ارتباط اجزای روی با پاسخ‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) در برخی خاک‌های آهکی تیمارشده و تیمارنشده با لجن فاضلاب

حمیدرضا متقیان*، علیرضا حسین‌پور، فایز رئیسی و جهانگرد محمدی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۸)

چکیده

مطالعه اجزاء روی در خاک امکان تعیین جزء یا شکل‌های قابل استفاده این عنصر را می‌دهد. در این تحقیق ۱۰ نمونه خاک آهکی انتخاب و سپس خاک‌های تیمارنشده (شاهد) و تیمارشده با لجن فاضلاب (۱٪ وزنی- وزنی) به‌مدت ۱ ماه در رطوبت ظرفیت مزرعه خوابانده شدند. قبل از کشت، اجزاء روی در خاک‌های شاهد و تیمارشده تعیین، سه بذر در هر گلدان کشت و پس از ۸ هفته بخش هوایی گیاهان برداشت شد. نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش تمام اجزاء روی شد. در خاک‌های شاهد، بین غلظت روی در گندم و روی تبادلی (r= ۰/۹۲) و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز (r= ۰/۷۶*) همبستگی معنی‌داری وجود داشت. به‌علاوه روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با جذب روی همبستگی معنی‌داری (r= ۰/۸۶**) داشت. هم‌چنین در خاک‌های تیمارشده، پاسخ‌های گندم با روی تبادلی همبستگی معنی‌داری (r=۰/۷۱*-۰/۸۴**) داشتند. ماده خشک با روی پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری (به‌ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۷۵) داشت. جذب روی با مقدار روی پیوندشده با کربنات‌ها همبستگی معنی‌داری (r=۰/۶۴*) داشت. بنابراین در خاک‌های شاهد جزءهای تبادلی و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و در خاک‌های تیمارشده جزءهای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز می‌توانند به‌عنوان اجزاء دارای قابلیت استفاده گندم به‌کار روند.**

واژه‌های کلیدی: روی، جزءبندی، لجن فاضلاب، گندم

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hrm_61@yahoo.com

مقدمه

خاک از ترکیبات مختلف مانند کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز، کربنات‌ها، مواد آلی و دیگر اجزاء جامد تشکیل شده است. هم‌چنین، گونه‌های شیمیایی مختلف، عناصر در محلول خاک وجود دارند (۸). به‌علاوه ویژگی‌های متعددی مانند ظرفیت تبادل کاتیونی، پ هاش، نوع و مقدار رس و مقدار ماده‌آلی همگی بر رفتار شیمیایی عناصر سنگین در خاک‌ها اثر می‌گذارند. بنابراین یک عنصر ممکن است بسته به این‌که با ترکیبات مختلف خاک، سطوح واکنش‌دهنده و محل‌های پیوند داخلی یا خارجی با انرژی مختلف پیوند داشته باشد، می‌تواند اجزای مختلفی را تشکیل دهد (۲۰).

جزءهای مختلف عناصر قابلیت استفاده یکسانی برای گیاه ندارند و بنابراین قابلیت استفاده عناصر برای گیاه اغلب ارتباط زیادی با نحوه توزیع آن عنصر در اجزاء مختلف خاک دارد (۱۵ و ۴۱). بر همین اساس جداسازی اجزای عناصر در برآورد مقدار قابل استفاده آنها حائز اهمیت است. یکی از اولین روش‌های عصاره‌گیری متوالی به‌وسیله تسیر و همکاران (۴۷) ارائه شده است و به‌صورت گسترده‌ای در جزءبندی عناصر سنگین به اجزای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، پیوندشده با ماده‌آلی و باقی‌مانده در خاک‌ها به‌کاربرده می‌شود (۶).

استفاده از لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی در حال افزایش است و تعیین مقدار کل روی در آن اطلاعاتی درباره مقدار قابل استفاده این عنصر برای گیاه در اختیار قرار نمی‌دهد (۷). درحالی‌که امکان برآورد جزء یا اجزای روی که قابلیت استفاده برای گیاه دارند در طی مطالعه جزءبندی در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب، فراهم می‌گردد. به علاوه نحوه توزیع عناصر کم‌نیاز از جمله روی در اجزای مختلف، بیانگر توان خاک در تأمین میزان کافی عناصر برای رشد گیاه است (۶).

در تحقیقات زیادی ارزیابی قابلیت استفاده عناصر کم‌نیاز خاک با استفاده از روش‌های عصاره‌گیری متوالی انجام شده است (۱۵، ۳۶ و ۳۹). هم‌چنین در تحقیقات زیادی رابطه بین اجزای مختلف عناصر کم‌نیاز و پاسخ‌های گیاه مورد توجه قرار گرفته است (۲۱ و ۲۶). با وجود این به خصوص در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب، تعیین جزء یا اجزای روی که قابلیت استفاده بیشتری برای گیاهان دارند هنوز مسأله‌ای حل نشده است، زیرا قابلیت استفاده عناصر به‌وسیله گیاه به نوع گیاه و نوع خاک بستگی دارد. بنابراین بررسی رابطه بین اجزاء روی در خاک و پاسخ‌های گیاه ضروری است (۶). باکرسی‌اوقلو و همکاران (۹) در خاک‌های ترکیه به بررسی همبستگی اجزاء روی با غلظت این عنصر در گیاه گندم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که جزءهای تبادلی و پیوندشده با اکسیدها با پاسخ غلظت روی در گندم ضریب همبستگی به‌ترتیب *۰/۷۱۵ و *۰/۶۲۱ داشتند. آلوارز و همکاران (۶) مشاهده کردند که غلظت روی در گیاه جو با جزء باقی‌مانده همبستگی معنی‌داری ($r=۰/۶۷^{**}$) داشت. لیانگ و همکاران (۲۳) به بررسی جزءبندی عنصر روی در خاک‌های اسیدی و آهکی تحت کشت لوبیا و یونجه پرداختند. نتایج آنها نشان داد که روی جذب شده به‌وسیله هر دو گیاه در خاک‌های آهکی با جزءهای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و باقی‌مانده و در خاک‌های اسیدی با اجزاء تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای منگنز همبستگی معنی‌داری داشت. در تحقیقات کمی به بررسی جزءبندی عناصر کم‌نیاز در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب پرداخته شده است (۳۷، ۴۳ و ۴۴). لک‌لاری و همکاران (۲۴) مشاهده کردند که در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب بین غلظت روی در برگ جو با مقدار روی تبادلی، پیوندشده با ماده‌آلی، پیوندشده با کربنات‌ها و باقی‌مانده همبستگی معنی‌داری وجود داشت. در مورد قابلیت استفاده اجزای روی در خاک‌های چهارمحال و بختیاری مطالعه‌ای انجام نشده است. هدف این مطالعه بررسی رابطه بین اجزای روی و پاسخ‌های گیاه گندم در خاک‌های آهکی تیمارشده و تیمارنشده با لجن فاضلاب بود.

مواد و روش‌ها

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

این تحقیق روی ۱۰ نمونه خاک لایه شخم (۳۰ cm – ۰)

جدول ۱. خلاصه روش عصاره‌گیری تسیر برای جزءبندی روی (۴۷)

جزء	مرحله	روش عصاره‌گیری	دما (سلسیوس)	زمان (ساعت)
تبادلی	۱	۱ گرم خاک + ۸ میلی‌لیتر $MgCl_2$ ۱ مولار (pH =۷)	دمای اتاق	۲
پیوندشده با کربنات‌ها	۲	۸ میلی‌لیتر CH_3COONa ۱ مولار (pH=۵)	دمای اتاق	۶
پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز	۳	۲۰ میلی‌لیتر $NH_2OH.HCl$ ۰/۰۴ مولار (در اسید استیک ۲۵٪)	۹۶±۳	۶
پیوندشده با ماده‌آلی	۴	۵ میلی‌لیتر HNO_3 ۰/۰۲ مولار + ۸ میلی‌لیتر H_2O_2 ۳۰٪ (pH=۲) + ۵ میلی‌لیتر NH_4OAC ۳/۲ مولار (در اسید نیتریک ۲۰٪)	۸۵±۲	۵
			دمای اتاق	۰/۵
باقی‌مانده *	۵	۷ میلی‌لیتر HNO_3 ۴ نرمال	۸۰±۲	۱۶

*: بخش باقی‌مانده با استفاده از روش عصاره‌گیری اسپوزیتو و همکاران (۴۴) اندازه‌گیری شد.

استان چهارمحال و بختیاری که از نظر روی قابل استفاده، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل تغییرات زیادی داشتند انجام شد. براساس رده‌بندی آمریکایی خاک‌های مورد مطالعه در زیر گروه‌های Typic calcixerepts و haploxerepts Typic قرار دارند. بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۱۴)، pH خاک در سوسپانسون دو به یک آب به خاک (۴۸)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره دو به یک آب به خاک (۴۰)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (۲۵)، گنجایش تبادل کاتیونی به‌روش استات سدیم در pH برابر با ۷ (۴۶)، ماده‌آلی به‌روش اکسیداسیون مرطوب (۳۳) تعیین شدند. مقادیر قابل استفاده آهن، منگنز، مس و روی به‌ترتیب با استفاده از DTPA-TEA (۲۴) و کل روی با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۴) تعیین شدند. نیتروژن با روش کجلدال و پتاسیم خاک‌ها با استات آمونیوم ۱ مولار اندازه‌گیری شدند.

لجن فاضلاب

لجن فاضلاب خشک شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد. خصوصیات لجن فاضلاب شامل pH در سوسپانسیون پنج به یک آب به لجن فاضلاب، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره پنج به یک آب به لجن فاضلاب و مقادیر کل و قابل استفاده روی به‌ترتیب با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۴) و DTPA-TEA (۲۴) تعیین شدند. هم‌چنین مقدار کل عناصر کادمیم، نیکل، سرب و مس با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۴) تعیین شد.

کشت گلخانه‌ای

مقدار ۱۰ گرم لجن فاضلاب به هر کیلوگرم خاک اضافه و رطوبت خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب و خاک‌های تیمارنشده به حدود ظرفیت مزرعه‌ای رسانده و به‌مدت ۱ ماه خوابانده شدند (۳ و۱۷). در طول دوره انکوباسیون رطوبت خاک‌ها در حدود ظرفیت مزرعه‌ای ثابت شد (۱۸). در پایان دوره انکوباسیون و قبل از کشت، در خاک‌های تیمارشده و تیمارنشده با لجن فاضلاب اجزای مختلف روی با روش تسیر و همکاران (۴۷) عصاره‌گیری شدند (جدول ۱).

این پژوهش قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد (شکل ۱). مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک به گلدان‌ها منتقل شد. به هر گلدان در خاک‌های شاهد ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به‌صورت تقسیط در سه مرحله، ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم و ۵

شکل ۱. الگوی کشت گندم (سمت راست) و گندم‌های کشت‌شده در خاک‌های تیمارشده (T1) و شاهد (T0) خاک شماره ۳ (سمت چپ)

میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین ۱۳۸ اضافه شد. هم‌چنین مقدار کود فسفره پس از تعیین فسفر قابل استفاده خاک‌ها با روش اولسن قبل از کشت، به هر گلدان اضافه شد. بذرهای گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم بک‌کراس روشن با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (۳٪) و درون آب قرار داده شد و در کاغذ صافی جوانه زدند. سپس ۳ بذر در هر گلدان کشت شد. در طول مدت رشد مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه‌ای ثابت بماند. گیاهان ۸ هفته پس از جوانه‌زدن برداشت شدند. بخش‌های هوایی با آب مقطر شسته و به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون تهویه‌دار خشک و سپس وزن خشک اندام هوایی تعیین شد. غلظت روی در اندام‌های هوایی با روش خاکستر خشک عصاره‌گیری (۱۱) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی‌بی‌سی، ۹۳۲) تعیین و سپس روی جذب‌شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

ماده خشک (کیلوگرم در گلدان) × غلظت روی (میلی‌گرم در کیلوگرم) = روی جذب‌شده (میلی‌گرم در گلدان)

معنی‌دار بودن تفاوت بین اجزای روی و پاسخ‌های گندم در سطح احتمال ۵ درصد در خاک‌های تیمارشده و تیمارنشده با استفاده از آزمون t-test (نمونه‌های جفت‌نشده) انجام شد. ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین پاسخ‌های گندم (ماده خشک، غلظت و جذب روی) با اجزای روی در خاک‌های شاهد و تیمارشده با لجن فاضلاب برای تعیین جزء یا جزءهای روی که بیشترین قابلیت استفاده برای گندم را در این خاک‌ها دارند در سطح احتمال ۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 17.0 تعیین شدند.

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج دامنه تغییرات رس ۲۵ تا ۵۵٪ و سیلت دارای دامنه ۳۳ تا ۵۵٪ بود. دامنه pH در خاک‌های مورد مطالعه ۷/۵ تا ۸/۱ و قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. دامنه تغییرات کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک‌ها به‌ترتیب ۰/۳۰ تا ۱/۱۹ و ۱۱/۲۷ تا ۴۱/۰۳٪ بود. دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۱/۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌مول بار در کیلوگرم بود. دامنه تغییرات عناصر نیتروژن ۰/۰۴ تا ۰/۱۶ درصد، فسفر ۷/۱ تا ۳۵/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و پتاسیم ۱۳۶ تا ۲۹۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. مقدار قابل استفاده روی در دامنه ۰/۳۴ تا ۱/۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقدار کل روی خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۳۴ تا ۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود.

ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر عناصر سنگین موجود در لجن فاضلاب مورد استفاده با استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا نشان داد که غلظت این عناصر در لجن فاضلاب کمتر از حداکثر غلظت استاندارد این عناصر (حداکثر

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	رس	سیلت	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	pH	قابلیت هدایت الکتریکی	گنجایش تبادل کاتیونی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	منگنز	مس	روی	روی کل
			(٪)			($dS\ m^{-1}$)	($cmol\ kg^{-1}$)	(٪)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)	قابل استفاده ($mg\ kg^{-1}$)				($mg\ kg^{-1}$)
۱	۵۵	۴۰	۲۸/۶۷	۰/۷۲	۷/۸	۰/۱۳	۲۰/۹	۰/۱۰	۲۰/۴	۲۵۰	۳/۷۹	۷/۵۸	۱/۱۸	۰/۵۰	۵۷
۲	۵۳	۴۴	۳۵/۵۸	۰/۳۰	۸/۱	۰/۱۳	۱۹/۳	۰/۰۴	۲۵/۷	۲۳۸	۳/۸۵	۷/۷۱	۱/۵۰	۰/۵۹	۵۴
۳	۴۹	۳۹	۲۹/۳۷	۰/۵۱	۷/۹	۰/۱۲	۲۲/۵	۰/۰۷	۷/۱	۱۹۷	۴/۵۴	۹/۰۹	۱/۸۶	۰/۳۴	۴۵
۴	۴۶	۴۲	۲۶/۳۷	۰/۷۱	۷/۸	۰/۱۴	۲۱/۶	۰/۱۰	۱۹/۲	۲۹۶	۴/۶۶	۹/۳۲	۱/۱۲	۰/۷۵	۴۵
۵	۴۱	۴۲	۳۲/۱۹	۰/۵۴	۸/۱	۰/۱۳	۱۶/۰	۰/۰۷	۳۵/۴	۲۲۵	۳/۷۶	۷/۵۳	۱/۰۷	۰/۵۴	۳۷
۶	۳۷	۴۴	۳۲/۴۹	۰/۸۰	۷/۶	۰/۱۶	۱۵/۶	۰/۱۰	۱۶/۷	۲۳۰	۴/۰۹	۸/۱۸	۰/۸۵	۰/۶۶	۴۴
۷	۲۵	۳۳	۴۱/۰۳	۰/۴۷	۷/۷	۰/۲۱	۱۱/۵	۰/۰۶	۱۰/۳	۱۳۶	۲/۲۴	۶/۴۸	۰/۵۴	۰/۷۷	۳۴
۸	۳۸	۵۵	۲۳/۰۶	۱/۱۹	۸/۱	۰/۲۴	۱۷/۹	۰/۱۶	۲۷/۰	۲۹۲	۳/۰۵	۶/۹۰	۱/۳۰	۰/۷۳	۵۸
۹	۴۸	۴۶	۱۱/۲۷	۱/۱۶	۷/۸	۰/۲۵	۱۸/۵	۰/۱۲	۱۵/۲	۲۰۲	۳/۷۲	۷/۴۴	۰/۸۹	۱/۳۱	۵۴
۱۰	۴۹	۴۶	۱۴/۷۶	۰/۹۷۰	۷/۹	۰/۲۳	۱۷/۹	۰/۱۳	۱۹/۶	۲۷۹	۳/۷۱	۷/۴۱	۱/۴۱	۰/۳۹	۵۶

جدول ۳. برخی ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده

ویژگی	واحد	مقدار	حداکثر غلظت استاندارد (۴۹)
pH	–	۷/۵	–
کربن آلی	درصد	۲۰/۳	–
نیتروژن	″	۵/۷	–
فسفر	″	۱/۵	–
پتاسیم	″	۰/۴۵	–
روی قابل استفاده	میلی‌گرم در کیلوگرم	۵۵۸	–
مس قابل استفاده	″	۴۱	–
روی	″	۱۳۲۱	۷۵۰۰
مس	″	۷۸	۴۳۰۰
کادمیم	″	۷۳	۸۵
نیکل	″	۴۵	۴۲۰
سرب	″	۵۸۳	۸۴۰

شکل ۲. نمایی از لجن فاضلاب استفاده شده در این تحقیق

غلظت استاندارد عناصر روی، مس، کادمیم، نیکل و سرب به‌ترتیب ۷۵۰۰، ۴۳۰۰، ۸۵، ۴۲۰ و ۸۴۰ میلی‌گرم) بود (۴۹). نمایی از لجن فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

مقادیر اجزای مختلف روی در خاک‌های شاهد و تیمارشده با لجن فاضلاب در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد در بین اجزاء روی در خاک‌های شاهد، جزء تبادلی با میانگین ۰/۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم حداقل مقدار را داشت. بعد از جزء تبادلی، جزءهای پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با ماده‌آلی با میانگین به‌ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۷۷ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشت. جزء باقی‌مانده با میانگین ۴۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم حداکثر مقدار را در بین اجزای روی در خاک‌های شاهد داشت. بعد از جزء باقی‌مانده، جزء پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با میانگین ۴/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشت.

جزء تبادلی با میانگین ۰/۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم حداقل مقدار را در بین اجزای روی در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب داشت. بعد از جزء تبادلی، جزءهای پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با ماده‌آلی با میانگین ۴/۴۸ و ۱/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشتند. در بین اجزای روی در خاک‌های تیمارشده جزء باقی‌مانده با میانگین ۴۶/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم حداکثر مقدار را داشت. بعد از جزء باقی‌مانده، روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با میانگین ۱۳/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار داشت. براساس نتایج، تفاوت اجزای روی در خاک‌های مختلف نشان‌دهنده تفاوت ویژگی‌های خاک‌های مورد استفاده و هم‌چنین واکنش‌پذیری متفاوت روی با ترکیبات مختلف در خاک‌ها است.

در تحقیقات زیادی گزارش شده است که بیشترین مقدار روی در جزء باقی‌مانده و بعد از آن جزء پیوندشده با اکسیدهای آهن قرار دارد (۶، ۳۴ و ۴۱). اوبرادور و همکاران (۳۴) مشاهده کردند که در خاک‌های آهکی بیشترین مقدار روی به‌صورت جزء باقی‌مانده بود. آنها گزارش کردند که قرارگیری بیشترین مقدار روی در جزء باقی‌مانده می‌تواند به‌دلیل تمایل روی به قرارگیری در شکل غیر قابل استفاده و باقیماندن در خاک‌های قلیایی باشد. نتایج آنها نشان داد که بعد از جزء باقی‌مانده، جزءهای پیوندشده با اکسیدهای آهن، پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با ماده‌آلی و پیوندشده با اکسیدهای منگنز قرار داشتند. هم‌چنین آنها گزارش کردند که مقدار روی در محلول خاک و جزء تبادلی قابل تشخیص برای دستگاه جذب اتمی نبود. ریحانی‌تبار و همکاران (۱) و قانع و کریمیان (۲) به‌ترتیب در خاک‌های آهکی استان‌های تهران و فارس گزارش کردند که روی به شکل تتمه بیشترین مقدار را داشت. آلوارز و همکاران (۶) گزارش کردند که در خاک‌های قلیایی مورد مطالعه بیشترین مقدار روی به‌صورت جزء باقی‌مانده بود. براساس نتایج آنها، بعد از جزء باقی‌مانده، جزءهای پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با ماده‌آلی و تبادلی قرار داشتند. روپا و شوکلا (۴۱) گزارش کردند که بعد از مقدار روی در جزء باقی‌مانده، بیشترین مقدار روی در جزء پیوندشده با

اکسیدهای آهن بود. شریواستاوا و بانرجی (۴۲) مشاهده کردند که در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب روی باقی‌مانده بیشترین مقدار را دارد و بعد از آن اجزای پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با ماده‌آلی و تبادلی قرار داشتند.

همان‌طورکه در جدول ۴ مشاهده می‌شود بر اثر افزودن لجن فاضلاب به خاک‌های مورد مطالعه، مقدار اجزاء روی افزایش معنی‌داری یافت. میانگین اجزای روی در خاک‌های شاهد با میانگین جزءهای روی در خاک تیمارشده با لجن فاضلاب تفاوت معنی‌داری (به‌جز روی تبادلی در سطح احتمال ۵٪) در سطح احتمال ۱٪ داشتند. بر اثر افزودن لجن فاضلاب به خاک‌ها، میانگین جزء تبادلی ۱/۴۲، جزء پیوندشده با کربنات‌ها ۳/۷۹، جزء پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز ۲/۷۱، جزء پیوندشده با ماده‌آلی ۱/۹۳ و جزء باقی‌مانده ۱/۱۱ برابر افزایش یافت. به‌طورکلی لجن فاضلاب همواره دارای مقدار زیادتری عناصر کم‌نیاز نسبت به خاک است. بنابراین افزودن لجن فاضلاب به خاک باعث افزایش غلظت این عناصر در خاک می‌شود (۳۰ و ۴۳). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روی آزادشده از لجن فاضلاب با کربنات‌ها و اکسیدهای آهن و منگنز در خاک پیوند داده و بنابراین مقدار این اجزاء در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب افزایش می‌یابد. افزایش مقدار روی پیوندشده با کربنات‌ها در خاک‌های آهکی تیمارشده می‌تواند به این دلیل باشد که خاک‌های آهکی منبع بزرگ کربنات‌ها هستند و توانایی پیوند با روی آزادشده از لجن فاضلاب را دارند. هم‌چنین اکسیدهای آهن تمایل زیادی برای جذب روی دارند (۴۵). بنابراین مقدار روی پیوندشده با این دو جزء نسبت به سایر جزءهای روی در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب افزایش بیشتری یافته بود. نتایج مشابهی به‌وسیله سو (۱۸) گزارش شده است. برازاوسکین و همکاران (۱۰) مشاهده کردند که با افزایش لجن فاضلاب به خاک‌ها مقدار روی تبادلی افزایش یافت. نتایج آنها نشان داد که در طی انکوباسیون روی از جزءهای تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها به جزءهای پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز و پیوندشده با ماده‌آلی انتقال می‌یابد.

جدول ۵ پاسخ‌های گیاه گندم را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طورکه این جدول نشان می‌دهد غلظت روی و ماده خشک گیاه در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب (به غیر از غلظت روی در خاک شماره ۹) افزایش معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ داشت. مرینگتون و همکاران (۳۲) گزارش کردند که با افزایش مقدار مصرف لجن فاضلاب در خاک‌ها، غلظت روی در بخش‌های هوایی گیاه گندم افزایش می‌یابد. افیونی و همکاران (۵) افزایش روی جذب‌شده به‌وسیله گیاهان کاهو و اسفناج در خاک تیمارشده با لجن فاضلاب را گزارش کردند.

نتایج بررسی قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌ها پس از کشت نشان داد که قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب و خاک‌های شاهد تفاوت معنی‌داری نداشتند (اعداد نشان داده نشده است)، به عبارت دیگر علیرغم بالا بودن قابلیت هدایت الکتریکی لجن فاضلاب، به‌دلیل مصرف کم لجن فاضلاب و یا رسوب املاح محلول موجود در لجن به‌صورت املاح با حلالیت کمتر، کاربرد لجن فاضلاب تأثیری بر شور کردن خاک‌ها نداشته است.

ضریب همبستگی بین مقادیر اجزاء مختلف روی در خاک‌های شاهد و تیمارشده با لجن فاضلاب با پاسخ‌های گیاه گندم در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طورکه نتایج این جدول نشان می‌دهند در خاک‌های شاهد، پاسخ غلظت روی در گندم با روی تبادلی و روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری داشت. ضرایب همبستگی غلظت روی در گندم با روی تبادلی و روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز به‌ترتیب ۰/۹۶ و۰/۷۶ بود. بین ماده خشک و اجزای روی همبستگی معنی‌داری دیده نشد. هم‌چنین جذب روی تنها با مقدار روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز در بین اجزای مختلف روی همبستگی معنی‌داری (r=۰/۸۶) داشت. براساس نتایج جدول ۶ غلظت روی در گندم و جذب روی با

جدول ۵. پاسخ‌های گندم در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	خاک‌های شاهد			خاک‌های تیمارشده		
	غلظت (میلی‌گرم در کیلوگرم)	ماده خشک (گرم در گلدان)	جذب (میلی‌گرم در گلدان)	غلظت (میلی‌گرم در کیلوگرم)	ماده خشک (گرم در گلدان)	جذب (میلی‌گرم در گلدان)
۱	۱۴/۲۰	۴/۱۹	۰/۰۶	۲۳/۲۰	۵/۷۲	۰/۱۳
۲	۱۷/۸۵	۶/۷۵	۰/۱۲	۲۸/۲۰	۶/۳۷	۰/۱۸
۳	۱۶/۴۰	۵/۷۷	۰/۰۹	۳۳/۰۰	۸/۴۲	۰/۲۸
۴	۳۹/۶۵	۶/۰۲	۰/۲۴	۴۲/۱۷	۹/۹۰	۰/۴۲
۵	۱۸/۲۵	۵/۸۲	۰/۱۱	۳۱/۴۵	۸/۷۶	۰/۲۸
۶	۲۴/۸۷	۴/۳۱	۰/۱۱	۳۲/۷۰	۷/۸۸	۰/۲۶
۷	۲۳/۸۳	۴/۳۴	۰/۱۰	۳۳/۹۰	۸/۵۰	۰/۲۹
۸	۲۰/۲۵	۶/۸۶	۰/۱۴	۲۵/۷۰	۶/۹۲	۰/۱۸
۹	۲۸/۳۰	۸/۷۲	۰/۲۵	۲۸/۲۸	۱۱/۷۱	۰/۳۳
۱۰	۱۷/۲۰	۶/۱۵	۰/۱۱	۲۴/۴۰	۷/۷۵	۰/۱۹
میانگین*	۲۲/۰۸a	۵/۸۹ a	۰/۱۳ a	۳۰/۳۰ b	۸/۱۹ b	۰/۲۵ b

*: حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها براساس آزمون t-test در سطح احتمال ۱ درصد هستند.

جدول ۶. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر اجزای مختلف روی و پاسخ‌های گندم

پاسخ	F1	F2	F3	F4	F5	F1+F2	F1+F2+ F3	(F1+F2)/ F5	(F1+F2+ F3)/ F5
					خاک‌های شاهد				
غلظت	۰/۹۲**	۰/۴۳ns	۰/۷۶*	۰/۰۷ns	−۰/۵۴ns	۰/۵۴ ns	۰/۷۶*	۰/۵۸ns	۰/۸۳**
ماده خشک	۰/۱۳ns	−۰/۲۶ns	۰/۵۸ns	۰/۳۰ns	۰/۲۶ns	−۰/۲۴ns	۰/۵۸ns	−۰/۴۳ns	۰/۰۹ns
جذب	۰/۶۰ns	۰/۰۴ns	۰/۸۶**	۰/۱۵ns	−۰/۰۸ns	۰/۱۲ ns	۰/۸۵**	۰/۰۱ns	۰/۵۳ns
					خاک‌های تیمارشده				
غلظت	۰/۸۴**	۰/۴۹ns	۰/۳۵ns	−۰/۵۰ns	−۰/۸۴**	۰/۴۴ns	۰/۳۹ ns	۰/۶۵*	۰/۶۶*
ماده خشک	۰/۷۱*	۰/۶۹*	۰/۷۵*	۰/۳۴ns	−۰/۶۶*	۰/۷۳*	۰/۸۰**	۰/۷۵*	۰/۷۵*
جذب	۰/۸۱*	۰/۶۴*	۰/۵۹	−۰/۳۶ns	−۰/۶۷*	۰/۶۶*	۰/۶۵*	۰/۷۲*	۰/۶۹*

F1: روی تبادلی، F2: روی پیوندشده با کربنات‌ها، F3: روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، F4: روی پیوندشده با ماده‌آلی و F5: روی باقی‌مانده

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns: غیرمعنی‌دار

مجموع جزءهای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به‌ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۸۵) داشتند. در خاک‌های شاهد غلظت روی در گندم با مجموع نسبی روی تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز نیز همبستگی معنی‌داری (r=۰/۸۳) داشت.

براساس نتایج جدول ۶ در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب، بین پاسخ‌های گندم با روی تبادلی همبستگی معنی‌داری وجود داشت. ضرایب همبستگی غلظت روی، جذب روی و ماده خشک گندم با روی تبادلی به‌ترتیب ۰/۸۴، ۰/۷۱ و ۰/۸۱ بود. هم‌چنین غلظت روی در گندم با جزء باقی‌مانده همبستگی منفی معنی‌داری (r=-۰/۸۴) داشت. این همبستگی منفی نشان می‌دهد که با افزایش جزء باقی‌مانده در خاک‌های مطالعه شده، غلظت روی در گندم رشد کرده در این خاک‌ها کاهش می‌یابد. در این خاک‌ها ماده خشک با روی پیوندشده با کربنات‌ها و روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به‌ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۷۵) داشت. هم‌چنین ماده خشک با جزء باقی‌مانده همبستگی منفی و معنی‌داری (r= -۰/۶۶) داشت. این همبستگی منفی چنانچه در مورد غلظت نیز گفته شد نشان می‌دهد که با افزایش جزء باقی‌مانده ماده خشک کاهش یافت. جذب روی با مقدار روی پیوندشده با کربنات‌ها و جزء باقی‌مانده همبستگی معنی‌داری (ضرایب همبستگی به‌ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۶۷-) داشت. در مورد جذب روی نیز جزء باقی‌مانده با این پاسخ مانند غلظت و ماده خشک همبستگی منفی داشت.

براساس نتایج جدول ۵ در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب بین ماده خشک گندم با مجموع جزءهای تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها و مجموع اجزای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. به علاوه روی جذب‌شده با مجموع جزءهای تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها و مجموع اجزای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری داشت. در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب پاسخ‌های گیاه با مقدار نسبی جزءهای تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها همبستگی معنی‌داری داشتند. ضرایب همبستگی غلظت روی، ماده خشک و جذب روی با این نسبت به‌ترتیب ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۷۲ بود. هم‌چنین غلظت، ماده خشک و روی جذب‌شده با مجموع نسبی جزءهای تبادلی، پیوندشده با کربنات‌ها و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری داشتند.

در تحقیقات انجام شده جزءهای مختلفی به‌عنوان جزء یا اجزای قابل استفاده گیاه گزارش شده‌اند. در تحقیقات انجام شده در حالی‌که جزء باقی‌مانده معمولاً قابل استفاده گیاه نیست، عناصر در محلول خاک و جزء تبادلی قابلیت استفاده زیادی برای گیاه دارند، هم‌چنین اجزای پیوندشده با کربنات‌ها، پیوندشده با اکسیدها و پیوندشده با ماده‌آلی نیز می‌توانند قابل استفاده گیاه باشند (۱۶). در تحقیقات زیادی همبستگی معنی‌داری بین غلظت روی در گیاه و روی تبادلی گزارش شده است (۲۲، ۲۸ و ۴۱). روی پیوندشده با ماده‌آلی قابلیت استفاده زیادی برای گیاه ندارد زیرا اجزای ماده‌آلی با وزن ملکولی زیاد، مقدار کمی از عناصر پیوندشده را با سرعت کم آزاد می‌کنند (۱۳). همبستگی منفی بین روی باقی‌مانده و پاسخ‌های گیاه، نشان‌دهنده این است که روی باقی‌مانده در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب برای گندم قابل استفاده نیست. اوبرادور و همکاران (۳۵) و برازاوسکین و همکاران (۱۰) گزارش کردند که در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب روی تبادلی و پیوندشده با کربنات‌ها بیشترین قابلیت استفاده را دارند. آنها این دو جزء را به‌عنوان اجزای نشان‌دهنده مقدار قابلیت استفاده روی در این خاک‌ها معرفی کرده‌اند. دودکا و چلوکا (۱۲) مشاهده کردند که در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب روی پیوندشده با کربنات‌ها ۴۱٪ مقدار روی کل را به خود اختصاص داده و این جزء توانایی جایگزینی روی تبادلی را داشته و بنابراین در قابلیت استفاده روی برای گیاه اهمیت زیادی دارد. لک‌لاری و همکاران (۲۲) مشاهده کردند که بین غلظت روی در برگ جو با مقدار روی تبادلی، پیوندشده با ماده‌آلی، پیوندشده با کربنات‌ها و باقی‌مانده همبستگی معنی‌داری وجود داشت. براساس نتایج آنها بین مقدار روی باقی‌مانده با پاسخ گیاه همبستگی منفی وجود داشت و آنها روی باقی‌مانده را جزء غیرقابل استفاده گزارش کردند.

در برخی تحقیقات اکسیدهای آهن و منگنز به‌عنوان جزء با قابلیت استفاده کم برای گیاه گزارش شده است. اینگار و همکاران (۱۹) گزارش کردند که اجزای تبادلی، پیوندشده با ماده‌آلی و باقی‌مانده روی، قابلیت استفاده بیشتری نسبت به روی پیوندشده با اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز برای گیاه دارند. نتایج آنها نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین جذب روی و جزء باقی‌مانده این عنصر وجود داشت. آنها گزارش کردند که هوادیدگی مواد مادری در خاک‌های دارای مقدار زیاد جزء باقی‌مانده و مقدار زیاد عنصر قابل استفاده اتفاق می‌افتد و بنابراین جزء باقی‌مانده برای گیاه قابل استفاده می‌شود. همبستگی معنی‌دار مقدار روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با پاسخ‌های گیاه در برخی تحقیقات گزارش شده است (۹ و ۳۸). استانتون و برگر (۴۵) گزارش کردند که اکسیدهای آهن تمایل زیادی برای جذب روی دارند، اما روی پیوند شده با اکسیدهای آهن به شکل غیرقابل استفاده تبدیل نمی‌شود. بر همین اساس مقدار نسبی روی پیوندشده با اکسیدهای آهن بیشتر از روی پیوندشده با اکسیدهای منگنز است (۲۷). هم‌چنین روی پیوندشده با اکسیدهای منگنز تأثیری بر قابلیت استفاده روی ندارند (۳۱). بنابراین به نظر می‌رسد در خاک‌های مورد مطالعه اهمیت روی پیوندشده با اکسیدهای منگنز در قابلیت استفاده روی کمتر از روی پیوندشده با اکسیدهای آهن باشد، اما به‌دلیل این‌که در روش عصاره‌گیری تسیر و همکاران (۴۷) یک جزء پیوند شده با اکسیدها شامل اکسیدهای آهن و منگنز را عصاره‌گیری می‌کند، علی‌رغم قابلیت استفاده کم روی پیوندشده با اکسیدهای منگنز بین پاسخ‌های گیاه گندم با روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد در خاک‌های شاهد و تیمارشده با لجن فاضلاب در بین اجزای روی، روی تبادلی حداقل و جزء باقی‌مانده حداکثر مقدار را داشتند. بعد از روی باقی‌مانده، روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز قرار داشت. تمایل زیاد اکسیدهای آهن برای جذب روی باعث افزایش مقدار این جزء در خاک‌های مورد مطالعه شده است و بعد از جزء باقی‌مانده بیشترین مقدار را در بین اجزاء روی دارد. بر اثر افزودن لجن فاضلاب به خاک‌ها، مقدار اجزای روی افزایش معنی‌داری یافت. بر اثر افزودن لجن فاضلاب میانگین روی پیوندشده با کربنات‌ها و روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز بیشترین افزایش را یافتند.

در خاک‌های شاهد، غلظت روی در گیاه گندم با روی تبادلی و روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌داری داشت. در این خاک‌ها ماده خشک با هیچ یک از اجزاء روی همبستگی معنی‌داری نداشت. در بین اجزاء مختلف روی، تنها مقدار روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز با جذب روی همبستگی معنی‌دار داشت. در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب، بین پاسخ‌های گندم با روی تبادلی همبستگی معنی‌داری وجود داشت. پاسخ‌های گیاه با جزء باقی‌مانده همبستگی منفی و معنی‌دار داشتند که نشان‌دهنده غیرقابل استفاده بودن این جزء برای گندم بود. در این خاک‌ها ماده خشک با مقدار روی پیوندشده با کربنات‌ها و مقدار روی پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز همبستگی معنی‌دار داشت. هم‌چنین جذب روی با مقدار روی پیوندشده با کربنات‌ها همبستگی معنی‌دار داشت. براساس نتایج به‌دست آمده در خاک‌های تیمارنشده، روی تبادلی و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز بیشترین قابلیت استفاده را برای گندم داشتند در حالی‌که در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب علاوه بر روی تبادلی و پیوندشده با اکسیدهای آهن و منگنز، روی پیوندشده با کربنات‌ها نیز در بین اجزای روی بیشترین قابلیت استفاده را برای گندم داشتند. در پایان پیشنهاد می‌شود روش‌های مختلف جزءبندی در پیش‌بینی قابلیت استفاده روی در گیاهان مطالعه شوند.

منابع مورد استفاده

۱. ریحانی‌تبار، ع.، ن. کریمیان، م. معزاردلان، غ. ثواقبی و م.ر. قنادها. ۱۳۸۵. توزیع شکل‌های روی و ارتباط آنها با ویژگی‌های خاک در برخی خاک‌های آهکی استان تهران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۲): ۱۳۵-۱۲۵.

۲. قانع، ه. و ن. کریمیان. ۱۳۸۲. توزیع شکل‌های مختلف روی در خاک‌های آهکی استان فارس و رابطه آنها با ویژگی‌های خاک. هشتمین کنگره علوم خاک ایران، صفحه ۶۴۲-۶۴۱. رشت (گیلان).

۳. متقیان، ح.ر.، ع.ر. حسین‌پور، ف. رئیسی و ج. محمدی. ۱۳۹۲. اثر ریزوسفر گندم (*Triticum aestivum* L.) بر قابلیت استفاده و شکل‌های روی در تعدادی از خاک‌های آهکی. مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). (در دست چاپ).

4. Adamo, P., L. Denaix, F. Terribile and M. Zampella. 2003. Characterization of heavy metals in contaminated volcanic soils of the Solofrana river valley (southern Italy). Geoderma 117: 347- 366.
5. Afyuni, M., Y. Rezaeinejad and R. Schulin. 2006. Extractability and plant uptake of Cu, Zn, Pb and Cd from a sludge - amended Haplargid in Central Iran. Arid Land Res. Manage. 20(1): 29-41.
6. Alvarez, J.M., L.M. Lopez-Valdivia, J. Novillo, A. Obrador and M.I. Rico. 2006. Comparison of EDTA and sequential extraction tests for phytoavailability prediction of manganese and zinc in agricultural alkaline soils. Geoderma 132: 450- 463.
7. Amir, S., M. Hafidi, G. Merlina and J.C. Revel. 2005. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. Chemosphere 59: 801–810.
8. Aydinalp, C. and A.V. Katkat. 2004. The comparison of extraction methods for evaluating some heavy metals in polluted soils. Plant and Soil Environ. 50: 212-217.
9. Bakircioglu, D., Y. Bakircioglu Kurtulus and H. Ibar. 2011. Investigation of trace elements in agricultural soils by BCR sequential extraction method and its transfer to wheat plants Environ Monit Assess. 175:303-314.
10. Brazauskiene, D.M., V. Paulauskas and N. Sabiene. 2008. Speciation of Zn, Cu, and Pb in the soil depending on soil texture and fertilization with sewage sludge compost. J. Soils Sediments 8:184-192.
11. Campbell, C.R. and C.O. Plank. 1998. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. PP. 37-50. *In*: Kalra, Y.P., (Ed). Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, Taylor & Francis Group.
12. Dudka, S. and A. Chlopecka. 1990. Effect of solid-phase speciation on metal mobility and phytoavailability in sludge-amended. Water Air, Soil Pollut. 51:153-160.
13. Filgueiras, A.V., I. Lavilla and C. Bendicho. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. Environ. Monitoring 4: 823-857.
14. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 404-407. *In*: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed., Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
15. Han, F.X., A.T. Hu and Y.H. Qi. 1995. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. Geoderma 66: 121- 135.
16. He, Z.L.L., X.E. Yang and P.J. Stoffella. 2005. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. J. Trace Elements in Med. & Biol. 19: 125-140.
17. Hooda, P.S. and B.J. Alloway. 1994. The plant availability and DTPA extractability of trace metals in sludge-amended soils. The Sci. of the Total Environ. 149:39-51.
18. Hseu, Z.Y. 2006. Extractability and bioavailability of zinc over time in three tropical soils incubated with biosolids. Chemosphere 63:762-771.
19. Iyengar, S.S., D.C. Martens and W.P. Miller. 1981. Distribution and plant availability of soil zinc fractions. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45: 735-139.
20. Kabata-Pendias, A. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
21. Krishnamurti, G.S.R. and R. Naidu. 2002. Solid-phase speciation and phytoavailability of copper and zinc in soils. Environ. Sci. Technol. 36: 2645-2651.
22. LeClaire, J. P., A.C. Chang, C.S. Levesque and G. Sposito. 1984. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: IV. Correlations between zinc uptake and extracted soil zinc fractions. Soil Sci. Soc. Amer. J. 48:509-513.
23. Liang, J., R.E. Karamanos and J.W.B. Stewart. 1991. Plant availability of Zn fractions in Saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 71: 507-517.
24. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42: 421-428.

25. Loeppert, R.H. and D.L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. PP. 437-474. *In:* Sparks, D.L. (Ed). Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
26. Lopez-Valdivia, L.M., M.D. Fernandez, A. Obrador and J.M. Alvarez. 2002. Zinc transformations in acidic soil and zinc efficiency on maize by adding six organic zinc complexes. J. Agric. Food Chem. 50: 1455-1460.
27. Ma, Y.B. and N.C. Uren. 1998. Transformations of heavy metals added to soil application of a new sequential extraction procedure. Geoderma 84: 157-168.
28. Mandai, L.N. and B. Mandai. 1986. Zinc fractions in soil in relation to zinc nutrition of low land rice. Soil Sci. 142:141-148.
29. McGrath, D. 1996. Application of single and sequential extraction procedures to polluted and unpolluted soils. Sci. Total Environ. 178: 37-44.
30. McGrath, S.P., F.J. Zhao, S.J. Dunhum, A.R. Crosland and K. Coleman. 2000. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. J. Environ. Qual. 29:87-883.
31. McKenzie, R.M. 1978. The effect of two manganese dioxides on the uptake of lead, nickel, copper and zinc by subterranean clover. Aust. J. Soil Res. 16:209-214.
32. Merrington, G., L. Winder and I. Green. 1997. The bioavailability of Cd and Zn from soils amended with sewage sludge to winter wheat and subsequently to the grain aphid Sitobionavenae. The Science of the Total Environ. 205:245-254.
33. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 961-1010. *In*: Sparks, D.L., (Ed). Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison,
34. Obrador, A., J. Novillo and J.M. Alvarez. 2003. Mobility and availability to plants of two zinc sources applied to a calcareous soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 67:564-572.
35. Obrador, A., M.I. Rico, J.M. Alvarez and J. Novillo. 2001. Influence of thermal treatment on sequential extraction and leaching behavior of trace metals in a contaminated sewage sludge. Bioresour Technol. 76:259-264.
36. Perez-Cid, B., M. De Jesus, E. Fernandez. 2002. Comparison of single extraction procedures, using either conventional shaking or microwave heating, and the Tessier sequential extraction method for the fractionation of heavy metals from environmental samples. Analyst, 127: 681-688.
37. Pichtel, J. and M. Anderson. 1997. Trace metal bioavailability in municipal solid waste and sewage sludge composts. Bioresour. Technol. 60: 223-229.
38. Pradhan, Y. and B.B. Kanwar. 1990. Contribution of zinc fraction to available zinc extracted, by some chemical methods, from rice growing soils of North-Western Himalayas. Plant Soil 126: 149-153.
39. Qian, J., Z. Wang, X. Shan, Q. Tu, B. Wen and B. Chen. 1996. Evaluation of plant availability of soil trace metals by chemical fractionation and multiple regression analysis. Environ. Pollut. 91: 309–315.
40. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. PP. 417-435. *In*: Sparks, D.L., (Ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
41. Rupa, T.R. and L.M. Shukla. 1999. Comparison of four extractants and chemical fractions for assessing available zinc and copper in soils of India. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30 (19&20): 2579-2591.
42. Shrivastava, S.K. and D.K. Banerjee. 2004. Speciation of metals in sewage sludge and sludge-amended soils. Water Air, Soil Pollut. 152: 219–232.
43. Sims, J.T. and J. Sklin. 1991. Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. J. Environ. Qual. 20: 387-395.
44. Sposito, G., L.J. Lund and A. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge. I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46: 260–264.
45. Stanton, D.A. and R.T. Burger. 1967. Availability to plants of zinc sorbed by soil and hydrous iron oxides. Geoderma 1:13-17.
46. Sumner, M.E. and P.M. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. PP. 1201-1230. *In*: Sparks, D.L. (Ed). Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
47. Tessier, A., P.G.C. Campbell and M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal. Chem. 51: 844- 851.
48. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP.475-490. *In*: Sparks, D.L. (ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Madison.
49. USEPA. 1995. Land application of sewage sludge and domesic septage. Section 503. EPA/625/R-95/001 USEPA. Washington, DC. pp. 290.

Relationship between Zinc Fractions and Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Responses in Some Calcareous Soils Amended and Unamended with Sewage Sludge

H. R. Motaghian*, A. R. Hosseinpur, F. Raiesi and J. Mohammadi[1]

(Received : Dec. 01-2011 ; Accepted : Nov. 28 -2012)

Abstract

Studying the distribution of Zn in the soils allows investigating their mobility and bioavailability. In this research, 10 calcareous soil samples were selected, and sewage sludge-amended (1% w/w) and -unamended (control) soils were incubated for 1 month. Before planting, fractions of Zn were determined, three seeds of wheat were planted in each pot and after 8 weeks, they were harvested. Results showed that all Zn fractions were increased by sewage sludge addition. Results of pot experiment indicated a significant correlation between Zn concentration in wheat with exchangeable ($r=0.92^{**}$) and Zn associated with Fe and Mn oxides ($r=0.76^{*}$) in control soils. In addition, significant correlation coefficient was found between Zn associated with Fe and Mn oxides and Zn uptake index ($r=0.86^{**}$). Moreover, wheat responses were significantly correlated with Zn exchangeable ($r=0.71^{*}$- 0.84^{**}) in amended soils. Yield was correlated with Zn associated with carbonates and Zn associated with Fe and Mn 0.69 and 0.75, respectively. Zn uptake index was correlated with Zn associated carbonates ($r=0.64^{*}$). Therefore, the exchangeable and Zn associated with Fe and Mn oxides in control soils and the exchangeable and Zn associated carbonates and Zn associated with Fe and Mn oxides in amended soils could be used as available fractions of wheat.

Keywords: Zinc; Fractionation; Sewage sludge; Wheat

1. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.
*: Corresponding Author, Email: hrm_61@yahoo.com