ارزیابی چند عصاره‌گیر جهت تعیین مس قابل استفاده خاک برای گندم (*Triticum aestivum* L.) در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب

حمیدرضا متقیان[1*]، علیرضا حسین‌پور[1]، فایز رئیسی و جهانگرد محمدی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵)

چکیده

مس از عناصر ضروری برای گیاهان است. با این حال، تعیین عصاره‌گیر مناسب مس در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب کمتر مورد توجه قرار داشته است. این پژوهش با هدف ارزیابی چند روش عصاره‌گیری در برآورد مس قابل استفاده در ۱۰ خاک آهکی تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب زیر کشت گندم در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. مس قابل استفاده با ۷ روش عصاره‌گیری (DTPA-TEA، AB-DTPA، مهلیچ ۱، مهلیچ ۲، مهلیچ ۳، HCl ۰/۱ نرمال و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار) پس از یک ماه خواباندن خاک‌ها، تعیین شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مس در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب با استفاده از روش مهلیچ ۳ و کمترین مقدار آن با استفاده از روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار عصاره‌گیری شد. در بین عصاره‌گیرهای مورد استفاده در خاک‌های تیمار نشده، مس عصاره‌گیری شده با AB-DTPA بیشترین همبستگی را با غلظت مس اندام هوایی گندم (r=۰/۹۵) داشت. همچنین در خاک‌های تیمار شده، غلظت مس اندام هوایی همبستگی معنی‌داری با مس عصاره‌گیری شده با روش‌های AB-DTPA و مهلیچ ۳ داشت. با وارد کردن متغیرهای رس و شن در مدل‌های رگرسیون، برآورد پاسخ گیاه گندم بهبود یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که عصاره‌گیرهای مناسب برآورد کننده مس قابل استفاده خاک برای گندم در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب، AB-DTPA و مهلیچ ۳ بودند.**

واژه‌های کلیدی: قابلیت عصاره‌گیری، قابلیت استفاده زیستی، پاسخ گیاه

مقدمه

مس از عناصر غذایی ضروری برای گیاهان و حیوانات است (۲۲). عنصر مس در گیاه نقش‌های متعددی از جمله شرکت در ساختمان ترکیبات مختلف (پلاستوسیانین، پراکسیداز، لاکاز، اسکوربیک اسید اکسیداز، مس- روی دیسموتاز، سیتوکروم اکسیداز و فنولاز)، چوبی شدن و تشکیل دانه گرده دارد (۲). از سال ۱۹۵۵ میلادی مس به‌عنوان عنصری ضروری برای انسان‌ها تشخیص داده شد (۲۱). مس همانند آهن در واکنش‌های انتقال الکترون شرکت می‌کند و به‌راحتی از حالت دو ظرفیتی به یک ظرفیتی کاهش می‌یابد. نقش اصلی این عنصر در گیاهان، فعال کردن آنزیم واکنش اکسایش- کاهش است (۲).

کمبود مس در خاک‌های آلی، خاک‌های شنی که به‌طور معمول مقدار مس کل کمی دارند و در خاک‌های اسیدی و خاک‌های آهکی که مس قابل استفاده کمی دارند، عمومیت بیشتری دارد. پژوهش انجام شده در تعدادی از مزارع گندم نشان داده که حدود ۲۴٪ از خاک‌های مورد مطالعه زیر کشت

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

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

گندم آبی در ایران از کمبود مس رنج می‌برند (۱).

آزمون خاک اطلاعات مفیدی درباره مقدار مس قابل استفاده گیاه ارائه می‌کند که می‌تواند در تعیین نیاز کودی گیاه مورد استفاده قرار گیرد (۴۳). به منظور تعیین مقدار قابل استفاده عناصر در خاک از عصاره‌گیرها استفاده می‌شود. عصاره‌گیرهای مختلفی شامل اسیدها، نمک‌ها و کلات‌کننده‌ها برای تعیین مقدار قابل استفاده عنصر مس در خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (۱۲، ۱۳، ۱۵ و ۴۳). آلووی (۶) بیان کرد که برای ارزیابی توانایی هر عصاره‌گیر در برآورد مقدار مس قابل استفاده گیاه، از ضریب همبستگی بین مقدار مس عصاره‌گیری شده به وسیله آن عصاره‌گیر و مقدار مس جذب شده توسط گیاه استفاده می‌شود.

خاک‌های مناطق خشک عموماً آهکی و دارای پ- هاش نسبتاً زیاد بوده، و در نتیجه بسیاری از گیاهان رشد کرده در این خاک‌ها همواره با مشکل تغذیه عناصر کم‌مصرف مانند مس روبرو هستند. کاربرد لجن فاضلاب به‌صورت منطقی می‌تواند سهم مهمی در تأمین نیاز غذایی گیاهان در این مناطق داشته باشد (۲۰). بعلاوه، کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند سبب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک از جمله ظرفیت نگهداری آب، تهویه و تخلخل شود (۱۱). مصرف لجن فاضلاب در برخی موارد در برطرف کردن نیاز گیاهان به عناصر کم‌مصرف بسیار مؤثرتر از سایر منابع کودی عمل کرده است (۴۷).

با تعیین مقدار کل مس در لجن فاضلاب، اطلاعاتی درباره مقدار قابل استفاده این عنصر در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب در اختیار قرار نمی‌گیرد (۲۳). بنابراین شناسایی عصاره‌گیر مناسب مس قابل استفاده در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب می‌تواند در برآورد مقدار قابل استفاده مس در این خاک‌ها بسیار مفید باشد. نتایج تحقیقات متعدد نشان داده که روش‌های عصاره‌گیری حاوی کلات‌کننده‌ها، توانایی برآورد مس قابل استفاده گیاه گندم در خاک را دارند. فنگ و همکاران (۱۲) گزارش کردند که DTPA-TEA، عصاره‌گیر مناسب مس در خاک‌های آهکی (دارای پ- هاش بیشتر از ۶/۷) و EDTA عصاره‌گیر مناسب مس در خاک‌های اسیدی (دارای پ- هاش کمتر از ۶) برای تعیین مقدار قابل استفاده این عنصر در گیاه گندم است. چن و همکاران (۱۰) به بررسی قابلیت استفاده عناصر کم‌مصرف، از جمله مس، برای گیاه گندم پرداختند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که عصاره‌گیر DTPA-TEA با وجود اینکه مقدار کمی از مس کل را استخراج می‌کند (۹/۴٪)، اما توانایی برآورد مس قابل استفاده گیاه گندم را دارد. کرمی و همکاران (۲۰) نیز گزارش کردند که عصاره‌گیر DTPA-TEA در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب توانایی تعیین مقدار قابل استفاده مس برای گیاه گندم را دارد.

با وجود اهمیت لجن فاضلاب در برطرف کردن کمبود عناصر غذایی در خاک‌ها، نیاز به ارزیابی مقدار قابل استفاده عناصر غذایی موجود در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب وجود دارد. این تحقیق با توجه به اهمیت عنصر مس برای گیاه، با هدف امکان‌سنجی استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود آلی در برطرف کردن کمبود این عنصر و با توجه به اهمیت گندم به‌عنوان گیاه استراتژیک و همچنین ضرورت تحقیقات بیشتر جهت تعیین عصاره‌گیر مناسب برای مس قابل استفاده در خاک زیر کشت گندم انجام شد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

در این تحقیق، ابتدا ۳۰ نمونه خاک از لایه سطحی (۳۰-۰ cm) خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری جمع‌آوری شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هواخشک کردن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. در نهایت، پس از انجام برخی تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی، ۱۰ نمونه خاک بر اساس دارا بودن بیشترین تغییرات در مقدار مس قابل استفاده با استفاده از دی‌تی‌پی‌ای- تری اتانول آمین (DTPA-TEA) (۲۴)، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل جهت ادامه آزمایش انتخاب شدند. بافت خاک‌ها به‌روش هیدرومتر (۱۴)، پ- هاش خاک در سوسپانسون دو به یک آب به خاک (۴۸)، قابلیت هدایت

الکتریکی در عصاره دو به یک آب به خاک (۳۹)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (۲۵)، گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از روش استات سدیم (۴۷)، ماده آلی به‌روش اکسیداسیون تر (۳۵) و مس قابل استفاده با استفاده از ۷ روش شیمیایی (جدول ۱) تعیین شدند. مقدار کل مس خاک نیز با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۶) تعیین شد.

لجن فاضلاب

لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد تهیه و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد. خصوصیات لجن فاضلاب شامل پ- هاش در سوسپانسیون پنج به یک آب به لجن فاضلاب، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره پنج به یک آب به لجن فاضلاب و مقدار قابل استفاده مس با DTPA-TEA (۲۴) تعیین شد. همچنین مقدار کل مس، کادمیم، نیکل، سرب و روی با استفاده از هضم با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۶) تعیین شد.

کشت گلخانه‌ای

مقدار ۱۰ گرم لجن فاضلاب به هر کیلوگرم خاک اضافه شد. به این صورت که ابتدا لجن فاضلاب با مقدار کمی از خاک مورد نظر (هر یک از ۱۰ نمونه خاک) مخلوط شد و سپس مخلوط تهیه شده با بقیه خاک مورد نظر مخلوط گردید. رطوبت خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب و خاک‌های تیمار نشده به حدود ظرفیت مزرعه رسانده شد و به مدت یک ماه خوابانده شدند. در طول دوره انکوباسیون، رطوبت خاک‌ها با استفاده از توزین در حدود ظرفیت مزرعه ثابت شد. برای تعیین عصاره‌گیر مناسب مس در خاک‌های مختلف نیاز است که ضریب همبستگی بین مس عصاره‌گیری شده با روش‌های مختلف شیمیایی قبل از کشت و پاسخ گندم بررسی شود. بنابراین، در پایان دوره انکوباسیون و قبل از کشت، میزان مس در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب با عصاره‌گیرهای مختلف شیمیایی (جدول ۱) تعیین شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل دو تیمار کاربرد لجن فاضلاب در سه تکرار انجام شد. مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک تیمار شده و تیمار نشده در سه تکرار به گلدان‌هایی (در مجموع ۶۰ گلدان) با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ × ۱۳۰ میلی‌متر منتقل شد. به‌دلیل اینکه سایر عناصر غذایی باید به مقدار کافی در اختیار گیاه باشند، بر اساس نتایج تجزیه خاک به هر گلدان در خاک‌های تیمار نشده، ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به‌صورت تقسیط در سه مرحله (قبل از کشت، پنجه‌زنی و دو هفته قبل از برداشت) اضافه شد. همچنین، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم و ۵ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین ۱۳۸ قبل از کشت گیاه به خاک‌ها اضافه شد. همچنین مقدار کود فسفر مورد نیاز پس از تعیین فسفر قابل استفاده خاک‌ها (۳۷)، قبل از کشت گیاه، از منبع مونوکلسیم فسفات به هر گلدان اضافه شد.

جهت کشت گیاه، بذرهای گندم رقم بک‌کراس روشن درون آب قرار داده شد و در کاغذ صافی جوانه زدند. سپس ۳ بذر در هر گلدان کشت شد. در طول دوره رشد، مراقبت‌های زراعی لازم انجام گرفت و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه ثابت بماند. دمای گلخانه در روز ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس و در شب ۱۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس بود. گیاهان ۸ هفته پس از جوانه‌زدن برداشت شدند. بخش‌های هوایی با آب مقطر شسته شده و به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون تهویه‌دار خشک شده و سپس وزن خشک اندام هوایی تعیین شد. غلظت عنصر مس در اندام هوایی با روش خاکستر خشک (۹) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی‌بی‌سی، ۹۳۲) تعیین و سپس مس جذب شده توسط اندام هوایی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

[۱] عملکرد خشک (کیلوگرم در گلدان) × غلظت مس اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم) = مس جذب شده در اندام هوایی گندم (میلی‌گرم در گلدان)

آنالیز آماری

ضرایب همبستگی بین عملکرد خشک، غلظت مس اندام هوایی

جدول ۱. روش‌های عصاره‌گیری شیمیایی مورد استفاده در تعیین مس قابل استفاده خاک

عصاره‌گیر	ترکیب عصاره‌گیر	خاک: عصاره‌گیر	زمان تکان دادن (دقیقه)	منبع
DTPA-TEA	۰/۰۰۵ مولار DTPA + ۰/۰۱ مولار $CaCl_2$ + ۰/۱ مولار TEA (pH= ۷/۳)	۱:۲	۱۲۰	(۲۴)
AB-DTPA	۰/۰۰۵ مولار DTPA + ۱ مولار NH_4HCO_3 (pH= ۷/۶)	۱:۲	۱۵	(۴۴
مهلیچ ۱	۰/۰۵ نرمال HCl + ۰/۰۲۵ نرمال H_2SO_4	۱:۴	۵	(۲۸)
مهلیچ ۲	۰/۲ مولار NH_4Cl + ۰/۰۱۵ مولار NH_4F + ۰/۰۱۲ مولار HCl + ۰/۲ مولار CH_3COOH	۱:۱۰	۵	(۲۹)
مهلیچ ۳	۰/۰۱۵ مولار NH_4F + ۰/۲۵ مولار NH_4NO_3 + ۰/۰۱۳ مولار HNO_3 +۰/۲ مولار CH_3COOH + ۰/۰۰۱ مولار EDTA	۱:۱۰	۵	(۳۰)
HCl	۰/۱ نرمال HCl	۱:۵	۱۲۰	(۵۱)
کلرید کلسیم	۰/۰۱ مولار $CaCl_2$	۱:۱۰	۱۲۰	(۱۹)

و مس جذب شده توسط اندام هوایی گندم و مقدار مس قابل استفاده خاک (عصاره‌گیری شده با استفاده از ۷ روش شیمیایی) تعیین و بر اساس معنی‌دار بودن همبستگی، عصاره‌گیر یا عصاره‌گیرهای مناسب انتخاب شدند. برای مقایسه میانگین پاسخ گندم در خاک‌های مختلف (۱۰ نمونه) تیمار نشده و تیمارشده با لجن فاضلاب، از تجزیه واریانس و آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد. میانگین مس عصاره‌گیری شده با استفاده از ۷ روش شیمیایی در خاک‌های تیمار نشده با خاک‌های تیمار شده با استفاده از آزمون t-test مقایسه شد. همچنین برای پیش‌بینی پاسخ گیاه گندم با استفاده از مقدار مس عصاره‌گیری شده و خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه، از رگرسیون گام به گام پیش‌رونده (پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو) و نرم‌افزار Statistica 6 استفاده شد. از ضریب همبستگی (r) برای آزمون مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. به این صورت که این ضریب بین مقادیر پاسخ گیاه اندازه‌گیری شده و مقادیر پاسخ گیاه برآورد شده با استفاده از مدل رگرسیونی مربوطه تعیین شد.

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خصوصیات خاک‌ها از دامنه تغییرات وسیعی برخوردار هستند. دامنه تغییرات رس ۲۵ تا ۵۵ درصد و سیلت ۳۳ تا ۵۵ درصد است. خاک‌های مورد مطالعه دارای پ- هاش قلیایی و مقدار کربن آلی کم هستند. دامنه تغییرات پ- هاش ۷/۵ تا ۸/۱ و قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر است. دامنه تغییرات کربن آلی و کربنات کلسیم معادل خاک‌ها به ترتیب ۰/۳۰ تا ۱/۱۹ درصد و ۱۱/۳ تا ۴۱ درصد است. دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۱/۵ تا ۲۲/۵ سانتی‌مول بار در کیلوگرم خاک است. مقدار مس عصاره‌گیری شده خاک‌ها با استفاده از DTPA-TEA در دامنه ۰/۵۴ تا ۱/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقدار کل مس خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱۵ تا ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است.

پیامدهای کاربرد لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی بستگی زیادی به ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده دارد. مقدار قابل استفاده و کل مس در لجن فاضلاب به ترتیب ۴۱ و ۷۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقایسه مقادیر فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب مورد استفاده (جدول ۳) با استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) نشان داد که غلظت عناصر سنگین در لجن فاضلاب کمتر از حد

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	رس	سیلت	کربنات کلسیم معادل (درصد)	کربن آلی	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	گنجایش تبادل کاتیونی (cmolc/kg)	مس قابل استفاده* (mg/kg)	مس کل (mg/kg)
۱	۵۵	۴۰	۲۸/۷	۰/۷۲	۷/۸	۰/۱۳	۲۰/۹	۱/۱۸	۲۴
۲	۵۳	۴۴	۳۵/۶	۰/۳۰	۸/۱	۰/۱۳	۱۹/۳	۱/۵۰	۲۳
۳	۴۹	۳۹	۲۹/۴	۰/۵۱	۷/۹	۰/۱۲	۲۲/۵	۰/۸۶	۱۹
۴	۴۶	۴۲	۲۶/۴	۰/۷۱	۷/۸	۰/۱۴	۲۱/۶	۱/۱۲	۱۸
۵	۴۱	۴۲	۳۲/۲	۰/۵۴	۸/۱	۰/۱۳	۱۶/۰	۱/۰۷	۱۸
۶	۳۷	۴۴	۳۲/۵	۰/۸۰	۷/۶	۰/۱۶	۱۵/۶	۰/۸۵	۱۷
۷	۲۵	۳۳	۴۱/۰	۰/۴۷	۷/۷	۰/۲۱	۱۱/۵	۰/۵۴	۱۵
۸	۳۸	۵۵	۲۳/۱	۱/۱۹	۸/۱	۰/۲۴	۱۷/۹	۱/۳۰	۲۱
۹	۴۸	۴۶	۱۱/۳	۱/۱۶	۷/۸	۰/۲۵	۱۸/۵	۰/۸۹	۲۱
۱۰	۴۹	۴۶	۱۴/۸	۰/۹۷۰	۷/۹	۰/۲۳	۱۷/۹	۱/۴۱	۲۵
میانگین	۴۴	۴۳	۲۸/۹	۰/۷۱	۷/۹	۰/۱۷	۱۸/۲	۱/۰۴	۲۰

*: مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA

جدول ۳. برخی ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده

ویژگی	واحد	مقدار	حداکثر غلظت استاندارد (۵۰)
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 کل	″	۱۳۲۱	۷۵۰۰
مس کل	″	۷۸	۴۳۰۰
کادمیم کل	″	۷۳	۸۵
نیکل کل	″	۴۵	۴۲۰
سرب کل	″	۵۸۳	۸۴۰

بالایی مقدار استاندارد این عناصر بود (۵۰).

مقدار مس عصاره‌گیری شده با روش‌های مختلف شیمیایی در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، مس عصاره‌گیری شده با روش‌های مختلف در یک خاک تغییرات زیادی داشت که نشان دهنده مکانیسم متفاوت عصاره‌گیرها در استخراج این عنصر است. همچنین در هر عصاره‌گیر، مس

جدول ۴. مقادیر مس قابل استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم) عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	DTPA-TEA	AB-DTPA	مهلیچ ۱	مهلیچ ۲	مهلیچ ۳	HCl	کلرید کلسیم
			خاک‌های تیمار نشده				
۱	۳/۲۵	۶/۱۷	۰/۴۴	۰/۵۵	۶/۰۵	۰/۵۸	۰/۳۶
۲	۲/۰۳	۴/۰۷	۰/۳۵	۰/۲۹	۸/۳۵	۰/۶۸	۰/۲۴
۳	۱/۵۰	۲/۹۹	۰/۳۳	۰/۳۳	۴/۹۰	۰/۶۵	۰/۱۷
۴	۲/۸۲	۴/۶۱	۰/۳۲	۰/۵۹	۶/۹۹	۰/۷۲	۰/۱۲
۵	۱/۹۸	۳/۴۵	۰/۳۶	۰/۵۴	۶/۱۲	۰/۷۶	۰/۲۶
۶	۱/۷۶	۳/۰۸	۰/۳۷	۰/۵۲	۵/۱۵	۰/۷۶	۰/۱۲
۷	۱/۷۰	۲/۵۰	۰/۳۴	۰/۵۹	۴/۲۹	۰/۷۴	۰/۲۴
۸	۲/۹۷	۴/۵۹	۰/۴۰	۰/۷۲	۶/۷۰	۰/۷۴	۰/۱۴
۹	۲/۳۰	۳/۴۲	۰/۴۱	۰/۶۴	۶/۲۳	۰/۸۰	۰/۲۴
۱۰	۲/۹۰	۴/۶۴	۰/۳۴	۰/۸۹	۸/۲۱	۰/۷۹	۰/۱۹
میانگین	۲/۳۲a	۳/۹۵a	۰/۳۷a	۰/۵۷a	۶/۴۰a	۰/۷۲a	۰/۲۱a
			خاک‌های تیمار شده				
۱	۳/۹۶	۶/۰۲	۰/۳۶	۰/۹۸	۱۱/۰۴	۰/۸۲	۰/۱۶
۲	۳/۲۱	۴/۷۲	۰/۳۷	۱/۰۰	۹/۴۳	۰/۷۶	۰/۱۲
۳	۲/۲۸	۳/۴۱	۰/۳۳	۰/۷۸	۷/۷۴	۰/۸۱	۰/۱۷
۴	۲/۱۸	۳/۷۶	۰/۳۷	۱/۰۲	۸/۲۲	۰/۸۱	۰/۱۲
۵	۲/۰۷	۳/۱۱	۰/۳۵	۰/۹۰	۷/۱۵	۰/۸۱	۰/۱۲
۶	۲/۲۴	۳/۱۱	۰/۳۵	۰/۷۶	۶/۹۴	۰/۸۰	۰/۲۴
۷	۱/۶۵	۲/۳۳	۰/۴۱	۰/۸۶	۵/۸۲	۰/۸۲	۰/۲۰
۸	۲/۶۵	۴/۰۲	۰/۴۷	۰/۷۵	۷/۶۶	۰/۸۰	۰/۲۴
۹	۱/۹۹	۳/۳۵	۰/۳۹	۰/۸۵	۷/۲۴	۰/۷۵	۰/۱۸
۱۰	۲/۶۳	۴/۱۱	۰/۴۶	۱/۱۱	۸/۸۸	۰/۸۳	۰/۱۳
میانگین*	۲/۴۹a	۳/۷۹a	۰/۳۹a	۰/۹۰b	۸/۰۱ b	۰/۸۰ b	۰/۱۷ b

*: حروف متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین‌های مس استخراج شده با هر عصاره‌گیر در خاک‌های تیمار شده با تیمار نشده در سطح اطمینان ۱٪ می‌باشند.

عصاره‌گیری شده در خاک‌ها تفاوت زیادی داشت که نشان دهنده تفاوت مس قابل عصاره‌گیری در خاک‌ها است. بر اساس کاهش مقدار میانگین مس عصاره‌گیری شده در خاک‌های تیمار نشده، به ترتیب عصاره‌گیرهای مهلیچ ۳، AB–DTPA، DTPA-TEA، HCl ۰/۱ نرمال، مهلیچ ۲، مهلیچ ۱ و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار قرار داشتند. از سویی دیگر، بر اساس کاهش مقدار میانگین مس عصاره‌گیری شده در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، به ترتیب عصاره‌گیرهای مهلیچ ۳، AB–DTPA،

DTPA-TEA، مهلیچ ۲، HCl ۰/۱ نرمال، مهلیچ ۱ و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار قرار داشتند.

همان‌طور که بیان شد، برای تعیین مقدار قابل استفاده عنصر غذایی مس در خاک‌ها روش‌های عصاره‌گیری مختلفی مانند محلول‌های نمکی، کلات‌کننده‌ها و اسیدها وجود دارد (۴۰). توانایی عصاره‌گیرها در استخراج عناصر کم‌نیاز متفاوت است. توانایی زیاد عصاره‌گیر مهلیچ ۳ در عصاره‌گیری مقدار بیشتر عنصر مس به‌دلیل وجود کلات‌کننده اتیلن دی‌آمین ترا استیک اسید (EDTA) در ترکیب این روش عصاره‌گیری است (۳۰). همر و کلر (۱۶) و ساهوکیلو و همکاران (۴۱) گزارش کردند که عصاره‌گیر EDTA بدون توجه به خصوصیات خاک به‌دلیل داشتن پ- هاش کمتر نسبت به عصاره‌گیر DTPA مقدار بیشتری از عناصر کم‌نیاز خاک را عصاره‌گیری می‌کند. روش عصاره‌گیری AB-DTPA مس قابل استفاده بیشتری نسبت به روش DTPA-TEA عصاره‌گیری می‌کند (۴۴). روش عصاره‌گیری DTPA-TEA دارای پ- هاش بافر شده با استفاده از تری‌اتانول آمین و همچنین محتوی کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار است که از حل شدن کربنات کلسیم و آزاد شدن عناصر محبوس شده در این ترکیب جلوگیری می‌کنند (۲۴). بنابراین علت عصاره‌گیری مقدار بیشتر مس در استفاده از روش AB-DTPA می‌تواند به دلیل بافر نبودن این روش عصاره‌گیری باشد. توانایی کم روش‌های عصاره‌گیری دارای ترکیب اسیدی مانند روش HCl ۰/۱ نرمال و روش مهلیچ ۱ می‌تواند به دلیل خنثی شدن قدرت اسیدی این عصاره‌گیرها در خاک‌های آهکی مورد مطالعه باشد. مهلیچ (۲۹) گزارش کرد که روش عصاره‌گیری مهلیچ ۱ در خاک‌های نزدیک به خنثی و آهکی توانایی عصاره‌گیری کمی دارد. با این وجود، به‌دلیل وارد کردن مس از منبع لجن فاضلاب به خاک‌ها، این عصاره‌گیرها نیز استفاده شدند. مهلیچ (۳۰) گزارش کرد که روش عصاره‌گیری مهلیچ ۲ محتوی اسید استیک است که دارای قدرت بافری بیشتری نسبت به اسیدهای مورد استفاده در روش مهلیچ ۱ است. بعلاوه، روش عصاره‌گیری مهلیچ ۲ محتوی یون فلوراید است که توانایی ترکیب با یون کلسیم و افزایش حلالیت کربنات کلسیم را دارد. روش عصاره‌گیری کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار عنصر مس جذب غیر اختصاصی شده را از طریق جانشینی عصاره‌گیری می‌کند (۲۶). بنابراین، بر این اساس، روش عصاره‌گیری کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در مقایسه با سایر روش‌های مورد استفاده، مقدار مس کمتری عصاره‌گیری کرده است.

همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد، در اثر افزودن لجن فاضلاب به خاک، مقدار مس قابل استفاده در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده، به غیر از روش‌های عصاره‌گیری مهلیچ ۳ و مهلیچ ۲، تفاوت زیادی نداشت. پایاپرز و همکاران (۳۸) گزارش کردند که عصاره‌گیر EDTA توانایی استخراج عناصر کم‌مصرف پیوند شده با مواد آلی، اکسیدها و بخش‌هایی از عناصر موجود در کانی‌های رسی را دارد. بنابراین افزایش میانگین مس قابل استفاده عصاره‌گیری شده با روش مهلیچ ۳ (به مقدار ۱/۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب نسبت به خاک‌های تیمار نشده می‌تواند به دلیل توانایی کلات EDTA در استخراج عنصر مس پیوند شده با مواد آلی، اکسیدها و بخش‌هایی از مس موجود در کانی‌های رسی و همچنین وجود یون فلوراید در ترکیب این روش عصاره‌گیری باشد.

تحقیقات نشان داده که افزودن لجن فاضلاب و سایر مواد زاید شهری به خاک باعث افزودن غلظت عناصر کم‌نیاز در خاک می‌شود. زیرا لجن فاضلاب همواره دارای مقدار زیادتری از این عناصر نسبت به خاک است (۲۷). کرمی و همکاران (۲۰) گزارش کردند که افزایش ۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار مقدار مس عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA شد. در تحقیق آنها، مقدار کل مس در لجن فاضلاب ۳۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. درحالی‌که در این پژوهش مقدار کل مس در لجن فاضلاب ۷۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است. بنابراین تغییرات کم مقدار مس قابل استفاده می‌تواند به دلیل مقدار نسبتاً کم مس در لجن فاضلاب و همچنین قرارگیری مس در

جدول ۵. پاسخ گیاه گندم در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	غلظت مس اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم)		ماده خشک (گرم در گلدان)		جذب مس در اندام هوایی (میلی‌گرم در گلدان)	
	تیمار نشده	تیمار شده	تیمار نشده	تیمار شده	تیمار نشده	تیمار شده
۱	۷/۳۳ abc	۷/۶۰ ab	۴/۱۹ g	۵/۷۲ ef	۰/۰۳۱ def	۰/۰۴۳ c-f
۲	۵/۹۰ a-d	۷/۷۳ a	۶/۷۵ e	۶/۳۷ ef	۰/۰۴۰ c-f	۰/۰۴۹ bcd
۳	۴/۹۵ bcd	۷/۰۳ abc	۵/۷۷ f	۸/۴۲ cd	۰/۰۲۹ def	۰/۰۵۹ abc
۴	۶/۰۰ a-d	۷/۷۸ a	۶/۰۲ ef	۹/۹۰ b	۰/۰۳۶ c-f	۰/۰۷۷ a
۵	۵/۷۳ a-d	۶/۱۰ a-d	۵/۸۲ f	۸/۷۶ c	۰/۰۳۳ c-f	۰/۰۵۳a-d
۶	۴/۸۳ cd	۵/۵۳ a-d	۴/۳۱ g	۷/۸۸ cd	۰/۰۲۱ ef	۰/۰۴۴ c-f
۷	۴/۲۷ d	۵/۴۷ a-d	۴/۳۴ g	۸/۵۰ cd	۰/۰۱۹ f	۰/۰۴۶ cde
۸	۵/۶۰ a-d	۷/۷۳ a	۶/۸۶ e	۶/۹۲ e	۰/۰۳۸ c-f	۰/۰۵۴ a-d
۹	۵/۵۵ a-d	۶/۲۷ a-d	۸/۷۲ c	۱۱/۷۱ a	۰/۰۴۸ cd	۰/۰۷۳ ab
۱۰	۶/۲۵ a-d	۶/۱۷ a-d	۶/۱۵ ef	۷/۷۵ d	۰/۰۳۸ c-f	۰/۰۴۸ cd
میانگین	۵/۶۴ B	۶/۷۴ A	۵/۸۹ B	۸/۱۹ A	۰/۰۳۳ B	۰/۰۵۵ A

*: حروف متفاوت برای هر ویژگی تعیین شده نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

جزءهای معدنی در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب که قابلیت استفاده زیادی برای گیاه ندارند، باشد (۳).

جدول ۵ پاسخ گیاه گندم را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، میانگین غلظت مس اندام هوایی، ماده خشک و جذب مس در گندم در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب افزایش معنی‌داری در سطح ۱٪ نسبت به خاک‌های تیمار نشده داشت. افیونی و همکاران (۵) افزایش مقدار جذب مس به وسیله گیاهان کاهو و اسفناج در اراضی تیمار شده با لجن فاضلاب را گزارش کردند. موررا و همکاران (۳۴) قابلیت استفاده مس برای گیاه آفتابگردان در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش مصرف لجن فاضلاب، میزان جذب مس و عملکرد گیاه آفتابگردان افزایش یافت. مرینگتون و همکاران (۳۲) گزارش کردند که با افزایش مصرف لجن فاضلاب در خاک‌ها، غلظت مس در بخش‌های هوایی گیاه گندم افزایش می‌یابد.

ضریب همبستگی (r) بین مقادیر مس قابل استفاده عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف و پاسخ گیاه گندم در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب در جدول ۶ نشان داده شده است. در خاک‌های تیمار نشده، بین غلظت مس اندام هوایی گندم و مس عصاره‌گیری شده با روش‌های AB–DTPA، DTPA-TEA و مهلیچ ۳ همبستگی معنی‌داری وجود داشت. همچنین بین جذب مس در اندام هوایی و ماده خشک گندم و مس عصاره‌گیری شده با روش مهلیچ ۳ نیز همبستگی معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۶). از بین عصاره‌گیرهایی که دارای همبستگی معنی‌دار با غلظت مس اندام هوایی گندم هستند، عصاره‌گیر AB–DTPA بیشترین ضریب همبستگی را دارد. روش‌های عصاره‌گیری مختلفی برای تعیین مقدار قابل استفاده مس در خاک گزارش شده است. هائو و همکاران (۱۷) روش عصاره‌گیری DTPA-TEA را جهت برآورد مس قابل استفاده برخی سبزی‌های کشور چین مناسب گزارش کردند. همچنین مینیچ و همکاران (۳۳)

جدول ۶. ضریب همبستگی (r) بین مقادیر مس قابل استفاده عصاره‌گیری شده با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف و پاسخ گیاه گندم

پاسخ	DTPA-TEA	AB-DTPA	مهلیچ ۱	مهلیچ ۲	مهلیچ ۳	HCl	کلرید کلسیم
			خاک تیمار نشده				
غلظت مس	۰/۷۸*	۰/۹۵**	۰/۰۴^{ns}	۰/۲۴ ^{ns}	۰/۶۶*	−۰/۲۶^{ns}	۰/۲۴^{ns}
ماده خشک	۰/۲۷ ^{ns}	۰/۱۴ ^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۴۳ ^{ns}	۰/۷۰*	۰/۴۲^{ns}	−۰/۱۶^{ns}
جذب مس در اندام هوایی	۰/۵۳ ^{ns}	۰/۴۴^{ns}	۰/۲۱^{ns}	۰/۳۴ ^{ns}	۰/۸۳**	۰/۲۷^{ns}	−۰/۰۱^{ns}
			خاک تیمار شده				
غلظت مس اندام هوایی	۰/۵۶ ^{ns}	۰/۷۳*	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۲۶^{ns}	۰/۷۳*	−۰/۳۶^{ns}	۰/۲۲^{ns}
ماده خشک	−۰/۹۰**	−۰/۶۸*	−۰/۱۵^{ns}	−۰/۰۵^{ns}	−۰/۵۷^{ns}	−۰/۲۱^{ns}	−۰/۶۱^{ns}
جذب مس در اندام هوایی	−۰/۳۲ ^{ns}	−۰/۰۷^{ns}	۰/۰۱^{ns}	−۰/۰۴^{ns}	−۰/۰۲^{ns}	−۰/۵۰^{ns}	−۰/۲۲^{ns}

**، *و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح اطمینان ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی‌دار

گزارش کردند که مس عصاره‌گیری شده با DTPA توانایی برآورد مس قابل استفاده گیاه لوبیا سبز را دارد. از سوی دیگر، تیواری و ماهان کومار (۴۹) گزارش کردند که روش عصاره‌گیری HCl ۰/۱ نرمال بهترین عصاره‌گیر در تعیین مس قابل استفاده گیاه برنج بود. ابول‌روس و عبدل- وابید (۴) به بررسی عصاره‌گیر مناسب در تعیین مس قابل استفاده گیاه جو پرداختند. نتایج آنان نیز نشان داد که HCl ۰/۱ نرمال توانایی برآورد مس قابل استفاده گیاه جو را دارد.

در بین عصاره‌گیرهای مختلف مورد استفاده در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، بین مس عصاره‌گیری شده با روش‌های AB–DTPA و مهلیچ ۳ با غلظت مس اندام هوایی گندم همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. کرمی و همکاران (۲۰) گزارش کردند که ضریب همبستگی بین مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب و مس جذب شده در ساقه‌های گیاه گندم معنی‌دار بود. بوگال و همکاران (۷) گزارش کردند که عصاره‌گیر NH_4NO_3 توانایی عصاره‌گیری عناصر کم‌مصرف در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب را دارد. نیامانگارا و مززوا (۳۶) عصاره‌گیر EDTA را به عنوان مناسب‌ترین عصاره‌گیر عناصر کم‌مصرف در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب گزارش کردند.

برازاوسکین و همکاران (۸) گزارش کردند که عنصر مس در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب در اجزای پیوند شده با مواد آلی و جزء باقیمانده قرار می‌گیرد. هودا و آلووی (۱۸) بیان کردند که کلات‌کننده DTPA برای عصاره‌گیری عناصر در جزءهای محلول، تبادلی و پیوندشده با مواد آلی در خاک‌ها مناسب است. بنابراین روش‌های عصاره‌گیری حاوی کلات‌کننده‌ها در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب، در تعیین مقدار قابل استفاده عنصر مس برای گیاه گندم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج رگرسیون چند متغیره مورد استفاده برای برآورد پاسخ گیاه گندم در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب در جدول ۷ آمده است. نتایج مدل‌های رگرسیون به‌دست آمده نشان می‌دهد که با وارد کردن متغیرهای رس و شن در آنها، برآورد پاسخ گیاه گندم بهبود می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، در خاک‌های تیمار نشده، غلظت مس اندام هوایی گندم با وارد کردن متغیر رس همراه با متغیرهای مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های DTPA-TEA، AB–DTPA و مهلیچ ۳ در رگرسیون چندمتغیره برآورد می‌شود. جذب مس در اندام هوایی گندم با وارد کردن متغیر شن همراه با متغیرهای مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های DTPA-TEA، AB-DTPA و مهلیچ ۳ برآورد

جدول ۷. نتایج رگرسیون چندمتغیره در پیش‌بینی پاسخ گندم

متغیر وابسته	معادله	r
	خاک‌های تیمار نشده	
غلظت مس اندام هوایی	۱/۵۲ + ۰/۸۳ (DTPA-TEA) + ۰/۰۵ Clay	۰/۹۴**
	۲/۰۵ + ۰/۵۹ (AB-DTPA) + ۰/۰۳ Clay	۰/۹۶**
	۲/۰۹ + ۰/۱۵ (M3) + ۰/۰۶ Clay	۰/۷۸**
جذب مس در اندام هوایی	۰/۰۴ + ۰/۰۰۰۶۴ (DTPA-TEA) - ۰/۰۰۰۶ Sand	۰/۷۲*
	۰/۰۵ + ۰/۰۰۲ (AB-DTPA) - ۰/۰۰۰۷ Sand	۰/۸۷**
	۰/۱۴ + ۰/۰۶ (M3) - ۰/۰۰۵ Sand	۰/۸۸**
ماده خشک	۵/۶۵ + ۰/۰۹ (M3) - ۰/۰۵ Sand	۰/۷۴*
	خاک‌های تیمار شده	
غلظت مس اندام هوایی	۵/۸۶ + ۰/۵۲ (DTPA-TEA) - ۰/۰۳ Sand	۰/۷۰*
	۵/۲۶ + ۰/۴۶ (AB-DTPA) - ۰/۰۲ Sand	۰/۷۳*
	۴/۸۶ + ۰/۲۷ (M3) - ۰/۰۳ Sand	۰/۷۳*
ماده خشک	۰/۰۹ – ۰/۰۰۷ (DTPA-TEA) + ۰/۰۰۰۶ CCE	۰/۷۱*
	۰/۰۹ – ۰/۰۰۹ (AB-DTPA) + ۰/۰۰۰۸ Sand	۰/۶۷*

CEC : گنجایش تبادل کاتیونی، Sand : شن، Clay : رس، CCE : کربنات کلسیم معادل و M3 : .مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش مهلیچ ۳ .
** و *: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪

می‌شود. ماده خشک گیاه گندم با وارد کردن متغیر شن همراه با متغیر مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش مهلیچ ۳ برآورد می‌شود. در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، غلظت مس اندام هوایی گندم با وارد کردن متغیر شن همراه با متغیرهای مس عصاره‌گیری شده با استفاده از روش‌های DTPA-TEA ، AB-DTPA و مهلیچ ۳ برآورد می‌شود. ماده خشک گیاه گندم با وارد کردن متغیر کربنات کلسیم معادل همراه با متغیر مس عصاره‌گیری شده با استفاده از DTPA-TEA در یک معادله و وارد کردن متغیر شن همراه با متغیر مس عصاره‌گیری شده با استفاده از AB-DTPA در معادله‌ای دیگر برآورد می‌شود. در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب، همبستگی معنی‌داری بین مقدار مس قابل استفاده خاک و مقدار رس خاک به دست آمد که ناشی از رابطه بین مقدار مس قابل استفاده با جزء باقیمانده مس (مس موجود در ساختارکانی‌ها) بوده است (داده‌ها نشان داده نشده است) (۳). بنابراین، درصد رس به صورت متغیر مستقل وارد مدل‌های رگرسیونی شد. از طرف دیگر، به دلیل رابطه معکوس بین درصد رس و شن در خاک‌های مورد مطالعه، درصد شن با ضریب منفی وارد معادلات شده است. نتایج مشابهی توسط شارما و همکاران (۴۲) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت مس اندام هوایی، ماده خشک و جذب مس در اندام هوایی گندم در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب افزایش معنی‌داری در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده داشت. بیشترین مقدار مس عصاره‌گیری شده در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب، با روش مهلیچ ۳ و کمترین مقدار آن با روش کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار

استخراج شد. در خاک‌های تیمار نشده، بین غلظت مس اندام هوایی گندم و مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای AB-DTPA، DTPA-TEA و مهلیچ ۳ همبستگی معنی‌داری وجود داشت و در بین این عصاره‌گیرها، عصاره‌گیر AB-DTPA بیشترین همبستگی را با غلظت مس اندام هوایی گندم داشت. از سوی دیگر، در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب، بین مس عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیرهای AB-DTPA و مهلیچ ۳ با غلظت مس اندام هوایی گندم همبستگی معنی‌داری وجود داشت. نتایج نشان داد که روش‌های عصاره‌گیری حاوی کلات‌کننده‌ها می‌توانند در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده با لجن فاضلاب در تعیین مقدار قابل استفاده عنصر مس برای گیاه گندم مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی عصاره‌گیر مناسب عنصر مس برای سایر گیاهان زراعی تعیین شود. بعلاوه، از روش‌های عصاره‌گیری متوالی نیز در برآورد مس قابل استفاده گیاهان استفاده شود.

منابع مورد استفاده

۱. بلالی، م.، م.ج. ملکوتی، ح. مشایخی و ز. خادمی. ۱۳۷۸. اثر عناصر ریزمغذی بر افزایش عملکرد و تعیین حد بحرانی آنها در خاک‌های تحت کشت گندم آبی ایران. مجله خاک و آب ۱۲(۶):۱۱۱-۱۱۹.

۲. خوشگفتارمنش، ا.ح. ۱۳۸۶. مبانی تغذیه گیاه. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۴۶۲ صفحه.

۳. متقیان ح.ر.، ع.ر. حسین‌پور، ج. محمدی و ف. رئیسی. ۱۳۹۲. ارتباط شکل‌های شیمیایی مس با پاسخ‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) در خاک‌های آهکی تیمار شده و تیمار نشده با لجن فاضلاب. مجله پژوهش‌های خاک (در دست چاپ).

4. Aboul-Roos, S.A. and M.A. Abdel-Wabid. 1978. Evaluation of two methods of measuring available soil copper. Beitrage Trop Land Wirtsch Veterinarmed 16: 155-162.
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. Alloway, B.J. 1990. Heavy Metals in Soils. Blackie and Son Ltd., Glasgow, 339 p.
7. Bhogal, A., F.A. Nicholson, B.J. Chambers and M.A. Shepherd. 2003. Effects of past sewage sludge additions on heavy metal availability in light textured soils: Implications for crop yields and metal uptakes. Environ. Pollut. 121: 413-423.
8. 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.
9. 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.
10. Chen, B., X. Shan and J. Qian. 1996. Bioavailability index for quantitative evaluation of plant availability of extractable soil trace elements. Plant Soil 186: 275-283.
11. Engelhart, M., M. Kruger, J. Kopp and N. Dichtl. 2000. Effects of disintegration on anaerobic degradation of sewage excess sludge in downflow stationary fixed film digesters. Water Sci. Technol. 41: 171-179.
12. Feng, M.H., X.Q. Shan, S.Z. Zhang and B. Wen. 2005. Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat. Chemosphere 59: 939-949.
13. Fuentes, A., M. Llorens, J. Saez, A. Soler, M.I. Aguilar, J.F. Ortuno and V.F. Meseguer. 2004. Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges. Chemosphere 54: 1039-1047.
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 edition, Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.
15. Gupta, A.K. and S. Sinha. 2007. Assessment of single extraction methods for the prediction of bioavailability of metals to *Brassica juncea* L. Czern. (var. Vaibhav) grown on tannery waste contaminated soil. J. Hazard. Mater. 149: 144-150.
16. Hammer, D. and C. Keller. 2002. Changes in the rhizosphere of metal accumulating plants evidenced by chemical extractants. J. Environ. Qual. 31: 1561-1569.

17. Hao X.Z., D.M. Zhou, D.Q. Huang, H.L. Cang and H. Wang. 2009. Heavy metal transfer from soil to vegetable in southern Jiangsu Province, China. Pedosphere 19: 305-311.
18. Hooda, P.S. and B.J. Alloway. 1994. The plant availability and DTPA extractability of trace metals in sludge-amended soils. Sci. Total Environ. 149: 39-51.
19. Hoyt, P.B. and M. Nyborg. 1971. Toxic metals in acid soil. 2. Estimation of plant available manganese. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35: 141-144.
20. Karami, M., M. Afyuni, Y. Rezaeinejad and R. Schulin. 2009. Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil. Nutr. Cycl. Agroecosys. 83: 51-61.
21. Kopsell, D. and D.A Kopsell. 2007. Copper. PP. 293-328. *In:* Barker, A.V. and D.J. Pilbean (Eds.), Handbook of Plant Nutrition, CRC, Taylor & Francis Group, LLC.
22. Lehmann, R.G. and D.M. Harter. 1984. Assessment of copper soil bond strength by desorption kinetics. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 769-772.
23. Li, Q., X.Y. Guo, X.H. Xu, Y.B. Zuo, D.P. Wei and Y.B. Ma. 2012. Phytoavailability of copper, zinc and cadmium in sewage sludge-amended calcareous soils. Pedosphere 22: 254-262.
24. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Am. 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, WI.
26. Martenz, D.C. and W.L. Lindsay. 1990. Testing soils for copper, iron, manganese and zinc. *In:* Westrman, R.L. (Ed.), Soil Testing and Plant Analysis, SSSA, Madison, WI, USA.
27. McGrath, S.P., F.J. Zhao, S.J. Dunham, 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: 875-883.
28. Mehlich, A. 1953. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH_4. North Carolina Soil Testing Div. Mimeo, Raleigh.
29. Mehlich, A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, manganese and zinc. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 9: 477-492.
30. Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 15: 1409-1416.
31. Mendoza, J., T. Garrido, G. Castillo and N. San-Martin. 2006. Metal availability and uptake by sorghum plants grown in soils amended with sludge from different treatments. Chemosphere 65: 2304-2312.
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. Sci. Total Environ. 205: 245-254.
33. Minnich, M.M., M.B. McBride and R.L. Chaney. 1987. Copper activity in soil solution: II. Relation to copper accumulation in young snapbeans. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 573-578.
34. Morera, M.T., J. Echeverria and J. Garrido. 2002. Bioavailability of heavy metals in soils amended with sewage sludge. Can. J. Soil Sci. 82: 433-438.
35. 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, WI.
36. Nyamangara, J. and J. Mzezewa. 1999. The effect of long-term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. Agric. Ecosys. Environ. 73: 199-204.
37. Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe and L.A. Dean. 1954. PP. 403-430. *In:* Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Physical Properties, Part 1, 2nd ed., Agron. Monogr. No. 9, Madison WI, USA.
38. Paya-Perez, A., J. Sala and F. Mousty. 1993. Comparison of ICPAES and ICP-MS for the analysis of trace elements in soil extracts. Intl. J. Environ. Anal. Chem. 51: 223-230.
39. 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, WI.
40. 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: 2579-2591.
41. Sahuquillo, A., A. Rigol and G. Rauret. 2003. Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. Trend Anal. Chem. 22: 152-159.
42. Sharma, B., D. Harsh-Arora and V.K. Nayya. 2004. Relationships between soil characteristics and total and DTPA-extractable micronutrients in Inceptisols of Punjab. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 35: 799-818.
43. Singh, K., U. Shukla and S. Karwasra. 1987. Chemical assessment of the zinc status of the semiarid region of India. Fert. Res. 13: 191-197.
44. Soltanpour, P.N. and A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 8(3): 195-207.
45. Sommers, L.E. 1977. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. J. Environ. Qual. 6(6): 225-231.

46. Sposito, G.L., J. Lund and A.C. 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. Am. J. 46: 260-265.
47. 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, WI.
48. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-490. *In:* Sparks, D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, SSSA, Madison, WI.
49. Tiwari, R.C. and B. Mohan Kumar. 1982. A suitable extractant for assessing plant available copper in different soils (peaty, red, and alluvial). Plant Soil 68: 131-134.
50. USEPA. 1993. Clean water act, section 503. Vol. 58, No. 32, USEPA, Washington, DC.
51. Williams, D.E., J. Vlamis, A.H. Pukite and J.E. Corey. 1980. Trace element accumulation movement and distribution in the soil profile from massive applications of sewage sludge. Soil Sci. 129: 119-132.