

## تغییرات شکل‌های شیمیایی و زیست‌فراهمی روی با فاصله از ریزوسفر منفرد و مشترک

یاسر عظیم‌زاده<sup>\*</sup>، حسین شریعتمداری<sup>۲</sup>، مهران شیروانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ و ۳- برترتیب استاد و استادیار خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* نویسنده مسئول: [Yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:Yaser.azimzadeh@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۲

### چکیده

توزیع شکل‌های مختلف روی در خاک، باعث پیچیدگی رفتار آن در خاک می‌گردد. به منظور بررسی تغییرات شکل‌های مختلف روی با فاصله از ریزوسفر ذرت و کلزا در سیستم کشت منفرد و مخلوط، آزمایشی در سیستم جعبه ریزوسفر انجام شد. با ناحیه‌بندی فضای داخل جعبه ریزوسفر به ۴ ناحیه، بذره‌های ذرت و کلزا در ناحیه مرکزی جعبه ریزوسفر (ناحیه ریزوسفر) کشت شدند. گیاهان بعد از پایان دوره رشد برداشت شده و خاک هر ناحیه جداگانه تجزیه گردید. نتایج نشان داد که کشت گیاه با کاهش pH و افزایش کربن آلی محلول خاک، جزءبندی روی را در خاک تغییر داده و زیست‌فراهمی روی را افزایش داد. همچنین با فاصله از ریشه، pH افزایش و کربن آلی محلول خاک کاهش یافت. شکل‌های تبدیلی، وابسته به مواد آلی، اکسیدی و قابل جذب روی با فاصله از ریشه تغییر یافت. زیست‌فراهمی روی با کربن آلی محلول و بخش‌های تبدیلی، وابسته به مواد آلی و کربناته همبستگی مثبت و با pH و بخش اکسیدی روی همبستگی منفی نشان داد. کشت مخلوط باعث کاهش غلظت روی در شاخساره ذرت و کلزا شد. عملکرد شاخساره و مقدار جذب روی در شاخساره کشت مخلوط بیشتر از ذرت بود. فاکتور انتقال روی در کشت مخلوط بیشتر از ذرت و کمتر از کلزا اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی: عنصر روی، ریزوسفر، کشت مخلوط، رایزوباکس، جزءبندی

### مقدمه

آن در اجزاء خاک و قابلیت جذب آن توسط گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Ksouri et al., 1995; Wang et al., 2002). به همین دلیل، بسیاری از محققین جهت بررسی تغییرات اجزاء و قابلیت زیست‌فراهمی روی در خاک، بر ریزوسفر تمرکز کرده‌اند (Wang et al., 2002; Nye 1981; Puschenreiter et al., 2005). ریزوسفر یک محیط کوچک و مهم در اطراف ریشه است که خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی آن به علت فعالیت ریشه متفاوت از خاک اطراف است (Nye, 1981). وانگ و همکاران نشان دادند زیست‌فراهمی و توزیع روی در شکل‌های مختلف، با فاصله از ریشه تغییر کرده و در ریزوسفر متفاوت از خاک غیر ریزوسفری می‌باشد (Wang et al., 2002). منچ و مارتین نیز تفاوت در ترکیب ترشحات ریشه گیاهان مختلف را یکی از دلایل جذب مقادیر متفاوت فلزات سنگین توسط گونه‌های گیاهی مختلف دانستند (Mench & Martin, 1991). تأثیر فعالیت ریشه در رفتار روی در خاک به نوع و مقدار ترشحات

روی یکی از عناصر غذایی کم مصرف و ضروری برای حیوانات و گیاهان محسوب می‌شود ولی در غلظت‌های بیشتر ممکن است برای میکروارگانیسم‌های خاک، گیاهان و حیوانات ایجاد سمیت نماید (Alloway, 1995). بنابراین روی عنصر مهمی است که هم از نظر کمبود و هم سمیت مورد توجه می‌باشد. رفتار فلز روی در خاک و عوامل مؤثر بر آن بسیار پیچیده است و تغییرات شکل‌های شیمیایی آن در خاک بر این پیچیدگی می‌افزاید. توزیع شکل‌های مختلف روی در خاک به pH، مواد آلی، CEC، Eh، نوع و مقدار رس، اکسیدهای Al، Fe، Mn و کلات کننده‌های آلی ترشح شده از ریشه بستگی دارد (Chairidchai & Ritchie, 1992; Iyengar et al., 1981; Zhang et al., 1989). ریشه می‌تواند با ترشح انواع اسیدهای آلی، تحریک فعالیت میکروبی و جذب روی، توزیع شکل‌های مختلف

## مواد و روش‌ها

### ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک آلوده به روی از فاصله یک کیلومتری معدن سرب و روی باما، واقع در جنوب غرب شهر اصفهان جمع‌آوری شدند. تعدادی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به شرح زیر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند: نیتروژن به روش کلدال (Bremner & Keeney, 1966)، پتاسیم قابل جذب خاک به روش استات آمونیوم و فسفر به روش عصاره‌گیری السن (Kuo, 1996) پ-هاش خاک با دستگاه pH متر در سوسپانسیون یک به دو و نیم خاک و آب مقطر، ماده آلی خاک به روش اکسیداسیون تر والکلی- بلک (Nelson & Sommers, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات آمونیوم در pH برابر ۷ (Rhoades, 1982) بافت خاک به روش پیپت (Gee & Bauder, 1986) و درصد کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون با اسید (Nelson & Sommers, 1982). مقدار روی کل در خاک با استفاده از مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک به نسبت ۱ به ۳ (حجمی) اندازه‌گیری شد (McGrath & Cunliffe, 1985) و مقدار ۲۴۴۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد که با توجه به حد اکثر مجاز روی در خاک (۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) آلوده به روی می‌باشد (Kabata & Pendias, 2000). خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک در جدول ۱ نشان داده شده است.

### جعبه ریزوسفر

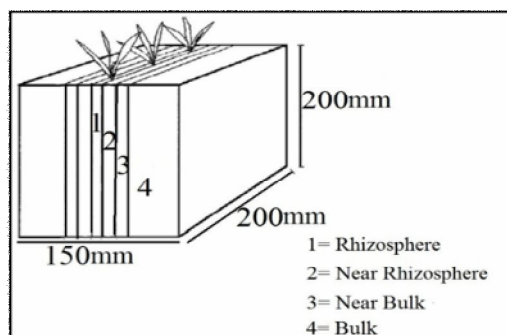
در این تحقیق برای کاشت گیاه از جعبه ریزوسفر استفاده شد (شکل ۱). جعبه ریزوسفر مطابق سیستم یوسف و چاینو (Youssef & Chino, 1987) در ابعاد ۲۰×۱۵×۲۰ سانتی‌متر (طول×عرض×ارتفاع) ساخته شدند. فضای درون هر جعبه ریزوسفر با استفاده از صفحات مشبک نایلونی (nylon cloth) ۳۲۵ مش به ۴ ناحیه تقسیم شد: (۱) ناحیه ریزوسفری (R) به ضخامت ۱ سانتی‌متر، (۲) ناحیه نزدیک ریزوسفر (NR) به ضخامت ۰/۸ سانتی‌متر، (۳) ناحیه نزدیک توده خاک (NB) به ضخامت ۰/۸ سانتی‌متر و (۴) ناحیه توده خاک (B) به ضخامت ۵ سانتی‌متر. غیر از ناحیه مرکزی، نواحی ۲، ۳ و ۴، با همان ضخامت در طرف دیگر ناحیه مرکزی متناظراً تکرار شد (شکل ۱).

ریشه بستگی دارد. لذا با کشت دو گیاه مختلف در کنار هم، ریزوسفر مشترک آنها با داشتن خصوصیات متفاوت، می‌تواند تأثیرات متفاوتی در رفتار روی در خاک داشته باشد. در این رابطه چن و همکاران نشان دادند که در کشت مخلوط دو گیاه (*yokoscence Atbyrium* و *Arabis flagellosa*)، خصوصیات شیمیایی خاک و جزءبندی فلزات سنگین از جمله روی در ریزوسفر کشت مخلوط متفاوت از ریزوسفر کشت منفرد بوده و مقدار جذب فلزات توسط دو گیاه در کشت مخلوط متفاوت از کشت منفرد می‌باشد. علاوه بر آن، تغییرات مذکور با فاصله از ریشه در کشت مخلوط و منفرد، متفاوت گزارش شد (Chen *et al.*, 2009). بنابراین ویژگی‌های محیط ریزوسفر به علت فراوانی میکروارگانیزم‌ها و فعالیت‌های بیولوژیکی ریشه، با توده خاک متفاوت است (Chairidchai & Ritchie, 1992; Nye, 1981) و به نوبه خود، خصوصیات خاک و رفتار روی را تحت تأثیر قرار داده و باعث جذب مقادیر متفاوت روی توسط گیاهان می‌شود. با این حال فرایندهای مربوط به روی در ریزوسفر، مخصوصاً در گیاهان بیش‌اندوز به خوبی شناخته شده نیست (Puschenreiter *et al.*, 2005).

ذرت و کلزا از جمله گیاهان بیش‌اندوز فلزات سنگین می‌باشند که با تولید زیست‌توده زیاد، پتانسیل بالایی در استخراج فلزات سنگین از خاک دارند (Felix, 1997; Park *et al.*, 2012). کلزا از گیاهان دانه روغنی می‌باشد که به علت انتقال بسیار کم فلزات سنگین به دانه، می‌توان علاوه بر پالایش خاک، از روغن آن نیز استفاده کرد. علاوه بر آن، کلزا و بویژه ذرت از محصولات زراعی پرمصرف در دنیا به شمار می‌روند که غنی‌سازی زیستی فلزاتی مانند روی در آنها بویژه در ذرت اهمیت فراوان دارد. بررسی شکل‌های شیمیایی و رفتار روی در ریزوسفر این گیاهان جهت بهبود روش‌های گیاه‌پالایی و همچنین غنی‌سازی زیستی روی ضروری به نظر می‌رسد (Turan & Esring, 2007; Marchiol *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2004) بنابراین هدف از انجام این تحقیق بررسی تغییرات شکل‌های شیمیایی روی در یک خاک آلوده طبیعی با فاصله از ریزوسفر منفرد و مشترک ذرت و کلزا با استفاده از جعبه ریزوسفر بود.

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش  
Table 1) Physicochemical properties of tested soil

لومی رسی	بافت
Typic Haplocambids	طبقه بندی
7.9	پ-هاش (۲/۵ : ۱)
13.66	ظرفیت تبادل کاتیونی ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )
56.09	فسفر ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
109.1	پتاسیم ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
0.1	نیترژن کل (%)
41	آهک (درصد)
25.53	کربن آلی محلول ( $\text{mg l}^{-1}$ )
1.07	ماده آلی (%)
2443	روی کل ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
382.5	روی قابل عصاره‌گیری با DTPA ( $\text{mg kg}^{-1}$ )



شکل (۱) طرح شماتیک سیستم جعبه ریزوسفر مورد استفاده

Fig. 1) sketch diagram of used rhizobox system

خارج نشود. بعد از ۸۵ روز، شاخساره گیاهان برداشت و هر کدام از جعبه‌ها باز شد. نمونه خاک هر ناحیه جداگانه برداشت و با ناحیه متناظر مخلوط شد. ریشه‌ها از خاک ریزوسفری جدا و اندام هوایی و ریشه‌ها با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس نمونه‌های گیاه در داخل آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. ۱ گرم از هر نمونه خاک توزین و در داخل لوله‌های سانتریفوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی تیسیر ۵ جزء روی شامل: تبادل، کربناته، وابسته به مواد آلی، متصل به اکسیدهای آهن و منگنز و باقی‌مانده در شبکه کانی‌ها هضم و عصاره‌گیری شد (Tessier *et al.*, 1979). برای اندازه‌گیری بخش باقی‌مانده، از مخلوط اسیدنیتریک و اسیدکلریدریک با نسبت ۱ به ۳ (حجمی) استفاده شد (McGrath & Cunliffe, 1985) (جدول ۲).

### آزمایش گلخانه‌ای

در داخل هر کدام از نواحی B و NB, NR, R به ترتیب ۴۰۰، ۳۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰۰ گرم (در مجموع ۵/۶ کیلوگرم) خاک هواخشک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر ریخته شد. بذره‌های ذرت، رقم سینگل گراس ۷۰۴ و کلزا رقم هایولا ۴۰۱، در تاریکی جوانه‌دار شد. سپس در ناحیه مرکزی (R) هر جعبه ۸ عدد بذر کشت شد که بعداً به ۴ گیاه تنک شد به طوری که در تیمارهای کشت مخلوط، دو بوته ذرت و دو بوته کلزا به صورت یک در میان و در تیمارهای کشت منفرد ذرت و کشت منفرد کلزا، به ترتیب ۴ بوته ذرت و ۴ بوته کلزا نگه داشته شد. آبیاری گیاهان با استفاده از آب مقطر، به روش وزنی و پس از مصرف ۲۵٪ آب قابل استفاده خاک به گونه‌ای انجام شد که از زیر جعبه ریزوسفر آب

جدول ۲) روش عصاره‌گیری متوالی مورد استفاده برای عصاره‌گیری روی از خاک  
 Table 2) Used sequential extraction procedure of zinc from soil

مرحله	جزء شیمیایی	عصاره‌گیر
1	محلول + تبدالی	۸ میلی‌لیتر کلرید منیزیم ۱ مولار در pH برابر ۷، یک ساعت شیک در دمای اتاق
2	کربناته (متصل به کربناتها)	۸ میلی‌لیتر استات سدیم ۱ مولار با pH=۵ تنظیم شده با استیک اسید، ۶ ساعت شیک در دمای اتاق
3	اکسیدی (متصل به اکسیدهای آهن و منگنز)	۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسیل آمین هیدروکلراید ۰/۰۴ مولار حل شده در اسید استیک ۲۵٪ حجمی، ۶ ساعت شیک در دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد
4	آلی (متصل به مواد آلی)	۳ میلی‌لیتر اسید ۰/۰۲ مولار + ۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد با pH=۲ تنظیم شده با اسید نیتریک، ۲ ساعت شیک در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، ۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد با pH=۲ تنظیم شده با اسید نیتریک، ۳ ساعت شیک در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۳/۲ مولار در اسید نیتریک ۲۰٪ حجمی
5	باقی مانده	۲۰ میلی‌لیتر مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۳ به ۱ حجمی، ۱۶ ساعت ماندن در دمای اتاق، ۲ ساعت حرارت در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد

تحت کشت ذرت بیشتر از کلزا بوده و در تیمار کشت مخلوط مقدار حد واسط مشاهده شد (جدول ۳). کشت گیاه اثر معنی‌دار بر بخش کربناته، اکسیدی و باقی‌مانده نداشت در حالی که باعث افزایش بخش وابسته به مواد آلی و روی قابل جذب شد. زیست‌فراهمی روی در خاک تحت کشت ذرت بیشتر از کلزا و کشت مخلوط بود. بخش تبدالی روی در خاک تحت کشت ذرت بیشترین مقدار را داشت. در واقع به علت فعالیت ریشه گیاه، pH خاک کاهش و کربن آلی محللول خاک افزایش یافته و باعث افزایش بخش تبدالی و زیست‌فراهمی روی شده و ترکیبات آلی ترشح شده از ریشه نیز با تشکیل کمپلکس با روی باعث افزایش بخش وابسته به مواد آلی روی شده است. کربن آلی محللول به خاطر تشکیل کلات با کاتیون‌های چند ظرفیتی، خاصیت تبادل کاتیونی و حلالیت فلزات، در بیوشیمی عناصر غذایی و آلاینده‌ها در خاک نقش مهمی دارد (Stevenson, 1994). برنال و مک گراث گزارش کردند که کشت گندم باعث کاهش pH خاک شد ولی به عقیده آنان احتمالاً کاهش pH تنها مکانیسم انحلال فلزات سنگین در ریزوسفر نیست (Bernal & McGrath, 1994) و ممکن است تشکیل کلات با ترکیبات آلی خاک و ترشحات ریشه و هم‌چنین فعالیت میکروارگانیزم‌ها نیز در آن اثرگذار باشد.

ذرت و کلزا در بخش تبدالی و زیست‌فراهمی روی اثر متفاوتی داشتند. مقدار و نوع ترکیبات ترشح شده از ریشه

برای عصاره‌گیری بخش زیست‌فراهمی روی برای گیاه از DTPA استفاده شد (DTPA ۰/۰۰۵ مولار + CaCl<sub>2</sub> ۰/۰۱ مولار + TEA ۰/۱ مولار در pH=۷/۳) (Lindsay & Norvell, 1978). عصاره‌گیر DTPA یک کمپلکس آلی است که برای ارزیابی زیست‌فراهمی فلزات سنگین، از جمله روی در خاک‌های با سطوح مختلف فلزات (به ویژه در خاک‌های با پ-هاش خنثی تا قلیایی) بکار برده می‌شود (Lindsay & Norvell, 1978; Hseu, 2006). غلظت روی موجود در عصاره‌های خاک و گیاهان، به روش اسپکتروسکوپی جذب اتمی (AAS). با دستگاه جذب اتمی پریکن الم مدل ۲۰۰ AA اندازه‌گیری شد. فاکتور انتقال روی از نسبت غلظت فلز در اندام هوایی به غلظت آن در ریشه گیاه به دست آمد (Gripsen *et al.*, 2006). تیمارهای آزمایش شامل ۴ تیمار کشت و ۴ ناحیه با فاصله از ریشه بودند. آنالیز تیمارها در قالب طرح فاکتوریل اسپلیت انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD و در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت.

## نتایج و بحث

### نتایج تجزیه خاک

#### نوع کشت

کشت گیاه باعث کاهش pH و افزایش کربن آلی محللول خاک شد به طوری که کربن آلی محللول در خاک

از کشت منفرد ذرت بود. بنابراین شاید بتوان علت افزایش بخش تبدالی روی در کشت ذرت را به جذب و برداشت کمتر این فلز توسط ذرت نسبت به کلزا و کشت مخلوط مربوط دانست. ریکاوری عصاره‌گیری متوالی برای روی ۸۶/۸٪ محاسبه شد که از تقسیم مجموع غلظت ۵ شکل شیمیایی روی بر غلظت کل روی خاک بدست می‌آید (Navas & Lindhorfer, 2002).

در گیاهان مختلف متفاوت بوده و درجه تحرک فلزات در خاک به شدت به مقدار و نوع ترشحات آلی ریشه و خصوصیات فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خاک بستگی دارد (Jones & Darrah, 1994). علاوه بر آن، متفاوت بودن جذب روی توسط گیاهان مختلف نیز می‌تواند در توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک مؤثر باشد. با توجه به نتایج گیاهان که در ادامه ذکر خواهد شد، جذب روی در کشت مخلوط و کشت منفرد کلزا بیشتر

جدول ۳) مقایسه میانگین اثر نوع کشت بر جزءبندی روی و خصوصیات شیمیایی خاک

Table 3) Mean comparison of the cultivation effect on Zn fractions and soil chemical properties

DOC (mg l <sup>-1</sup> )	pH	Zn-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )	اجزاء روی (mg kg <sup>-1</sup> )					نوع کشت
			Zn-Res	Zn-OM	Zn-OX	Zn-Car	Zn-EX	
53.6 <sup>a</sup>	7.6 <sup>b</sup>	403.3 <sup>a</sup>	252.1 <sup>ns</sup>	83.3 <sup>a</sup>	1547 <sup>ns</sup>	266.4 <sup>ns</sup>	18.5 <sup>a</sup>	ذرت
41.8 <sup>b</sup>	7.6 <sup>b</sup>	390.6 <sup>b</sup>	258.6 <sup>ns</sup>	77.5 <sup>ab</sup>	1545 <sup>ns</sup>	263.3 <sup>ns</sup>	16.2 <sup>b</sup>	کلزا
47.3 <sup>ab</sup>	7.6 <sup>b</sup>	387 <sup>b</sup>	243.2 <sup>ns</sup>	82.1 <sup>a</sup>	1556 <sup>ns</sup>	271.7 <sup>ns</sup>	16.5 <sup>b</sup>	مخلوط (ذرت و کلزا)
30.0 <sup>c</sup>	7.8 <sup>a</sup>	364.5 <sup>c</sup>	244.2 <sup>ns</sup>	73.9 <sup>b</sup>	1516 <sup>ns</sup>	269.6 <sup>ns</sup>	15.3 <sup>b</sup>	شاهد

حروف متفاوت روی میانگین‌ها در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار آنها در سطح ۵٪ آماری می‌باشد. ns = نشانه عدم وجود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

جدول ۴) مقایسه میانگین اثر فاصله از ریشه بر جزءبندی روی و خصوصیات شیمیایی خاک

Table 4) Mean comparison of the distance from root effect on Zn fractions and soil chemical properties

Zn-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )	pH	DOC (mg l <sup>-1</sup> )	جزءبندی روی (mg kg <sup>-1</sup> )					ناحیه
			Zn-Res	Zn-OM	Zn-OX	Zn-Car	Zn-EX	
1513 <sup>b</sup>	267.8 <sup>ns</sup>	16.0 <sup>b</sup>	70.5 <sup>a</sup>	7.4 <sup>c</sup>	379.7 <sup>c</sup>	255.6 <sup>ns</sup>	78.2 <sup>b</sup>	ریزوسفر
1547 <sup>ab</sup>	273.5 <sup>ns</sup>	17.7 <sup>a</sup>	47.8 <sup>b</sup>	7.6 <sup>b</sup>	393.4 <sup>b</sup>	251.7 <sup>ns</sup>	81.1 <sup>ab</sup>	نزدیک ریزوسفر
1550 <sup>ab</sup>	262.1 <sup>ns</sup>	18.8 <sup>a</sup>	39.5 <sup>c</sup>	7.6 <sup>b</sup>	410.8 <sup>a</sup>	245 <sup>ns</sup>	84.3 <sup>a</sup>	نزدیک توده خاک
1587 <sup>a</sup>	265 <sup>ns</sup>	15.6 <sup>b</sup>	32.5 <sup>d</sup>	7.7 <sup>a</sup>	392 <sup>b</sup>	253 <sup>ns</sup>	80.4 <sup>b</sup>	توده خاک

حروف متفاوت روی میانگین‌ها در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار آنها در سطح ۵٪ آماری می‌باشد. ns = نشانه عدم وجود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

ریشه ایجاد می‌کند، می‌تواند به راحتی از شکل آلی خارج شده و توسط گیاه جذب شود و یا به شکل کربناته تبدیل شود. لذا بخش وابسته به مواد آلی، در ریزوسفر کمتر از دو ناحیه میانی بوده و در ناحیه B به علت فاصله از ریشه مقدار کمتری داشت. بنا به نظر هارتر، نگهداری روی توسط مواد آلی در خاک به نوع ترکیبات آلی خاک (مانند هومین، اسید هومیک و اسید فولیک) بستگی زیادی دارد و با توجه به ترکیب مواد آلی خاک ممکن است روی متصل به مواد آلی رفتارهای متفاوتی در خاک داشته باشد (Harter, 1991). اینگر و همکاران اظهار کردند که بخش محلول + تبدالی روی با کاهش pH خاک افزایش یافته و روی متصل به مواد آلی با افزایش DOC افزایش می‌یابد (Iyengar et al., 1981).

نقش ترکیبات کلات کننده و فیتوسیدروفور ترشح شده از ریشه و کاهش pH در افزایش زیست‌فراهمی و قابلیت جذب روی در خاک توسط مک‌گراث و همکاران (۱۹۹۷) و زانگ و همکاران (۱۹۸۹) قبلاً نشان داده شده است.

بخش تبدالی و وابسته به مواد آلی روی در دو ناحیه میانی (NB و NR)، بیشتر از ریزوسفر و توده خاک بود. روی وابسته به مواد آلی در ناحیه R و B، دارای مقدار کمتری نسبت به دو ناحیه میانی بود و بیشترین مقدار آن در ناحیه NB مشاهده شد. کمپلکس روی ماده آلی در مقایسه با فلزاتی مانند مس، دارای ثابت پایداری کمتری بوده و در اثر تغییرات شدیدی که

بخش زیست‌فراهم روی در این ناحیه بیشترین مقدار را دارا بود. تغییرات شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در خاک بسیار پیچیده بوده و به عوامل بسیاری بستگی دارد و تاکنون یک اتفاق نظر واحد در مورد توزیع شکل‌های فلزات در ریزوسفر وجود نداشته است (Seguin *et al.*, 2003). با توجه به تغییرات شکل‌های شیمیایی و زیست‌فراهمی روی، pH و DOC با فاصله از ریشه، می‌توان نتیجه گرفت که DOC و pH در توزیع شکل‌های روی در خاک دارای نقش اساسی می‌باشد.

#### اثر متقابل نوع کشت و فاصله از ریشه

در ناحیه B بین تیمارهای کشت و شاهد تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد که بیانگر عدم تأثیر فعالیت ریشه در این ناحیه می‌باشد. روی تبدالی در ریزوسفر کشت مخلوط و کلزا بیشتر از ریزوسفر ذرت بود. اثر متقابل نوع کشت و فاصله از ریشه بر تغییرات بخش اکسیدی فقط در مورد ذرت معنی‌دار شد و در ریزوسفر کمتر از توده خاک بود. روی وابسته به مواد آلی در ریزوسفر ذرت بیشتر از ریزوسفر کلزا و کشت مخلوط بود. بیشترین مقدار DOC در ریزوسفر ذرت بوده و در ریزوسفر کلزا و کشت مخلوط تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد در حالی که pH در ریزوسفر کشت مخلوط کمتر از ریزوسفر کلزا بود و کمترین مقدار pH مربوط به ریزوسفر ذرت و کشت مخلوط بود (جدول ۵).

#### همبستگی ساده خطی

نتایج همبستگی ساده خطی نشان داد که DOC با pH همبستگی منفی معنی‌دار داشت. بدین ترتیب می‌توان بین اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه و کاهش pH ارتباط قائل شد. همچنین ترشحات ریشه باعث تحریک فعالیت میکروبی شده و با افزایش تنفس میکروبی، آزادسازی CO<sub>2</sub> نیز افزایش یافته و pH کاهش می‌یابد. pH با بخش تبدالی و زیست‌فراهم روی همبستگی منفی و با بخش اکسیدی همبستگی مثبت نشان داد. DOC با بخش تبدالی، کربناته، وابسته به مواد آلی و بخش زیست‌فراهم روی همبستگی مثبت و با بخش اکسیدی روی همبستگی منفی نشان داد. بخش تبدالی روی با بخش وابسته به مواد آلی و قابل عصاره‌گیری با DTPA همبستگی مثبت و با بخش اکسیدی و باقی‌مانده همبستگی منفی نشان داد. روی کربناته با بخش زیست‌فراهم و بخش آلی روی همبستگی مثبت معنی‌دار

روی اکسیدی با فاصله از ریشه افزایش یافت. یکی از منابع تأمین روی قابل جذب در طول دوره رشد گیاه، بخش متصل به اکسیدهای آهن و منگنز می‌باشد که در اثر فعالیت ریشه و میکروارگانسیم‌ها، از شکل اکسیدی خارج شده و به شکل محلول و تبدالی تبدیل می‌شود. بنابراین، با فاصله از ریشه و کاهش اثرات ترشحات ریشه، مقدار روی اکسیدی نیز افزایش نشان می‌دهد (جدول ۵). بنا به نظر یوسف و چاپنو و وانگ و همکاران کاهش شکل اکسیدی فلزات سنگین ممکن است به علت اثر اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه بوده و افزایش بخش وابسته به مواد آلی نیز ممکن است به علت فراوانی ترکیبات آلی در ریزوسفر باشد. به عقیده آنان افزایش بخش محلول + تبدالی + کربناته در ناحیه نزدیک ریزوسفر، به فعالیت میکروارگانسیم‌ها بویژه قارچها مربوط می‌باشد. چرا که میسلیموم قارچها از صفحه مشبک نایلونی عبور کرده و ناحیه بعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Wang *et al.*, 2002 ; Youssef & Chino, 1987). میکروارگانسیم‌ها قادرند مواد آلی را اکسید کنند و این باعث می‌شود که فلزات از شکل آلی به شکل اکسیدی و قابل جذب تبدیل شوند. در ناحیه توده خاک به علت فاصله زیاد از ریشه، جزءبندی فلزات به ندرت تحت تأثیر فعالیت ریشه قرار می‌گیرد (Wang *et al.*, 2002).

روی قابل عصاره‌گیری با DTPA، با فاصله از ریشه دارای روند افزایشی بود. به طوری که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب در نواحی R و NB مشاهده شد. علت کاهش روی قابل جذب در ناحیه B نسبت به ناحیه NB، دوری از ریشه و تأثیرپذیری کمتر این ناحیه از فعالیت ریشه می‌باشد. بدین ترتیب، زیست‌فراهمی روی در ریزوسفر تحت تأثیر فعالیت ریشه و میکروارگانسیم‌ها افزایش یافته ولی در نهایت با جذب برداشت روی توسط گیاه، مقدار آن در ریزوسفر کاهش یافته است. ناحیه NR به مقدار کمتری نسبت به ریزوسفر تحت تأثیر جذب گیاه قرار گرفته و دارای مقدار روی قابل استفاده بیشتری نسبت به ریزوسفر می‌باشد. روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در ناحیه NB تحت تأثیر فعالیت ریشه و میکروارگانسیم‌ها افزایش یافته ولی به علت فاصله نسبتاً بیشتری که از ریشه دارد، کمتر تحت تأثیر جذب توسط ریشه قرار گرفته است و لذا

و همبستگی منفی آن با بخش اکسیدی، می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های تبدلی، کربناته و آلی بخش زیست‌فراهم روی را تشکیل می‌دهد.

نشان داد. بخش قابل جذب روی دارای همبستگی منفی با بخش اکسیدی و همبستگی مثبت با بخش وابسته به مواد آلی بود (جدول ۶). با توجه به همبستگی مثبت بین بخش قابل جذب و بخش‌های تبدلی، کربناته و آلی

جدول ۵) مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کشت و فاصله از ریشه در جزءبندی روی و خصوصیات شیمیایی خاک

Table 5) Mean comparison of the effect of distance from root and cultivation on Zn fractions and soil chemical properties

pH	DOC (mg l <sup>-1</sup> )	Zn-DTPA (mg kg <sup>-1</sup> )	جزءبندی روی (mg kg <sup>-1</sup> )					ناحیه	نوع کشت
			Zn-Res	Zn-OM	Zn-OX	Zn-Car	Zn-EX		
7.3 <sup>f</sup>	85.6 <sup>a</sup>	349.5 <sup>b-f</sup>	239.2 <sup>abc</sup>	85.4 <sup>abs</sup>	1488.3 <sup>b</sup>	264 <sup>ns</sup>	18.0 <sup>b</sup>	ریزوسفر	ذرت
7.6 <sup>d</sup>	49.4 <sup>cd</sup>	414.7 <sup>ab</sup>	256.6 <sup>ab</sup>	81.8 <sup>bcd</sup>	1532.5 <sup>ab</sup>	281.8 <sup>ns</sup>	19.17 <sup>ab</sup>	نزدیک ریزوسفر	
7.6 <sup>d</sup>	44.7 <sup>de</sup>	426.8 <sup>a</sup>	265 <sup>ab</sup>	88.2 <sup>ab</sup>	1565.8 <sup>ab</sup>	257.9 <sup>ns</sup>	20.8 <sup>a</sup>	نزدیک توده خاک	
7.7 <sup>e</sup>	34.7 <sup>e-h</sup>	377.5 <sup>fgh</sup>	247.7 <sup>abc</sup>	77.8 <sup>c-f</sup>	1601.3 <sup>a</sup>	261.7 <sup>ns</sup>	15.9 <sup>cd</sup>	توده خاک	کلزا
7.4 <sup>e</sup>	58.1 <sup>bc</sup>	382.3 <sup>d-h</sup>	270.4 <sup>a</sup>	74.6 <sup>def</sup>	1517.9 <sup>ab</sup>	276.6 <sup>ns</sup>	15.1 <sup>d</sup>	ریزوسفر	
7.6 <sup>d</sup>	43 <sup>def</sup>	379.6 <sup>e-h</sup>	252.3 <sup>abc</sup>	79.3 <sup>cde</sup>	1560.6 <sup>ab</sup>	261.8 <sup>ns</sup>	17.3 <sup>bcd</sup>	نزدیک ریزوسفر	
7.5 <sup>d</sup>	33.1 <sup>fgh</sup>	405.6 <sup>abc</sup>	249.1 <sup>abc</sup>	74.3 <sup>def</sup>	1522.1 <sup>ab</sup>	256.7 <sup>ns</sup>	16.7 <sup>bcd</sup>	نزدیک توده خاک	مخلوط (ذرت و کلزا)
7.7 <sup>bc</sup>	32.7 <sup>fgh</sup>	394.8 <sup>b-f</sup>	262.7 <sup>ab</sup>	81.8 <sup>bcd</sup>	1580.5 <sup>ab</sup>	257.9 <sup>ns</sup>	15.6 <sup>cd</sup>	توده خاک	
7.3 <sup>f</sup>	67.7 <sup>b</sup>	362.4 <sup>h</sup>	257.1 <sup>ab</sup>	74.4 <sup>def</sup>	1533.5 <sup>ab</sup>	262.8 <sup>ns</sup>	14.8 <sup>d</sup>	ریزوسفر	
7.6 <sup>d</sup>	50.8 <sup>cd</sup>	385.8 <sup>c-g</sup>	246.1 <sup>abc</sup>	82.2 <sup>bcd</sup>	1549.2 <sup>ab</sup>	276.8 <sup>ns</sup>	16.7 <sup>bcd</sup>	نزدیک ریزوسفر	شاهد
7.6 <sup>d</sup>	40.7 <sup>d-g</sup>	400 <sup>b-e</sup>	221 <sup>c</sup>	90.3 <sup>a</sup>	1560.6 <sup>ab</sup>	271.7 <sup>ns</sup>	19.0 <sup>ab</sup>	نزدیک توده خاک	
7.7 <sup>bc</sup>	30.1 <sup>gh</sup>	403.8 <sup>bcd</sup>	248.7 <sup>abc</sup>	81.5 <sup>bcd</sup>	1579.5 <sup>ab</sup>	275.4 <sup>ns</sup>	15.4 <sup>cd</sup>	توده خاک	
7.9 <sup>a</sup>	32.2 <sup>fgh</sup>	372.6 <sup>gh</sup>	232.6 <sup>bc</sup>	71 <sup>f</sup>	1501.3 <sup>b</sup>	268.6 <sup>ns</sup>	15.8 <sup>cd</sup>	ریزوسفر	شاهد
7.8 <sup>bc</sup>	33 <sup>fgh</sup>	380 <sup>e-h</sup>	241 <sup>abc</sup>	76.4 <sup>def</sup>	1522.1 <sup>ab</sup>	283.3 <sup>ns</sup>	14.7 <sup>d</sup>	نزدیک ریزوسفر	
7.8 <sup>ab</sup>	26.6 <sup>h</sup>	367.9 <sup>gh</sup>	262 <sup>ab</sup>	72.5 <sup>ef</sup>	1541.9 <sup>ab</sup>	267.9 <sup>ns</sup>	14.8 <sup>d</sup>	نزدیک توده خاک	
7.7 <sup>e</sup>	28.1 <sup>h</sup>	337.4 <sup>i</sup>	241.2 <sup>abc</sup>	75.4 <sup>def</sup>	1500.2 <sup>b</sup>	258.3 <sup>ns</sup>	16.0 <sup>cd</sup>	توده خاک	

حروف متفاوت روی میانگین‌ها نشان دهنده اختلاف معنی‌دار آنها در سطح ۵٪ آماری می‌باشد. ns= نشانه عدم وجود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

جدول ۶) ضرایب همبستگی ساده بین شکل‌های مختلف روی، pH و DOC در خاک

Table 6) Simple correlation coefficient (r) for relationships between Pb forms, pH and DOC

	DOC	pH	Zn-EX	Zn-Car	Zn-OX	Zn-OM	Zn-Res	Zn-DTPA
DOC	1	-0.69**	-0.29*	-0.28*	-0.29**	0.32**	-	0.38**
pH		1	-0.33**	-	0.48**	-	-	-0.25*
Zn-EX			1	-	-0.36**	0.48**	-0.27*	0.57**
Zn-Car				1	-	-0.27*	-	0.47**
Zn-OX					1	-	-	-0.36**
Zn-OM						1	-0.37**	0.44**
Zn-Res							1	-
Zn-DTPA								1

\*, \*\* به ترتیب دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

### نتایج تجزیه گیاهان

سیستم کشت منفرد غلظت روی در ریشه ذرت بیشتر از کلزا بود ولی در سیستم کشت مخلوط، ریشه کلزا غلظت روی بیشتری نسبت به ذرت داشت. غلظت روی در هر دو سیستم کشت منفرد و مخلوط در شاخساره کلزا بیشتر از ذرت بود. عملکرد شاخساره کشت مخلوط بیشترین مقدار را داشته و در کلزا بیشتر از ذرت بود. میزان جذب روی در

غلظت روی در کشت منفرد ذرت و کشت منفرد کلزا از غلظت میانگین عصاره حاصل از ۴ بوته در هر جعبه بدست آمد در حالی که در کشت مخلوط، دو بوته ذرت و دو بوته کلزا جداگانه تجزیه و غلظت روی در ذرت و کلزا به صورت جداگانه گزارش شد. نتایج نشان داد که در

و کلزا بیشتر از ذرت بود. بنابراین پتانسیل کلزا برای جذب و انباشت روی در اندام هوایی بیشتر از ذرت بوده و کشت مخلوط باعث کاهش غلظت روی در شاخساره هر دو گیاه و افزایش جذب روی نسبت به ذرت منفرد شد (جدول ۷).

کشت مخلوط، در مجموع زیست‌توده ذرت و کلزا با هم (mg Box<sup>-1</sup>) گزارش گردید و نتایج نشان داد که جذب روی در ریشه ذرت بیشتر از ریشه کشت مخلوط و در آن بیشتر از کلزا بود. در حالی که در شاخساره کشت مخلوط

جدول ۷) مقایسه میانگین اثر سیستم کشت منفرد و مخلوط بر عملکرد، غلظت و جذب روی در ریشه و شاخساره و فاکتور انتقال (Table 7) Mean comparison of the effect of single and mixed culture system on yield, concentration and uptake of Zn in root and shoot and on translocation factor

کشت	غلظت (mg kg <sup>-1</sup> )		جذب (mg Box <sup>-1</sup> )		عملکرد (g)		فاکتور انتقال	فاکتور تجمع زیستی
	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره	ریشه	شاخساره		
ذرت	824.2 <sup>a</sup>	478.4 <sup>b</sup>	3.84 <sup>a</sup>	7.21 <sup>b</sup>	4.6 <sup>ns</sup>	15.1 <sup>c</sup>	0.59 <sup>c</sup>	19.59 <sup>b</sup>
کلزا	564.8 <sup>b</sup>	535.7 <sup>a</sup>	1.44 <sup>c</sup>	8.77 <sup>a</sup>	4 <sup>ns</sup>	16.2 <sup>b</sup>	1.25 <sup>a</sup>	21.93 <sup>a</sup>
مخلوط (ذرت)	345.6 <sup>d</sup>	356.3 <sup>d</sup>	2.49 <sup>b</sup>	8.67 <sup>a</sup>	4.5 <sup>ns</sup>	20.6 <sup>a</sup>	1.04 <sup>b</sup>	14.59 <sup>c</sup>
مخلوط (کلزا)	440.7 <sup>c</sup>	443.9 <sup>c</sup>					1.01 <sup>b</sup>	18.18 <sup>b</sup>

حروف متفاوت روی میانگین‌ها نشان دهنده اختلاف معنی‌دار آنها در سطح ۵٪ آماری می‌باشد. ns= نشانه عدم وجود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

زیست‌فراهمی روی را در خاک افزایش داد. کربن آلی محلول با فاصله از ریشه با روند منظمی کاهش ولی pH افزایش یافت. فعالیت ریشه بر تغییرات شکل‌های روی در خاک تا ناحیه نزدیک توده خاک (۲ سانتی‌متری ریزوسفر) اثرگذار بود ولی به علت جذب روی توسط گیاه بخش‌های تبادل‌ی، آلی و زیست‌فراهم روی در ریزوسفر کاهش نشان داد. وجود همبستگی منفی بین pH و بخش تبادل‌ی و زیست‌فراهم روی نشان دهنده نقش کاهش pH در افزایش زیست‌فراهمی روی می‌باشد. همچنین همبستگی مثبت بین DOC و بخش‌های تبادل‌ی، آلی و زیست‌فراهم روی بیانگر نقش ترشحات ریشه در افزایش زیست‌فراهمی روی می‌باشد. کشت مخلوط دو گیاه ذرت و کلزا باعث کاهش غلظت روی در ریشه و شاخساره هر دو گیاه نسبت به کشت منفرد شد. بنابراین می‌توان جهت کاهش غلظت روی در شاخساره ذرت و کلزا در خاک‌های آلوده به روی، از سیستم کشت مخلوط دو گیاه استفاده کرد. پتانسیل گیاه‌پالایی روی توسط کلزا و کشت مخلوط بیشتر از ذرت بوده و استفاده از تکنیک کشت مخلوط ذرت و کلزا جهت پالایش روی از خاک مؤثر ارزیابی می‌گردد. عملکرد شاخساره در کشت مخلوط نسبت به کشت منفرد افزایش یافت. با توجه به نتایج اثر کشت مخلوط بر فاکتور انتقال روی در گیاه می‌توان جهت کاهش انتقال روی از ریشه به اندام هوایی کلزا و همچنین افزایش انتقال روی از ریشه به اندام هوایی ذرت از کشت مخلوط استفاده کرد.

فاکتور انتقال (Transfer factor) فلز عبارت است از نسبت غلظت فلز در شاخساره به غلظت آن در ریشه و معیاری از توانایی گیاه در انتقال فلز از ریشه به شاخساره می‌باشد. فاکتور تجمع زیستی (Bioaccumulation factor) عبارت است از نسبت غلظت فلز در بافت‌های گیاه به غلظت آن در خاک (Sun *et al.*, 2007). کلزا در کشت منفرد دارای بیشترین فاکتور انتقال روی (۱/۲۵) بود. بیشترین و کمترین مقدار فاکتور انتقال روی به ترتیب در کلزای منفرد (۱/۲۵) و ذرت منفرد (۰/۵۹) بوده و در کشت مخلوط مقدار بینابین مشاهده شد. توانایی کلزا در انتقال روی به اندام هوایی بیشتر از ذرت بوده و کشت مخلوط باعث کاهش فاکتور انتقال روی در کلزا و افزایش آن در ذرت شد. فاکتور تجمع زیستی از تقسیم غلظت روی در شاخساره گیاه به غلظت کل روی در خاک بدست آمد. فاکتور تجمع زیستی در کلزا بیشتر از ذرت بود و کشت مخلوط باعث کاهش این فاکتور در ذرت و کلزا شد (جدول ۷).

### نتیجه گیری

کربن آلی محلول در خاک تحت کشت ذرت بیشتر از کلزا بوده و در کشت مخلوط مقدار حد واسط ذرت و کلزا مشاهده شد. pH در اثر کشت گیاه کاهش یافت. کشت گیاه توزیع شکل‌های روی را در خاک تحت تأثیر قرار داده و با افزایش بخش تبادل‌ی و وابسته به مواد آلی،



**References**

- Alloway BJ. 1995. Heavy metals in soils. Second Edition, Springer, Chapman & Hall, London.
- Bernal MP and McGrath SP. 1994. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* L. Plant Soil, 166:83–92.
- Bremner JM and Keeney DR. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: Exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction distillation methods. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:577-582.
- Chairidchai P and Ritchie GSP. 1992. The effect of pH on zinc adsorption by a lateritic soil in the presence of citrate and oxalate. Soil Sci. 43:723-728.
- Chen Z, Setagava M, Kang Y, Sakurai K, Aikava Y and Iwasaki K. 2009. Zinc and cadmium uptake from a metalliferous soil by a mixed culture of atbyrium yokoscense and arabis flagellosa. Soil Sci and Plant Nutr. 55: 315-324.
- Felix H. 1997. Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants. Z. Pflanzenernahr. Bodenk. 160: 525-529.
- Gee GW and Bauder JW. 1986. Particle-size analysis. In: Klute A (eds.). Methods of soil analysis, Part 1. Vol 9. ASA and SSSA. Madison, WI. pp. 383-412.
- Gripsen VMJ, Nelissen HJM and Verkleij TAC. 2006. Phytoextraction with plants: A tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils. J. Environ. Pollut. 144: 77-83.
- Harter RD. 1991. Micronutrient adsorption-desorption reactions in soils. In: Mortvedt JJ et al (eds.). Micronutrients in Agriculture. 2<sup>nd</sup> ed., SSSA, Madison, WI. 59-87p.
- Hseu ZY. 2006. Extractability and bioavailability of zinc over time in three tropical soils incubated with biosolids. Chemosphere, 63: 762–771.
- Iyengar SS, Martens DC and Miller WP. 1981. Distribution and plant availability of soil zinc fractions. Soil. Sci. Soc. Ame. J. 45: 735-739.
- Kabata-Pendias A and Pendias H. 2000. Trace Elements in Soil and Plants. Third ed, CRC press, Bokarton, London, New York. Washington, D.C.
- Ksouri R, Debez A, Mahmoudi H, Ouerghi Z, Gharsalli M, Kozak M and Rostad HPW. 1995. Speciation of particulate-bound cadmium of soils and its bioavailability. Analyst. 120 (3): 659-665.
- Kuo S. 1996. Phosphorus. In: Sparks DL (Eds.). Methods of soil analysis, Part 3. Vol 5. ASA and SSSA. Madison, WI. 225-311p.
- Lindsay WL and Norvell WA. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:421-428.
- Marchiol L, Assolari S, Sacco P and Zerbi G. 2004.. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multi-contaminated soil. Environ Pollut. 132: 21-27 .
- McGrath SP and Cunliffe CH. 1985. A simplified method for the extraction of the metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. J Sci Food Agric. 36: 794-798.
- McGrath SP, Shen ZG and Zhao FJ. 1997. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils. Plant Soil, 188: 153-159.
- Mench M and Martin E. 1991. Mobilization of cadmium and other metals from two soils by root exudates of *Zea mays* L. *Nicotiana tabacum* L. and *Nicotiana rustica* L. Plant Soil, 132:187-196.
- Navas A and Lindhorfer H. 2002. Geochemical speciation of heavy metals in semiarid soils of the central Ebro Valley (Spain). Environ. Int. 29:61-68.
- Nelson DW and Sommers LE. 1982. Total carbon, OC and organic matter. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds.). Methods of soil analysis, Part 2, 2<sup>nd</sup> Ed. Vol. 9. ASA and SSSA. Madison, WI. 539-577p.
- Nye PH. 1981. Changes of pH across the rhizosphere induced by root. Plant Soil, 61: 7-26.
- Park J, Kim JY and Kim KW. 2012. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals using *Brassica napus*. Geosyst. Eng.15 (1): 10-18 .

- Puschenreiter M, Schnepf A, Millan IM, Fitz WJ, Horak O, Klepp J, Schrefl T, Lombi E and Wenzel WW. 2005. Changes of Ni biogeochemistry in the rhizosphere of the hyperaccumulator *Thlaspi goesingense*. Plant Soil, 271: 205-218.
- Rhoades JD. 1982. Cation exchange capacity. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (Eds.). Methods of soil analysis, Part 2, 2<sup>nd</sup> Ed. Vol. 9. ASA and SSSA. Madison, WI. 149-157p.
- Sauerbeck DR and Hein A. 1991. The nickel uptake from different soils and its predication by chemical extractants. Water, Air and Soil Pollut. 57: 861-871.
- Seguin V, Gagnon C and Courchesne F. 2004. Changes in water extractable metals, pH and organic carbon concentrations at the soil-root interface of forested soils. Plant Soil, 260: 1-17.
- Shan XQ and Chen B. 1993. Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid. Anal. Chem. 65: 802-807.
- Shen ZG, Zhao FJ and McGrath SP. 1997. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non-hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. Plant Cell Environ. 20: 898-906.
- Stevenson FJ. 1994. Humus chemistry: Genesis, composition and reactions. John Wiley & Sons, NewYork.
- Sun YB, Zhou QX, Ren LP. 2007. Growth responses of *Rorippa globosa* and its accumulation characteristics of Cd and As under the Cd-As combined pollution, Envir. Sci. 28: 1355-1360.
- Tessier A, Campbell PGC and Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. Anal. Chem. 51: 844-851.
- Turan M and Esring A. 2007. Phytoremediation based on canola (*Brassica napus* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. Plant. Soil. Environ. 53 (1):7-15 .
- Wang ZG, Shan XQ and Zhang SZ. 2002. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils. Chemosphere, 46: 1163-1171.
- Youssef RA and Chino M. 1987. Studies on the behavior of nutrients in the rhizosphere. Establishment of a new rhizobox system to study nutrient status in the rhizosphere. Plant Nutr. 10: 1185-1195.
- Zhang F, Römheld V and Marschner H. 1989. Effect of zinc deficiency in wheat on the release of zinc and iron mobilization root exudates. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 152: 205-210.

## Changes in Chemical Forms and Bioavailability of Zinc by Distance from Rhizosphere of Single and Mixed Culture

Yaser Azimzadeh<sup>1\*</sup>, Hosein Shariatmadari<sup>2</sup>, Mehran Shirvani<sup>3</sup>

1- MSc. Student of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

2, 3- Professor and Assistant Professor of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

\* Corresponding author: [yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:yaser.azimzadeh@gmail.com)

Received: 23.10.2012

Accepted: 12.03.2013

### Abstract

Heavy metals behavior in soil is complicated due to their different chemical forms. To investigate the effects of single and mixed rhizosphere of canola and corn on chemical forms and DTPA extractability of zinc, this experiment is set up using a rhizobox system. The rhizoboxes divided into four different parts and canola and corn were seeded in the middle part mixed or separately. The plants were harvested after the growth period and the soil samples were taken from different parts of the rhizoboxes. The results showed that, due to the decrease in pH and increase in dissolved organic carbon, the distribution of different forms of zinc changed in rhizosphere as compared to the bulk soil. The DTPA extractability of Zn is increased in the rhizosphere, while decreased with distance from the root. The soil pH increased and the DOC decreased from rhizosphere toward the bulk soil while the exchangeable, organic bound and oxide forms of zinc changed differently. There was a positive correlation between DOC and DTPA extractable, exchangeable, and organic and carbonate bound forms of zinc while the correlation between these forms and soil pH and oxide bound Zn was negative. Zinc concentrations in corn and canola shoot decreased while zinc uptake increased over corn in mixed culture. The Zn transport factor from root to shoot in mixed culture was greater than corn but lower than canola in single culture.

**Key words:** zinc, rhizosphere, mixed culture, rhizobox, fractionation