

بررسی نسبی اثرات لجن فاضلاب شهری بر غلظت فلزات سنگین و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک کاهو

نسترن سهرابی، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی¹، محمد فیضیان و عباس ملکی

دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان؛

Sohrabinastaran7@gmail.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان؛ alinejadian@yahoo.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان؛ m_feizian@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان؛ dr.maleki38@yahoo.com

دریافت: 95/7/11 و پذیرش: 95/12/2

چکیده

استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان یک کود ارزان‌قیمت و غنی از عناصر غذایی در مناطقی از ایران رواج یافته است. اما کاربرد لجن فاضلاب در مقادیر زیاد می‌تواند انباشته شدن فلزات سنگین در گیاه را به دنبال داشته باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر لجن فاضلاب شهری بر غلظت فلزات سنگین و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه کاهو بود. این پژوهش در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان با پنج سطح لجن فاضلاب شامل تیمار شاهد (بدون لجن)، 25، 50، 75 و 100 تن در هکتار، در چهار تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا گردید. نتایج تجزیه گیاه نشان داد که کاربرد لجن باعث افزایش معنی‌دار غلظت فلزات آهن، مس، کادمیم و سرب در اندام هوایی، ریشه و مغز ساقه کاهو گردید. بیشترین غلظت آهن (به میزان 6/16 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار 100 تن در هکتار در اندام هوایی، بیشترین غلظت مس و سرب (به ترتیب به میزان 1/49 و 1/20 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار 100 تن در هکتار در ریشه کاهو و بیشترین غلظت کادمیم (به میزان 0/43 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار 100 تن در هکتار مغز ساقه کاهو مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی و ریشه، ارتفاع گیاه، طول ریشه و شاخص سطح برگ کاهو گردید. اما بر شاخص کلروفیل برگ تأثیر معناداری نداشت. بیشترین مقدار برای صفات ذکر شده در تیمار 100 تن در هکتار لجن فاضلاب به دست آمد. در کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی توجه به غلظت فلزات سنگین سمی از جنبه‌ی مخاطرات آن شایان توجه است چرا که استفاده مکرر و درازمدت این مواد به‌ویژه در مقادیر زیاد می‌تواند آلودگی خاک و انتقال این عناصر به زنجیره‌ی غذایی انسان و حیوان را در پی داشته باشد. بنابراین با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر در زمینه‌ی فلزات سنگین، توصیه می‌گردد که از لجن فاضلاب برای محصولات خوراکی استفاده نگردد. از طرف دیگر قبل از هرگونه توصیه‌ای جهت استفاده از لجن فاضلاب، حتماً لازم است برای هر منطقه با توجه به ترکیب لجن فاضلاب، قبل از استفاده و توصیه برای کاربرد در اراضی کشاورزی، ابتدا بار میکروبی آن مورد بررسی قرار بگیرد و با توجه به شرایط منطقه، نوع گیاه و خصوصیات خاک منطقه، توصیه مناسب تدوین شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، بار میکروبی، عملکرد، آهن، مس، سرب، کادمیم

¹ نویسنده مسئول: آدرس: خرم‌آباد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان - گروه علوم و مهندسی خاک.

مقدمه

لجن فاضلاب، مواد جامدی است که در روش‌های مختلف تصفیه به‌منظور حذف آلاینده‌های معلق و محلول از فاضلاب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به دست می‌آید. در سال‌های اخیر کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های کشاورزی، از یک‌طرف به‌عنوان یک کود آلی و از طرف دیگر به‌عنوان یک روش نسبتاً ایمن برای دفن پسماند حاصل از تصفیه فاضلاب‌های شهری مورد توجه قرار گرفته است (بولان و دورایسامی، 2003) و ارزش کودی آن در تحقیق‌های متعدد در کشورهای مختلف نشان داده شده است (انگرس و مهوئیس، 1989 و اسمیت، 1992).

کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند در خاک‌های سنگین دانه‌بندی، تخلخل، نفوذپذیری و تهویه و در خاک‌های شنی نگهداری آب و مواد غذایی را بهبود بخشد. لجن فاضلاب به‌عنوان یک پسماند آلی می‌تواند منبع خوبی از عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف باشد (تسادیلاس و همکاران، 1995). استفاده از لجن فاضلاب به‌خصوص در کشورهایی با آب و هوای خشک مثل ایران به دلیل کمبود مواد آلی خاک بیشتر مورد توجه می‌باشد. پژوهشگران بسیاری گزارش کرده‌اند که کودهای آلی به‌طور مؤثری می‌تواند سبب افزایش رشد محصولات شود و وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد (تسادیلاس و همکاران، 1995؛ دلگن و همکاران 2007 و وانگ و همکاران، 2008). برخلاف جنبه‌های مفید لجن فاضلاب به‌عنوان کود آلی، ممکن است به دلیل وجود مقادیر نسبتاً زیاد فلزات سنگین کاربرد آن به‌ویژه در مقادیر زیاد در کشاورزی مشکل‌ساز باشد و باعث انباشته شدن بیش از حد فلزات سنگین خاک گردد.

برخی از این فلزات مانند روی، منگنز، آهن و مس برای جانداران لازم هستند که از عناصر کم‌مصرف ضروری برای تغذیه و رشد گیاهان، حیوانات و انسان محسوب می‌شوند و وجود غلظت‌های مناسبی از آن‌ها در بافت‌های گیاهان نه تنها برای رشد و عملکرد مطلوب گیاهان بلکه در زنجیره غذایی برای رشد و سلامتی حیوانات و انسان ضروری هستند (بردانیر و آتکینز، 1998؛ هاولین و همکاران، 2004؛ فاگریا و همکاران، 2002 و بولان و دورایسامی، 2003). برخی دیگر از فلزات سنگین همچون کادمیوم و سرب برای جانداران ضروری نیستند. هر دو گروه از فلزات سنگین (ضروری و غیرضروری برای جانداران) در غلظت‌های زیاد (بیشتر از غلظت آستانه) برای گیاهان، جانوران و انسان سمی هستند (بولان و دورایسامی، 2003؛ آلووی، 1995 و آپتروس، 2010).

چنانچه گیاه در معرض سطوح بالایی از فلزات سنگین قرار گیرد، ممکن است

دچار محدودیت‌های فیزیولوژیک شود و بازدهی آن تحت تأثیر منفی قرار گیرد (حسینی‌خانمیری و همکاران، 1390). کلینگ و همکاران (1977) لجن فاضلاب را در مقادیر صفر، 3/75، 7/5، 15، 30 و 60 تن در هکتار در دو خاک لوم شنی و لوم سیلتی به کار بردند و رشد گیاه چاودار را بررسی کردند، نتایج نشان داد که عملکرد گیاه بعد از کاربرد لجن به‌طور مشخص افزایش یافت و در برخی موارد مقادیر 30 و 60 تن در هکتار لجن فاضلاب، عملکرد محصول را به‌خاطر مقادیر بالای فلزات موجود در لجن کاهش داد. واتقی و همکاران (1382) با بررسی تأثیر لجن فاضلاب بر قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف و فلزات سنگین در خاک‌های با pH متفاوت دریافتند که لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار مقدار قابل استخراج آهن، روی، مس، سرب، کادمیوم و نیکل شده که این افزایش متناسب با افزایش مقدار لجن بوده است. آن‌ها همچنین دریافتند که افزودن لجن فاضلاب به خاک باعث افزایش رشد گیاه و مقدار جذب فلزات در محصول ذرت گردیده که این افزایش با کاهش pH متناسب بوده است. کرمی و همکاران (1386) اثر تجمعی و باقیمانده لجن فاضلاب شهری اصفهان را بر غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه گندم بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که کاربرد لجن در مقادیر زیاد و با فواصل زمانی کم، موجب آلودگی خاک‌های تحت تیمار شد و غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه را افزایش داده است. لاتار و همکاران (2014) در پژوهشی به‌منظور بررسی اثرات مستقیم و باقیمانده لجن فاضلاب، تیمارهای صفر، 10، 20، 30 و 40 تن در هکتار لجن فاضلاب بر عملکرد، غلظت فلزات سنگین و حاصلخیزی خاک تحت سیستم کشت برنج-گندم بررسی نمودند، نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه شد.

گونداک (2009) با بررسی میزان کادمیوم در ذرت و خاک پس از مصرف لجن فاضلاب در آزمایشی گلدانی دریافتند که لجن فاضلاب نسبت به کودهای معدنی نه تنها باعث افزایش کادمیم ذرت نگردید بلکه عملکرد بیشتری را موجب شد. سعادت و همکاران (1391) به‌منظور بررسی اثر لجن فاضلاب بر برخی خصوصیات خاک، عملکرد و غلظت سرب و کادمیوم ریشه و اندام هوایی ذرت گزارش کردند کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار عملکرد، غلظت نیتروژن، فسفر و سدیم در ذرت شده است. آن‌ها همچنین دریافتند افزودن لجن موجب افزایش معنی‌دار در سطح یک درصد غلظت سرب و

کادمیوم در ریشه ذرت گردید. زارع و همکاران (1393) نیز در پژوهشی به منظور بررسی اثر لجن فاضلاب بر برخی خصوصیات شیمیایی و عناصر غذایی ضروری خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی نهال زیتون نشان دادند که اثر لجن فاضلاب بر افزایش تعداد شاخه‌های جدید، طول گیاه، وزن خشک ریشه و تعداد برگ‌های جدید گیاه زیتون معنی‌دار شد.

با گذشت چندین سال از شروع به کار تصفیه‌خانه فاضلاب خرم آباد استان لرستان، لجن فاضلاب فراوانی تولید گردیده که علیرغم رایگان بودن لجن فاضلاب تولیدی این تصفیه‌خانه، کشاورزان منطقه برای استفاده از آن رغبت نشان نمی‌دهند و لجن فاضلاب حاصل در محوطه تصفیه‌خانه انباشته شده است. بنابراین، به نظر رسید که قبل از انجام هرگونه توصیه به کشاورزان منطقه برای استفاده از این ماده، تأثیر آن بر رشد گیاه کاهو و ترکیب شیمیایی آن به‌ویژه از نظر غلظت‌های فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به نقش گیاه کاهو در رژیم غذایی مردم ایران و نیاز به مطالعه بیشتر کاربرد لجن فاضلاب بر روی سبزی‌هایی که مصرف تازه‌خوری دارند و عدم اجرای تحقیقات ضروری در این زمینه در منطقه خرم‌آباد، بنابراین این پژوهش با هدف اثرات لجن فاضلاب شهری بر غلظت فلزات سنگین در خاک و گیاه و برخی خصوصیات مورفولوژیک کاهو صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال 1395-1394 در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا گردید. خاک مورد آزمایش از عمق صفر تا 30 سانتی‌متری، از مزرعه‌ای در نزدیکی گلخانه تحقیقاتی دانشکده تهیه و به منظور یکنواختی از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد؛ سپس در معرض هوا خشک گردید. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار لجن فاضلاب شهری شامل سطوح 0، 0/93، 1/85، 2/8 و 3/7 درصد وزنی لجن در خاک (معادل صفر (S₀), 25 (S₂₅), 50 (S₅₀), 75 (S₇₅) و 100 (S₁₀₀) تن در هکتار) و در چهار تکرار اجرا گردید. برخی خصوصیات اولیه خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (دی، 1965)، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه دست نخورده (بلک و هارتگ، 1986a)، کربن آلی به روش واکلی و بلاک (الیسون، 1965)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH خاک در سوسپانسیون یک به پنج خاک به آب به ترتیب توسط دستگاه هدایت‌سنج و دستگاه pH متر (رودس، 1996)، فسفر به روش اولسن (اولسن و سامرز، 1982)، نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کج‌جدال (وسترمن، 1990)، کلسیم

و منیزیم محلول به روش کمپلکسومتری (لانیون و هیلد، 1982) و پتاسیم قابل دسترس و سدیم محلول به روش شعله‌سنجی (فلیم فتومتری) اندازه‌گیری شد (کاندش و همکاران، 1982). غلظت قابل جذب فلزات سنگین با استفاده از عصاره‌گیر DTPA و توسط دستگاه جذب اتمی مدل plus GBC 932 قرائت گردید (لیندزی و نورول، 1978). لجن مورد استفاده (از نوع هضم شده به روش بی‌هوازی)، از تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهری شهرستان خرم‌آباد تهیه و پس از هوا خشک کردن از الک چهار میلی‌متری عبور داده شد. برخی خصوصیات اولیه آن شامل pH و هدایت الکتریکی در عصاره یک به پنج (لجن به آب)، کربن آلی، نیتروژن کل، غلظت عناصر پرمصرف (فسفر و پتاسیم قابل جذب) و غلظت قابل جذب برخی فلزات سنگین لجن (آهن، مس، کادمیم و سرب قابل جذب) با روش‌های ذکر شده برای نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش و لجن فاضلاب مورد استفاده در جدول یک آورده شده است.

گلدان‌های پلاستیکی با ابعاد تقریبی قطر 14 و ارتفاع 20 سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت و براساس جرم مخصوص ظاهری مزرعه با خاک و لجن پر شدند. در هر گلدان نشای کاهو (*Lactuca sativa crispum*) به تعداد سه عدد کشت و پس از گذشت 20 روز از کاشت نشاها بوته‌ها تنک شدند تا فضای کافی برای رشد گیاه وجود داشته باشد، به گونه‌ای که در هر گلدان یک بوته نگه‌داشته شد. در طول دوره‌ی رشد شاخص کلروفیل برگ‌ها با دستگاه کلروفیل‌سنج مدل SPAD-502 مارک MINOLTA و شاخص سطح برگ از نسبت سطح برگ هر بوته (LA) به سطح خاک گلدان که توسط بوته اشغال شده بود (GA) طبق رابطه‌ی زیر محاسبه شد (مجیدیان و غدیری، 1381).

$$LAI = \frac{LA}{GA}$$

که در این رابطه، LA= سطح برگ‌ها در هر بوته و GA= سطح خاک گلدان که توسط بوته اشغال شده می‌باشد.

در مدت رشد گیاهان در گلخانه، عملیات آبیاری تا رساندن خاک گلدان به رطوبت ظرفیت زراعی و وجین علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد. لازم به ذکر است که در طول کشت از هیچ‌گونه کود شیمیایی، علف‌کش، سم و حشره‌کش استفاده نشد. در انتهای فصل رشد نمونه‌های ریشه و اندام هوایی از محل طوقه

سنگین و عناصر کم‌مصرف در اندام هوایی و ریشه و مغز ساقه کاهو از روش هضم با اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه 30 درصد استفاده گردید (بتان و کیس، 1990). سپس غلظت عناصر مذکور در کاهو توسط دستگاه جذب اتمی مدل 932plus GBC به روش شعله در طول موج خاص هر عنصر قرائت شد. در پایان آزمایش، تأثیر استفاده از لجن فاضلاب بر صفات مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SAS (9.1) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و جهت مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید.

جداشده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها در ابتدا با آب معمولی تمیز و سپس با محلول رقیق اسید کلریدریک 0/005 درصد شسته شدند و بعد از شستن مجدد آن‌ها با آب معمولی، در نهایت چندین بار با آب مقطر شستشو داده شدند. پارامترهای رویشی گیاه شامل ارتفاع گیاه و طول ریشه در ابتدا اندازه‌گیری شدند. پس از توزین نمونه‌های گیاهی و تعیین عملکرد تر آن‌ها، نمونه‌ها در پاکت کاغذی و به مدت 72 ساعت در دمای 75 درجه سلسیوس در آون تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند و پس از این مدت، به منظور تعیین وزن خشک اندام هوایی و ریشه توزین گردیدند. برای تعیین غلظت فلزات

جدول 1- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و لجن مورد آزمایش

ویژگی	واحد	خاک	لجن فاضلاب
بافت	-	لوم رسی	-
pH	-	7/48	6/93
قابلیت هدایت الکتریکی	dS/m	0/7	12/14
کربن آلی	%	0/428	15/60
جرم مخصوص ظاهری	g/cm ³	1/3	0/44
نیترژن کل	%	0/041	1/028
پتاسیم قابل جذب	mg/kg	158	493
فسفر قابل جذب	mg/kg	8/7	295/4
منیزیم محلول	meq/lit	1/91	0/89
کلسیم محلول	meq/lit	5/23	2/69
سدیم محلول	meq/lit	0/92	8/97
آهن قابل جذب	mg/kg	3/67	301/89
روی قابل جذب	mg/kg	0/59	69/34
مس قابل جذب	mg/kg	0/88	21/36
سرب قابل جذب	mg/kg	0/71	10/38
کادمیم قابل جذب	mg/kg	0/39	1/63

جدول 2- تجزیه واریانس (کمیت F) اثر لجن فاضلاب بر غلظت آهن و مس کاهو

منبع تغییرات	درجه آزادی	آهن (Fe)		مس (Cu)	
		ریشه	مغز ساقه	ریشه	مغز ساقه
تیمار	4	102/88*	13/41*	261/36*	46/47*
تکرار	3	1/42 ^{ns}	1/33 ^{ns}	3/05 ^{ns}	0/31 ^{ns}
خطا	12	-	-	-	-
ضریب تغییرات	-	6/68	14/07	6/36	10/89

ns و * به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

جدول 3- تجزیه واریانس (کمیت F) اثر لجن فاضلاب بر غلظت سرب و کادمیم کاهو

منبع تغییرات	درجه آزادی	سرب (Pb)			کادمیم (Cd)		
		اندام هوایی	ریشه	مغز ساقه	اندام هوایی	ریشه	مغز ساقه
تیمار	4	110/51 [*]	29/46 [*]	114/49 [*]	108/39 [*]	19/52 [*]	251/16 [*]
تکرار	3	1/18 ^{ns}	1/68 ^{ns}	0/46 ^{ns}	0/82 ^{ns}	0/75 ^{ns}	1/74 ^{ns}
خطا	12	-	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات	-	16/78	20/33	9/38	14/92	15/44	13/16

ns و * به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

جدول 4- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن و مس (میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر) در کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف لجن فاضلاب

تیمار	آهن (Fe)		مس (Cu)	
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
S ₀	2/98 ^c	2/59 ^c	0/17 ^d	0/23 ^c
S ₂₅	3/19 ^c	2/81 ^c	0/16 ^d	0/27 ^c
S ₅₀	3/13 ^c	4/05 ^b	0/22 ^c	0/68 ^b
S ₇₅	4/27 ^b	4/64 ^b	0/44 ^b	0/79 ^b
S ₁₀₀	6/16 ^a	5/74 ^a	0/48 ^a	1/49 ^a

در هر ستون، میانگین‌هایی دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

S₀: شاهد، S₂₅: 25 تن در هکتار، S₅₀: 50 تن در هکتار، S₇₅: 75 تن در هکتار، S₁₀₀: 100 تن در هکتار لجن فاضلاب

جدول 5- مقایسه میانگین‌های غلظت سرب و کادمیم (میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تر) در کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف لجن فاضلاب

تیمار	سرب (Pb)		کادمیم (Cd)	
	اندام هوایی	ریشه	اندام هوایی	ریشه
S ₀	0/06 ^d	0/27 ^c	0/01 ^d	0/08 ^c
S ₂₅	0/08 ^{cd}	0/37 ^c	0/04 ^c	0/10 ^c
S ₅₀	0/11 ^c	0/70 ^b	0/06 ^c	0/14 ^b
S ₇₅	0/19 ^b	0/88 ^b	0/12 ^b	0/15 ^b
S ₁₀₀	0/44 ^a	1/20 ^a	0/19 ^a	0/20 ^a

در هر ستون، میانگین‌هایی دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

S₀: شاهد، S₂₅: 25 تن در هکتار، S₅₀: 50 تن در هکتار، S₇₅: 75 تن در هکتار، S₁₀₀: 100 تن در هکتار لجن فاضلاب

نتایج

اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین گیاه

سطوح مختلف لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاه کاهو تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول 2 تا 5).

آهن: نتایج تجزیه واریانس اثر لجن فاضلاب بر غلظت آهن (جدول 2) نشان داد که اثر لجن فاضلاب بر غلظت آهن اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 4 نیز نشان داد که با افزایش لجن به خاک غلظت آهن در همه‌ی

تیمارهای دریافت‌کننده‌ی لجن نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که غلظت آهن اندام هوایی از 2/98 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به 6/16 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار 100 تن در هکتار افزایش یافت (جدول 4).

غلظت آهن ریشه کاهو به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب قرار گرفت (جدول 2). با

فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت سرب ریشه کاهو در سطح احتمال پنج درصد شد (جدول 3). جدول 5 نیز نشان می‌دهد که کاربرد لجن فاضلاب در تمام تیمارها (به‌استثنای تیمار 25 تن در هکتار) سبب افزایش معنی‌دار غلظت سرب ریشه کاهو شد. به‌گونه‌ای که غلظت سرب از 0/27 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به 1/20 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار 100 تن در هکتار افزایش یافت.

نتایج جدول 5 نشان می‌دهد که سطوح مختلف لجن فاضلاب در خاک سبب افزایش معنی‌دار غلظت سرب در مغز ساقه کاهو گردید. کمترین و بیشترین غلظت سرب به ترتیب 0/17 و 0/66 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد و 100 تن در هکتار مشاهده شد. غلظت سرب در اندام هوایی کمتر از ریشه و در ریشه بیشتر از مغز ساقه به دست آمد.

کادمیم: نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثر تیمارهای لجن فاضلاب، بر غلظت کادمیم در اندام هوایی کاهو معنی‌دار بوده است (جدول 3). نتایج مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 5 نشان داد که غلظت کادمیم در اندام هوایی متناسب با افزایش سطح لجن افزایش یافت ولیکن بین تیمارهای 25 و 50 تن لجن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد. تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت کادمیم ریشه کاهو در جدول 5 بیانگر این است که کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در ریشه کاهو شد. بیشترین غلظت کادمیم و کمترین مقدار آن به ترتیب در تیمار 100 تن در هکتار و تیمار شاهد (0/20 میلی‌گرم در کیلوگرم و 0/08 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید. همچنین جدول 5 نشان داد که غلظت کادمیم در اندام هوایی کمتر از ریشه و مغز ساقه بود.

مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 5 نشان می‌دهد که کاربرد لجن فاضلاب در خاک سبب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم در مغز ساقه کاهو در همه‌ی تیمارها گردید. حداکثر غلظت کادمیم، 0/43 میلی‌گرم در کیلوگرم (در تیمار 100 تن در هکتار) و حداقل غلظت آن، 0/05 میلی‌گرم در کیلوگرم (در تیمار شاهد) مشاهده شد. ولیکن بین تیمارهای 25 و 50 تن در هکتار و 50 و 75 تن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد.

اثر لجن فاضلاب بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و برخی صفات مورفولوژیک کاهو

نتایج تجزیه واریانس و مقایسه‌ی میانگین تأثیر لجن فاضلاب بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و

کاربرد 100 تن لجن در هکتار حداکثر غلظت آهن ریشه و کمترین غلظت آن در تیمار شاهد به دست آمد.

تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت آهن مغز ساقه کاهو در جدول 4 نشان داده شده است. کاربرد لجن سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن مغز ساقه کاهو شد، غلظت آهن از 3/33 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به 3/78 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار 100 تن در هکتار افزایش یافت. غلظت آهن در اندام هوایی بیش از ریشه و در مغز ساقه کمتر از ریشه به دست آمد.

مس: کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت مس اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد شد (جدول 2). مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 4 نشان‌دهنده‌ی این است که با افزایش لجن به خاک غلظت مس در همه‌ی تیمارهای دریافت‌کننده‌ی لجن (به‌استثنای تیمار 25 تن در هکتار) نسبت به شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافته است. بیشترین و کمترین غلظت مس اندام هوایی در تیمار 100 تن در هکتار و شاهد (به ترتیب 0/17 و 0/48 میلی‌گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید.

نتایج تأثیر تیمارهای لجن فاضلاب بر غلظت مس ریشه کاهو در جدول 4 ارائه شده است. نتایج بیانگر این است که استفاده از لجن فاضلاب در تمام تیمارها (به‌استثنای تیمار 25 تن در هکتار) نسبت به شاهد سبب افزایش معنی‌دار غلظت مس ریشه کاهو شده است. حداکثر غلظت مس ریشه (1/49 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار 100 تن در هکتار لجن دیده شد؛ ولیکن بین تیمارهای شاهد و 25 تن در هکتار و تیمارهای 50 و 75 تن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد.

کاربرد لجن سبب افزایش معنی‌دار غلظت مس مغز ساقه کاهو شد. به‌گونه‌ای که غلظت مس از 0/26 میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به 0/64 در تیمار 100 تن در هکتار افزایش یافت. غلظت مس بین تیمارهای 25 و 50 تن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. غلظت مس در اندام هوایی کمتر از ریشه و در ریشه بیشتر از مغز ساقه بود.

سرب: مطابق جدول 3 اثر لجن فاضلاب بر غلظت سرب اندام هوایی معنی‌دار بود. مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 5 نیز نشان‌دهنده‌ی این است که با افزایش لجن به خاک غلظت سرب در همه‌ی تیمارهای دریافت‌کننده‌ی لجن به‌استثنای تیمار 25 تن در هکتار، نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. بیشترین غلظت سرب در تیمار 100 تن در هکتار (0/44 میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار آن (0/06 میلی‌گرم در کیلوگرم) در تیمار شاهد مشاهده گردید. استفاده از لجن

برخی صفات مورفولوژیکی کاهو در جداول 6 و 7 آورده شده است.

جدول 6- تجزیه واریانس (کمیت F) اثر لجن فاضلاب بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و برخی صفات مورفولوژیک کاهو

منبع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	ارتفاع گیاه	طول ریشه	شاخص سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ
تیمار	4	77/96*	17/42*	89/46*	24/68*	7/41*	2/02 ^{ns}
تکرار	3	1/25 ^{ns}	1/05 ^{ns}	1/82 ^{ns}	0/44 ^{ns}	1/57 ^{ns}	3/25 ^{ns}
خطا	12						
ضریب تغییرات		8/48	19/15	2/54	5/06	6/60	4/33

ns و * به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

جدول 7- مقایسه میانگین‌های وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و برخی صفات مورفولوژیک کاهو تحت تأثیر تیمارهای مختلف لجن فاضلاب

تیمار	وزن خشک اندام هوایی (g/pot)	وزن خشک ریشه (g/pot)	ارتفاع کل گیاه (ریشه و اندام هوایی) (cm)	طول ریشه (cm)	شاخص سطح برگ	شاخص کلروفیل برگ
S ₀	2/79 ^d	0/90 ^b	36/87 ^e	23/75 ^c	0/87 ^b	37/53 ^b
S ₂₅	6/59 ^c	1/48 ^b	42/75 ^d	28/62 ^b	1/00 ^a	39/09 ^{ab}
S ₅₀	6/79 ^c	2/35 ^a	46/00 ^c	29/37 ^b	1/08 ^a	39/31 ^{ab}
S ₇₅	8/47 ^b	2/59 ^a	48/62 ^b	32/12 ^a	1/09 ^a	39/40 ^{ab}
S ₁₀₀	10/49 ^a	2/84 ^a	50/62 ^a	33/25 ^a	1/09 ^a	40/93 ^a

در هر ستون، میانگین‌هایی دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند
S₁: شاهد، S₂: 25 تن در هکتار، S₃: 50 تن در هکتار، S₄: 75 تن در هکتار، S₅: 100 تن در هکتار لجن فاضلاب

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

نتایج تجزیه‌ی واریانس نشان‌دهنده‌ی تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف لجن فاضلاب بر وزن خشک اندام هوایی می‌باشد (جدول 6). نتایج مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 7 نیز نشان می‌دهد که با افزایش میزان لجن فاضلاب، وزن خشک اندام هوایی کاهو روند افزایشی داشته است. با کاربرد 100 تن لجن در هکتار بیشترین وزن خشک اندام هوایی به دست آمد و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده گردید. به‌گونه‌ای که وزن خشک گیاه از 2/79 گرم در تیمار شاهد به 10/49 گرم در تیمار 100 تن در هکتار افزایش یافت. ولیکن بین تیمارهای 25 و 50 تن لجن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد. همچنین کاربرد لجن در همه‌ی مقادیر (به‌استثنای تیمار 25 تن در هکتار) سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه کاهو در مقایسه با شاهد شد. کمترین و بیشترین مقدار برای این صفت به ترتیب در تیمار شاهد و 100 تن در هکتار لجن به دست آمد. اما بین تیمارهای 50 تا 100

تن در هکتار نیز از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول 7).

ارتفاع گیاه و طول ریشه

نتایج جدول 6 نشان داد که اثر لجن فاضلاب بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. مقایسه‌ی میانگین‌ها نیز نشان داد که بیشترین ارتفاع گیاه (50/62 سانتی‌متر) در تیمار 100 تن در هکتار لجن و کمترین مقدار آن (36/87 سانتی‌متر) در تیمار شاهد به دست آمد (جدول 7). کاربرد لجن در همه‌ی تیمارها، باعث افزایش معنی‌دار طول ریشه نسبت به شاهد شد. به‌طوری‌که طول ریشه از 23/75 سانتی‌متر در تیمار شاهد به 32/25 سانتی‌متر در تیمار 100 تن در هکتار افزایش نشان داد. اما با وجود روند افزایشی بین تیمارهای 25 و 50 و تیمارهای 75 و 100 تن لجن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول 7).

شاخص سطح برگ و شاخص کلروفیل برگ

طبق نتایج تجزیه‌ی واریانس (جدول 6)، کاربرد لجن فاضلاب بر افزایش شاخص سطح برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید. مقایسه‌ی میانگین‌ها نیز نشان می‌دهد که با افزایش لجن فاضلاب به خاک، شاخص سطح برگ نسبت به تیمار شاهد در همه‌ی تیمارهای دریافت‌کننده‌ی لجن افزایش یافته است. با وجود این روند افزایشی در شاخص سطح برگ، بین تیمارهای 25 تا 100 تن لجن در هکتار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول 7).

مقایسه‌ی میانگین‌ها در جدول 7 نشان می‌دهد که سطوح مختلف لجن فاضلاب شاخص کلروفیل برگ‌ها را افزایش داد اما این روند افزایشی فقط در تیمار 100 تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی‌دار بود و سایر تیمارها نسبت به تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد نشان ندادند. بیشترین شاخص کلروفیل برگ‌ها در تیمار 100 تن لجن در هکتار و کمترین آن در تیمار شاهد مشاهده گردید.

بحث

نتایج این آزمایش نشان داد که غلظت فلزات سنگین در قسمت‌های مختلف گیاه، عملکرد و خصوصیات مورفولوژیک کاهو در تیمارهایی که لجن فاضلاب دریافت کرده بودند نسبت به تیمار شاهد روند افزایشی داشت، که این افزایش متناسب با افزایش در مقادیر کاربرد لجن فاضلاب بود (جدول 4 و 5).

کاربرد لجن فاضلاب در خاک، تولید کمپلکس‌های آلی محلول با فلزات می‌کند که این کمپلکس‌ها بسیار متحرک بوده و در مقایسه با یون‌های فلزی آزاد به سهولت به‌وسیله‌ی گیاهان جذب می‌شوند (بهبهانی نیا، 2009). در این پژوهش به دلیل این‌که در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه احتمالاً فرصت کمپلکس‌سازی و افزایش حلالیت عنصر وجود نداشته یا به مقدار کم وجود داشته است، افزایش غلظت در گیاه می‌تواند بیشتر ناشی از افزایش مقدار آن در محیط ریشه‌ی گیاه باشد. تحقیقات زیادی افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف و فلزات سنگین در بافت‌های گیاه را به دنبال کاربرد لجن در خاک گزارش کرده‌اند. به دنبال کاربرد لجن فاضلاب غلظت این عناصر در کاهو و اسفناج (واتقی و همکاران، 1380، افیونی و همکاران، 2006 و بهبهانی نیا و همکاران، 2009)، لوبیا، ذرت، چغندر قند، سیب‌زمینی (کیلر و همکاران، 2000)، ذرت (سعادت و همکاران، 1391 و عباسی‌زاده، 1386)، کلم بروکلی (پرز مورسیا و همکاران، 2006) و در سسیتیم کشت برنج-گندم (لاتار و همکاران، 2014) به‌طور

معنی‌داری افزایش یافت. علت افزایش جذب عناصر کم‌مصرف و فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی با کاربرد لجن، ممکن است افزایش غلظت عناصر مذکور در خاک با کاربرد لجن فاضلاب باشد که باعث جذب بیشتر این عناصر به وسیله گیاه می‌گردد (خدیوی، 1382 و مک براید، 2002). نتایج این آزمایش نشان داد که غلظت سرب در ریشه گیاه کاهو بیشتر از غلظت سرب در اندام هوایی بود، این مؤید عدم قابلیت تحرک بالای عنصر سرب در گیاه و انتقال به اندام هوایی می‌باشد. البته لازم به توضیح است که این روند بسته به نوع گیاه متفاوت است. لیتا و دنویلی (1999) معتقدند که برخی فلزاتی که با لجن فاضلاب به خاک افزوده شده‌اند به شکل آلی بوده و نسبت به فلزات بومی موجود در خاک قابلیت دسترسی کمتری دارند و یا مواد آلی افزوده شده به خاک ممکن است با آن‌ها تشکیل کمپلکس دهد و بنابراین کمتر توسط گیاه جذب می‌شوند. این نکته از این نظر که برگ‌های کاهو مورد استفاده خوراکی قرار می‌گیرند، دارای اهمیت است. غلظت کادمیم نیز در اندام هوایی بیشتر از غلظت

کادمیم ریشه به دست آمد. سانیتا دی تاپی و گابریلی (1999) بیان کردند، کادمیم فلزی است که به راحتی در خاک حرکت نمی‌کند و به‌طور معمول عمدتاً در ریشه باقی می‌ماند و به مقدار کم به ساقه‌ها و اندام هوایی منتقل می‌شود. توزیع کادمیم در بافت‌های مختلف گیاه به نوع گیاه نیز بستگی دارد (لی و همکاران، 2006). در این رابطه حتی در بین ارقام مختلف گیاهان نیز تفاوت وجود دارد به طوری که در ذرت، یونجه، یولاف و سویا غلظت کادمیم ریشه بیشتر از شاخساره بوده ولی در هویج، کاهو، تنباکو، سیب زمینی برگ‌ها بیشترین مقدار کادمیم را داشتند (ملکوتی و همایی، 1383). طبق نتایج، غلظت کادمیم به استثنای تیمار 100 تن در هکتار در مغز ساقه گیاه، در ریشه گیاه بیشتر از سایر قسمت‌های گیاه بود. ممکن است تحمل بالای یک بخش از گیاه در برابر سمیت کادمیم در توزیع این عنصر در گیاه نقش داشته باشد (لی و همکاران، 2006). برای استفاده از لجن فاضلاب در خاک‌ها با توجه به مقدار افزایش عناصر مذکور به خاک و مقدار جذب شده توسط گیاهان لازم است که حد آستانه سمیت برای هر فلز، بسته به نوع گیاه و نوع خاک و شرایط محیطی مکان کاربرد لجن فاضلاب تعیین گردد و مقادیر کاربرد لجن بر اساس آن ارزیابی شود.

نتایج این تحقیق همچنین حاکی از آن است که با کاربرد لجن فاضلاب در مقادیر مختلف عملکرد خشک اندام هوایی و ریشه و برخی از خصوصیات مورفولوژیک

لجن به کار برده شده در تحقیق حاضر، روند غلظت فلزات سنگین آهن <مس> سرب <کادمیم بود. وجود عنصری مانند مس و آهن می‌تواند برای گیاه مفید باشد ولیکن در کاربرد پسماند آلی در کشاورزی توجه به غلظت فلزات سنگین سمی از جنبه‌ی مخاطرات آن بیشتر شایان توجه است چرا که استفاده مکرر و درازمدت این مواد می‌تواند آلودگی خاک و انتقال این عناصر به زنجیره‌ی غذایی انسان و حیوان را در پی داشته باشد. در این تحقیق استفاده از لجن فاضلاب شهری سبب افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه، اندام هوایی و خصوصیات مورفولوژیک گیاه کاهو شامل ارتفاع گیاه، طول ریشه، تعداد برگ و شاخص سطح برگ در تمام تیمارهای دریافت‌کننده‌ی لجن فاضلاب در مقایسه با تیمار شاهد گردید، اما بر شاخص کلروفیل برگ اثر معنی‌داری نداشت. بنابراین اثرهای مثبت کاربرد لجن فاضلاب در کشت‌های بعدی می‌تواند در افزایش رشد کاهو مؤثر باشد. با توجه به اینکه بار میکروبی در این پژوهش اندازه‌گیری نشده است ولیکن ضروری است برای استفاده از لجن فاضلاب بار میکروبی آن در نظر گرفته شود و با توجه به توصیه‌های سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA)، بار میکروبی باید در حد کلاس‌های A و B قرار گیرد و آنگاه با توجه به توصیه‌های مربوط به هر کلاس، برای استفاده از لجن اقدام شود.

در پژوهش حاضر نیز با فرض اینکه لجن فاضلاب مورد استفاده از لحاظ بار میکروبی در حد کلاس استاندارد قرار داشته است، صورت گرفته است. بنابراین باید در صورت کاربرد سطوح لجن فاضلاب و افزودن مکرر آن، افزایش فلزات سنگین، بار میکروبی و شوری خاک را در نظر داشت. در این مطالعه کمترین غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی، ریشه و مغز ساقه گیاه در تیمار دریافت‌کننده‌ی لجن فاضلاب (S₂₅) و بیشترین غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی، ریشه و مغز ساقه گیاه در تیمار دریافت‌کننده‌ی بیشترین لجن فاضلاب (S₁₀₀) به‌دست آمد. بنابراین قبل از هرگونه توصیه‌ای جهت استفاده از لجن فاضلاب، لازم است برای هر منطقه با توجه به ترکیب لجن فاضلاب، حتماً ابتدا بار میکروبی آن قبل از استفاده و توصیه برای کاربرد در اراضی کشاورزی مورد بررسی قرار بگیرد و با توجه به شرایط منطقه، نوع گیاه و خصوصیات خاک منطقه، فرمول راهنما تدوین شود.

گیاه به طور معنی‌داری افزایش یافت. اما بر افزایش شاخص کلروفیل برگ تأثیر معنی‌داری نداشت. افزایش عملکرد و خصوصیات مورفولوژیک کاهو را می‌توان به بالا بودن میزان ماده آلی در لجن و نقش مثبت لجن در افزایش غلظت برخی عناصر غذایی همچون نیتروژن، فسفر و پتاسیم، آهن، منگنز، منیزیم، وجود درصد بالایی از مواد آلی در لجن فاضلاب، بهبود شرایط فیزیکی خاک از طریق افزایش پایداری خاکدانه‌ها و نیز آب قابل استفاده گیاه نسبت داد. به نظر می‌رسد این عوامل منجر به افزایش باروری خاک و در نتیجه بهبود رشد گیاه گردیده است (نیلسون و همکاران، 1998). حسین و همکاران (2015) در یک پژوهش لجن فاضلاب و لجن بیوجار را برای محصول گوجه‌فرنگی به کار بردند و مشاهده کردند که بیشترین وزن خشک گیاه، تعداد میوه و عملکرد مربوط به تیمار لجن فاضلاب بود. کمار و چوپرا (2016) نیز در مطالعه خود لجن فاضلاب را در سطوح مختلف (صفر، 5، 25، 50، 75 و 100 درصد لجن فاضلاب) به کار بردند و گزارش کردند که لجن فاضلاب باعث افزایش عملکرد گیاه شد و حداکثر کارایی گیاه در قالب ارتفاع بوته، طول ریشه، وزن خشک، شاخص سطح برگ، محتوای کلروفیل برگ و عملکرد گیاه بادمجان در تیمار 50% لجن فاضلاب بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش لجن فاضلاب می‌تواند سبب افزایش عملکرد شود، ولی با توجه به پتانسیل سمیت فلزات سنگین لجن فاضلاب، این امر تا مقادیر مشخصی از میزان لجن صادق است و در مقادیر بیش از این حد، افزایش لجن ممکن است باعث سمیت عناصر در گیاه و کاهش عملکرد گردد. تعیین این محدوده به شرایط مختلف خاک و گیاه و ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده بستگی دارد. البته با توجه به آثار مفید لجن در خاک، پیشنهاد می‌شود راه‌های ورود فلزات سنگین به لجن از طریق صنایع مختلف بررسی شود، تا با کاهش ورود این فلزات، بتوان ارزش کودی لجن فاضلاب را افزایش داد.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش‌های مختلفی بر استفاده از لجن فاضلاب در کشت گیاهان مختلف صورت پذیرفته است که در بیشتر تحقیقات با کاربرد لجن فاضلاب، شاخص‌های رشد و عملکرد گیاهان افزایش یافته است. یافته‌های پژوهش حاضر نیز مؤید آثار مثبت کاربرد لجن فاضلاب بر عملکرد گیاه کاهو است. ولیکن در برخی پژوهش‌ها به تأثیر زیستی و وجود فلزات سنگین لجن فاضلاب در گیاهان زیر کشت توجه‌ای نشده است. در

فهرست منابع:

1. حسینی خانمیری، ن.، هاشمی مجد، ک.، اصغری، ش.، اوستان، ش. و کیوان بهجو، ف. 1390. اثر لجن بیولوژیک مجتمع پتروشیمی تبریز بر غلظت برخی فلزات سنگین در خاک و گیاه جو بهاره در شرایط گلخانه‌ای. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. 83-92: 8.
2. خدیوی، بروجنی. 1382 اثر کودهای آلی بر اشکال شیمیایی فلزات سنگین در خاک و جذب این عناصر توسط گندم پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
3. زارع، م.، چرم، م.، و معلمی، ن.ا. 1393. اثر لجن فاضلاب شهری تصفیه شده بر خصوصیات شیمیایی و عناصر غذایی ضروری خاک و خصوصیات فیزیولوژیکی نهال زیتون. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، جلد سی و هفتم (شماره 2).
4. سعادت، ک.، بارانی مطلق، م.، دردی پور، ا. و قاسم نژاد، ع. 1391. اثر لجن فاضلاب بر برخی خصوصیات خاک، عملکرد و غلظت سرب و کادمیوم ریشه و اندام هوایی ذرت. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. جلد دوم، شماره دوم.
5. عباسی زاده، ا. 1386. اثر لجن فاضلاب و کمپوست بر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، عملکرد ذرت و آلودگی خاک به عناصر سنگین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
6. کرمی، م.، ی. رضایی نژاد، م. افیونی و ح. شریعتمداری. 1386 اثرات تجمع‌ی و باقیمانده لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر سرب و کادمیوم در خاک و گیاه گندم. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی: 1. 79-94
7. مجیدیان، م.، و ح. غدیری. 1381. تأثیر تنش رطوبت و مقادیر مختلف کود نیتروژن در مراحل مختلف رشد بر عملکرد اجزای عملکرد، بازده استفاده از آب و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه ذرت. مجله علوم کشاورزی ایران. (3): 533-521
8. ملکوتی، م. ج.، و همایی، م. 1383. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک "مشکلات و راه‌حل‌ها" چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
9. واتقی، س.، شریعتمداری، ح.، افیونی، م.، و مبلی، م. 1380. اثر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در گیاهان کاهو و اسفناج در خاک‌های با pH متفاوت. مجله علوم و فنون باغبانی ایران، جلد 2 (شماره‌های 3 و 4)، صفحات 125 تا 142.
10. واتقی، س.، م. افیونی، ح. شریعتمداری، و مبلی، م. 1382. اثر لجن فاضلاب و pH بر قابلیت جذب عناصر کم مصرف و فلزات سنگین. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هفتم، شماره سوم. صفحات 95-106.
11. Afyuni, M., R. Schulin., and Y. Rezaeinejad. 2006. Extractability and plant uptake of Cu, Zn, Pb and Cd from a sludge-amended Haplargid in central Iran. *Arid Land Res. Manag.* 20(1): 29-41.
12. Allison, L.E. 1965. Organic carbon, P 1372-1376. In: Black, C.A., Evans, D.D., White, L.J., Ensminger, L.E., Clark, F.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
13. Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soils*. 2nd ed., Blackie Academic & Professional, Glasgow, UK.
14. Angers, D.A., and G.R. Mehuys. 1989. Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. *Can. J. Soil Sci.* 69 (2): 373-380.
15. Appenroth, K.J. 2010. Definition of "Heavy Metals" and Their Role in Biological Systems. PP. 19-30. In: I. Sherameti and A. Varma (Eds). *Soil Heavy Metals*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

16. Behbahaninia, A., S. A. Mirbagheri., N. Khorasani., J. Nouri., and A. H. Javid. 2009. Heavy metal contamination of municipal effluent in soil and plants. *J. Food, Agri. Environ.* 7(3&4): 851-856.
17. Benton, J., and V.W. Case. 1990. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples, P 389-428. In: Westerman, R.L. (ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. Book series No. 3. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI., USA.
18. Berdanier, C.D., and T.K. Atkins. 1998. *Advanced Nutrition*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.
19. Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986a. Bulk density. Pp. 363-375. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
20. Bolan, N.S., and V.P. Duraisamy. 2003. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilisation and phytoavailability of heavy metals: A review involving specific case studies. *Aust. J. Soil Res.* 41:533-555.
21. Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis, P 545-567. In: Black, C.A., Evans, D.D., White, L.J., Ensminger, L.E., Clark, F.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
22. Dolgen, D., M.N. Alpaslan., and N. Delen. 2007. Agricultureral recycling of treatment- plant sludge: A case study for a vegetable processing factory. *J. Environ. Manage.* 84: 274-281.
23. Fageria, N.K., V.C. Baligar., and R.B. Clark. 2002. Micronutrients in crop production. *Adv Agron.* 77:185-268.
24. Gondec, K. 2009. Assessment of the influence of sewage sludge fertilization on yield and content of nitrogen and sulphur in maize. *J. Elementol.* 15: 1. 65-79.
25. Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale., and W.L. Nelson. 2004. *Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management*. 7th ed., Prentice Hall, USA.
26. Hossain, M. K., V. Strezov., and P. F. Nelson. 2015. Comparative assessment of the effect of wastewater sludge biochar on growth, yield and metal bioaccumulation of cherry tomato. *Pedosphere.* 25(5): 680-685.
27. Keller, C., A. Kayser., A. Keller., and R. Schulin. 2000. Heavy-metal uptake by agricultural crops from sewage- sludge treated soils of the upper swiss Rhine valley and the effect of time. *Environmental Restoration of Metals contaminated soils*, 273-291.
28. Kelling, K.A., A.E. Peterson., and L.M. Walsh. 1977. Field study of the agricultural use of sewage sludge: I. Effect on crop yield and uptake of N and P. *J. Environ. Qual.* 6: 339-343.
29. Knudesh, D., G. A. Peterson., and P. F. Pratt. 1982. Lithium, Sodium, and Potassium. In: Page, A. L. (Ed) *Methods of soil Analysis. . Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd E d. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA. Madison WI.
30. Kumar, V., and A. K. Chopra. 2016. Agronomical Performance of High Yielding Cultivar of Eggplant (*Solanum melongena* L.) Grown in Sewage Sludge Amended Soil. *Research in Agriculture*, 1(1): 1-24.
31. Lanyon, L. E., and W. R. Heald. 1982. Magnesium, Calcium, Strontium, and Barium. In: Page, A. L. (Ed) *Methods of soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd E d. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA. Madison WI.
32. Latare, A. M., O. Kumar., S. K. Singh., and A. Gupta. 2014. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. *Ecol. Eng.* 69: 17-24.
33. Leita, L., and M. Denobili. 1991. Water-soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste. *J. Environ. Qual.* 20: 73-78.

34. Li, S., R. Liu., M. Wang., X. Wang., H. Shan., and H. Wang. 2006. Phytoavailability of cadmium to cherry-red radish in soils applied composted chicken or pig manure. *Geoderma*. 136: 206-271.
35. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for Zn, Fe, Mn, and Cu. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
36. McBride, M. B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? *J. Environ. Qual.* 24: 5-18.
37. Nielson, G.H., E.J. Hogue., D. Nielson., and B.J. Zebarth. 1998. Evaluation of organic wastes as soil amendments for cultivation of carrot and chard on irrigated sandy soils. *Can. J. Soil Sci.* 78: 217-225.
38. Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. In: Page et al. (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part II.* 2ed. ASA, SSSA, Madison, WI. USA.
39. Perez-Murcia, M. D., R. Moral., J. Moreno-Caselles., A. Perez-Espinosa., and C. Paredes. 2006. Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli. *Bioresour. Technol.* 97: 123-130.
40. Roades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. *Method of soil analysis, parss: chemical methods.* Madison. Wisconsin, USA. Pp: 417-436.
41. Sanita di Toppi, L., and R. Gabbrielli. 1999. A review: Response to cadmium in higher plants. *J. Env. Exp. Bot.* 41: 105-130.
42. Smith, S.R. 1992. Sewage sludge and refuse compost as peat alternatives for conditioning impoverished soils. *J. Hort. Sci.* 67 (2): 703-716.
43. Tsadilas, C.D., T. Matsi., N. Barbayiannis., and D. Dimoyiannis. 1995. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metals fraction. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 2603-2619.
44. U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Clean water act. Section 503. Vol.58, No. 32, USEPA. Washington, DC.
45. Wang, X., T. Chen., Y. Ge., and Y. Jia. 2008. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *J. Hazard. Mater.* 160: 554-555.
46. Westreman, R.E.L. 1990. *Soil Testing and Plant Analysis.* SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

A Comparative Study of the Effects of Sewage Sludge on Heavy Metals Concentrations and Some Morphological Characteristics of Lettuce

N. Sohrabi, A. Alinejadian Bidabadi¹, M. Feizian, and A. Maleki

Graduate student of Soil Science, Lorestan University; E-mail: sohrabinastaran7@gmail.com

Assistant Professor., Faculty of Agriculture, Soil Science Department, Lorestan University;
E-mail: alinejadian@yahoo.com

Assistant Professor., Faculty of Agriculture, Soil Science Department, Lorestan University;
E-mail: m_feizian@yahoo.com

Assistant Professor., Faculty of Agriculture, Water Engineering Department, Lorestan University; E-mail: dr.maleki38@yahoo.com

Received: October, 2016 & Accepted: February, 2017

Abstract

Use of sewage sludge as a cheap and nutrients-rich fertilizer has been common in some regions of Iran. But, using sewage sludge in large quantities can lead to accumulation of heavy metals in plant. The goal of this study was to evaluate the effects of sewage sludge on heavy metals concentrations in plants and some morphological characteristics of lettuce. This research was conducted in greenhouse of Faculty of Agriculture at Lorestan University. Treatments included five levels of sewage sludge: control (no sludge), 25, 50, 75 and 100 tons per hectare (t/ha), with four replications based on a completely randomized blocks design. Plant tissue analysis showed that sludge application significantly increased concentrations of Fe, Cu, Cd and Pb in lettuce shoot, root, and stalk. In 100 t/ha treatment, the highest concentrations of Fe (6.16 mg.kg^{-1}) was in shoots and the highest concentrations of Cu and Pb, (1.49 and 1.20 mg.kg^{-1} , respectively) was observed in the root and highest concentrations of Cd (0.43 mg.kg^{-1}) was found in lettuce stalk. The results showed that application of sewage sludge significantly increased dry weight of biomass and root, plants height, root length, and leaf area index of lettuce, but had no significant effect on chlorophyll content. The highest amounts of these growth parameters were obtained in the treatment of 100 t/ha. Thus, because of concentration of heavy metals in sewage sludge, its long term application poses risk of heavy metal contamination in the soil and, consequently, health risk to the human and animal food chain. Therefore, according to the research results, it is recommended that sewage sludge should not be used for growing edible food crops. Indeed, before using sewage sludge in different farms, it is necessary to be examined for microbial load and suitable recommendations should be made based on local conditions, vegetation type, and soil characteristics.

Keywords: Soil contamination, Microbial load, Yield, Iron, Copper, Lead, Cadmium

¹ Corresponding author: Faculty of Agriculture, Soil Science Department, Lorestan University