Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 3, PP. 34-40, Autumn 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.215767.1182

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۳، صفحات ۳۴-۴۰، پاییز ۱۳۹۹

Research Paper

The Effect of Sewage Sludge Application on Soil Chemical Properties in Greenhouse Conditions of Helianthus Annuus

Elham Mohammadian[1], Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh[2*] and Maryam Varavipour[3]

1- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Drainage, Collage of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Collage of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Collage of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding author, Email: sehashemi@ut.ac.ir

Received: 20/01/2020
Revised: 15/08/2020
Accepted: 16/08/2020

Abstract

Today, due to legal restrictions on the methods burying sewage sludge, environmentalists recommend using it as a fertilizer as a fertilizer in agriculture to get rid of the problems caused by sludge produced in treatment plants. Sewage sludge can be the best and cheapest organic fertilizer for agricultural lands due to its high content of organic compounds and nutrients required by the plant. But at the same time toxic factors such as heavy metals in sludge are the most important limiting factor for its use. The purpose of this study was to investigate the effect of sewage sludge application on some soil chemical properties and heavy soil metals. This study was carried out in the Aburaihan Campus Research Greenhouse of Tehran University with three levels of sewage sludge for anaerobic and dehydrated anaerobic wastewater treatment plant south of Tehran containing 0, 10 and 20 g/kg soil, in three replications in a completely randomized block design on *Helianthus annuus*. After finishing the growing season, the Soil of control and treated pots were sampled. After physical and chemical tests on soil samples, it was observed that application of sewage sludge in soil significantly increased Organic Matter (O.M), Cation Exchange Capacity (CEC), Salinity (EC), total nitrogen, potassium and Heavy metals Pb, Ni, Cd concentrations, and There was a significant decrease in pH in the treated soils compared to the control treatment. Also, treatment of 20 g of sewage sludge per kg soil had the best effect on soil chemical properties.

Keywords: Heavy Metals, Helianthus Annuus, Reuse of Sewage Sludge, Soil Properties, South Tehran Wastewater Treatment Plant.

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر خصوصیات شیمیایی خاک در شرایط کشت گلخانه‌ای گل آفتابگردان زینتی

الهام محمدیان[۱]، سید ابراهیم هاشمی گرم‌دره[۲*] و مریم وراوی پور[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: sehashemi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶

چکیده

امروزه به‌دلیل محدودیت‌های قانونی در مورد روش‌های دفن لجن فاضلاب، متخصصین محیط‌زیست برای رهایی از مشکلات ناشی از لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها، استفاده از آن را به‌عنوان کود در کشاورزی توصیه می‌کنند. لجن فاضلاب به‌دلیل داشتن مقادیر زیادی از ترکیبات آلی و عناصر غذایی موردنیاز گیاه می‌توانند بهترین و ارزان‌ترین کودهای آلی برای اراضی کشاورزی باشد؛ اما عوامل سمی مانند فلزات سنگین موجود در لجن، مهم‌ترین فاکتور محدودکننده استفاده از آن است. هدف از این پژوهش بررسی اثر کاربرد لجن فاضلاب روی خصوصیات شیمیایی و فلزات سنگین خاک است. این تحقیق در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران با سه سطح لجن فاضلاب مربوط به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و تهیه شده به‌روش بی‌هوازی و آبگیری شده، شامل ۰، ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم خاک، در سه تکرار و در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی بر روی گل آفتابگردان زینتی انجام شد. پس از اتمام دوره رشد، از خاک گلدان‌های شاهد و تحت تیمار نمونه‌برداری انجام شد. پس از انجام آزمایشات فیزیکی و شیمیایی روی نمونه‌های خاک و تجزیه و تحلیل آماری، مشاهده شد که کاربرد لجن فاضلاب در خاک باعث افزایش معنی‌دار ماده آلی، گنجایش تبادل کاتیونی، شوری، غلظت نیتروژن کل، پتاسیم و فلزات سنگین سرب، نیکل و کادمیوم و کاهش معنی‌دار pH در خاک‌های تحت تیمار نسبت به تیمار شاهد شد. ضمن این‌که تیمار ۲۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک بهترین تأثیر را بر مشخصات شیمیایی خاک داشت.

واژه‌های کلیدی: استفاده مجدد لجن فاضلاب، تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران، فلزات سنگین، خصوصیات خاک، آفتابگردان زینتی.

۱- مقدمه

لجن فاضلاب، مواد جامد، نیمه جامد یا مایع تولید شده در طی فرآیند تصفیه است که شامل آب، مواد جامد قابل رسوب و عمدتاً مواد آلی است که طی فرآیندهای تصفیه دفع می‌شوند (Water Security Agency, 2004). در حال حاضر فقدان مدیریت اصولی بر لجن‌های دفعی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در کشور موجب شده است که در بیشتر موارد این لجن‌ها به‌صورت خام و تثبیت نشده به محیط راه یافته و خسارات زیادی را بر سلامت انسان و منابع محیط‌زیست وارد نمایند (فرزاد کیا، ۱۳۷۸). لجن فاضلاب دارای مقادیر فراوانی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است و می‌تواند به‌عنوان یک کود آلی در کشاورزی مصرف شود (افیونی و همکاران، ۱۳۷۹). به‌طور متوسط ۳۰ میلیون تن لجن فاضلاب سالانه در جهان تولید می‌شود، که حدود ۲۱ میلیون تن آن به‌عنوان کود به زمین‌های کشاورزی اضافه می‌شود (واثقی و همکاران، ۱۳۸۰). پژوهش‌ها نشان داده است که لجن دارای عناصر پرمصرف مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم و عناصر کم مصرف مانند آهن، مس، روی و منگنز است که می‌توانند باعث افزایش باروری و حاصلخیزی خاک شده و از آن طریق در افزایش رشد و عملکرد گیاه نقش به سزایی داشته باشند (افیونی و همکاران، ۱۳۷۹؛ زائری، ۱۳۸۰).

نکته مهمی که در کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی باید به آن توجه شود، غلظت به نسبت زیاد برخی عناصر سنگین مانند سرب، کادمیوم و نیکل در آن‌ها است. وجود عناصری نظیر سرب و کادمیوم همراه با عناصر کم‌مصرف در محیط ریزوسفر، سبب انتقال این عناصر به زنجیره غذایی انسان و حیوان می‌شود که می‌تواند پیامدهای خطرناکی را به دنبال داشته باشد (Bolan et al., 2003). ایراد اصلی فلزات سنگین این است که در بدن متابولیزه نمی‌شوند و به‌تدریج در بافت‌های بدن انباشته می‌شوند و همین امر موجب بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی در بدن می‌شود. از جمله مهم‌ترین مضرات فلزات سنگین اختلالات عصبی (پارکینسون، آلزایمر، افسردگی، اسکیزوفرنی)، انواع سرطان‌ها، برهم خوردن تعادل هورمون‌ها، سقط جنین، اختلالات تنفسی و قلبی- عروقی، آسیب به کبد، کلیه‌ها و مغز، آلرژی و آسم، اختلال در عملکرد آنزیم‌ها، ناباروری، کم‌خونی، خستگی، تهوع، سردرد، تضعیف سیستم ایمنی بدن، تخریب ژن‌ها، کاهش حافظه، پوکی استخوان، بی‌خوابی و مرگ است (Geravandi et al., 2014; Sadat Taghavirad et al., 2014).

Epestein et al. (1976)، ثابت کردند که گنجایش تبادل کاتیونی خاک با مقدار ماده آلی خاک نسبت مستقیم دارد. با افزودن ۲۴۰ تن در هکتار لجن فاضلاب به خاکی که گنجایش تبادل کاتیونی آن بین ۰/۰۵۵ تا ۰/۰۶۴ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم خاک بود به ۰/۱۵۴ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم خاک رسید. رضایی‌نژاد و افیونی (۱۳۷۹) و زائری (۱۳۸۰)، گزارش کردند که افزودن لجن فاضلاب در حجم‌ها و تعداد سال‌های مختلف، افزایش معنی‌دار ماده آلی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک را به‌دنبال داشت. یگانه (۱۳۸۳) به بررسی تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر پروفیل شوری خاک آهکی پرداخت و مشاهده کرد که افزودن لجن فاضلاب منجر به افزایش معنی‌دار EC در همه تیمارها و در همه اعماق گردید.

فتح‌العلومی و همکاران (۱۳۹۴)، به‌منظور بررسی اثرات لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک و گیاه و برخی صفات زراعی گندم تحقیقی انجام داده و مشاهده کردند که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار نیتروژن کل، فسفر قابل استخراج و پتاسیم قابل استخراج در خاک زیر کشت گندم شد. Latare et al. (2014)، نشان دادند که کاربرد لجن فاضلاب به مقدار ۴۰ تن در هکتار باعث افزایش معنی‌دار عناصر پرمصرف خاک زیر کشت گندم شد. واثقی و همکاران (۱۳۸۰) اثر لجن فاضلاب بر غلظت تعدادی از عناصر غذایی و ویژگیهای شیمیایی خاک را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار فسفر و پتاسیم قابل جذب، نیتروژن کل، درصد کربن آلی، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود و pH خاک نیز کاهش معنی‌داری پیدا می‌کند.

Wu et al. (2017) یک آزمایش گلخانه‌ای با اضافه کردن مقادیر متفاوتی از لجن فاضلاب به خاک و کاشت پنج گیاه زینتی (Aphelandra ruellia, Syngonium podophyllum, Schefflera odorata, Alocasia macrorrhiza, and Dianella ensifolia) انجام دادند. نتایج نشان داد که افزودن لجن، به‌طور قابل‌توجهی قدرت حاصلخیزی و رطوبت خاک و نیز محتوای کادمیوم، سرب، مس و روی در خاک و رشد نسبی گیاهان و جذب مواد مغذی را افزایش داد. Yang et al. (2018)، یک آزمایش مزرعه‌ای طولانی مدت با یک سیستم چرخش ذرت-گندم برای بررسی تجمع فلزات سنگین در یک خاک آهکی با مقادیر مختلف اصلاح لجن فاضلاب انجام دادند. با افزایش یک تن لجن کاربردی در هکتار در سال در خاک، محتوای روی، مس، سرب و کادمیوم در خاک به‌ترتیب ۶۱۹، ۹۲/۹، ۴۹/۲ و ۰/۵ میکروگرم بر کیلوگرم افزایش یافت. Guoqing et al. (2019)، با آزمایشی دو ساله برای تعیین تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر رشد صنوبر، به این نتیجه

رسیدند که لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار قطر و تقویت رشد صنوبر شد. ضمن این‌که لجن فاضلاب به‌طور قابل‌توجهی بر تجمع کلسیم، سدیم، مس، نیکل و سرب در قسمت‌های هوایی صنوبر و توزیع N، S، Ni، Mg و P بین ریشه و برگ یا ساقه تأثیر گذاشت.

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته، لزوم بررسی کاربرد لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی و اثر کشت گیاهان مختلف بر روی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، امری ضروری به‌شمار می‌آید. لذا پژوهش حاضر به بررسی کاربرد لجن فاضلاب توأم با کشت گل آفتابگردان زینتی و تأثیر آن روی برخی خصوصیات شیمیایی خاک می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۷، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، به‌صورت گلدانی در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه سطح کاربرد ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی خاک لجن فاضلاب با سه تکرار انجام شد. خاک مورد استفاده از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی برداشته شد و به محل انجام پژوهش، انتقال یافت. لجن فاضلاب مورد استفاده مربوط به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران از نوع هضم‌شده به‌روش بی‌هوازی و آبگیری شده بود.

در این تحقیق، از گیاه آفتابگردان زینتی استفاده شد. تعداد گلدان‌ها با توجه به تعداد تیمار و تکرارها برابر ۹ عدد گلدان بود. در اواخر تیر ماه بذرهای گیاه آفتابگردان زینتی در گلدان‌های استکانی کاشته شد. به این‌صورت که در گلدان‌ها شش بذر کاشته شد. پس از گذشت ۱۵روز از کاشت بذرها، نشاء بوته‌ها تنک شدند و در هر گلدان سه بوته که از بقیه بوته‌ها مقاوم‌تر بود نگهداشته شد تا فضای کافی برای رشد گیاه وجود داشته باشد و یک هفته بعد هریک از گیاهچه‌ها به یک گلدان بزرگتر انتقال داده شد. در این مطالعه از گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۳۰ و قطر ۲۰ سانتی‌متر با ظرفیت تقریبی ۳ کیلوگرم خاک استفاده شد. به‌منظور آماده کردن تیمارها، نمونه‌های خاک خشک شده در هوا، از الک شش میلیمتری و لجن فاضلاب پس از کوبیده شدن از الک یک میلیمتری عبور داده شد و سپس در سطح صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی خاک با آن مخلوط شد. قبل از پر کردن گلدان‌ها با تیمارهای خاک، در کف هر گلدان مقداری شن درشت به‌عنوان زهکش ریخته شد و گلدان‌ها با تیمارهای تهیه شده، پر شدند. در مدت رشد گیاهان در گلخانه، وجین علف‌های هرز با دست انجام شد و جز لجن اضافه شده از کود دیگری استفاده نشد. آبیاری گلدان‌ها با آب شهر و تقریباً هر چهار الی پنج روز یک‌بار تا حد ظرفیت زراعی خاک که به‌صورت وزنی با وزن کردن گلدان‌ها صورت می‌گرفت، انجام شد.

جدول ۱، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و لجن فاضلاب مورداستفاده را نشان می‌دهد. طبق این جدول، مقایسه مقادیر عناصر مذکور در لجن مورد آزمایش با استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA, 1993)، نشان می‌دهد که غلظت این عناصر در این لجن فاضلاب در محدوده مجاز بوده و از پتانسیل آلودگی کمی برخوردار است؛ اما با این وجود، کاربرد طولانی مدت لجن می‌تواند موجب انباشته شدن این عناصر در خاک شود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اعمال تیمارها و لجن مورد استفاده

ویژگی	واحد	خاک	لجن فاضلاب	حد مجاز استاندارد USEPA[1]
بافت خاک	-	لوم شنی	-	-
اسیدیته (pH)	-	۷/۸	۶/۴۵	-
هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۸۵۵	۱۶/۲	-
گنجایش تبادل کاتیونی	cmol+/kg	۲۰/۴۴	-	-
ماده آلی	%	۰/۴۹	۴۰/۴۷	-
نیتروژن کل	%	۰/۱۹۶	۳/۶۹	-
پتاسیم	mg/kg	۱۰۵/۵۵	۳۲۸	-
سرب	mg/kg	۰/۷۱	۶۱/۳۵	۳۰۰
نیکل	mg/kg	۰/۴۰	۶۵/۷	۴۲۰
کادمیوم	mg/kg	۰/۰۵۷	۱/۱	۳۹

۱- آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (۱۹۹۳)

برداشت گل آفتابگردان زینتی، ۶۰ روز بعد از کاشت و به گل نشستن گیاه انجام شد. هم‌زمان با برداشت گیاه، از خاک گلدان‌ها نیز نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن و کوبیدن از الک دو میلی‌متری گذرانده شده و برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد آزمایش قرار گرفتند.

بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک به‌ترتیب توسط دستگاه pH متر و دستگاه هدایت‌سنج (McLean, 1982)، درصد کربن آلی به‌روش واکلی و بلاک (Walkley and Black, 1934)، گنجایش تبادل کاتیونی به‌روش استات آمونیوم و استات سدیم در pH=۸/۲ به‌روش شعله‌سنجی (Rhoades, 1982)، نیتروژن کل با استفاده از دستگاه کجلدال (Westeman, 1990) و پتاسیم قابل‌دسترس به‌روش شعله‌سنجی (Knudesh et al., 1982) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در خاک، عصاره‌گیری از خاک با DTPA انجام شد. غلظت فلزات سنگین سرب، نیکل و کادمیم در عصاره‌های خاک توسط دستگاه جذب اتمی (مدل Perkin Elmer 1100B) اندازه‌گیری شد.

در پایان آزمایش، تأثیر استفاده از لجن فاضلاب بر روی پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. بعد از این‌که معنی‌دار بودن پارامترها مشخص شد، میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت عناصر پرمصرف خاک

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس و جدول ۳ مقایسه میانگین‌های اثرات کاربرد لجن روی برخی خصوصیات شیمیایی و غلظت عناصر پرمصرف خاک را در پایان کشت و پس از برداشت گل‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات کاربرد لجن روی برخی خصوصیات شیمیایی و غلظت عناصر پرمصرف خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (SM)					
		pH	EC dS/m	CEC cmol+/kg	OM %	N %	K mg/kg
تیمار	۲	۰/۵۹**	۰/۷۰۵*	۲۷/۹۱*	۳/۷۳**	۰/۰۱**	۴۸۲۱/۱۹**
تکرار	۲	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۰۱۸^{ns}	۰/۶۵^{ns}	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۰۰۳^{ns}	۳۰۹/۶۲^{ns}
خطا	۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴۴	۱/۶۲	۰/۱۲	۰/۰۰۰۴	۲۲۱/۱۶
ضریب تغییرات		۱/۳۳	۶/۵۸	۵/۳۷	۵/۸۴	۷/۳	۱۰/۰۷

ns: فاقد اختلاف معنی‌دار، * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های اثرات کاربرد لجن روی برخی خصوصیات شیمیایی و غلظت عناصر پرمصرف خاک

تیمار	pH	EC dS/m	CEC cmol+/kg	OM %	N %	K mg/kg
شاهد	۷/۸۰^{a}	۰/۸۵۵^{c}	۲۰/۴۴^{b}	۴/۸۷^{c}	۰/۲^{b}	۱۰۵/۵۵^{b}
۱۰ گرم در کیلوگرم	۷/۲۱^{b}	۱/۰۱۱^{b}	۲۴/۰۵^{a}	۶/۰۹^{b}	۰/۲۸^{a}	۱۵۲/۱^{a}
۲۰ گرم در کیلوگرم	۶/۹۳^{c}	۱/۱۶۲^{a}	۲۶/۵^{a}	۷/۱^{a}	۰/۳۲^{a}	۱۸۵/۳۶^{a}

a، b و c: در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

- اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی

کاربرد لجن فاضلاب باعث کاهش اسیدیته خاک در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). بیشترین اسیدیته خاک در تیمار شاهد و کمترین آن مربوط به تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم بود، به‌طوری که اسیدیته خاک از ۷/۸۰ در تیمار شاهد به ۶/۹۳ در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم رسید (جدول ۳) که این احتمالا به‌دلیل اکسیداسیون مواد آلی اضافه‌شده در اثر لجن فاضلاب بوده که با تولید عوامل اسیدی منجر به کاهش pH محیط کشت شده است. نتایج این تحقیق با نتایج Navas et al. (1998) و برجی و همکاران (۱۳۹۰) که گزارش کردند افزودن لجن به خاک باعث کاهش pH خاک شد، همخوانی دارد.

کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش شوری خاک در سطح احتمال پنج درصد شد (جدول ۲). همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، با افزایش میزان لجن فاضلاب به خاک، شوری آن از ۰/۸۵۵ در تیمار شاهد به ۱/۱۶۲ در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم لجن فاضلاب افزایش یافت، که دلیل آن بالا بودن میزان املاح

موجود در لجن فاضلاب است. این نتایج با تحقیقات Miller et al. (1986) و یگانه (۱۳۸۳) که ثابت کردند افزودن لجن فاضلاب به خاک، قابلیت هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهد، مطابقت دارد.

- گنجایش تبادل کاتیونی خاک

جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) دلالت بر این دارد که کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار گنجایش تبادل کاتیونی خاک در سطح پنج درصد شد. مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در جدول ۳ نشان می‌دهد که مصرف لجن فاضلاب باعث افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک از ۲۰/۴۴ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۲۶/۵ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم شده است، اما تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم مشاهده نشد. بنابراین، افزودن لجن فاضلاب به خاک، افزایش کربن آلی و به‌دنبال آن، افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک را موجب شده است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Epestein et al. (1976)، رضایی‌نژاد و افیونی (۱۳۷۹) و زائری (۱۳۸۰) که افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را با کاربرد لجن فاضلاب گزارش کردند، همخوانی دارد.

- ماده آلی خاک

کاربرد لجن فاضلاب باعث افزایش ماده آلی خاک در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). کمترین ماده آلی خاک در تیمار شاهد و بیشترین آن مربوط به تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم بود، به‌طوری که ماده آلی خاک از ۴/۸۷ درصد در تیمار شاهد به ۷/۱ درصد در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم رسید (جدول ۳). لجن فاضلاب حاوی مواد آلی است که باعث افزایش ماده آلی خاک می‌شود. این نتایج با تحقیقات Epestein et al. (1976)، رضایی‌نژاد و افیونی (۱۳۷۹) و زائری (۱۳۸۰) که نشان دادند کاربرد لجن فاضلاب، مقدار کربن آلی خاک را افزایش می‌دهد، همخوانی دارد.

- نیتروژن کل خاک

نتایج تجزیه واریانس نیتروژن کل در جدول ۲ نشان‌دهنده این است که استفاده از لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار مقدار نیتروژن کل در سطح یک درصد شد. مقایسه میانگین‌ها در جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که مقدار نیتروژن کل، با افزایش لجن فاضلاب در هر دو تیمار خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری (در سطح پنج درصد) داشته است، اما تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم مشاهده نشد. بیشترین مقدار نیتروژن کل مربوط به تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم با مقدار ۰/۳۲ درصد و کمترین مقدار آن هم در تیمار شاهد با ۰/۲ درصد بود. دلیل افزایش نیتروژن کل، درصد بالای نیتروژن لجن فاضلاب است که به افزایش ماده آلی خاک در نتیجه کاربرد لجن فاضلاب مرتبط است. نتایج این پژوهش با یافته‌های فتح‌العلومی و همکاران (۱۳۹۴) که در پژوهش خود اثرات لجن فاضلاب شهری را بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک و گیاه و برخی صفات زراعی گندم مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند استفاده از لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار نیتروژن کل در خاک زیر کشت گندم شد، مطابقت دارد.

- پتاسیم خاک

تیمارهای لجن فاضلاب طبق جدول تجزیه واریانس‌ها (جدول ۲) تأثیر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم خاک داشتند. مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در جدول ۳ نیز نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار پتاسیم خاک (در سطح پنج درصد) به‌دلیل استفاده از لجن فاضلاب نسبت به تیمار شاهد است؛ اما تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم مشاهده نشد. مصرف لجن فاضلاب باعث افزایش پتاسیم خاک از ۱۰۵/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۸۵/۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم شده است. دلیل این افزایش به محتوای نسبتاً بالای پتاسیم در لجن فاضلاب برمی‌گردد. Latare et al. (2014)، نشان دادند که کاربرد لجن فاضلاب به مقدار ۴۰ تن در هکتار باعث افزایش معنی‌دار عناصر پرمصرف مانند پتاسیم خاک زیر کشت گندم شد، این نتیجه مشابه نتایج حاصل از پژوهش حاضر بود.

۳-۲- تأثیر لجن فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین در خاک

جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس و جدول ۵ مقایسه میانگین‌های اثرات کاربرد لجن فاضلاب بر میزان فلزات سنگین خاک را در پایان کشت و پس از برداشت گل‌ها را نشان می‌دهد.

استفاده از لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار میزان سرب، نیکل و کادمیوم خاک در سطح یک درصد شد. کم‌ترین میزان سرب، نیکل و کادمیوم خاک در تیمار شاهد و بیش‌ترین آن‌ها مربوط به تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم بود، به‌طوری‌که سرب، نیکل و کادمیوم خاک به‌ترتیب از ۰/۶۶، ۰/۳۸ و ۰/۰۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد، به ۲/۸۴، ۱/۱۸ و ۰/۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار ۲۰ گرم در کیلوگرم افزایش پیدا کرد. با افزایش

میزان لجن فاضلاب در تیمارهای دریافت‌کننده لجن، میزان سرب و نیکل خاک، افزایش معنی‌داری (در سطح پنج درصد) داشته است؛ اما در مورد کادمیوم تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم مشاهده نشد. ضمن این‌که میزان فلزات سنگین (سرب، نیکل و کادمیوم) در خاک نیز از حد مجاز استاندارد (SEPA, 1995) کم‌تر بود. فلز سرب بیش‌ترین غلظت را در بین سایر فلزات نیکل و کادمیوم دارا است؛ زیرا تحرک سرب در خاک از دیگر عناصر پایین‌تر بوده و این عنصر به‌علت بالا بودن میزان مواد آلی و کانی‌های رسی، بیش‌تر در سطح خاک، تثبیت می‌شود (Sipos et al., 2005). Wu et al. (2017) یک آزمایش گلخانه‌ای با اضافه کردن مقادیر متفاوتی از لجن فاضلاب به خاک و کاشت پنج گیاه زینتی انجام داده و نتایج نشان دادند که افزودن لجن، به‌طور چشمگیری محتوای فلزات سنگین (کادمیوم، سرب، مس و غیره) را در خاک افزایش داد. این نتایج با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثرات لجن فاضلاب بر میزان فلزات سنگین (سرب، نیکل و کادمیوم) خاک پس از برداشت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (SM)		
		Pb mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg
تکرار	۲	۰/۰۵ ns	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۰۰۱۹ ns
تیمار	۲	۳/۵۷ **	۰/۴۸ **	۰/۰۰۹ **
خطا	۴	۰/۰۲۲	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۱۳
ضریب تغییرات		۸/۴۳	۱۵/۵۴	۹/۹۱

ns: فاقد اختلاف معنی‌دار، * اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثرات لجن فاضلاب بر میزان فلزات سنگین (سرب، نیکل و کادمیوم) خاک پس از برداشت

تیمار	Pb mg/kg	Ni mg/kg	Cd mg/kg
شاهد	۰/۶۶ c	۰/۳۸ c	۰/۰۵۵ b
۱۰ گرم در کیلوگرم	۱/۷۶ b	۰/۷۸ b	۰/۱۴ a
۲۰ گرم در کیلوگرم	۲/۸۴ a	۱/۱۸ a	۰/۱۶ a
محدوده مجاز در خاک (SEPA, 1995)[۲]	۳۵۰	۶۰	۰/۶

a، b و c: در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد با آزمون دانکن، تفاوت معنی‌داری ندارند.

۴- جمع‌بندی

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن لجن فاضلاب به خاک، منجر به افزایش معنی‌دار برخی خصوصیات شیمیایی خاک مانند هدایت الکتریکی، گنجایش تبادل کاتیونی، ماده آلی، نیتروژن کل و پتاسیم خاک و نیز کاهش معنی‌دار اسیدیته خاک شد که تمامی این پارامترها باعث بهبود حاصلخیزی خاک می‌شوند. بنابراین لجن فاضلاب می‌تواند به‌عنوان کود در خاک‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. اما باتوجه به این‌که لجن فاضلاب دارای عناصر سنگین و شوری زیاد می‌باشد، در کاربرد طولانی مدت نیازمند ملاحظاتی است که باید مدنظر قرار گیرد.

با توجه به این‌که تیمار ۲۰ گرم لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک، در این آزمایش نتایج بهتری را نشان داد، توصیه می‌شود که از این مقدار لجن برای بهبود خصوصیات خاک برای کشت گل آفتابگردان زینتی در شرایط گلخانه‌ای استفاده شود. افزودن لجن فاضلاب باعث افزایش شوری خاک و زه‌آب خارج شده ناشی از آبیاری می‌شود. بدین منظور پیشنهاد می‌شود که شوری خاک و زه‌آب خروجی نیز به‌طور مرتب کنترل شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- US Environmental Protection Agency
2- State Environmental Protection Administration China

۶- مراجع

افیونی، م.، و رضایی نژاد، ی.، (۱۳۷۹)، "اثر مواد آلی بر خواص شیمیایی خاک، جذب عناصر به‌وسیله ذرت و عملکرد آن"، *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*. ۴(۴)، ۱۹-۲۸.

برجی، ح.، امینی، ح.، و عسکری، ا.، (۱۳۹۰)، "تأثیر تیمارهای مختلف لجن فاضلاب بر برخی خصوصیات شیمیایی خاک و

جذب عناصر سنگین در گوجه فرنگی"، *دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران*، تبریز، ۱-۵.

زائری، ع.ر.، (۱۳۸۰)، "بررسی اثرات تجمعی و باقی‌مانده لجن فاضلاب بر حرکت املاح، رطوبت خاک و برخی خواص فیزیکی خاک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

فتح‌العلومی، س.، اصغری، ش.ا.، و گلی کلانپا، ا.، (۱۳۹۴)، "اثرات لجن فاضلاب شهری بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک و گیاه و برخی صفات زراعی گندم"، *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۵(۲)، ۴۹-۷۰.

فرزادکیا، م.، (۱۳۷۸)، "معیارهای بهداشتی استفاده مجدد از لجن فاضلاب شهری در زمین"، *مجله آب و محیط‌زیست*، ۳۴(۱۵)، ۳۳-۳۸.

واثقی، س.، شریعتمداری، ح.، افیونی، م.، و مبلی، م.، (۱۳۸۰)، "اثر لجن فاضلاب بر غلظت تعدادی از عناصر غذایی و ویژگی-های شیمیایی خاک"، *مجله آب و فاضلاب*، ۱۶(۱)، ۱۵-۲۲.

یگانه، م.، (۱۳۸۳)، "اثر لجن فاضلاب بر پارامترهای شوری و فلزات سنگین در پروفیل یک خاک آهکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Bolan, N.S., and Duraisamy, V.P., (2003), "Role of inorganic and organic soil amendments on immobilization and phytoavailability of heavy metals: A review involving specific case studies", *Australian Journal of Soil Research*, 41(3), 533-555.

Epestein, E., Tylor, J.M., and Chaney, R.L., (1976), "Effect of sewage sludge compost applied to soil on some soil pHysical and chemical properties", *Journal of Environmental Quality*, 5(55), 422-426.

Gee, G. W., and Bauder, J.W., (1986). "Particle-size analysis", pp. 383-412, In: Klute, A. (eds.), *Method of Soil Analysis*, Part 1, 2nd ed., *Agronomy Monographs*, Vol. 9, *Agronomy Society of America and Soil Science of America*, Madison WI.

Geravandi, S., Mohammadi, M.J., Goudarzi, G., Ahmadi Angali, K., Neisi, A.K., and Zalaghi, E., (2014), "Health effects of exposure to particulate matter less than 10 microns (PM10), in Ahvaz", *Journal of Qazvin University of Medical Sciences*, 18(5), 45-53.

Guoqing, X., Xiuqin, C., Liping, B., Hongtao, Q., and Haibo, L., (2019), "Absorption, accumulation and distribution of metals and nutrient elements in poplars planted in land amended with composted sewage sludge: A field trial", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109360.

Knudesh, D., Peterson, G.A., and Pratt, P.F., (1982), "Lithium, Sodium and Potassium", In: Page, A.L., (eds.) *Methods of soil Analysis*, Part 2, *Chemical and Microbilogical Properties*, 2nd ed., *Agronomy Monographs*, No. 9, *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison WI.

Latare, A.M., Kumar, O., Singh, S.K., and Gupta, A., (2014), "Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system", *Ecological Engineering*, 69, 17-24.

Laved, R.S., (2006), "Effect of sewage sludge application on soils and sun flower yield: Quality and toxic element accumulation", *Journal of Plant Nutrition*, 29(6), 975-984.

Miller, W.P., Martens, D., and Zelazny, C., (1986), "Effect of sequence in extraction of trace metal from soils", *Soil Science Society of America*, 50(3), 598-601.

Navas, A., Bermudez, F., Machin. J., (1998), "Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols", *Geoderama*, 87(1-2), 123-138.

Rhoades, J.D., (1982), "Cation exchange capacity", pp. 149-157, In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2: *Chemical and Biological Properties*, (2nd ed.), *Soil Science Society of America*, Inc. Publication, USA.

Sadat Taghavirad, S., Davar, H., and Mohammadi, M.J., (2014), "The a study on concentration of BETX vapors during winter in the department of ports and shipping located in one of the southern cities of Iran", *International Journal of Current Life Sciences*, 4(9), 5416-5420.

SEPA, (1995), *Environmental quality standards for soils*, State Environmental Protection Administration, China, GB 15618.

Sipos, P., Nemeth, T., and Mohai, I., (2005), "Distribution and possible immobilization of lead in a forest soil (Luvisol) profile", *Environmental Geochemistry and Health*, 27(1), 1-10.

U.S. Environmental Protection Agency, (1993), *Clean water act*, Section 503, 58(32), USEPA, Washington, DC.

Walkley, A., and Black, C.A., (1934), "An examination of the degtjareff-method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method", *Soil Science*, 37(1), 29-38.

Water Security Agency, (2004), *Land application of municipal sewage sludge guidelines*, EPB 296.

Westeman, R.E.L., (1990), *Soil testing and plant analysis*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Wu, D., Chu, S., Lai, C., Mo, Q., Jacobs, D.F., Chen, X., and Zeng, S., (2017), "Application rate and plant species affect the ecological safety of sewage sludge as a landscape soil amendment", *Urban Forestry and Urban Greening*, 27(6), 138-147.

Yang, G.H., Zhu, G.Y., Li, H.L., Han, X.M., and Li, J.M., (2018), "Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments", *Journal of Integrative Agriculture*, 17(8), 1861-1870.