

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب شهری اراک بر جذب کادمیوم در گیاه ذرت در یک خاک لومی

پگاه هوشیار و امیرحسین بقائی¹

گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران؛ Phoshyar@yahoo.com

گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران؛ baghaie@iau-arak.ac.ir

دریافت: 95/8/3 و پذیرش: 95/12/2

چکیده

ورود فلزات سنگین به محیط در نتیجه فعالیت‌های انسان یکی از مهم‌ترین مسائل پیش‌روی جوامع امروزی است. مدیریت استفاده از پسماندهای آلی در اراضی کشاورزی ضمن کاهش خطرات زیست محیطی، افزایش بهره‌وری آنها را در پی دارد. بدین منظور، آزمایشی گلخانه‌ای به منظور بررسی اثر لجن فاضلاب شهری اراک بر میزان جذب کادمیوم در گیاه ذرت در یک خاک لومی به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. تیمارها شامل کاربرد مقادیر صفر، 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به مقادیر صفر، 10.5 و 15 میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و کلات DTPA در دو مقدار صفر و 1/5 میلی‌مول کلات DTPA در کیلوگرم خاک بود. بعد از گذشت 60 روز از کاشت ذرت، ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک و غلظت کادمیوم در خاک و گیاه ذرت اندازه‌گیری شد. نتایج حاکی از آن بود که افزایش کاربرد لجن فاضلاب از صفر به 30 تن در هکتار به ترتیب باعث افزایش و کاهش معنی‌دار گنجایش تبادل کاتیونی خاک (3/5 واحدی) و پی‌اچ خاک (0/3 واحدی) تحت کشت ذرت شد. کاربرد 1/5 میلی‌مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به 15 میلی‌گرم کادمیوم به ترتیب باعث افزایش 8/2% و 15 درصدی در میزان کادمیوم قابل دسترس گیاه شد. روند کاهش 4% و 14 درصدی در میزان فسفر قابل دسترس خاک هم‌زمان با افزایش کادمیوم قابل دسترس خاک مشاهده شد. 79 درصد جذب کادمیوم را می‌توان بر اساس غلظت کادمیوم شاخساره گیاه پیش بینی کرد. نتایج کلی این تحقیق حاکی از آن است که کاربرد کلات DTPA توانسته است باعث افزایش جذب کادمیوم گیاه ذرت و افزایش راندمان گیاه پالایی آن شود.

واژه‌های کلیدی: فسفر قابل دسترس، دی تی پی، گیاه پالایی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: گروه خاکشناسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

مقدمه

کاربرد لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی جهت بهبود کیفیت خاک نگرانی‌هایی را به همراه داشته است، زیرا ضایعاتی مانند لجن فاضلاب برای استفاده در کشاورزی طراحی نشده‌اند و ممکن است دارای مقادیر مختلف ترکیبات مضر باشند. لجن فاضلاب معمولاً حاوی مقادیر زیادی عناصر سنگین می‌باشد (منگ و همکاران، 2016). این عناصر ممکن است آبشویی شده و منابع آب پیرامون مناطق تیمار شده با لجن را آلوده کنند. البته در اغلب خاک‌های کشاورزی که معمولاً دارای پی اچ بین 6 تا 8 هستند فلزات سنگین حلالیت نسبتاً کمی دارند، هر چند که میزان حلالیت بستگی به شرایط فیزیکوشیمیایی خاک و نوع فلز سنگین دارد. قابل ذکر است که در بسیاری موارد لجن فاضلاب به دلیل داشتن ترکیبات اسیدی باعث کاهش موضعی پی اچ خاک شده و قابلیت دسترسی فلزات سنگین از جمله کادمیوم را افزایش می‌دهد (کرمی و همکاران، 2009). بر اساس گزارش آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا مصرف لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت سرب، جیوه، نیکل، سلنیوم و کادمیوم تا 100 برابر غلظت پایه این عناصر در خاک می‌شود.

کادمیوم به دلیل پتانسیل ایجاد سمیت در گیاه، حیوان و انسان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. غلظت کادمیوم خاک در بسیاری از کشورها طی افزودن کودهای آلی به خاک افزایش یافته و سبب آلودگی آب‌های زیر زمینی و ورود این عناصر به زنجیره غذایی انسان شده است (ملائی و همکاران، 1395).. شریفی و همکاران (2010) در تحقیقی گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب با پائین آوردن موضعی پی اچ خاک باعث افزایش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک شده است. سعادت و همکاران (1391) در تحقیقی اثر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های خاک، عملکرد و غلظت سرب و کادمیوم ریشه و اندام هوایی ذرت را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که کاربرد لجن فاضلاب موجب افزایش معنی‌دار ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی خاک و کاهش معنی‌دار پی اچ خاک شده است که این کاهش پی اچ بر افزایش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک و گیاه تأثیر معنی‌داری داشته است.

با وجود تمامی مطالب ذکر شده همیشه نمی‌توان اثر کاربرد لجن فاضلاب را یک اثر افزایشی در جهت افزایش قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک دانست، اگر چه در اکثر تحقیقات (آواستی و همکاران، 2016؛ هی و همکاران، 2016)، کاربرد افزودنی‌های آلی نظیر لجن فاضلاب را عاملی مؤثر در جهت افزایش قابلیت دسترسی

فلزات سنگین در خاک دانسته‌اند، ولی نقش بخش معدنی و آلی موجود در این ترکیبات در تثبیت فلزات سنگین نادیده گرفته شده است. با توجه به اینکه در مطالعات گیاه پالایی هدف پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشد، بایستی جهت تعیین راندمان گیاه پالایی، نقش بخش معدنی و آلی ترکیبات آلی در تثبیت فلزات سنگین در خاک نیز در نظر گرفته شود که در اکثر مطالعات به آن کمتر توجه شده است (مولائی و همکاران، 1394). ذرت تثبیت فلزات سنگین بسته به نوع فلز و پیوند تشکیل دهنده متفاوت می‌باشد (باستا و همکاران، 2005). بخش معدنی و آلی کودهای آلی می‌توانند فلزات سنگین موجود در خاک را تثبیت کرده و مانع تحرک آنها شوند. به طور کلی اکسیدها، کربنات‌ها و فسفات‌ها را می‌توان عامل مؤثری در تثبیت فلزات سنگین دانست (بقائی و همکاران، 1391).

امروزه روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی جهت پالایش فلزات سنگین پیشنهاد شده است (بانگ و همکاران، 2016؛ ین و زهو، 2016)، لیکن کارایی هر کدام از روش‌ها بستگی به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، شرایط آب و هوایی هر منطقه، نوع کشت و... دارد که شناسایی هر کدام از روش‌ها در هر منطقه می‌تواند ما را در بالا بردن اثر بخشی پاکسازی هر منطقه یاری رساند. استفاده از کلاتها به عنوان یکی از راههای بالا بردن کارایی روش گیاه پالایی پیشنهاد شده است (ویسنزیوسکا و همکاران، 2016). محمود و همکاران (2013) در تحقیقی کاربرد اثر کلات بر روی حلالیت کادمیوم مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که کاربرد کلات DTPA باعث افزایش کادمیوم قابل دسترس در خاک شده است، هر چند که این افزایش قابل دسترس نتوانسته تغییر محسوسی در جذب بیشتر کادمیوم توسط گیاه کاهو ایجاد کند. موفقیت در روش‌های گیاه پالایی بستگی به مقدار زیست توده، بخش قابل دسترسی عناصر سنگین در محیط ریشه و غلظت فلزات سنگین در محیط ریشه دارد (محمدی و همکاران، 1389) و راه‌های افزایش تجمع فلز در گیاهان با عملکرد بالا بهترین و کاربردی‌ترین راهبرد در توسعه این روش می‌باشد (چنگ و همکاران، 2015).

در شهرستان اراک نیز لجن فاضلاب به عنوان کود آلی نسبتاً ارزان قیمت رواج زیادی در اراضی کشاورزی پیدا کرده است. هر چند که استفاده از این نوع افزودنی آلی باعث افزایش درصد ماده آلی خاک و افزایش عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌شود ولی تبعاتی از جمله افزایش میزان فلزات سنگین از جمله کادمیوم را در پی داشته

می‌باشد که متأسفانه در بسیاری از منابع به درستی تفکیک نشده است. لازم به ذکر است که در بسیاری مواقع غلظت فلز سنگین در گیاه به دلیل اثر رقت (کاهش غلظت در اثر افزایش عملکرد) نمی‌تواند گویای دقیقی از میزان فلز سنگین خارج شده (جذب شده) از زمین باشد (شریفی و همکاران، 1390)، لذا این تحقیق با هدف بررسی اثر کاربرد لجن فاضلاب شهری اراک بر رشد و جذب کادمیوم در گیاه ذرت در یک خاک لومی در شهرستان اراک مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تیمارهای آزمایشی شامل کاربرد صفر (S_0)، 15 (S_{15}) و 30 (S_{30}) تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده شده با کادمیوم در مقادیر صفر (Cd_0)، 5 (Cd_5)، 10 (Cd_{10}) و 15 (Cd_{15}) میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم لجن فاضلاب و کاربرد کلات DTPA به مقدار صفر (E_0) و $1/5$ ($E_{1.5}$) میلی مول بر کیلوگرم خاک بود. طرح آزمایشی اجرا شده در این پژوهش به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بوده است. جهت انجام این تحقیق، یک نمونه از خاک سطحی (0-30 سانتی متری) با بافت لومی (جدول 1) که بر اساس رده بندی خاک (کلید رده بندی خاک، 2006) هاپلو آرجیدز (Fine loamy, mixed, thermic, Typic Haplargids) نامگذاری می‌شود از روستای علی آباد واقع در سی و پنج کیلومتری شمال شرقی شهر اراک انتخاب گردید.

است (بلخیر و اشرف، 2016؛ دد و ازدمیر، 2016؛ هوانگ و یوان؛ 2016، سولگی و همکاران، 2010). بنابراین لازم است در جهت بازافت ضایعات و پیشگیری از آلودگی محیط زیست، استفاده از لجن فاضلاب به عنوان کود آلی در کشاورزی به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. تاکنون تحقیقاتی در مورد استفاده کلاتها در جهت افزایش قابلیت دسترسی فلزات سنگین صورت پذیرفته است (لی و سونگ، 2014؛ یلیواینیو، 2010)، لیکن علل و عوامل میزان اثر بخشی کاربرد کلات در جهت جذب بیشتر فلز سنگین توسط گیاه در نظر گرفته نشده است. با توجه به اینکه در بین گیاهان زراعی ذرت به عنوان گیاه رایج منطقه در شهرستان اراک بوده و گیاه ابر جذب کننده فلزات سنگین شناخته شده است (چنگ و همکاران، 2015)، بایستی به دنبال راهی بود که بتوان با افزایش عملکرد گیاه و کاهش استرس گیاه میزان جذب و خروج فلز سنگین از خاک را افزایش داد. اگرچه تاکنون مطالعات محدودی درباره اثر کاربرد کلاتها بر تغییر قابلیت دسترسی فلزات سنگین از جمله کادمیوم با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از جمله درصد مواد آلی خاک صورت پذیرفته (عربی و همکاران، 1389)، لیکن میزان جذب این فلزات مورد بررسی قرار نگرفته و تنها به اندازه‌گیری غلظت این فلزات در شاخساره گیاه اکتفا شده است. با توجه به اینکه فاکتور جذب در برگیرنده غلظت فلز و میزان زیست توده گیاه می‌باشد بررسی این فاکتور به جای غلظت از اهمیت خاصی برخوردار

جدول 1- ویژگی‌های خاک و لجن مورد استفاده در این پژوهش

استاندارد USEPA 503	مقدار	واحد	متغیر	مقدار	واحد	متغیر
	لجن فاضلاب			خاک		
---	6/4	---	بی‌اچ	7/04	---	بی‌اچ
----	13	$dS m^{-1}$	قابلیت هدایت الکتریکی	1/12	$dS m^{-1}$	قابلیت هدایت الکتریکی
----	19	%	کربن آلی	0/1	%	کربن آلی
-----	1/7	%	نیتروژن کل	لوم	%	بافت
-----	1	%	فسفر	5	%	آهک خاک
39	3	$mg kg^{-1}$	کادمیوم کل*	1	$mg kg^{-1}$	کادمیوم کل
300	2	$mg kg^{-1}$	سرب کل	18	$mg kg^{-1}$	فسفر
2800	12	$mg kg^{-1}$	روی کل	10/8	$Cmol kg^{-1} soil$	ظرفیت تبادل کاتیونی
				0/03	%	نیتروژن کل

* میزان کادمیوم قبل از غنی سازی

در حد 80 درصد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. کادمیوم اولیه موجود در خاک عصاره‌گیری (لی و همکاران،

خاک مورد آزمایش به مدت دو هفته در دمای 25-23 درجه سلسیوس خوابانیده شده و رطوبت آن با آب مقطر

روش کلرید باریم اندازه‌گیری شد (رود و همکاران، 1982). شکل قابل جذب کادمیوم در نمونه‌های خاک به روش لی و همکاران (2015) اندازه‌گیری شد. همچنین جهت تعیین میزان اثر بخشی کاربرد کلات EDTA در جذب فلز سرب، از فاکتور جذب که حاصل ضرب عملکرد در غلظت کادمیوم شاخساره گیاه است کمک گرفته شد (شریفی و همکاران، 2010). فسفر قابل دسترس موجود در نمونه‌های خاک بر اساس روش مرفی و رالی (مرفی و رالی، 1962) اندازه‌گیری شد. مقدار آهک به روش خنثی سازی با اسید و تیتراسیون اسید اضافی با سود (نلسون، 1982) تعیین شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم افزار SAS انجام گرفت و مقایسه‌های میانگین ها بر اساس آزمون آماری LSD در سطح احتمال 5 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

اثر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک
نتایج جدول 2 حاکی از معنی‌دار بودن اثر ساده کاربرد لجن فاضلاب بر پی اچ خاک، کربن آلی، نیتروژن و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌باشد. کاربرد 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار پی اچ خاک (0/3 واحدی) نسبت به خاک فاقد لجن فاضلاب در طی دوره رشد گیاه شده است که این کاهش معنی‌دار احتمالاً می‌تواند بر قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک مؤثر باشد، هرچند که تفاوت معنی‌داری بین تیمار 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب خاک مشاهده نشد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به نقش قدرت بافری خاک در جلوگیری از کاهش بیشتر pH خاک دانست (کریمی و همکاران، 2009). لجن فاضلاب دارای مقادیر قابل توجهی از ماده آلی می‌باشند که این مقدار ماده آلی می‌تواند اثرهای مطلوبی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و در نهایت رشد و عملکرد گیاه داشته باشد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاربرد 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب به ترتیب باعث افزایش 0/05 و 0/08 درصدی در مقدار نیتروژن کل خاک شده است که این احتمالاً می‌تواند تأثیر مستقیمی روی رشد رویشی گیاه داشته باشد. همچنین کاربرد 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب به ترتیب باعث افزایش 0/9 و 2/8 واحدی در نسبت کربن به ازت خاک شده که این تأثیر به‌سزایی بر قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک و میزان جذب کادمیوم توسط گیاه دارد.

2015) و توسط دستگاه جذب اتمی پریکین المر مدل 3030 اندازه‌گیری شد. مقایسه غلظت برخی عناصر سنگین موجود در لجن فاضلاب (جدول 1) با استانداردهای تعیین شده توسط USEPA503 حاکی از آن است که غلظت فلزات سنگین اولیه موجود در این کود زیر حد استاندارد می‌باشد. لجن فاضلاب با مقدار فوق‌الذکر و به صورت اسپری با محلول نیترات کادمیوم غنی‌سازی شد. در طول این مدت نمونه‌های لجن فاضلاب مرتباً تر و خشک شدند و رطوبت آن در حد 70 درصد ظرفیت زراعی مزرعه نگهداری شد تا نمونه‌های لجن با کادمیوم اضافه شده به تعادل برسند.

بعد از گذشت دو هفته نمونه‌های لجن فاضلاب آلوده شده با کادمیوم هوا خشک شده، سپس آسیاب و در نسبت‌های صفر، 15 و 30 تن در هکتار با خاک مخلوط گردید و به مدت یک ماه نمونه‌ها انکوبه شد تا به تعادل برسد و در طول این مدت رطوبت نمونه‌ها در حد 70 درصد ظرفیت زراعی مزرعه نگهداری شد. سپس بذر گیاه ذرت سینگل کراس 704 در گلدانهای 4 کیلوگرمی کاشته شد. در طول رشد گیاه، عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام پذیرفت. آبیاری گلدان‌ها هر 2 روز یک بار به طور یکنواخت انجام شد و در طول مدت آزمایش گیاهان در شرایط محیطی (نور و گرما) یکسان قرار گرفتند. لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات قبلی (بناعراقی و همکاران، 2010) یک هفته به پابان دوره رشد گیاه کلات DTPA در دو مقدار صفر و 1/5 میلی‌مول به خاک اضافه شد.

برداشت بوته‌های گیاه ذرت 60 روز پس از کاشت انجام شد. نمونه‌ها به مدت 48 ساعت در دمای 65 درجه سلسیوس در خشک‌کن قرار داده شد، سپس نمونه‌ها توسط آسیاب برقی به پودر تبدیل شده و در ظروف پلاستیکی نگهداری شد. نمونه‌ها در دمای 480 درجه سلسیوس خاکستر و غلظت فلزات سنگین بعد از عصاره‌گیری نمونه‌های با اسید کلریدریک 2 نرمال با استفاده از دستگاه جذب اتمی پریکین المر مدل 3030 قرائت شد (لی و همکاران، 2015). همزمان با برداشت گیاه، از خاک گلدان‌های تحت کشت گیاه ذرت نمونه‌برداری شده و نمونه‌های خاک جهت تجزیه‌های مورد نظر به آزمایشگاه منتقل شدند.

جهت اندازه‌گیری مقدار کربن آلی خاک از روش اکسیداسیون تر (نلسون و سامر، 1982)، قابلیت هدایت الکتریکی و پی اچ نمونه‌های خاک و کود در عصاره اشباع (ام سی لین، 1982) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به

جدول 2- تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب، کلات و کادمیوم بر صفات اندازه‌گیری شده

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییر
کادمیوم قابل دسترس خاک	فسفر قابل استفاده خاک	ظرفیت تبادل کاتیونی	نیتروژن	کربن آلی	اسیدیته		
0/1233*	1/1434ns	0/011*	0/00003ns	0/0003 ns	0/0038**	2	بلوک
103/7722**	27262/19347**	74/4211**	0/0450**	3/8810**	0/2722**	2	لجن فاضلاب
4/4516**	155/1734ns	0/0018ns	0/00005ns	0/0011 ns	0/00011ns	1	کلات
278/5216**	743/6231**	0/01813 ns	0/00005ns	0/0024 ns	0/0057 ns	3	کادمیوم
0/0811*	6/6284*	0/0015ns	0/00005ns	0/0002 ns	0/0001 ns	2	کلات× لجن فاضلاب
22/0317**	36/6992**	0/0098*	0/0001**	0/0032*	0/0058*	6	کادمیوم× لجن فاضلاب
0/8431**	17/2994*	0/0022ns	0/00001ns	0/0008 ns	0/0003ns	3	کادمیوم× کلات
0/1410**	1/5349**	0/0030ns	0/00008ns	0/0009 ns	0/0003ns	6	کادمیوم× کلات× لجن
0/01	0/5239	0/00353	0/0022	0/007	0/0020	46	خطا

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح 5 و 1 درصد می‌باشد.

خاک مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه به آن اشاره شده است.

میزان فسفر قابل دسترس خاک

نتایج جدول 2 حاکی از معنی‌دار بودن اثر ساده لجن فاضلاب و کادمیوم و همچنین اثر متقابل کاربرد لجن، کادمیوم و کلات DTPA بر میزان فسفر قابل دسترس خاک می‌باشد که با توجه به معنی‌دار بودن اثر کاربرد سه گانه لجن، کادمیوم و کلات تنها به توصیف اثر سه گانه کاربرد تیمارهای مذکور پرداخته شده است. بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در خاک تیمار شده با 30 تن در هکتار لجن فاضلاب بدون آلودگی با کادمیوم بود (جدول 3). کمترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در خاک فاقد کاربرد لجن فاضلاب و آلوده به 15 میلی‌گرم کادمیوم همراه با کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA بود، این در حالی است که بالاترین میزان کادمیوم قابل دسترس خاک (جدول 3) نیز در این تیمار مشاهده شد که دلیل احتمالی آن را می‌توان به اثر برهمکنش فسفر و کادمیوم (رحیمی و رونقی، 1391) در کاهش قابل دسترسی فسفر در خاک دانست، اگرچه اثر برهمکنش فسفر و کادمیوم در گیاه نیز نبایستی نادیده گرفته شود (صفرزاده شیرازی و همکاران، 1391).

بیشترین مقدار گنجایش تبادل کاتیونی خاک در تیمار 30 تن در هکتار لجن فاضلاب مشاهده شد و کمترین گنجایش تبادل کاتیونی نیز در مربوط به تیمار فاقد لجن فاضلاب بود که دلیل احتمالی این امر را می‌توان مقدار بالای کربن آلی موجود در کودهای آلی دانست (یوان و همکاران، 2016؛ زهاو و همکاران، 2016). کاربرد 15 تن در هکتار لجن فاضلاب باعث شد گنجایش تبادل کاتیونی خاک از 10/8 در خاک بدون لجن فاضلاب به 12/8 سانتی مول بر کیلوگرم خاک افزایش یابد. همچنین افزودن 30 تن در هکتار لجن فاضلاب گنجایش تبادل کاتیونی خاک را از 10/8 در خاک شاهد به 14/3 سانتی مول بر کیلوگرم خاک افزایش داد.

اصولاً لجن فاضلاب شهری حاوی مقادیر نسبتاً بالایی فسفر بوده و کاربرد این افزودنی آلی احتمالاً می‌تواند باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک شود. با عنایت به اثر برهمکنش فسفر و کادمیوم (صفرزاده شیرازی و همکاران، 1391) احتمالاً ترکیبات موجود در لجن فاضلاب از قبیل فسفر خاک می‌تواند از عوامل مهم تأثیرگذار بر میزان اثر بخشی کاربرد کلات DTPA بر میزان جذب کادمیوم توسط گیاه باشد. بنابراین در ابتدا اثر کاربرد لجن فاضلاب بر تغییر میزان فسفر قابل دسترس

جدول 3- اثر کاربرد لجن فاضلاب، کلات DTPA و نیترات کادمیوم بر میزان فسفر و کادمیوم قابل دسترس خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

تیمار	Cd ₀		Cd ₅		Cd ₁₀		Cd ₁₅	
	فسفر	کادمیوم خاک	فسفر	کادمیوم خاک	فسفر	کادمیوم خاک	فسفر	کادمیوم خاک
S ₀ E _{1.5}	13 ^k	ND**	8/4 ^l	14/15 ⁱ	4/1 ^m	9/15 ^d	1/77 ⁿ	13/93 ^a
S ₀ E ₀	13 ^k	ND	11/7 ^k	3/86 ^k	7/4 ^l	8/56 ^e	4/2 ^m	12/26 ^b
S ₁₅ E _{1.5}	64/6 ^e	ND	56/8 ^e	2/84 ^m	52/5 ^h	6/93 ^f	41/7 ^j	9/88 ^c
S ₁₅ E ₀	64/6 ^e	ND	61/4 ^f	2/55 ⁿ	57/6 ^g	6/24 ^g	48/5 ⁱ	9/13 ^d
S ₃₀ E _{1.5}	82/5 ^a	ND	71/3 ^c	1/83 ^o	68/3 ^d	3/75 ^k	64/8 ^e	4/64 ^h
S ₃₀ E ₀	82/5 ^a	ND	74/6 ^b	1/45 ^p	71/8 ^c	3/04 ^l	67/5 ^d	4/04 ⁱ

S₀، S₁₅ و S₃₀ به ترتیب شامل کاربرد صفر، 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک، Cd₀، Cd₅، Cd₁₀ و Cd₁₅ به ترتیب شامل تیمارهای صفر، 5، 10 و 15 میلی گرم در کیلو گرم خاک، E₀ و E_{1.5} به ترتیب شامل صفر و 1/5 میلی مول کلات DTPA در کیلو گرم خاک است، *داده هایی که در هر پارامتر دارای حروف مشابه می باشند در سطح 5٪ بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معناداری نیستند، **ND: قابل اندازه گیری به وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.

خاک در نتیجه کاربرد لجن احتمالاً توانسته است با تشکیل پیوند فسفر با کادمیوم خاک باعث کاهش میزان کادمیوم قابل دسترس خاک شده است (رحیمی و همکاران، 1393). بنابراین احتمالاً بتوان چنین نتیجه گیری کرد که کاربرد لجن فاضلاب اگر چه به عنوان یک ترکیب آلی در جهت افزایش ماده آلی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک مفید واقع شده و در کوتاه مدت می تواند باعث تثبیت فلز سنگین در خاک شود ولی این تثبیت موقتی می باشد. زمانی که بر اساس فرآیند بمب زمانی (بقائی و همکاران، 1391) این ترکیبات در خاک تجزیه شوند مجدداً فلزات سنگین در خاک رها شده و باعث آلودگی خاک می شوند. مادامی که هدف پاکسازی فلز سنگین از خاک مد نظر باشد کاربرد این قبیل ترکیبات آلی با افزایش رقابت فلز با کلات و فلز با ترکیب آلی باعث کاهش اثر بخشی کاربرد کلات در جهت پاکسازی خاک از فلز سنگین شده و بایستی میزان و زمان کاربرد کلات در هر منطقه بایستی بسته به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک بایستی جداگانه مورد ارزیابی قرار گیرد.

عملکرد گیاه ذرت

نتایج جدول 4 حاکی از معنی دار بودن اثرات ساده و متقابل کاربرد لجن، کلات و کادمیوم بر عملکرد، غلظت کادمیوم و جذب کادمیوم شاخساره گیاه می باشد. با توجه به اینکه اثرات متقابل کاربرد لجن، کلات و کادمیوم بر عملکرد گیاه معنی دار نیز می باشد، تنها به توصیف اثر سه گانه کاربرد تیمارهای مذکور پرداخته شده است

بیشترین عملکرد وزن خشک گیاه مربوط به خاک تیمار شده با 30 تن در هکتار لجن فاضلاب بدون آلودگی کادمیوم و بدون کاربرد کلات DTPA بوده است، این در

کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA در خاک فاقد کاربرد لجن فاضلاب و آلوده به 5 و 10 میلی گرم کادمیوم باعث افزایش معنی دار میزان کادمیوم قابل دسترس خاک (جدول 3) و کاهش معنی داری به ترتیب برابر 28/2 و 44/5 درصدی در میزان فسفر قابل دسترس خاک شد (جدول 3) که دلیل احتمالی آن را می توان به دلیل تشکیل احتمالی رسوب فسفات کادمیوم نسبت داد (رحیمی و رونقی، 1391). کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA در خاک تیمار شده با 15 تن در هکتار لجن فاضلاب و آلوده به 5 و 10 میلی گرم نیز افزایش معنی داری در میزان کادمیوم قابل دسترس خاک نشان داد، این در حالی است که کاهش معنی داری در میزان فسفر قابل به ترتیب برابر 7/4 و 8/8 درصد مشاهده شد. نکته قابل توجه در این است که صرف نظر از میزان کاربرد لجن فاضلاب، با افزایش آلودگی کادمیوم، کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA توانسته است با افزایش میزان کادمیوم قابل دسترس خاک، تأثیر بیشتری بر روند کاهش میزان فسفر قابل دسترس در خاک داشته باشد (جدول 3). تشکیل پیوندهایی قوی بین کادمیوم و کلات احتمالاً می تواند با افزایش میزان کادمیوم قابل دسترس خاک، باعث اثر بخشی بیشتر کاربرد کلات در جهت پاکسازی خاک از فلز سنگین شود (محمود و همکاران، 2013).

صرفه نظر از میزان آلودگی خاک و میزان کاربرد کلات، کاربرد لجن فاضلاب توانسته است افزایش معنی داری را در میزان فسفر قابل دسترس خاک داشته باشد، این در حالی است که میزان کادمیوم قابل دسترس خاک (جدول 3) روند معکوسی را نشان می دهد و این حاکی از آن است که افزایش میزان فسفر قابل استفاده

کیلوگرم خاک همراه با کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA بوده است. بالاترین غلظت کادمیوم شاخساره گیاه نیز در همین تیمار مشاهده شده است.

حاکی است که غلظت کادمیوم در شاخساره این گیاه نیز بسیار کم و در حد اندازه‌گیری به وسیله دستگاه نبوده است (جدول 5). کمترین عملکرد گیاه نیز در خاک فاقد کاربرد لجن فاضلاب و آلوده به 15 میلی‌گرم کادمیوم در

جدول 4- تجزیه واریانس اثر کاربرد لجن فاضلاب، کلات و کادمیوم بر صفات اندازه‌گیری شده

میانگین مربعات		درجه آزادی		منابع تغییر
جذب کادمیوم	غلظت کادمیوم شاخساره	عملکرد	درجه آزادی	
0/05214*	0/0201**	0/0080 ^{ns}	2	بلوک
234/22**	40/00**	40/6030**	2	لجن فاضلاب
34/8942**	2/1972*	0/0696*	1	کلات
1025/5924*	82/6011**	1/5082**	3	کادمیوم
0/7588**	0/0901*	0/0004*	2	کلات × لجن فاضلاب
61/8519**	7/4300**	0/2147**	6	کادمیوم × لجن فاضلاب
4/4103*	0/3712**	0/0026*	3	کادمیوم × کلات
0/3005**	0/0701**	0/0046**	6	کادمیوم × کلات × لجن
0/5966	0/0213	0/0324	46	خطا

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح 5 و 1 درصد می‌باشد.

جدول 5- اثر کاربرد لجن، کلات و نیترات کادمیوم بر عملکرد (گرم در گلدان) و غلظت کادمیوم شاخساره (میلی گرم بر کیلوگرم)

تیمار	Cd ₀		Cd ₅		Cd ₁₀		Cd ₁₅	
	غلظت کادمیوم	عملکرد	غلظت کادمیوم	عملکرد	غلظت کادمیوم	عملکرد	غلظت کادمیوم	عملکرد
S ₀ E _{1.5}	ND**	3/25 ^g	2/47 ^g	3/19 ^m	5/65 ^c	2/95 ⁿ	7/52 ^a	2/10 ^p
S ₀ E ₀	ND*	3/27 ⁱ	2/05 ^h	3/22 ^{lm}	5/04 ^d	3/00 ⁿ	6/39 ^b	2/29 ^o
S ₁₅ E _{1.5}	ND*	4/89 ^g	1/38 ^j	4/69 ⁱ	3/14 ^f	4/56 ^j	5/25 ^d	4/40 ^k
S ₁₅ E ₀	ND*	4/98 ^f	1/75 ⁱ	4/77 ^h	3/86 ^e	4/59 ^j	5/73 ^c	4/44 ^k
S ₃₀ E _{1.5}	ND*	5/60 ^b	0/46 ^l	5/49 ^c	1/24 ^j	5/37 ^d	2/04 ^h	5/20 ^e
S ₃₀ E ₀	ND*	5/69 ^a	0/88 ^k	5/55 ^b	1/66 ⁱ	5/40 ^d	2/34 ^g	5/25 ^e

S₃₀ و S₁₅، S₀ به ترتیب شامل کاربرد صفر، 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک، Cd₀، Cd₅، Cd₁₀ و Cd₁₅ به ترتیب شامل تیمارهای صفر، 5، 10 و 15 میلی گرم در کیلو گرم خاک، E₀ و E_{1.5} به ترتیب شامل صفر و 1/5 میلی مول کلات DTPA در کیلو گرم خاک است * داده هایی که در هر پارامتر دارای حروف مشابه می باشند در سطح 5٪ بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنا داری نیستند. ND** قابل اندازه گیری با دستگاه نبود.

اساس نتایج پژوهشگران متعدد، قابلیت دسترسی فلزات در خاک تیمار شده با ترکیبات آلی بسیار کمتر از خاک تیمار شده با منابع معدنی فلزات می‌باشد (بقائی و همکاران، 2011؛ باستا و همکاران، 2005؛ مولائی و همکاران، 1394). بقائی و همکاران (1391) در تحقیقی بخش معدنی و آلی موجود در لجن فاضلاب را عامل مهمی در جهت کاهش قابلیت دسترسی فلز سنگین توسط گیاه و به دنبال آن افزایش عملکرد گیاه دانستند. نکته قابل توجه در این است که هر چند در مطالعات زیادی کاربرد لجن فاضلاب را عامل مهمی در جهت افزایش قابلیت دسترسی فلزات سنگین توسط گیاه دانسته‌اند، اما نقش بخش معدنی و آلی فلزات سنگین در تثبیت فلزات را

کاربرد 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک آلوده به 15 میلی گرم کادمیوم همراه با کاربرد 1/5 میلی مول کلات به ترتیب باعث افزایش معنی‌دار 1/6 و 2/3 واحدی در عملکرد گیاه شده است، این در حالی است که میزان کادمیوم شاخساره گیاه روند کاهشی را نشان می‌دهد (جدول 5) که در اینجا می‌توان به نقش عناصر غذایی موجود در لجن فاضلاب در جهت افزایش عملکرد گیاه و از سویی دیگر به نقش بخش معدنی و آلی موجود در لجن فاضلاب در کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم و به دنبال آن کاهش تنش کادمیوم و افزایش عملکرد گیاه دانست. به طور کلی قابلیت دسترسی عناصر در ترکیبات آلی بسیار کمتر از نمک‌های فلزی این عناصر می‌باشد. بر

جذب کادمیوم گیاه

با توجه به اینکه جذب تحت تأثیر دو فاکتور عملکرد و غلظت کادمیوم شاخساره گیاه قرار می‌گیرد روند نسبتاً متفاوتی بین غلظت و جذب کادمیوم شاخساره گیاه مشاهده شد، هر چند که جهت بررسی اثر بخش معدنی و آلی لجن و اثربخشی کاربرد کلات DTPA بر میزان جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت، در این پژوهش جذب فاکتور مناسب‌تری نسبت به غلظت تشخیص داده شد (شریفی و همکاران، 1390). بیشترین میزان جذب کادمیوم شاخساره در تیمار $S_{15}E_{1.5}Cd_{15}$ مشاهده شد که خاک تیمار شده با 15 تن در هکتار لجن فاضلاب آلوده به 15 میلی گرم کادمیوم و حاوی 1/5 میلی مول کلات می‌باشد (جدول 6)، این در حالی است که بالاترین غلظت کادمیوم شاخساره در خاک فاقد کاربرد لجن فاضلاب همراه با کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA و آلوده به 15 میلی-گرم کادمیوم بود (جدول 5). کمترین مقدار جذب کادمیوم شاخساره گیاه در تیمار $S_{30}E_0Cd_5$ مشاهده شد. با توجه به اینکه غلظت کادمیوم شاخساره گیاه در تیمار فاقد آلودگی کادمیوم (Cd_0) قابل اندازه‌گیری به وسیله دستگاه نبود، مقدار جذب در این تیمارها محاسبه نشده است.

نادیده گرفته‌اند. لازم به ذکر است که چون در مطالعات گیاه پالایی هدف پالایش خاک از فلزات سنگین می‌باشد، بایستی هر دو جنبه قضیه در نظر گرفته شود. نکته قابل توجه این پژوهش در این است که با توجه به مطالعات قبلی (بناعراقی و همکاران، 2010) در مورد زمان کاربرد کلات DTPA (که در این تحقیق بر اساس تحقیقات قبلی یک هفته به برداشت گیاه در نظر گرفته شده) کاربرد این کلات تأثیر متفاوتی در عملکرد گیاه داشته است (در بعضی تیمار تغییر عملکرد معنی‌دار نبوده است) و از سویی دیگر نتایج کاربرد کلات DTPA در اکثر تیمارها حاکی از افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم شاخساره گیاه می‌باشد (جدول 5)، لذا جهت بررسی دقیق‌تر میزان کادمیوم جذب شده توسط گیاه، فاکتور جذب (جدول 6) که حاصل ضرب عملکرد در غلظت کادمیوم شاخساره گیاه می‌باشد فاکتور مهمتری به جای غلظت تشخیص داده شد که در ادامه به آن اشاره شده است.

جدول 6- اثر کاربرد لجن فاضلاب، کلات و نیترات کادمیوم بر جذب کادمیوم شاخساره گیاه ذرت (میلی گرم بر کیلوگرم)

تیمار	Cd_0	Cd_5	Cd_{10}	Cd_{15}
$S_0E_{1.5}$	----	2/47 ^g	5/65 ^c	7/52 ^a
S_0E_0	----	2/05 ^h	5/04 ^d	6/39 ^b
$S_{15}E_{1.5}$	----	1/38 ^j	3/14 ^f	5/25 ^d
$S_{15}E_0$	----	1/75 ⁱ	3/86 ^e	5/73 ^c
$S_{30}E_{1.5}$	----	0/46 ^l	1/24 ^j	2/04 ^h
$S_{30}E_0$	----	0/88 ^k	1/66 ⁱ	2/34 ^g

S_0 ، S_{15} و S_{30} به ترتیب شامل کاربرد صفر، 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک، Cd_0 ، Cd_5 ، Cd_{10} و Cd_{15} به ترتیب شامل تیمارهای صفر، 5، 10 و 15 میلی گرم در کیلوگرم خاک، E_0 و $E_{1.5}$ به ترتیب شامل صفر و 1/5 میلی مول کلات DTPA در کیلوگرم خاک است * داده‌هایی که دارای حروف مشابه می‌باشند در سطح 5٪ بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معناداری نیستند.

همین میزان کلات در خاک تیمار شده با 15 و 30 تن در هکتار لجن فاضلاب و آلوده به 15 میلی گرم کادمیوم به ترتیب باعث 9 و 12 درصدی در میزان جذب کادمیوم شاخساره گیاه شده است.

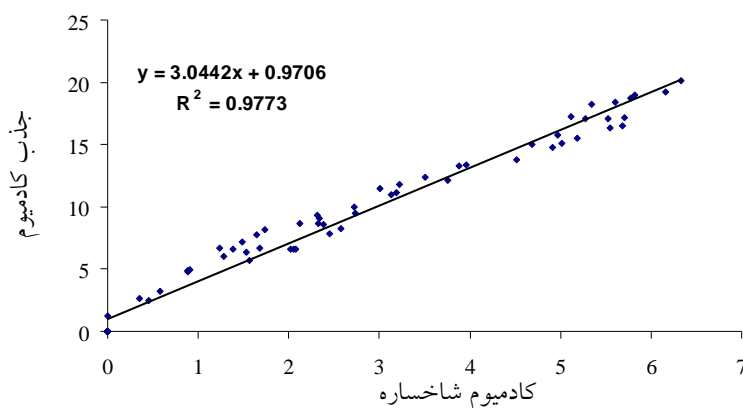
نکته قابل توجه در این است که صرفه‌نظر از میزان کاربرد کلات DTPA، همزمان با افزایش میزان کاربرد لجن فاضلاب از 15 تن به 30 تن در هکتار، میزان جذب کادمیوم شاخساره گیاه یا به عبارتی دیگر میزان پاکسازی خاک از فلز سنگین کادمیوم کاهش یافته است، هر چند

صرفه‌نظر از میزان آلودگی و کود آلی به کار برده شده، کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA افزایش معنی‌داری را در میزان جذب کادمیوم شاخساره گیاه نشان داده است، هر چند که میزان اثر بخشی کاربرد کلات DTPA در میزان جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت متفاوت بوده است، به نحوی که کاربرد 1/5 میلی مول کلات DTPA در خاک فاقد کاربرد لجن فاضلاب و آلوده به 15 میلی گرم کادمیوم باعث افزایش 15 درصدی در میزان جذب کادمیوم خاک شده است، این در حالی است که کاربرد

حائز اهمیت در این است که هر چند که استفاده از لجن فاضلاب می‌تواند تأثیر معنی‌داری در افزایش عملکرد گیاه داشته باشد، ولی آلوده بودن این افزودنی آلی به فلز سنگین نیز بایستی مورد بررسی قرار گیرد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد تغییر درصد ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد این ترکیب می‌تواند راندمان گیاه پالایی را تحت تأثیر قرار دهد. لذا در صورت استفاده از لجن فاضلاب به عنوان یک منبع کودی جهت تغذیه‌ای گیاه، اهمیت آلودگی آن به فلز سنگین نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد.

نتایج شکل (1) حاکی از آن است که 97 درصد تغییرات جذب کادمیوم گیاه را می‌توان بر اساس غلظت کادمیوم شاخساره گیاه پیش بینی کرد. با توجه به اینکه جذب عناصر توسط گیاه تحت تأثیر غلظت و عملکرد گیاه قرار می‌گیرد، لازم است در مطالعات گیاه پالایی جهت برآورد راندمان پاک‌سازی خاک از فلزات سنگین بایستی فاکتور جذب به جای غلظت مورد استفاده قرار گیرد که در این میان تا حدودی می‌توان فاکتور جذب را از روی فاکتور غلظت پیش‌بینی کرد، هر چند که در این میان نقش ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک در عملکرد گیاه و همچنین تغییر قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک و به دنبال آن جذب توسط گیاه نبایستی نادیده گرفته شود.

که میزان فسفر قابل دسترس خاک افزایش یافته است (جدول 3) و این حاکی از آن است که میزان جذب کادمیوم نیز با میزان فسفر قابل دسترس خاک (جدول 3) روند معکوسی را نشان می‌دهد. نکته اساسی و قابل توجه در این است که هر چند که کاربرد 30 تن نسبت به 15 تن در هکتار لجن فاضلاب در این تحقیق توانسته است باعث افزایش معنی‌داری در عملکرد گیاه شود (جدول 5) ولی از سویی دیگر کاربرد لجن فاضلاب با افزایش ویژگی‌های جذبی خاک نظیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و همچنین اثر رقت (شریفی و همکاران، 1390) باعث کاهش غلظت کادمیوم شاخساره گیاه شده است (جدول 5) و با افزایش مقدار کاربرد لجن، میزان کادمیوم قابل دسترس خاک کاهش یافته شده، لذا جذب کادمیوم توسط شاخساره گیاه یا به عبارت دیگر راندمان گیاه پالایی کاهش پیدا کرده است. میزان جذب کادمیوم در خاک تیمار شده با 30 تن در هکتار لجن فاضلاب و آلوده به 15 میلی‌گرم کادمیوم نسبت به 15 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک فاقد کاربرد کلات کاهشی برابر 3/3 واحدی را در میزان جذب کادمیوم نشان داد، این در حالی است که روند نسبتاً مشابهی نیز در تیمار کاربرد کلات نیز مشاهده شد. بنابراین چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که درصد ماده آلی موجود در خاک می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در اثربخشی کاربرد کلات DTPA جهت افزایش میزان جذب کادمیوم توسط شاخساره گیاه باشد. نکته



شکل 1- رابطه رگرسیونی بین جذب و غلظت کادمیوم گیاه (میلی گرم بر کیلوگرم)

نتیجه‌گیری

غلظت فلزات سنگین نظیر کادمیوم در خاک و زنجیره غذایی کرده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که کاربرد لجن فاضلاب با تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک

با پیشرفت و صنعتی شدن شهرها، غلظت آلاینده‌های فلزات سنگین مدام رو به افزایش است و کاربرد افزودنی‌های آلی نظیر لجن فاضلاب نیز کمک شایانی به افزایش

پالایش کادمیوم از خاک باشد، به طوری که نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش میزان کاربرد لجن فاضلاب، میزان اثربخشی کاربرد کلات DTPA بر راندمان گیاه پالایی کادمیوم کاهش یافته است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با توجه به نقش مهم عملکرد گیاه در میزان کادمیوم جذب شده به وسیله گیاه، جذب (حاصل ضرب عملکرد در غلظت) فاکتور مناسب تری نسبت به غلظت می باشد. نتایج کلی این تحقیق حاکی از آن است که تنها 79 درصد تغییرات جذب کادمیوم در گیاه را بر اساس غلظت می توان پیش بینی کرد، ولی شرایط رشد گیاه در هر منطقه، غلظت، نوع منبع آلودگی و میزان کاربرد افزودنی آلی در هر منطقه نیز بایستی در نظر گرفته شود.

نظیر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کمک شایانی به تغییر قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک کرده است، هر چند که در بسیاری مواقع تجزیه مجدداً ترکیبات آلی در خاک ممکن است باعث رها سازی مجدد فلزات سنگین در خاک نظیر کادمیوم شود، لذا گیاه پالایی این ترکیبات امری ضروری به نظر می رسد. همچنین کاربرد لجن فاضلاب با افزایش میزان فسفر قابل دسترس خاک باعث کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم در خاک و به دنبال آن کاهش جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت شده است. همچنین نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که درصد مواد آلی باقیمانده موجود در خاک می تواند یکی از عوامل موثر در میزان اثربخشی کاربرد کلات DTPA بر راندمان

فهرست منابع:

1. بقائی، ا.م.، خوشگفتارمنش، ا.م.، وافیونی، م. 1391. اثر بخش معدنی و آلی کود گاوی و لجن فاضلاب غنی شده بر توزیع شکل های شیمیایی سرب در خاک. مجله علوم آب و خاک، جلد 16، شماره 60، صفحه: 95-106.
2. رحیمی، ط. و رونقی، ع. 1391. اثر کاربرد فسفر بر کاهش سمیت کادمیم در گیاه اسفناج در یک خاک آهکی، مجله علوم آب و خاک، جلد 16، شماره 59، صفحه: 75-85.
3. رحیمی، ق.، دودانکه، ه.، معروفی، ص. و غلامی، م. 1393. اثرات کودهای شیمیایی و آلی بر تثبیت سرب و کادمیوم در خاک های آلوده، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد 21، شماره 5، صفحه: 71-92.
4. شریفی، م.، افیونی، م. و خوشگفتارمنش، ا.م. 1390. اثر کاربرد لجن فاضلاب کارخانه پلی اکریل، کمپوست زباله شهری و کود گاوی بر قابلیت جذب آهن و روی در خاک و جذب آنها توسط ذرت، یونجه و گل جعفری در شرایط گلخانه. مجله علوم آب و خاک، جلد 15، شماره 56، صفحه: 141-154.
5. صفرزاده شیرازی، ص.، عبدالمجید، ر.، کریمیان، ن.، یثربی ج. و امام ی. 1391. اثر سمیت کادمیم بر جذب نیتروژن و فسفر و برخی از ویژگی های رویشی شاخساره هفت رقم برنج. مجله علوم و فنون کشت های گلخانه ای، جلد 3، شماره 9، صفحه: 107-118.
6. عربی، ز.، همایی، م. و اسدی، م. ا. مقایسه آثار افزودن اسید سیتریک و کی لیت های مصنوعی بر افزایش پالایش گیاهی کادمیوم از خاک، مجله علوم آب و خاک، جلد 14، شماره 54، صفحه: 85-95.
7. محمدی، م. حبیبی، د.، اردکانی، م. و اصغرزاده ا. 1389. ارزیابی قدرت جذب و اندوزش گیاه یونجه یکساله (Medicago scutellata) در خاک های آلوده به کادمیوم، فصلنامه علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد 2، صفحه: 260-247.
8. ملایی، ر.، عابدی کوپایی، ج.، اسلامیان س. س. 1395. اثر ژئولیت بر جذب کادمیم در گیاه اسفناج در شرایط آبیاری با پساب. مجله علوم آب و خاک، جلد 20، شماره 75، صفحه: 15-25.
9. مولائی، ش.، شیرانی ح.، حمیدپور م.، شکفته ح. و بسالت پور ع. ا. 1394. تأثیر برخی اصلاح کننده های آلی بر ویژگی های رویشی و غلظت کادمیوم، روی و سرب در ذرت در یک خاک آلوده به عناصر سنگین. مجله علوم آب و خاک، جلد 19، شماره 74، صفحه: 113-124.

10. Awasthi, M. K., Q. Wang, H. Huang, R. Li, F. Shen, A. H. Lahori, P. Wang, D. Guo, Z. Guo, S. Jiang and Z. Zhang. 2016. Effect of biochar amendment on greenhouse gas emission and bio-availability of heavy metals during sewage sludge co-composting. *J. Clean. Prod.* 135: 829-835.
11. Baghaie, A., A. H. Khoshgoftarmanesh, M. Afyuni and R. Schulin. 2011. The role of organic and inorganic fractions of cow manure and biosolids on lead sorption. *Soil Sci. Plant Nutr.* 57: 11-18.
12. Balkhair, K. S. and M. A. Ashraf. 2016. Field accumulation risks of heavy metals in soil and vegetable crop irrigated with sewage water in western region of Saudi Arabia. *Saudi J. Biol. Sci.* 23: 32-S44.
13. Banaaraghi, N., M. Hoodaji and M. Afyuni. 2010. Use of EDTA and EDDS for enhanced ZeaMays' phytoextraction of heavy metals from a contaminated soil. *J. Residuals Sci. Tech.* 7: 139-145.
14. Basta, N. T., J. A. Ryan and R. L. Chaney. 2005. Trace element chemistry in residual treated soil: Key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Qual.* 34: 49-63.
15. Cheng, S.-F., C.-Y. Huang, Y.-C. Lin, S.-C. Lin and K.-L. Chen. 2015. Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land- An in situ study and benefit assessment. *Ecotox. Environ. Safe.* 111: 72-77.
16. Dede, G. and S. Ozdemir. 2016. Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge. *J. Environ. Manage.* 166: 103-108.
17. Environmental Protection Agency. 1993. Clean water act. section 503. Vol.58. ,No. 32, USEPA. Washington, DC .
18. He, X., Y. Zhang, M. Shen, G. Zeng, M. Zhou and M. Li. 2016. Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. *Bioresour. Technol.* 218: 867-873.
19. Huang, H.-j. and X.-z. Yuan. 2016. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 200: 991-998.
20. Karami, M., M. Afyuni, Y. Rezainejad and R. Schulin. 2009. Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 83: 51-61.
21. Lee, J. and K. Sung. 2014. Effects of chelates on soil microbial properties, plant growth and heavy metal accumulation in plants. *Ecol. Eng.* 73: 386-394.
22. Lee, P.-K., B.-Y. Choi and M.-J. Kang. 2015. Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk. *Chemosphere*, 119: 1411-1421.
23. McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. p.199-224. In A.L. Page, et al. (ed.). *Methods of soil analysis*, Part 2. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
24. Mehmood, F., A. Rashid, T. Mahmood and L. Dawson. 2013. Effect of DTPA on Cd solubility in soil – Accumulation and subsequent toxicity to lettuce. *Chemosphere*, 90: 1805-1810.
25. Murphy, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphates in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27: 31-36.
26. Nelson D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 539-580. In A.L. Page, et al. (ed.). *Methods of soil analysis*, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
27. Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. p. 181-197. In A.L. Page, et al. (ed.). *Methods of soil analysis*, Part 2. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

28. Rhoades J.D. 1982. Cation exchange capacity. p. 149-157. In A.L. Page, et al. (ed.). Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
29. Sharifi, M., M. Afyuni and A.H. Khoshgofarmanesh. 2010. Effects of sewage sludge, animal manure, compost and cadmium chloride on cadmium accumulation in corn and alfalfa. *J. Residuals Sci. Tech.* 7: 219-225.
30. Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil Taxonomy, U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, , USDA, NRCS, Washington DC.
31. Solgi, E., A. Esmaili-Sari, A. Riyahi-Bakhtiari and M. Hadipour. 2012. Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran. *B. Environ. Contam. Tox.* 88: 634-638.
32. Wiszniewska, A., E. Hanus-Fajerska, E. Muszyńska and K. Ciarkowska. 2016. Natural Organic Amendments for Improved Phytoremediation of Polluted Soils: A Review of Recent Progress. *Pedosphere*, 26: 1-12.
33. Yang, Z., Z. Zhang, L. Chai, Y. Wang, Y. Liu and R. Xiao. 2016. Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *J. Hazard. Mater.* 301: 145-152.
34. Yin, H. and J. Zhu. 2016. In situ remediation of metal contaminated lake sediment using naturally occurring, calcium-rich clay mineral-based low-cost amendment. *Chem. Eng. J.* 285: 112-120.
35. Ylivainio K. 2010. Effects of iron(III)chelates on the solubility of heavy metals in calcareous soils. *Environm. Pollut.* 158: 3194-3200.
36. Yuan, H., T. Lu, Y. Wang, Y. Chen and T. Lei. 2016. Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. *Geoderma*, 267: 17-23.
37. Zhao, X.-l., B.-q. Li, J.-p. Ni and D.-t. Xie. 2016. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting. *J. Integr. Agric.* 15: 232-240.

Effect of Arak Municipal Sewage Sludge Application on Corn Cd Uptake in a Loamy Soil

P. Hoshyar and A.H. Baghaie¹

Department of Soil Science, Arak branch, Islamic Azad University, Arak, Iran;
E-mail: Phoshyar@yahoo.com

Department of Soil Science, Arak branch, Islamic Azad University, Arak, Iran;
E-mail: a-baghaie@iau-arak.ac.ir

Received: October, 2016 & Accepted: February, 2017

Abstract

Emission of heavy metals pollutants caused by human activities is one of the most important issues in today's society. The management and application of organic wastes in agricultural lands decreases environmental risks and increases utilization of these materials. A greenhouse factorial experiment was conducted to investigate the effect of Arak municipal sewage sludge on corn Cd uptake in a loamy soil, using a randomized complete block design. Treatments consisted of applying sewage sludge (0, 15 and 30 t ha⁻¹) polluted with cadmium at the rates of 0, 5, 10 and 15 mg kg⁻¹ and DTPA at the rates of 0 and 1.5 mmol kg⁻¹ soil. Sixty days after corn sowing, soil physico-chemical properties and soil and corn Cd concentrations were measured. Increasing the loading rates of sewage sludge from 0 to 30 t ha⁻¹ caused a significant increase in cation exchange capacity (3.5 units) and a significant decreasing in soil pH (0.3 units), respectively. Applying 1.5 mmol DTPA chelate in a soil treated with 15 and 30 t ha⁻¹ polluted sewage sludge (15 mg Cd) increased the plant Cd availability by 8.2% and 15 percent, respectively, and decreased phosphorous availability by 4% and 14 percent, respectively. Almost 79 % of Cd uptake changes were estimated by shoot Cd concentration. The result of this study showed that applying DTPA chelate can increase corn Cd uptake and its phytoremediation efficiency.

Keywords: Phosphorous availability, Phytoremediation, DTPA chelate

¹ Corresponding author: Department of Soil Science, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran