بررسی تجمع سرب و کادمیوم در بافت گونه‌های تره (*Allium ampeloprasum persicum*) و نعناع (*Mentha piperita*) تیمارشده با لجن فاضلاب تصفیه‌خانه شهرک قدس تهران

سهیل سبحان اردکانی[1*]، مهدی حبیبی[2]، آزیتا بهبهانی‌نیا[3]

۱- دانشیار گروه محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۳- استادیار گروه محیط‌زیست، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: s_sobhan@iauh.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۳/۱/۳۱ پذیرش نهایی: ۹٤/۹/۱۷)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی غلظت تجمع‌یافته عناصر سرب و کادمیوم در گونه‌های تره و نعناع تحت تیمار لجن دفعی تصفیه‌خانه شهرک قدس تهران انجام یافت. پس از آماده‌سازی خاک و لجن فاضلاب و تعیین برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن‌ها، تره و نعناع در گروه‌های شاهد و تیمار کشت گردیدند. سپس غلظت عناصر سرب و کادمیوم در اندام هوایی این گیاهان توسط دستگاه نشر اتمی اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج مطالعه، میانگین غلظت سرب در گروه‌های تره شاهد و تیمار و هم‌چنین نعناع شاهد و تیمار به‌ترتیب برابر با ۰/۲٦±۰/۰۸ و ۰/۵۵±۰/۱٦ mg/kg و هم‌چنین ۰/۲٦±۰/۰٦ و ۲/٤۱±۰/۷۹ mg/kg بود. به‌علاوه، میانگین غلظت کادمیوم در تیمارهای تره و نعنا (شاهد و تیمار) به‌ترتیب برابر با ۰/۰۸۳±۰/۰۰۳ و ۰/۲٦±۰/۰۵ و نیز ۰/۰۵۷±۰/۰۰۲ و ۰/۱٤±۰/۰۲ mg/kg برآورد گردید. مقایسه میانگین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در تمام تیمارها با رهنمود آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار با حد مجاز بود (p<۰/۰۵). بدین صورت که میانگین غلظت تجمع‌یافته کادمیوم در تیمارهای تره و نعناع بیش‌تر از حد مجاز برآورد شد، اما در سایر موارد، کم‌تر از حد مجاز (به‌ترتیب ۵/۰ و ۰/۱ mg/kg برای سرب و کادمیوم) بود. می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از لجن فاضلاب تأثیری در جذب سرب توسط گیاهان مورد مطالعه نداشته است اما در مورد غلظت تجمع‌یافته کادمیوم در گونه‌های تره و نعناع مقادیر جذب بیش از حد مجاز تعیین شد. لذا ضروری است در خصوص کاهش مخاطرات بهداشتی کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان کود و به‌ویژه در طولانی مدت تمهیداتی اندیشیده شود.

واژه‌های کلیدی: سرب، کادمیوم، لجن دفعی، تره، نعناع، تصفیه‌خانه شهرک قدس

مقدمه

امروزه به‌دلیل نرخ بالای رشد جمعیت و تولید هرچه بیش‌تر مواد زاید آلی از یک سو و افزایش تقاضای محصولات کشاورزی و به‌ویژه سبزیجات به‌عنوان منبع ویتامین، مواد ریزمغذی و فیبر از سوی دیگر، مصرف کودهای آلی نظیر کمپوست و لجن فاضلاب به‌دلیل غنی بودن آن‌ها از بعضی عناصر مفید برای رشد گیاه و افزایش عملکرد محصولات زراعی همچون مواد آلی، ازت، فسفر و سایر مواد مغذی مورد توجه قرار گرفته است. به‌علاوه، استفاده از لجن می‌تواند در جبران بخشی از هزینه‌های تصفیه فاضلاب مفید باشد (Wong *et al.*, 2001). مثلاً در اروپا بیش از ۵۰ درصد لجن فاضلاب تصفیه‌خانه‌های شهری به‌عنوان کود و یا به‌منظور اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی، پایداری خاک‌دانه‌ها، تهویه و رطوبت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Smith, 2000). از طرفی لجن فاضلاب معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی سمی، عناصر سنگین به‌ویژه عناصر سمی با قابلیت ذخیره یا تحرک در خاک و اندام گیاه، میکروارگانیسم‌ها و تخم انگل‌ها است که به‌طور بالقوه برای محیط‌زیست و بهداشت و سلامت شهروندان تهدید محسوب می‌شود (Tu *et al.*, 2012). به‌عنوان مثال بر اساس گزارش EPA، مصرف لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت عناصر سرب، جیوه، نیکل، سلنیوم و کادمیوم تا ۱۰۰ برابر غلظت پایه این عناصر در خاک می‌شود (بهبهانی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰). از این‌رو، استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود در کشاورزی می‌بایست با تدابیر بیشتری همراه بوده و همچنین نسبت به مطالعه رفتار محیط‌زیستی عناصر موجود در لجن نیز اقدام کرد (Doelsch *et al.*, 2006; Walter *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2007a, b; Singh and Agrawal, 2010; Tu *et al.*, 2012). در حال حاضر فقدان مدیریت اصولی بر لجن‌های دفعی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کشور موجب شده که در بیش‌تر موارد این لجن‌ها به‌صورت خام و تثبیت‌نشده به محیط راه یافته و خسارات زیادی را بر سلامت انسان و منابع محیط‌زیست از جمله آلودگی میکروبی و شیمیایی منابع آب، خاک و محصولات کشاورزی و شیوع بیماری‌های انگلی و مسمومیت‌های شیمیایی وارد نماید (فرزادکیا، ۱۳۸۱). در تهران روزانه بیش از دو میلیون مترمکعب فاضلاب تولید می‌شود که حجم بسیار قابل توجهی است. وجود زمین‌های حاصل‌خیز در اطراف شهر و بازار مصرف گسترده محصولات کشاورزی در مجاورت آن‌ها، به‌کارگیری پساب فاضلاب در امر کشاورزی را با جاذبه بسیار همراه ساخته است. اما همان‌طور که اشاره شد، ورود فلزات سنگین از طریق پساب و لجن دفعی در خاک و گیاهان می‌تواند مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی به‌دنبال داشته باشد. از این‌رو این پژوهش با هدف بررسی غلظت تجمع‌یافته عناصر سرب و کادمیوم در دو گونه گیاهی تره و نعناع تیمارشده با لجن دفعی تصفیه‌خانه شهرک قدس تهران به‌عنوان کود در سال ۱۳۹۱ انجام یافت.

مواد و روش‌ها

برای آماده‌سازی خاک مورد استفاده در این پژوهش، نمونه‌های خاک از الک با قطر منافذ ۲ میلی‌متر عبور داده شده و سپس در یخچال در دمای ٤ درجه

سلسیوس نگه‌داری شد. همچنین به‌منظور نمونه‌برداری از لجن دفعی تصفیه‌خانه، از ظروف پلی‌اتیلنی یک کیلوگرمی که با آب مقطر شسته شده بودند، استفاده شد. برای آماده‌سازی و نگه‌داری نمونه‌های لجن نیز پس از خشک کردن آن‌ها در دمای ٤٠ درجه سلسیوس به مدت ٢٤ ساعت، نسبت به همگن کردن آن‌ها از طریق کوبیدن در هاون چینی و عبور دادن نمونه‌ها از الک با قطر منافذ ۱۰۰ میلی‌متر اقدام و نمونه‌های لجن در دمای ٤ درجه سلسیوس در بطری-های پلی‌اتیلنی ذخیره شد. سپس نمونه‌ها تحت آزمون‌هایی نظیر اندازه‌گیری pH، غلظت فسفر، غلظت ازت و مواد آلی قرار گرفتند. اندازه‌گیری pH لجن با دستگاه pH متر دیجیتال Metrohm مدل ۸۲۷ و پس از تهیه رقت ۱ به ۱۰ (لجن به آب) صورت پذیرفت (Tu *et al.*, 2012).

برای اندازه‌گیری غلظت فسفر در خاک و لجن دفعی از روش هضم استفاده شد. برای این کار ۵ گرم از خاک را در یک ارلن ریخته و ۱۰۰ میلی‌لیتر بی-کربنات سدیم ۰/۵ نرمال به آن اضافه شد. محلول حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه شیکر با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه قرار گرفت و با کاغذ صافی واتمن ٤٢ صاف شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره به بالون ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری انتقال یافت و توسط اسید سولفوریک ۱ نرمال (مرک، آلمان) به حجم ۸۰ میلی-لیتر و با افزودن ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۱ درصد مولیبدات آمونیوم (مرک، آلمان) و ۰/۵ میلی‌لیتر محلول کلرید قلع ۲ درصد (مرک، آلمان) حجم نهایی محلول به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسید. در نهایت غلظت فسفر در محلول با اسپکتروفتومتر (Jenway, UK) در طول موج ٦٦٠ نانومتر خوانده شد. برای تعیین غلظت فسفر در لجن نیز از همین روش استفاده شد (Olsen *et al.*, 1954; Kalavrouziotis and Koukoulakis, 2012).

برای اندازه‌گیری غلظت ازت کل در خاک و لجن دفعی از روش کلدال استفاده شد. در این روش مقدار ۱ گرم خاک الک‌شده به بالون ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتری انتقال یافت و پس از افزودن ۱/۱ گرم مخلوط کاتالیست (سولفات پتاسیم، سولفات مس، پودر سلنیم) و ۳ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ، محلول توسط هیتر برقی تا ۳۷۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از انجام فرآیند هضم توسط اسید بوریک ۱ درصد و انجام مرحله تقطیر، در نهایت با استفاده از اسید سولفوریک ۰/۰۱ نرمال و در مجاورت معرف متیل‌رد بروموکرزول گرین نمونه‌ها تیتر شدند. به‌منظور اندازه‌گیری غلظت ازت در لجن نیز از همین روش استفاده شد (Kim *et al.*, 2007).

برای اندازه‌گیری درصد ماده آلی در خاک و لجن دفعی، مقدار ۱ گرم از نمونه خاک الک‌شده را در ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته و به‌آرامی ۱۰ میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم به آن اضافه شد. در ادامه و پس از افزودن ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ، محلول توسط هیتر به‌مدت ۲۰ دقیقه تا حداکثر ١٦٥ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از خنک‌شدن محلول، ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر به آن افزوده و نمونه با فروآمونیوم سولفات تیتر شد. با ظاهرشدن رنگ سبز لجنی در محلول، فرآیند تیتراسیون متوقف شد و حجم مصرفی فروآمونیوم سولفات به‌منظور محاسبه درصد ماده آلی نمونه ثبت گردید. برای اندازه‌گیری درصد ماده آلی در لجن نیز از همین روش استفاده شد (Tu *et al.*, 2012).

برای تعیین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در لجن دفعی، ۲/۵ گرم نمونه لجن با ۵۰ میلی‌لیتر تیزاب سلطانی به‌مدت ۲٤ ساعت در دمای اتاق هضم و محلول حاصل در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت در شرایط رفلاکس باز قرار داده شد. پس از سرد شدن، باقی‌مانده محلول در ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۱۰ درصد حل شد. سپس محلول توسط کاغذ صافی واتمن شماره ٤۲ صاف و در بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده و غلظت عناصر مدنظر توسط دستگاه نشر اتمی مدل ۷۱۰-ES (Varian, Australia) خوانده شد (Tu *et al.*, 2012). برای تعیین غلظت فلزات سنگین در خاک تیمار شاهد، پس از همگن و الک کردن نمونه‌ها، مقدار ۲ گرم از خاک در سه تکرار، به فلاسک‌های درب‌دار منتقل و به آن ۱۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ٤ نرمال اضافه شد. فلاسک‌ها به‌مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در حمام آب گرم قرار گرفت و پس از صاف کردن محلول، غلظت عناصر مورد ارزیابی با دستگاه نشر اتمی خوانده شد (Black, 1985; Soltanpour *et al.*, 1998; Paramasivam *et al.*, 2006; Kalavrouziotis and Koukoulakis, 2012).

در این مطالعه از طرح آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار استفاده شد. برای کاشت بذر و یا ریشه گیاهان نیز از گلدان‌های پلاستیکی استوانه‌ای به قطر ۲۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای آماده‌سازی خاک تیمار اصلی، خاک بعد از ۲ بار صاف‌شدن با الک به قطر منافذ ۲ میلی متر، با لجن دفعی مخلوط شد. هم‌چنین خاک تیمار شاهد نیز به نسبت ۲:۱:۱ از ماسه، کود برگی و خاک باغچه تهیه شد (Kalavrouziotis and Koukoulakis, 2012). برای کاشت گیاه تره، در ۱۸ گلدان پلاستیکی شامل ۹ گلدان اصلی (حاوی خاک تیمارشده با لجن‌دفعی) و ۹ گلدان شاهد (حاوی خاک فاقد لجن) هر کدام ۱۵ عدد بذر با خلوص ۹۹ درصد کشت داده شد. هم‌چنین به‌منظور کاشت گیاه نعناع، ریشه گیاه از مزارع سبزی‌کاری تهیه شد و به همان ترتیب بالا نسبت به اجرای آزمایش اقدام گردید (بهبهانی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰).

پس از گذشت ٤۵ روز از کشت، نمونه‌برداری از گیاهان اقدام گرفت. برای این‌کار ابتدا گیاهان توسط قیچی پلاستیکی تمیز چیده شده و پس از انتقال به ظروف پلی‌اتیلنی برای تعیین غلظت عناصر سرب و کادمیوم تجمع‌یافته در بافت آن‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند (بهبهانی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰).

برای تعیین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در نمونه‌های گیاهی مورد مطالعه، ابتدا نمونه‌ها با آب دوبار تقطیر کاملاً شسته شدند و به مدت ٤۸ ساعت در دستگاه آون قرار گرفتند. یک گرم از هر گیاه پس از انتقال به بوته چینی، به‌مدت دو ساعت در کوره الکتریکی با دمای ٤۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد تا به خاکستر تبدیل شود. خاکسترها با ۱ تا ۳ میلی‌لیتر آب مرطوب شد و روی هیتر حرارت داده شدند. پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ٦ مولار به خاکسترها، دوباره بر روی هیتر حرارت داده شدند. سپس خاکستر باقی‌مانده در ۱۰ تا ۳۰ میلی‌لیتر از اسید نیتریک ۰/۱ نرمال حل شد و با شیشه ساعت روی بوته‌ها به مدت دو ساعت پوشانده شد. پس از هم‌زدن محلول، نمونه‌ها از داخل بوته‌ها به بطری‌های پلی اتیلنی که قبلاً شسته شده بودند منتقل و غلظت عناصر

مورد ارزیابی در آن‌ها بر حسب ppm به‌وسیله دستگاه نشر اتمی خوانده شد (Horwitz, 2000; Kim *et al.*, 2007).

به‌منظور پردازش آماری داده‌ها از ویرایش ۱۸ نرم افزار SPSS استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف تعیین و سپس از آزمون‌های آنالیز واریانس یک‌طرفه (چند دامنه‌ای دانکن) برای مقایسه میانگین غلظت عناصر مورد ارزیابی بین تیمارهای اصلی و شاهد و از آزمون آماری One Sample t-Test نیز برای مقایسه میانگین غلظت عناصر مورد ارزیابی در تیمارهای اصلی و شاهد با مقادیر استاندارد استفاده شد.

یافته‌ها

نتایج مربوط به برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و لجن فاضلاب و همچنین میانگین غلظت تجمع‌یافته فلزات سنگین در خاک، لجن و نمونه‌های گیاهی به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارایه شده است.

جدول (۱)- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و لجن فاضلاب

پارامتر	واحد	خاک	لجن
pH	–	۷/٤	٦/۳
ماده آلی	%	۰/۲	۰/۳٦
فسفر کل	%	۰/٤۸	۱/۷٦
ازت کل	%	۰/۰٦	۱/۹۷

جدول (۲)- غلظت تجمع‌یافته (میانگین و انحراف معیار)* فلزات سنگین در خاک، لجن و نمونه‌های گیاهی

عنصر	نمونه (mg/kg)					
	خاک	لجن	تره اصلی	تره شاهد	نعناع اصلی	نعناع شاهد
سرب	۰/۲۲±۰/۰٤^{a}	۰/۲٦±۰/۰۷^{a}	۰/۵۵±۰/۱٦^{b}	۰/۲٦±۰/۰۸^{a}	۲/٤۱±۰/۷۹^{c}	۰/۲٦±۰/۰٦^{a}
کادمیوم	۰/۰۳±۰/۰۰۱^{a}	۰/۰٤±۰/۰۰۱^{a}	۰/۲٦±۰/۰۵^{d}	۰/۰۸۳±۰/۰۰۳^{b}	۰/۱٤±۰/۰۲^{c}	۰/۰۵۷±۰/۰۰۲^{a}

* میانگین غلظت ارایه‌شده مربوط به میانگین ۳ تکرار می‌باشد.

** حروف a، b، c و ... در هر ردیف، بیان‌گر تفاوت معنی‌دار آماری ($p<۰/۰۵$) بین میانگین غلظت تجمع‌یافته عناصر سنگین در تیمارهای مورد مطالعه بر اساس نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (آزمون دانکن) می‌باشد.

نتایج ارایه‌شده در جدول (۲) بیانگر آن است که بین میانگین غلظت عنصر سرب در نمونه‌های خاک و لجن با تیمارهای تره شاهد و نعناع شاهد تفاوت معنی‌دار آماری وجود نداشت ولی بین میانگین غلظت این عنصر در تیمارهای تره اصلی و نعناع اصلی با سایر نمونه‌ها یا تیمارها تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد ($p<۰/۰۵$). هم‌چنین بین میانگین غلظت تجمع یافته عنصر کادمیوم در نمونه‌های خاک و لجن با تیمار نعناع شاهد تفاوت معنی‌دار آماری مشاهده نشد، ولی بین میانگین غلظت این عنصر در تیمارهای تره شاهد و اصلی و نعناع اصلی با سایر نمونه‌ها یا تیمارها تفاوت معنی‌دار آماری وجود دارد ($p<۰/۰۵$).

نتایج مقایسه میانگین غلظت تجمع یافته‌عناصر در خاک، لجن، تیمارهای تره و نعناع اصلی و شاهد با رهنمود EPA (جدول ۳) بیان‌گر آن است که میانگین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در تمام تیمارها تفاوت معنی‌دار با حد مجاز دارد ($p<۰/۰۵$) و به‌جز در مورد میانگین غلظت عنصر کادمیوم در تیمارهای تره و

نعناع کشت‌شده توسط لجن فاضلاب که بیش‌تر از رهنمود EPA بود، در سایر موارد میانگین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در همه نمونه‌ها و تیمارها کم‌تر از حد مجاز برآورد گردید.

جدول (۳)- غلظت مجاز تجمع عناصر سرب و کادمیوم در خاک، لجن و بافت گیاهی (Guerra *et al.*, 2012)

نمونه	غلظت (ppm)	
	سرب	کادمیوم
خاک	۱/۰	۷/۰
لجن	۱۰۰/۰	۱/۲۵
بافت گیاه	۵/۰	۰/۱

بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه خصوصیات فیزیکی لجن فاضلاب تصفیه خانه شهرک قدس تهران بیانگر pH اسیدی لجن می‌باشد (جدول ۱) که این موضوع را می‌توان با تولید اسیدهای آلی حاصل از تخمیر مواد آلی مرتبط دانست (بهبهانی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۰). نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که میانگین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در تیمارهای اصلی تره و نعناع بیش از تیمار شاهد می‌باشد و در این رابطه بین تیمارهای اصلی و شاهد تفاوت معنی‌دار آماری ($p<۰/۰۵$) وجود داشت (جدول ۲). این موضوع بیانگر قابلیت انباشت و تحرک عناصر موجود در لجن در اندام گونه‌های گیاهی مورد مطالعه می‌باشد (Tu *et al.*, 2012). لذا به‌منظور استفاده از لجن به‌عنوان کودی ارزان قیمت و غنی از مواد مغذی در مزارع کشاورزی، می‌بایست نسبت به اعمال مدیریت اصولی از جمله تصفیه مجدد لجن دفعی در تصفیه‌خانه‌ها اقدام کرد.

نتایج نشان داد که مقایسه میانگین صرفاً میانگین غلظت عنصر کادمیوم در تیمارهای تره و نعناع اصلی بیش‌تر از رهنمود EPA می‌باشد (جدول ۳). بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که اثر لجن دفعی بر جذب عنصر سرب توسط تره و نعناع معنی‌دار نبوده است. بهبهانی‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) غلظت تجمع‌یافته عناصر سرب و کادمیوم را در گونه‌های تیمارشده با لجن دفعی بررسی کرده و به نتایج مشابهی دست یافتند. از طرفی یافته‌های چند پژوهش با نتایج این پژوهش مغایرت دارد. تقوی و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی تاثیر آبیاری با فاضلاب صنعتی بر تجمع عناصر سرب، نیکل و روی در گونه مرتعی *Hordeum morinum* عنوان کردند که میانگین غلظت تجمع‌یافته هر سه عنصر در نمونه‌ها بیش‌تر از رهنمود FAO می‌باشد. کرمی و همکاران (۱۳۸٦) طی پژوهش خود نتیجه گرفتند که استفاده از لجن فاضلاب اثری معنی‌دار بر غلظت تجمع‌یافته کادمیوم در ریشه و ساقه و سرب در دانه گندم دارد. رحیمی آلاشتی و همکاران (۱۳۹۰الف) به این نتیجه رسیدند که مصرف ٤٠ تن لجن فاضلاب در هکتار برای مدت ۳ سال، غلظت تجمع‌یافته عناصر سرب و کادمیوم در ریشه و اندام هوایی کاهو و تربچه را به‌طور قابل توجه افزایش می‌دهد. از طرفی نتایج این پژوهش نشان داد که اثر لجن دفعی بر جذب عنصر کادمیوم در گیاهان تره و نعناع معنی‌دار می‌باشد، که با یافته‌های کرمی و همکاران (۱۳۸٦) و بهبهانی‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد.

آنتولین و همکاران (۲۰۰۵) با ارزیابی ویژگی‌های رویشی گیاه جو در خاک تیمارشده با لجن فاضلاب، نتیجه گرفتند که در صورت استفاده طولانی‌مدت از

لجن فاضلاب به‌عنوان کود، تجمع فلزات سنگین در دانه جو قابل ملاحظه می‌باشد. داتا و یانگ (۲۰۰۵) با بررسی تجمع برخی فلزات سنگین در گیاه اسفناج کشت‌شده در خاک تحت تیمار طولانی‌مدت با لجن فاضلاب، نتیجه گرفتند که افزایش مواد آلی و pH خاک با کاهش تحرک‌پذیری عناصر در خاک، باعث کاهش مخاطره برای مصرف‌کنندگان می‌شود. گریدو و همکاران (۲۰۰۵) نتیجه گرفتند که میانگین غلظت تجمع‌یافته عناصر مس، نیکل، روی، کادمیوم و کروم در دانه‌های باقلا کشت‌شده در خاک تحت تیمار لجن فاضلاب فاقد مخاطرات محیط‌زیستی می‌باشد. پراماسیوم و همکاران (۲۰۰۶) عنوان کردند که نرخ جذب فلزات سنگین توسط اندام‌های گیاهی سورگوم سودانی با افزایش کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان بهبوددهنده خاک رابطه مستقیم دارد. کاسادو-ولا و همکاران (۲۰۰۷) نتیجه گرفتند که میوه فلفل تحت تیمار لجن فاضلاب در شرایط گلخانه در مقایسه با محیط مزرعه، ۶۰ درصد رشد بیش‌تر داشته است و از طرفی جذب عنصر سرب در میوه فلفل تحت تیمار لجن بیش‌تر از سایر عناصر می‌باشد. کیم و همکاران (۲۰۰۷) نتیجه گرفتند که غلظت تجمع‌یافته مولیبدن در دانه‌های سویا تحت تیمار لجن فاضلاب، ۵ برابر تیمار شاهد می‌باشد. کرمی و همکاران (۱۳۸۷) عنوان کردند که لجن فاضلاب بر غلظت تجمع‌یافته روی و مس در اندام هوایی و دانه گندم اثر معنی‌دار دارد. مرادمند و همکاران (۲۰۰۹) نتیجه گرفتند که آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهرکرد تأثیری بر تجمع عنصر نیکل در خاک و اندام فلفل سبز ندارد. رحیمی آلاشتی و همکاران (۱۳۹۰ب) نتیجه گرفتند که استفاده از لجن فاضلاب در طی دوره زمانی ۳ ساله، بر غلظت تجمع‌یافته سرب و کروم در ریشه و اندام هوایی چمن گندمی رونده و شبدر برسیم تأثیر معنی‌دار دارد. کلاوروزیوتیس و کوکولاکیس (۲۰۱۲) با بررسی فاکتور تجمع (Concentration Factor) فلزات سنگین در گیاه کلم کشت‌شده در خاک تحت تیمار فاضلاب شهری عنوان کردند که فاکتور تجمع برای عناصر روی، کبالت و نیکل در ساقه گیاه به‌ترتیب برابر با ۲/۹۶، ۰/۸۵ و ۰/۹۲ و برای عنصر سرب در برگ کلم برابر با ۱۱/۷۸ می‌باشد. نجفی و همکاران (۱۳۹۰) نتیجه گرفتند که با کاربرد لجن فاضلاب، نرخ جذب و غلظت تجمع‌یافته عناصر آهن، منگنز، روی، سرب و مس در بخش هوایی آفتابگردان افزایش می‌یابد. تو و همکاران (۲۰۱۲) عنوان کردند که غلظت عناصر مس، روی، کروم و نیکل در لجن فاضلاب کم‌تر از استاندارد چین می‌باشد و لذا استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود در کشاورزی خطری را متوجه مصرف‌کنندگان محصولات نمی‌کند. حسین‌پور و قاجارسپانلو (۱۳۹۲) با بررسی اثرات تلفیقی لجن فاضلاب شهری و کودهای شیمیایی بر غلظت عناصر کم مصرف در گیاه تربچه نتیجه گرفتند که بیشینه میانگین غلظت تجمع‌یافته عناصر آهن و منگنز در ریشه و عنصر مس در اندام هوایی تربچه مربوط به کاربرد متوالی لجن و کود شیمیایی می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان کود در کشاورزی و یا عامل بهبوددهنده خاک به‌ویژه در طولانی‌مدت، می‌تواند بر حسب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و لجن، باعث تجمع فلزات سنگین در خاک و به تبع آن بافت گیاهان شده و از طرفی با افزایش تحرک‌پذیری عناصر، اثرات بهداشتی نامطلوب برای مصرف‌کنندگان

به‌دنبال داشته باشد. لذا می‌بایست در خصوص کاهش مخاطرات بهداشتی کاربرد طولانی‌مدت لجن فاضلاب به‌عنوان کود از طریق اعمال تمهیداتی مانند تدوین استانداردهای محیط‌زیستی، اجرای برنامه پایش و کنترل لجن در تصفیه‌خانه‌ها و استفاده از لجن دفعی تصفیه‌خانه ها برای احیای اراضی بایر و یا استفاده در جنگل‌کاری اطراف شهرها اقدام کرد.

منابع

- بهبهانی‌نیا، آزیتا؛ میرباقری، سیداحمد و آزادی، امین (۱۳۹۰). تاثیر استفاده از پساب و لجن در آبیاری گیاهان بر میزان غلظت فلزات سنگین گیاهان. فصلنامه گیاه و زیست بوم، شماره ۲۸، صفحات: ۷۰-۵۹.
- حسین پور، رحیمه و قاجار سپانلو، مهدی (۱۳۹۲). اثرات تلفیقی لجن فاضلاب شهری و کودهای شیمیایی بر غلظت عناصر کم مصرف در خاک و تربچه (*Raphanus sativus*). مجله پژوهشهای خاک (علوم خاک و آب)، دوره ۲۷، شماره ۳، صفحات: ۳۸۵-۳۷۳.
- رحیمی‌آلاشتی، سپیده؛ بهمنیار، محمدعلی و قاجارسپانلو، مهدی (۱۳۹۰الف). نقش لجن فاضلاب بر میزان pH، O.C و EC خاک و تجمع سرب و کادمیم در خاک و گیاه کاهو و تربچه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۱۸، شماره ۳، صفحات: ۱۴۷-۱۳۳.
- رحیمی‌آلاشتی، سپیده؛ بهمنیار، محمدعلی و قاجارسپانلو، مهدی (۱۳۹۰ب). بررسی اثرات باقی‌مانده و تجمعی لجن فاضلاب بر غلظت سرب و کروم در اندام‌های گیاهی چمن گندمی رونده (*Agropyrum repen L.*) و شبدر برسی (*Trifolum alexandrium L.*). مجله علمی پژوهشی مرتع، سال پنجم، شماره ۱، صفحات: ۶۹-۵۸.
- فرزادکیا، مهدی (۱۳۸۱). بررسی وضعیت تثبیت و قابلیت استفاده مجدد لجن در چهار تصفیه خانه کوچک فاضلاب شهر تهران. مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان، شماره ۲۴، صفحات: ۶۲-۵۵.
- کرمی، مهین؛ رضایی‌نژاد، یحیی؛ افیونی، مجید و شریعتمداری، حسین (۱۳۸۶). اثرات تجمعی و باقی‌مانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سرب و کادمیم در خاک و گیاه گندم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)، دوره ۱۱، شماره ۱، صفحات: ۹۵-۷۹.
- کرمی، مهین؛ افیونی، مجید؛ رضایی‌نژاد، یحیی و خوشگفتارمنش، امیرحسین (۱۳۸۷). اثرات تجمعی و باقی‌مانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت روی و مس در خاک و گیاه گندم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)، شماره ۴۶، صفحات: ۶۵۴-۶۳۹.

- نجفی، نصرت اله؛ مردمی، سنیه و اوستان، شاهین (۱۳۹۰). اثر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر غلظت فلزات سنگین در ریشه و بخش هوایی آفتابگردان در یک خاک شن لومی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)، شماره ۵۸، صفحات: ۱۵۷-۱۳۹.
- Antolín, M.C., Pascual, I., García, C., Polo, A. and Sánchez-Díaz, M. (2005). Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. Field Crops Research, 94: 224-237.
- Behbahaninia, A., Mirbagheri, S.A. and Azadi, A. (2011). The Impact of Irrigation with Effluent and Sewage Sludge on Heavy Metal Content in Plants, Plant and Ecosystem, 7(28): 59-70. [in Persian]
- Black, C.A. (1985). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monograph. 9. ASA, Medison, WI.
- Cai, Q.Y., Mo, C.H., Wu, Q.T., Zeng, Q.Y. and Katsoyiannis, A. (2007a). Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China. Chemosphere, 68(9): 1751-1762.
- Cai, Q.Y., Mo, C.H., Wu, Q.T., Zeng, Q.Y. and Katsoyiannis, A. (2007b). Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludgecomposts. Journal of Hazardous Materials, 147(3): 1063-1072.
- Casado-Vela, J., Sellés, S., Díaz-Crespo, D., Navarro-Pedreño, J., Mataix-Beneyto, J., and Gómez, I. (2007). Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*Capsicum annuum* var. *annuum*) grown under two exploitation regimes. Waste Management, 27: 1509-1518.
- Datta, S.P. and Young, S.D. (2005). Predicting metal uptake and risk to the human food chain from leaf vegetables grown on soils amended by long-term application of sewage sludge. Water, Air, & Soil Pollution, 163: 119-136.
- Doelsch, E., Deroche, B. and Van de Kerchove, V. (2006). Impact of sewage sludge spreading on heavy metal speciation in tropical soils (Reunion, Indian Ocean). Chemosphere, 65(2): 286-293.
- Hosseinpour, R. and Ghajar Sepanlou, M. (2013). Effects Of Integrated Municipal Sewage Sludge With Chemical Fertilizer On Micronutrient Concentration In Soil And Radish (*Raphanus Sativus*), IRANIAN JOURNAL OF SOIL RESEARCH (FORMERLY SOIL AND WATER SCIENCES), 27(3): 385-373. [in Persian]
- Garrido, S., Del Campo, G.M., Esteller, M.V., Vaca, R. and Lugo, J. (2005). Heavy metals in soil treated with sewage sludge composting, their effect on yield and uptake of broad bean seeds (*Vicia faba* L.). Water, Air, & Soil Pollution, 166: 303-319.
- Guerra, F., Trevizam, A.R., Muraoka, T., Chaves Marcante, N. and Canniatti-Brazaca, S.G. (2012). Heavy metals in vegetables and potential risk for human health. Scientia Agricola, 69(1): 54-60.
- Farzadkia, M. (2002). Investigation Of Sludge Stabilization And Reuse In Four Small Sewage Treatment Plants Of Tehran City, Scientific Journal Of Hamadan University Of Medical Sciences And Health Services, 9(2): 55-62. [in Persian]
- Horwitz, W. (2000). Official methods of Analysis of AOAC, In: Metals and other elements, 17nd ed, AOAC International, 22-27.
- Kalavrouziotis, I.K. and Koukoulakis P.H. (2012). Soil pollution under the effect of treated municipal wastewater. Environmental Monitoring and Assessment, 184: 6297-6305.
- Kim, B., McBride, M.B., Richards, B.K. and Steenhuis, T.S. (2007). The long-term effect of sludge application on Cu, Zn, and Mo behavior in soils and accumulation in soybean seeds. Plant and Soil, 299: 227-236.

- Karami, M., Rezainejad, Y., Afyuni, M. and Shariatmadari, H. (2007). Cumulative and Residual Effects of Sewage Sludge on Lead and Cadmium Concentration in Soil and Wheat, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources - Isfahan University of Technology, 11(1): 79-95. [in Persian]
- Karami, M., Rezainejad, Y., Afyuni, M. and Shariatmadari, H. (2007). Cumulative and Residual Effects of Sewage Sludge on Zinc and copper Concentration in Soil and Wheat, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources - Isfahan University of Technology, 12(46): 654-639. [in Persian]
- Najafi, N., Mardomi, S. and Oustan, SH. (2012). Influence of Waterlogging, Sewage Sludge and Manure on The Heavy Metals Concentrations in Roots and Shoots of Sunflower in a loamy SAnd Soil, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources - Isfahan University of Technology, 15(58): 139-157. [in Persian]
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A. (1954). Estimation of available, phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular Number 939, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Paramasivam, S., Sajwan, K.S. and Alva, A.K. (2006). Incinerated sewage sludge products as amendments for agricultural soils: Leaching and plant uptake of trace elements. Water, Air, & Soil Pollution, 171: 273-290.
- Rahimi Alashty, S., Bahmanyar, M.A. and Ghajar Sepanlou, M. (2011). The effects of sewage sludge application on pH, EC, O.C, Pb and Cd in soil and lettuce and radish plants, Journal of Water and Soil Conservation, 18(3): 147-133. [in Persian]
- Rahimi Alashty, S., Bahmanyar, M.A. and Ghajar Sepanlou, M. (2011). Effect of accumulated and residual sewage sludge on concentration of lead, chromium, nickel and cadmium in plant parts of creeping wheatgrass (*Agropyrum repen L.*) And berseem (*Trifolum alexandrium L.*), Rangeland, 5(1): 69-58. [in Persian]
- Singh, R.P. and Agrawal, M. (2010). Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop: Metal uptake by plant. Ecological Engineering, 36(7): 969-972.
- Smith, S.R. (2000). Are controls on organic contaminants necessary to protect the environment when sewage sludge is used in agriculture?. Progress in Environmental Science, 2(2): 129-146.
- Soltanpour, P.N., Johnson, C.W., Workman, S.M., Jones, J.B. and Miller, R.O. (1998). Advances in ICP emission and ICP mass spectroscopy Adv. Agronomy, 64: 28-113.
- Tu, J., Zhao, Q., Wei, L. and Yang, Q. (2012). Heavy metal concentration and speciation of seven representative municipal sludges from wastewater treatment plants in Northeast China. Environmental Monitoring and Assessment, 184: 1645-1655.
- Walter, I., Mart Nez, F. and Cala, V. (2006). Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. Environmental Pollution, 139(3): 507-514.
- Wong, J.W., Li, K., Fang, M. and Su, D.C. (2001). Toxicity evaluation of sewage sludges in Hong Kong. Environment International, 27(5): 373-380.