- Macnicol RD and Beckett PHT, 1985. Critical tissue concentration of potentially toxic elements. *Plant Soil* 85: 107-129.
- Marschner H, 1986. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic press, 2nd ed. institute of Plant Nutrition, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany.
- McBride MB, 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press, Oxford.
- McKenna IM, Chaney RL and Williams FM, 1993. The effects of Cd and Zn interactions on the accumulation and tissue distribution of Zn and Cd in lettuce and spinach. *Environ Pollut* 79: 113-120.
- McLean EO, 1982. Soil pH and lime requirement. Pp. 199-224. In: Page AL (eds). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Moustakas NK, Akoumianaki-Ioannidou A and Barouchas PE, 2011. The effects of Cd and Zn interactions on the concentration of Cd and Zn in pot marigold (*Calendula officinalis* L.). *Austr J Crop Sci* 5(3): 277-282.
- Nan Z, Li J, Zhang J and Clieng G, 2002. Cd and Zn interactions and their transfer in soil-crop system wider actual field. *Sci Total Environ* 285(1-3): 187-195.
- Narwal RP, Singh M, Singh JP and Dahiya DJ, 1993. Cd×Zn interaction in maize grown on sewer water irrigated soil. *Arid Soil Res Rehabilitation* 7(2): 125-131.
- Nelson DW and Sommers LE, 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 539-579. In: Page AL (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Oliver DP, Wilhelm NS, McFarlane JD, Tiller KG and Cozend GD, 1997. Effect of soil and foliar applications of Zn on Cd concentrations in wheat grain. *Aust J Exp Agric* 37: 677-681.
- Portman D, 2012. *Cd and Zn Uptake in Wheat as Affected by Nitrogen Fertilization and Agricultural Management*. Master thesis. Supervised by. Dr. Susan Tandy. Prof. Dr. Rainer Schulin.
- Poschenrieder CH and Barceló J, 1999. Water relations in heavy metal stressed plants. Pp. 207-230. In: Prasad MNV (eds). *Heavy Metal Stress in Plants*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Qureshi MI, D'Amici GM, 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. *J Plant Physiol* 167(10): 761-770.

- Saber Z, Pirdashti H and Heidarzade A, 2012. Osmopriming and hydro priming effects on seed and seeding parameters of two rapeseed (*Brassica Napus* L.) cultivars. *Inter J Agric Res Rev* 2(5): 547-554.
- Safarzadeh S, Ronaghi A and Karimian N, 2013. Effect of Cd toxicity on micronutrient concentration, uptake and partitioning in seven rice cultivars. *Arch Agro Soil Sci* 59(2): 231-245.
- Skrebsky EC, Tabaldi LA, Pereira LB, Rauber R, Maldaner J, Cargnelutti D, Gonçalves JF, Castro GY, Shetinger MRC and Nicoloso FT, 2008. Effect of Cd on growth, micronutrient concentration, and δ -aminolevulinic acid dehydratase and acid phosphatase activities in plants of *Pfaffia glomerata*. *Brazilian J Plant Physiol* 20(4): 285-294.
- Smilde KW, Van Luit B and Van Driel W, 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied Zn and Cd. *Plant Soil* 143: 233-238.
- 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.
- Zhao ZQ, Zhu YG, Kneer R and Smith SE, 2005. Effect of Zn on Cd toxicity induced oxidative stressing winter wheat seedlings. *J Plant Nutr* 28: 1947-1959.
- Zhong-qiu Z, Yong-guan Z and Yun-long C, 2005. Effect of Zn on Cd uptake by spring wheat (*Triticum aestivum* L.): long-time hydroponic study and short-time ^{109}Cd tracing study. *J Zhejiang Univ Sci* 6 A (7): 643-648.