

## بررسی مقدار و اشکال شیمیایی فلزات سنگین در لجن فاضلاب تهران برای کاربرد در کشاورزی

سمیه ناجی راد<sup>۱</sup>

اکبر قویدل<sup>۲\*</sup>

[Ghavidel@uma.ac.ir](mailto:Ghavidel@uma.ac.ir)

حسینعلی علیخانی<sup>۳</sup>

علی اشرف سلطانی طولارود<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

### چکیده

زمینه و هدف: از بین روش‌های دفع لجن فاضلاب، کاربرد در زمین به دلیل منافع اقتصادی و کاهش هزینه‌های خرید کود برای کشاورزان، ارجح است. ولی در صورتی که لجن حاوی مقادیر بالایی فلزات سنگین و آلودگی میکروبی باشد باعث آلودگی خاک و محیط زیست می‌شود.

روش بررسی: در این تحقیق مقادیر کل، قابل عصاره‌گیری با DTPA و محلول عناصر آهن، روی، سرب، کادمیوم، کبالت، مس، منگنز و نیکل و جمعیت کلی فرم‌ها در لجن تهیه‌شده از سه تصفیه‌خانه شهرک غرب، اکباتان، و شوش تهران اندازه‌گیری شده و با استانداردهای جهانی حد آلاینده‌گی این عناصر و استاندارد تعداد کلی فرم‌ها مقایسه شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در مجموع ۰/۰۱٪ از مجموع کل فلزات مورد مطالعه به شکل محلول، ۱/۳۲٪ به شکل قابل عصاره‌گیری با DTPA و ۹۸/۶۷٪ به اشکال دیگر و غیرقابل دسترس بود. از بین سه نمونه لجن مورد مطالعه، لجن فاضلاب شوش دارای بیشترین مقدار مجموع کل فلزات سنگین (گرم بر کیلوگرم وزن خشک لجن ۳۹/۷۳) بود و بعد از آن به ترتیب تصفیه‌خانه‌های اکباتان (گرم بر کیلوگرم وزن خشک لجن ۲۸/۴۲) و شهرک غرب (گرم بر کیلوگرم وزن خشک لجن ۲۲/۹۵) قرار داشتند.

۱- عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

**بحث و نتیجه‌گیری:** به دلیل بالا بودن مقدار روی و مس در نمونه‌های لجن، در مقایسه با استاندارد، نمونه‌های لجن تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه در گروه کیفیت استثنایی که قابلیت کاربرد در کشاورزی را دارد، قرار نگرفتند. همچنین مقایسه جمعیت کلی فرم‌ها با استانداردها نشان داد که از این نظر نیز نمونه‌های لجن در گروه **B** قرار دارند و کاربرد آن‌ها در کشاورزی با محدودیت‌هایی همراه خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** آلودگی محیط‌زیست، تصفیه فاضلاب، دفع لجن فاضلاب و کلیفرم.

# **The Investigation of Heavy Metal Content and Their Chemical Forms in Tehran Sewage Sludge for Agricultural Application**

**Sumayyah Naji Rad<sup>1</sup>**

**Akbar Ghavidel<sup>2\*</sup>**

[Ghavidel@uma.ac.ir](mailto:Ghavidel@uma.ac.ir)

**Hossein Ali Alikhani<sup>3</sup>**

**Ali Ashraf Soltnai Toolarood<sup>4</sup>**

Admission Date: April 10, 2016

Date Received: January 18, 2017

## **Abstract**

**Background and Objective:** Among sewage sludge disposal options, land application is more preferred because of economic benefits and decreasing fertilizer cost for farmers. However, if sludge has excess amount of heavy metals and microbial infections, land application may lead to soil and environmental pollution.

**Method:** In this research, the amount of total, DTPA-extractable and soluble forms of Fe, Zn, Pb, Cd, Co, Cu, Mn and Ni and population of coliform bacteria were determined in the sludge samples of three different sewage sludge treatment plants including Shahrak-e-Gharb, Ekbatan and Shoush and the results were compared to the world pollution limit standards of these metals and the coliform population.

**Findings:** Results showed that 0.01% of all metals accumulatively in sewage sludge were in soluble form, 1.32% in DTPA-extractable form and 98.67% in other forms, which are unavailable. Shoush sludge had largest amount of sum of eight metals (39.73 gr/kg dry sludge), Ekbatan sludge (28.42 gr/kg dry sludge) and Shahrak-e-Gharb sludge (22.95 gr/kg dry sludge) were the second and third in the rank, respectively.

**Discussion and Conclusion:** Because of high amounts of Zn and Cu in the sludge samples in compare to the standards, the samples from all the treatment plants did not categorized as the exceptional quality which can be used in agriculture. A comparison between the coliform population and the standards showed that in this regard, sludge samples were in B quality and there would be limitations in their land application.

**Keywords:** Coliform, Environmental pollution, Sewage sludge disposal, Wastewater Treatment

---

1-Young Researchers and Elite Club, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Iran.

2- Assistant Prof. Department of Soil Science and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. *\*(Corresponding Author)*

3- Prof. Department of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

4- Associate Prof. Department of Soil Science and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

## مقدمه

توجه به محدود بودن منابع کودهای دامی، استفاده از کودهای آلی دیگر نظیر لجن فاضلاب امری مطلوب به نظر می‌رسد (۷)؛ اما از طرف دیگر، وجود آلاینده‌هایی از قبیل فلزات سنگین و پاتوژن‌ها باعث می‌شود کاربرد لجن در زمین با مشکل مواجه شود (۸). نگرانی در مورد آلودگی فلزات سنگین به دلیل سه ویژگی مهم این مواد یعنی؛ عدم تجزیه زیستی، سمیت برای موجودات خاک‌زی و پایداری و ماندگاری در خاک می‌باشد (۹). فلزات سنگین در مقادیر بالا، اثرات سمی بر موجودات خاک‌زی، گیاهان و حیوانات دارند و با ورود به چرخه غذایی انسان سبب بروز سمیت در بدن انسان نیز می‌شوند. لذا اهتمام کلی، جلوگیری از ورود این عناصر به چرخه غذایی انسان است. از طرف دیگر مقدار فلزات سنگین در لجن فاضلاب بیانگر سمیت آن‌ها نیست و برای تعیین اثرات زیان‌بار فلزات سنگین، باید شکل شیمیایی آن‌ها تعیین شود (۹)؛ لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی مقدار فلزات سنگین و اشکال مختلف شیمیایی آن‌ها در لجن فاضلاب تهیه شده از سه تصفیه‌خانه بزرگ شهر تهران شامل شوش، اکباتان و شهرک غرب و مقایسه مقادیر این فلزات با استانداردهای جهانی حدود سمیت فلزات سنگین و امکان‌سنجی استفاده از لجن فاضلاب تهران برای کاربرد در کشاورزی بود. همچنین جمعیت میکروبی و تعداد باکتری‌های کلیفرم در نمونه‌های لجن تعیین و با استانداردهای موجود مقایسه شده‌اند.

## روش بررسی

## نمونه‌برداری و آماده‌سازی لجن‌های فاضلاب

نمونه‌برداری از لجن فعال<sup>۷</sup> و لجن هوادهی شده<sup>۸</sup>، از ایستگاه‌های لجن فاضلاب شوش، اکباتان و شهرک غرب، در سه نوبت در ماه‌های شهریور، آبان و دی در ساعت ۱۲ ظهر انجام شد. انتخاب تصفیه‌خانه‌ها به نحوی بود که نقاط مختلف (شمال، مرکز و جنوب) شهر تهران تحت پوشش قرار گیرد. تصفیه‌خانه‌های مذکور از لحاظ حجم تصفیه فاضلاب از بزرگ‌ترین تصفیه‌خانه‌های تهران می‌باشند. نمونه‌های تهیه شده

با پیشرفت علم و فناوری و ارتقا سطح رفاه عمومی، مواد زاید دفعی نیز به مرور زمان افزایش پیدا کرده است. از جمله این مواد زاید، فاضلاب<sup>۱</sup> است. سالانه حجم بالایی از فاضلاب در مناطق شهری و صنعتی تولید می‌شود که بایستی قبل از ورود به محیط‌زیست تصفیه شوند. یکی از تبعات حاصل از تصفیه فاضلاب تولید سالانه میلیون‌ها تن لجن فاضلاب در دنیا تولید می‌باشد (۱). تولید سالانه لجن در دنیا رو به افزایش بوده و از جمله‌گزینه‌های پیش‌رو برای دفع لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه‌ها<sup>۲</sup>، می‌توان کاربرد در زمین<sup>۳</sup>، دفن در زمین<sup>۴</sup>، سوزاندن<sup>۵</sup> و ریختن در اقیانوس<sup>۶</sup> را نام برد (۲). از بین گزینه‌های یادشده، کاربرد در زمین به دلیل منافع اقتصادی و محیط‌زیستی برای دفع، دارا بودن عناصر غذایی موردنیاز گیاه و در نتیجه کاهش هزینه‌های خرید کود برای کشاورزان، نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد (۳). گزارش‌های مختلف حاکی از آن است که لجن فاضلاب غنی از انواع مغذی‌ها بوده (۴) و می‌تواند به‌عنوان جایگزین برای کودهای کامل گران‌قیمت، کاربرد داشته باشد (۴). این کود به دلیل رهاسازی کندتر مواد مغذی برای گیاه، به کودهای غیر آلی برتری دارد؛ این شکل از مواد مغذی، حلالیت کم‌تری در آب داشته و از این رو کم‌تر در معرض آب‌شویی و ورود به آب‌های زیرزمینی قرار می‌گیرند (۵). کاربرد لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی، جنگل‌ها و یا اراضی دیگر، به‌عنوان یکی از بهترین راه‌های بازگرداندن عناصر غذایی به خاک و افزایش قدرت باروری خاک می‌باشد (۴) به‌نحوی که افزودن این کود آلی به خاک موجب افزایش محتوی ماده آلی، بهبود شرایط فیزیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و نیز افزایش مواد غذایی خاک می‌شود (۶).

خاک‌های مناطق مرکزی ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، اغلب دارای کم‌تر از یک درصد ماده آلی می‌باشند. بنابراین با

- 1- wastewater
- 2- wastewater treatment plant
- 3- land application
- 4- landfill
- 5- incineration
- 6- ocean dumping

- 7- activated sludge
- 8- aerated sludge

مورد مطالعه با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu AA-670) مورد استفاده قرار گرفت (۱۰).

#### اندازه‌گیری مقدار قابل عصاره‌گیری فلزات سنگین در لجن‌های فاضلاب

بدین منظور پنج گرم از هر نمونه لجن فاضلاب توزین و ۲۵ میلی‌لیتر از محلول یک نرمال DTPA (Diethylene Triamine) Pentaacetic Acid)، (با نسبت ۵: ۱) به آن اضافه گردید. نمونه‌ها پس از تکان دادن به مدت دو ساعت (با استفاده از همزن با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه)، به کمک قیف بوختر و کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲، صاف و مقدار قابل عصاره‌گیری فلزات سنگین در عصاره حاصل با استفاده از دستگاه جذب اتمی قرائت گردید (۱۴).

#### اندازه‌گیری شکل محلول فلزات سنگین در لجن‌های فاضلاب

جهت اندازه‌گیری شکل محلول فلزات سنگین، به پنج گرم از لجن خشک ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه گردید و نمونه‌ها مشابه روش ذکر شده در قسمت ۲-۴ صاف شده و مقدار محلول فلزات سنگین با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید.

قابل ذکر است که در این آزمایش به منظور قرائت مقدار واقعی عناصر و به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری در هر نمونه، از محلول‌های مورد استفاده (DTPA، اسیدنیتریک، اسیدپرکلریدریک و آب مقطر) نمونه‌هایی تحت عنوان شاهد (به ترتیب شاهد ۱، شاهد ۲، شاهد ۳ و شاهد ۴) در سه تکرار تهیه و مقادیر فلزات ذکر شده در آن‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی قرائت و مجموع مقادیر به دست آمده از هر یک از نمونه‌ها کسر گردید.

#### اندازه‌گیری شاخص‌های زیستی لجن‌های فاضلاب

از ویژگی‌های زیستی، تعداد کل ریزجانداران در لجن با استفاده از روش بیش‌ترین تعداد محتمل<sup>۱</sup> و تعداد واحدهای تشکیل کلنی<sup>۲</sup> و شمارش باکتری‌های کلیفرم با استفاده از روشی فرضی تاییدی انجام شد (۱۵).

در ظروف پلی‌اتیلنی جمع آوری شده و به آزمایشگاه منتقل گردید.

#### اندازه‌گیری خواص شیمیایی و مقدار عناصر غذایی در لجن‌های فاضلاب

بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه، هدایت الکتریکی (EC) و pH هر یک از نمونه‌ها با استفاده از EC متر (Jenway4230)، و pH متر (Orion 920) قرائت گردید (۱۰). همچنین مقدار کربن آلی (۱۱)، نیتروژن کل (۱۲)، فسفر قابل جذب (۱۳)، پتاسیم محلول و تبادلی، کلسیم محلول و تبادلی، منیزیم محلول و تبادلی و سدیم محلول و تبادلی (۱۰) در نمونه‌های لجن- فاضلاب تعیین شد. سپس نمونه‌ها بر بسترهای پلاستیکی مناسب در دمای اتاق به مدت ۷۲ ساعت هوا خشک و با آسیاب دستی پودر شدند. لازم به ذکر است که در حین آزمایش‌ها، تمام اجزایی که در تماس با لجن قرار داشتند از جنس پلاستیک بودند تا احتمال ورود فلزات سنگین از طریق ساییدگی قطعات فلزی وجود نداشته باشد. نمونه‌های لجن آسیاب شده در ظروف پلی‌اتیلنی ریخته شده و تا شروع آزمایش‌ها در دمای ۴°C در یخچال نگهداری شدند تا واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی در داخل لجن به کمترین حد ممکن برسد.

#### تعیین مقدار کل فلزات سنگین در لجن‌های فاضلاب

به منظور اندازه‌گیری مقدار کل عناصر آهن، روی، سرب، کادمیم، کبالت، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های لجن فاضلاب تهیه شده، پنج گرم از هر نمونه توزین و ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه گردید. نمونه تا خروج بخارات غلیظ دی‌اکسید نیتروژن با استفاده از حمام آب گرم حرارت داده شدند. در مرحله بعد ۱۰ میلی‌لیتر اسید پرکلریدریک غلیظ به همراه ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک به هر نمونه اضافه و عمل حرارت دهی در حمام آب گرم تا حصول محلول زلال انجام پذیرفت. محلول شفاف حاصل با استفاده از سیستم قیف بوختر و کاغذهای صافی واتمن شماره ۴۲، صاف و پس از به رساندن حجم آن به ۵۰ میلی‌لیتر، جهت اندازه‌گیری مقدار کل فلزات

1- Most Probable Number (MPN)  
2- Colony Forming Unit (CFU)

## تجزیه و تحلیل آماری

مقایسه داده‌های حاصل با استانداردهای موجود، با استفاده از آزمون t در نرم‌افزار SPSS و پیرایش ۲۲ انجام گردید.

## یافته‌ها

نتایج حاصل از اندازه‌گیری pH و EC نمونه‌های لجن‌فاضلاب مورد بررسی نشان داد که pH در حد خنثی بوده و مقدار املاح

محلول در داخل لجن‌فاضلاب پایین است (جدول ۱). در این پژوهش یافته‌های حاصل از ارزیابی میزان ماده آلی، وضعیت عناصر غذایی شامل نیتروژن کل، فسفر قابل‌دسترس و شکل محلول و قابل‌تبادل (تبادلی) عناصر پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم نشان داد که نمونه‌های لجن از لحاظ عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در وضعیت مناسبی قرار دارند (جدول ۲).

## جدول ۱- pH و EC نمونه‌های لجن‌فاضلاب مورد مطالعه

Table 1-The amount of pH and EC in the studied sewage sludge samples

نمونه لجن	pH	EC (dS/m)
اکباتان	۶/۸	۰/۷
شهرک غرب	۶/۸	۱/۰
شوش	۷/۰	۱/۳

## جدول ۲- مقدار عناصر غذایی در نمونه‌های لجن‌فاضلاب تصفیه‌خانه‌های اکباتان، شهرک غرب و شوش

Table 2- The amount of nutrients in sludge samples of Ekbatan, Shahrak-e-Gharb and Shus sewage treatment plants

نمونه لجن	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر قابل دسترس	پتاسیم		کلسیم		منیزیم		سدیم	
				محلول	تبادلی	محلول	تبادلی	محلول	تبادلی	محلول	تبادلی
میلی‌گرم در کیلوگرم											
درصد											
اکباتان	۲۶/۳	۵/۵۳	۵۷۰۰	۳۵۶۰	۳۲	۱۹۳۰	۸۲۴	۲۷۱۰	۶۶۵	۶۴۰	۱۶
شهرک غرب	۲۶/۶	۵/۸۷	۱۳۶۳	۳۲۸۰	۱۰۲	۱۸۲۶	۷۶۹	۱۸۱۲	۳۳۹	۱۵۶۰	۲۳
شوش	۲۸/۵	۶/۰۲	۶۱۵۴	۲۷۶۰	۸۶	۱۸۳۲	۷۸۵	۱۷۶۴	۳۱۷	۲۰۸۰	۸۹

## مقدار فلزات سنگین در نمونه‌های لجن‌فاضلاب

مقدار مجموع فلزات سنگین مورد مطالعه در لجن‌فاضلاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده (جدول ۳) نشان می‌دهد که بین نمونه‌های لجن‌فاضلاب تفاوت معنی‌داری از لحاظ مقدار مجموع فلزات سنگین وجود دارد و بیش‌ترین مقدار فلزات به ترتیب در لجن‌فاضلاب شوش، شهرک غرب و اکباتان مشاهده شد. با این وجود عکس این موضوع در مورد شکل محلول فلزات سنگین صادق است و لجن‌فاضلاب اکباتان دارای بیش‌ترین مقدار شکل محلول فلزات سنگین بوده و تفاوت معنی‌داری به ترتیب با نمونه‌های لجن شهرک غرب و شوش دارد. این وضعیت در مورد شکل قابل‌عصاره‌گیری فلزات سنگین نیز مشاهده می‌شود.

جدول ۳- مقدار و شکل شیمیایی کل فلزات سنگین در نمونه‌های لجن

Table 3- The amount of chemical form of total heavy metals in the sludge samples

کل	شکل‌های دیگر	قابل عصاره گیری	محلول	نمونه لجن
				(میلی گرم در کیلوگرم لجن خشک)
۲۸۴۱۹ <sup>c</sup>	۲۷۷۸۲ <sup>b</sup>	۶۳۱ <sup>a</sup>	۴/۵۷ <sup>a</sup>	اکباتان
۲۲۹۴۸ <sup>b</sup>	۲۲۵۰۶ <sup>c</sup>	۴۳۷ <sup>b</sup>	۳/۷۴ <sup>b</sup>	شهرک غرب
۳۹۷۳۱ <sup>a</sup>	۳۹۵۹۹ <sup>a</sup>	۱۳۰ <sup>c</sup>	۱/۹۸ <sup>c</sup>	شوش

اعداد با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشند.

جزءبندی شیمیایی فلزات سنگین در لجن فاضلاب

لجن در شکل ۱ آمده است. با توجه به جداول ۴، ۵ و ۶ و نیز شکل ۱، ملاحظه می‌شود که اغلب فلزات سنگین مطالعه شده در نمونه‌های لجن فاضلاب هر سه تصفیه‌خانه به صورت غیرقابل دسترس بوده و مقدار شکل محلول و قابل عصاره‌گیری آن‌ها پایین است. بیشترین مقدار شکل قابل دسترس در مورد سرب مشاهده شد. کمترین میزان شکل قابل دسترس مربوط به فلز مس بود. از طرفی فلزات نیکل و کبالت بیشترین درصد محلول را داشتند (شکل ۱). در مورد بقیه فلزات سنگین نیز مقدار شکل قابل دسترس کم‌تر از ۱۰ درصد کل این فلزات بود. همچنین نتایج جداول ۴، ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در هر سه نمونه لجن فاضلاب، آهن، روی و مس بیشترین مقدار را دارند.

مقدار شکل‌های قابل دسترس (مجموع مقدار محلول و قابل عصاره گیری)، غیرقابل دسترس و کل فلزات سنگین در نمونه‌های لجن فاضلاب اکباتان، شهرک غرب و شوش به ترتیب در جداول ۴، ۵ و ۶ ارایه شده‌اند. مقدار کل هر کدام از فلزات سنگین با استانداردهای EPA و اتحادیه اروپا با آزمون t مقایسه گردیده است؛ در صورتی که تفاوت معنی‌داری بین مقدار فلزات سنگین و استاندارد مشاهده شده باشد این اعداد به‌عنوان داده‌های معنی‌دار در جدول مشخص گردیده است. در صورتی که مقدار فلزات به طور معنی‌داری از استاندارد پایین‌تر باشد، معنی‌دار بودن نمایش داده نشده است. همچنین درصد هر کدام از شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین در هر سه نمونه

جدول ۴- مقدار و شکل شیمیایی فلزات سنگین در لجن تصفیه‌خانه اکباتان (میلی گرم بر کیلوگرم لجن خشک)

Table 4. The amount and chemical form of heavy metals in sludge sample of Ekbatan sewage treatment plant (mg/kg dry weight)

استاندارد EU <sup>†</sup> (۱۶)	استاندارد EPA <sup>†</sup> (۱۷ و ۱۸)	کل	شکل‌های دیگر	قابل دسترس		فلز سنگین
				قابل عصاره گیری	محلول	
-	-	۲۳۵۸۸	۲۳۲۲۱	۳۶۴	۱/۶۷	آهن
۷۵۰۰	۲۸۰۰	۲۷۹۴ <sup>**</sup>	۲۵۶۱	۲۳۰	۲/۲۵	روی
۸۴۰	۳۰۰	۲۲/۵	۱۱/۱	۱۱/۴	۰/۰۰	سرب

کادمیوم	۰/۰۰	۰/۲۴۰	۴/۰۸	۴/۳۲	۳۹	۸۵
کیالت	۰/۱۵۰	۰/۸۵۰	۳۴/۹	۳۵/۹	-	-
مس	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۵۷۲	۱۵۷۲**	۱۵۰۰	۴۳۰۰
منگنز	۰/۴۲۰	۲۴/۲	۳۷۱	۳۹۶	-	-
نیکل	۰/۰۹۰	۰/۴۹۰	۳/۹۱	۴/۴۹	۴۲۰	۴۲۰

\*\* معنی دار در سطح احتمال یک درصد (۱۶-۱۸) †

جدول ۵- مقدار و شکل شیمیایی فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه شهرک غرب (میلی گرم بر کیلوگرم لجن خشک)

Table 5. The amount and chemical form of heavy metals in sludge sample of Shahrak-e-Gharb sewage treatment plant (mg/kg dry weight)

فلز سنگین	قابل دسترس		شکل های دیگر	کل	استاندارد	استاندارد
	محلول	قابل عصاره گیری			EU	EPA
					(۱۶)	(۱۷ و ۱۸)
آهن	۰/۸۴۰	۱۲۰	۱۷۴۶۶	۱۷۵۸۸	-	-
روی	۲/۲۵	۲۵۶	۲۶۵۳	۲۹۱۱**	۷۵۰۰	۲۸۰۰
سرب	۰/۰۰۰	۵/۳۵	۳۱/۳	۳۶/۷	۸۴۰	۳۰۰
کادمیوم	۰/۰۱۰	۱/۰۱	۸/۱۴	۹/۱۵	۸۵	۳۹
کیالت	۰/۰۰۰	۰/۲۱۰	۹/۳۲	۹/۵۳	-	-
مس	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۲۱۱	۱۲۱۱	۴۳۰۰	۱۵۰۰
منگنز	۰/۴۶۰	۴۹/۸	۱۰۴۷	۱۰۹۷	-	-
نیکل	۰/۲۰۰	۴/۷۷	۷۹/۳	۸۴/۲	۴۲۰	۴۲۰

\*\* معنی دار در سطح احتمال یک درصد

جدول ۶- مقدار و شکل شیمیایی فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه شوش (میلی گرم بر کیلوگرم لجن خشک)

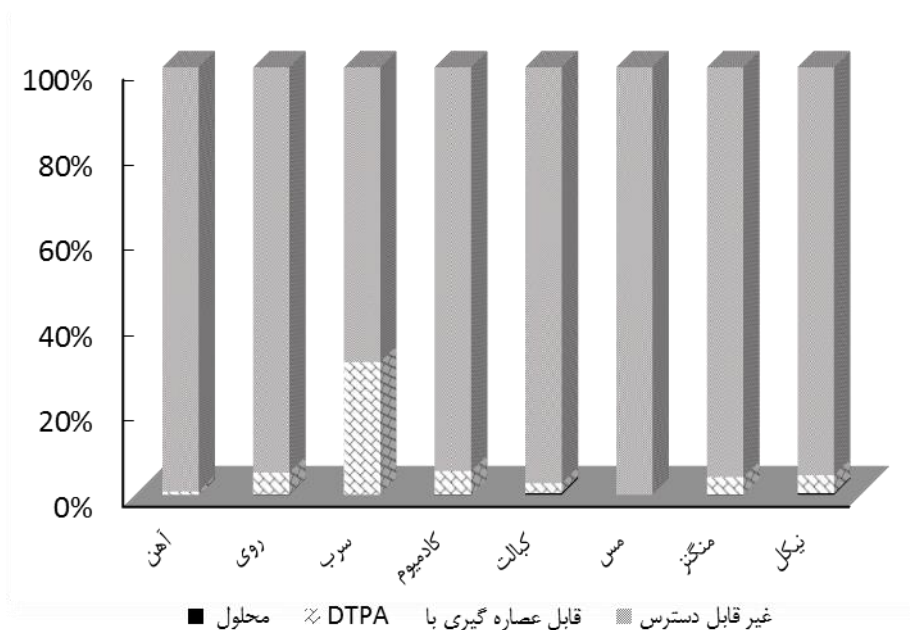
Table 6. The amount and chemical form of heavy metals in sludge sample of Shus sewage treatment plant (mg/kg dry weight)

فلز سنگین	قابل دسترس		شکل های دیگر	کل	استاندارد	استاندارد
	محلول	قابل عصاره گیری			EU	EPA
					(۱۶)	(۱۷ و ۱۸)
آهن	۱/۲۳	۲/۴۵	۲۹۳۴۹	۲۹۳۵۲	-	-
روی	۰/۲۵۰	۸۵/۸	۵۴۷۲	۵۵۵۸**	۷۵۰۰	۲۸۰۰
سرب	۰/۰۰۰	۱۸/۸	۳۶/۷	۵۵/۵	۸۴۰	۳۰۰
کادمیوم	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۹/۲۷	۹/۲۷	۸۵	۳۹



-	-	۱۰/۷	۱۰/۴	۰/۲۴۰	۰/۰۷۰	کبالت
۴۳۰۰	۱۵۰۰	۳۸۰۸**	۳۸۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	مس
-	-	۸۱۴	۷۹۴	۱۹/۶	۰/۰۰۰	منگنز
۴۲۰	۴۲۰	۱۲۱	۱۱۷	۳/۵۲	۰/۴۴۰	نیکل

\*\* معنی دار در سطح احتمال یک درصد



شکل ۱- درصد اجزای مختلف فلزات سنگین در مجموع هر سه نمونه لجن فاضلاب

Figure 1. Percentage of different fractions of heavy metals in the three sewage sludge samples

### مشخصات بیولوژیکی لجن فاضلاب

ریزجانداران در هر دو روش اندازه گیری در لجن فاضلاب شهرک غرب بیش تر از دو نمونه دیگر می باشد؛ و نیز تعداد کل در روش «بیشترین تعداد محتمل»، در لجن شوش پایین تر از دو نمونه دیگر است.

از بین ویژگی های بیولوژیکی لجن فاضلاب، تعداد کل ریز موجودات با دو روش بیشترین تعداد محتمل و شمارش واحدهای تشکیل کلنی و نیز تعداد باکتری های کلیفرم شمارش گردیده است (جدول ۷). نتایج نشان داد که تعداد کل

جدول ۷- نتایج شمارش تعداد ریزجانداران در لجن فاضلاب تصفیه خانه ها

Table 7. The results microorganism enumeration in the sludge samples of the treatment plants

تعداد کلیفرم ها (Number/ml)	تعداد باکتری (Number/ml)	تعداد باکتری (CFU/ml)	نمونه لجن
۱۰۰۰۰	$2/3 \times 10^7$	$1/2 \times 10^4$	اکباتان
۹۰۰۰	$4/9 \times 10^7$	$3 \times 10^4$	شهرک غرب
۱۱۰۰۰	$7/9 \times 10^5$	$2/7 \times 10^4$	شوش

### بحث و نتیجه‌گیری

داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که نمونه‌های لجن‌فاضلاب از لحاظ pH در حدود خنثی می‌باشند که این مورد بر روی انحلال فلزات سنگین تأثیرگذار می‌باشد، به این صورت که اغلب فلزات در pH اسیدی حلالیت بیشتری دارند و با افزایش pH، میزان حلالیت آن‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند و در pH قلیایی به کم‌ترین حد خود می‌رسد (۱۴). از لحاظ قابلیت هدایت الکتریکی نیز، نمونه‌های لجن در حد خیلی پایینی قرار دارند که این مساله حاکی از آن است که مقدار املاح محلول در آن‌ها خیلی پایین است که نتایج اندازه‌گیری شکل محلول فلزات سنگین این موضوع را تأیید می‌کند. مقدار عناصر مغذی در نمونه‌های لجن نشان می‌دهد که نمونه‌های لجن مورد مطالعه می‌توانند به عنوان کود آلی مناسب جهت بهبود وضعیت حاصل خیزی و باروری خاک مورد استفاده قرار گرفته و جایگزینی برای کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی باشند.

علت استفاده از شکل قابل عصاره‌گیری با DTPA، این است که این شکل نشان‌دهنده «شکل قابل‌دسترس برای گیاه» می‌باشد (۱۴). لذا هر چه مقدار این شکل بیشتر باشد، خطر آلودگی گیاه و در نتیجه چرخه غذایی انسان با فلزات سنگین بیشتر خواهد بود؛ به عبارت دیگر مقدار «شکل محلول» و «شکل قابل عصاره‌گیری»، نسبت به مقدار کل فلزات سنگین (در صورت استفاده در خاک به عنوان کود)، حایز اهمیت بیشتری است.

از بین فلزات مورد بررسی، آهن، روی، مس، منگنز، نیکل و کبالت جزو عناصر ضروری برای رشد گیاه و ریزجانداران خاک زی می‌باشند؛ بنابراین وجود این عناصر در لجن‌فاضلاب می‌تواند موجب افزایش حاصل‌خیزی خاک و بهبود تغذیه گیاه شود. در صورتی که مقدار این فلزات در لجن‌فاضلاب کم‌تر از حد استاندارد باشد و موجب بروز سمیت برای گیاه و موجودات دیگر نشود، افزودن لجن حاوی این فلزات امری مطلوب خواهد بود. با توجه به این که وضعیت عناصر غذایی کم‌مصرف (شامل فلزات ذکر شده) در اغلب خاک‌های کشور نامناسب بوده و کمبود آن‌ها مشاهده می‌شود، لذا کاربرد لجن‌فاضلاب می‌تواند مقداری از نیاز گیاه به این عناصر غذایی را مرتفع نماید (۱۹).

یافته‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که به طور کلی اغلب فلزات سنگین در لجن‌فاضلاب بیش‌تر به صورت غیرقابل‌دسترس هستند (شکل ۱). در نمونه‌های لجن‌فاضلاب مورد مطالعه کم‌تر از ۱۰٪ از کل مقدار فلزات سنگین، به جز سرب، به صورت اشکال قابل‌دسترس برای موجودات زنده (مجموع شکل محلول و شکل قابل عصاره‌گیری) بود. از بین فلزات مورد مطالعه سرب با داشتن حدود ۳۱٪ شکل قابل‌دسترس، بیش‌ترین مقدار شکل قابل‌دسترس را به خود اختصاص داده است. نتایج مشابه این تحقیق توسط محققان مختلف گزارش شده است (۲۲-۲۰).

با توجه به این‌که آسیب ناشی از حضور فلزات سنگین در محیط‌زیست که برای موجودات زنده بروز می‌کند بر اساس شکل قابل‌دسترس فلزات سنگین است، لذا به نظر می‌رسد که اگر سرب در مقادیر بالا در داخل لجن‌فاضلاب وجود داشته باشد، احتمالاً باعث بروز خطرات محیط‌زیستی بیش‌تری می‌شود. همچنین روی و کادمیوم نیز مقادیر بالاتری از شکل قابل‌دسترس فلزات سنگین را نشان می‌دهند (شکل ۱). با توجه به این‌که کادمیوم و سرب سمی‌ترین فلزات مورد مطالعه در این تحقیق هستند؛ بنابراین به نظر می‌رسد که علت بروز سمیت ناشی از فلزات سنگین موجود در لجن‌فاضلاب بیش‌تر به دلیل قابل‌دسترس بودن اشکال سمی عناصر مضر مثل کادمیوم و سرب است (۹).

با وجود مقادیر بالای فلزات در لجن‌فاضلاب شوش، مقدار فلزات محلول در آن کم‌تر از دو نمونه دیگر است. بیش‌ترین عناصر قابل عصاره‌گیری و درصد جزء قابل عصاره‌گیری از فلزات سنگین در لجن‌فاضلاب تهیه شده از تصفیه‌خانه اکباتان مشاهده گردید. بر اساس نتایج حاصل می‌توان اظهار نمود که ترکیبات عناصر موجود در لجن‌فاضلاب تصفیه‌خانه اکباتان احتمالاً از نوع محلول‌تر و به سهولت قابل عصاره‌گیری می‌باشد. این در حالی است که در لجن‌فاضلاب تهیه شده از تصفیه‌خانه شوش با وجود مقادیر بالای فلزات سنگین، تنها ۳۲٪ از این مقدار قابل عصاره‌گیری می‌باشد. نتایج مشابهی در مورد شکل محلول بسیار کم فلزات سنگین در لجن‌فاضلاب توسط محققان دیگر گزارش شده است (۸). نتایج یک پژوهش دیگر نشان داد

فلزات سنگین در آن کم‌تر از حد استاندارد بوده است (۲۴). در عین حال نتایج نشان داد که مقدار آرسنیک بیش‌تر از حد مجاز آلاینده‌گی می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که کیفیت لجن فاضلاب شهری با توجه به منشأ لجن و موقعیت جغرافیایی آن متفاوت است و در صورت انجام پژوهش روی نمونه‌های لجن فاضلاب دیگر (شهرهای دیگر)، احتمالاً نتایج متفاوتی حاصل خواهد گردید.

نکته دیگری که در صورت کاربرد لجن فاضلاب در زمین‌های کشاورزی باید مدنظر قرار گیرد این است که با افزودن مداوم لجن فاضلاب به خاک ممکن است تجمع فلزات سنگین مشاهده گردد. به عبارت دیگر در صورت استفاده از لجن در زمین‌های کشاورزی ممکن است مشکل سمیت ناشی از فلزات سنگین پس از چند سال بروز کند (۲۴). از طرف دیگر استفاده از لجن فاضلاب این تصفیه‌خانه‌ها باید با احتیاط صورت گیرد و pH خاک نیز مورد توجه قرار گیرد زیرا انحلال و قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک تا حد زیادی به pH خاک بستگی دارد و اثرات سمی فلزات سنگین نه تنها به غلظت این عناصر بستگی دارد بلکه به دسترسی زیستی این عناصر توسط گیاه، که عموماً در حالت محلول (pH اسیدی) بیش‌تر است، نیز بستگی دارد (۲۵ و ۲۶).

که فلزات سنگین در لجن فاضلاب به شکل کمپلکس با مواد آلی و غیر محلول می‌باشند که این امر باعث می‌شود به مقدار بسیار ناچیزی در معرض عصاره‌گیری قرار گیرند. شکل محلول این عناصر، درصد بسیار پایینی از کل محتوی فلزات سنگین را در بر می‌گیرد که می‌تواند به دلیل وجود نمک‌های معدنی که حلالیت پایینی دارند و درگیر شدن یون‌های فلزی در توده مواد آلی، به صورت پیوندهای پایدار با حلالیت کم باشد (۲۳).

استانداردهای مقدار فلزات سنگین در لجن فاضلاب برای کاربرد در زمین بر اساس استاندارد اتحادیه اروپا (۱۶) و سازمان حفاظت محیط‌زیست امریکا (۱۷ و ۱۸) در جدول ۸ ارایه گردیده است. برای عناصر آهن، کبالت و منگنز مقدار استاندارد در لجن فاضلاب ارایه نشده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار روی و مس در لجن اکباتان و شوش و مقدار روی در لجن شهرک غرب به طور معنی‌داری بالاتر از استاندارد می‌باشد. یعنی با توجه به این مقایسه می‌توان اظهار داشت که هیچ کدام از سه نمونه لجن تصفیه‌خانه‌ها در گروه لجن با کیفیت عالی قرار نمی‌گیرند؛ زیرا حداقل در مورد فلز روی در هر سه نوع لجن مقادیر بالاتر از استاندارد مشاهده می‌شود. رحمانی و همکاران در سال ۱۳۹۳ تحقیق مشابهی روی لجن فاضلاب اصفهان انجام دادند و مشخص گردید که مقدار

#### جدول ۸- استانداردهای فلزات سنگین در لجن فاضلاب برای کاربرد در زمین

Table 8- Sewage sludge heavy metal content standards for land application

استاندارد	روی	سرب	کادمیوم	مس	نیکل
غلظت در لجن با کیفیت عالی EPA (ppm)*	۲۸۰۰	۳۰۰	۳۹	۱۵۰۰	۴۲۰
حد نهایی در لجن EU (ppm)*	۷۵۰۰	۸۴۰	۸۵	۴۳۰۰	۴۲۰
حد سالانه آلاینده EPA (کیلوگرم بر هکتار بر سال)*	۱۴۰	۱۵	۱/۹	۷۵	۲۱
حد استاندارد برای خاک (ppm)*	۱۵۰-۳۰۰	۵۰-۳۰۰	۱-۳	۵۰-۱۴۰	۳۰-۷۵

\*(۱۶-۱۸)

از آن جا که وجود تعداد زیادی ریزجانداران در لجن فاضلاب ممکن است باعث بر هم خوردن تعادل اکولوژیکی خاک شود (۲۷)؛ لذا می‌بایست این معیار پیش از به کار بردن لجن فاضلاب در خاک، مورد توجه قرار گیرد. تفاوت میان اندازه‌گیری‌های این

دو روش بیان‌گر تفاوت میان تعداد کل ریزجانداران (اعم از زنده یا غیرزنده) و تعداد کل ریزجانداران زنده و قابل تکثیر می‌باشد. روش «بیش‌ترین تعداد محتمل» بر پایه کدورت سنجی می‌باشد ولی روش «اندازه‌گیری واحدهای تشکیل کلنی» بر

طریق بتوان یک منبع ماده آلی با هزینه کم به دست آورد؛ این منبع ماده آلی، می تواند راه گشای بسیاری از مشکلات خاک های بیابانی و فقیر از مواد آلی در ایران باشد.

#### منابع

1. Babel, S., del Mundo Dacera, D., 2006. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: a review. *Waste Management*. Vol. 26(9), pp. 988-1004.
2. Metcalf, E., Tchobanoglous, G., 2003. *Wastewater engineering: treatment disposal reuse*: McGraw-Hill; Boston. USA. 384 p.
3. Smith, SR., 1996. *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*: CAB International.
4. Wong, JW., Xiang, L., Gu, XY., Zhou, LX., 2004. Bioleaching of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge using FeS<sub>2</sub> as an energy source. *Chemosphere*. Vol. 55(1), pp. 101-7.
5. EPA832. 2000. Biosolids technology fact sheet: land application of biosolids. Available from, <<http://www.epa.gov>>.
6. Epstein, EL., Taylor, JM., Chancy, RL., 1976. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 5(4), pp. 422-6.
7. Bhangoo, MS., Day, KS., Sudanagunta, VR., Petrucci, VE., 1988. Application of poultry manure influences Thompson seedless grape production and soil properties. *Hort. Science (USA)*.
8. Wong, JW., Selvam, A., 2006. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere*. Vol. 63(6), pp. 980-6.
9. Dutta, S., 2002. *Environmental Treatment Technologies for Hazardous and Medical*

مبنای سلول های زنده میکروبی است که توانایی تشکیل کلنی را داشته باشند).

اگر تعداد ریزجانداران در لجن فاضلاب بیش از جمعیت باکتری های خاک باشد، افزودن لجن فاضلاب به خاک باعث ورود شمار زیادی از ریزجانداران غیربومی به خاک می شود که بر هم خوردن تعادل اکولوژیکی و زنجیره غذایی خاک را در پی دارد (۲۷).

مقایسه تعداد کلی فرم ها در داخل نمونه های لجن فاضلاب با استاندارد EPA (۲۸) نشان می دهد که هر سه نمونه لجن فاضلاب از لحاظ کیفیت در گروه B قرار می گیرند و کاربرد آنها با محدودیت هایی همراه است. طبق این استاندارد اگر تعداد کلی فرم ها کم تر از ۱۰۰۰ عدد باشد لجن دارای کیفیت A و اگر تعداد کلی فرم بین ۱۰۰۰ تا ۲,۰۰۰,۰۰۰ عدد باشد کیفیت B و در نهایت در صورت وجود تعداد کلی فرم بیش از این مقدار لجن دارای کیفیت C بوده و در مزارع کشاورزی غیر قابل استفاده خواهد بود (۲۸).

#### نتیجه گیری کلی

در نهایت می توان این گونه نتیجه گیری نمود به دلیل وجود مقادیر بالایی از فلزات سنگین به ویژه فلزات روی و مس، هیچ کدام از نمونه های لجن تصفیه خانه های اکباتان، شهرک غرب و شوش کیفیت لازم برای کاربرد بدون محدودیت در زمین های کشاورزی را ندارند و در صورت الزام به کاربرد آنها باید دستورالعمل های مربوطه مد نظر قرار گیرد. در عین حال مقدار عناصر مغذی در نمونه های لجن در حد بالایی بود که نشان از پتانسیل لجن فاضلاب برای کاربرد در کشاورزی دارد. بنابراین در صورت حذف یا کاهش فلزات سنگین در لجن فاضلاب می توان استفاده از آن در کشاورزی را توصیه نمود. از طرف دیگر تعداد کلی فرم ها در نمونه های لجن فاضلاب نیز بیش تر از حد استاندارد بوده و کاربرد آن در کشاورزی مستلزم رعایت محدودیت های مورد اشاره در استاندارد می باشد. لذا امید است در سال های آتی به این مشکل محیط زیستی، توجه بیشتری گردد و با به کارگیری فناوری های جدید در «زیست پالایی» لجن فاضلاب، بتوان آن را از نظر فلزات سنگین اصلاح و پالایش کرد و از این

- Journal of Water and Wastewater. Vol. 25 (5), 76-85. (In Persian)
20. Ali, S.M., 1994. Chemical and biological heavy metal dissolution process for sewage sludge. Master's Thesis. Asian institute of technology. Pathumthani, Thailand.
  21. Oake, R.J., Booker, C.S., Davis, R.D., 1985. Fractionation of heavy metals in sewage sludges. Water Science and Technology. Vol. 17(4-5), pp. 587-98.
  22. Stover, R.C., Sommers, L.E., Silviera, D.J., 1976. Evaluation of metals in wastewater sludge. Journal (Water Pollution Control Federation) Vol 1, pp. 2165-75.
  23. Ratanachoo, K., 1995. Biological heavy metal removal from sewage sludge. Master's Thesis, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand.
  24. Rahmani, H.R., Moayeri, M., Mazaheri Kouhestani, Z., Khodabakhsh, N., Sharifi, H. 2014. The investigation of some quality properties and heavy metal concentration in dried sewage sludge of Isfahan Shahinshahr wastewater treatment plant. Journal of Environmental Science and Technology. 16 (2): 55-65. (In Persian)
  25. Alloway, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils (2nd ed.) Blackie Academic & Professional. Glasgow, UK.
  26. Smith, S.R., 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-treated soils. I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass. Environmental Pollution, Vol. 85(3), pp. 321-7.
  27. Scheltinga, H.M., 1987. Sludge in agriculture: the European approach. Water Science and Technology. Vol. 19(8) pp. 9-18.
  28. USEPA. 1999. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA 625/R-92-013.
  - Wastes: Remedial Scope and Efficacy: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.
  10. Clesceri, L.S., Eaton, A.D., Greenberg, A.E., 1988. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: American Public Health Association.
  11. Walkley, A., Black, I.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. 1934. Vol. 37(1), pp. 29-38.
  12. Kjeldahl, J., 1883. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. Z. Anal. Chem. Vol. 22(1), pp. 366-82.
  13. Olsen, S.R., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dep. Of Agric. Cric. 939.
  14. Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil science society of America journal. Vol. 42(3), pp. 421-8.
  15. Alef, K., Nannipieri, P., 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry: Academic Press.
  16. European Council Directive 86/278/EEC. 2005. Sewage Sludge Metal Level Standards.
  17. USEPA. 1993. The Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, Title 40 of the Code of Federal Regulations, Part 503.
  18. USEPA. 1996. Soil Screening Guidance, EPA Tech. Background Document No. 9355.4-23.
  19. Kharrazi, S.M., Younesi, H., Abedini Torghabe, J. 2014. The Application of Active Sewage Sludge on the Vermicomposting of Agricultural Waste.