مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۹، صفحات ۸۷ تا ۱۰۲

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir
مقاله پژوهشی

پتانسیل آلودگی و ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری

بهاره قریشی[۱]، حسن اصلانی[۱]، محمد شاکر خطیبی[۱]، سپیده نعمتی منصور[۲]، محمد مسافری[۳،*]
۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۲- کمیته تحقیقات دانشجویی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۳- مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۶
تاریخ ویرایش: ۹۹/۰۳/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۷
تاریخ انتشار: ۹۹/۰۳/۳۱

واژگان کلیدی: فلزات سنگین، ریسک اکولوژیکی، لجن، آلودگی خاک، آذربایجان شرقی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
mosaferim@tbzmed.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: لجن حاصل از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری در صورت آلودگی به فلزات سنگین و ورود به محیط می‌تواند باعث ایجاد ریسک بهداشتی و اکولوژیکی شود. هدف این پژوهش ارزیابی میزان آلودگی و ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در لجن‌های تصفیه خانه فاضلاب شهری استان آذربایجان شرقی است.

روش بررسی: ۹ نمونه لجن به‌صورت مرکب از بسترهای لجن خشک کن تصفیه خانه فاضلاب شهری استان آذربایجان شرقی جمع آوری و غلظت فلزات سنگین آنها اندازه‌گیری شد. شاخص تجمع زمینی، شاخص آلودگی و شاخص ریسک اکولوژیکی با استفاده از روابط مربوطه جهت تعیین ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در لجن فاضلاب محاسبه گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تغییرات روند غلظت فلزات به‌صورت Zn>Cu>Pb>Cr>Ni>As>Hg>Cd بود. براساس حداکثر مجاز استاندارد (MPS) و شاخص Muller، سطح آلودگی کادمیوم و مس پایین، روی متوسط، آرسنیک و سرب شدید و جیوه خیلی شدید ارزیابی می‌شود. براساس MPS، شاخص آلودگی تک فاکتوره و شاخص آلودگی سنتتیک به‌ترتیب کمتر از عدد ۱ و ۰/۷ است که نشان‌دهنده عدم آلودگی لجن و ایمن بودن کاربرد آن در کشاورزی است. در مقایسه با غلظت‌های پوسته زمین، ریسک قابل توجه اکولوژیکی در مورد سرب، ریسک زیاد در مورد آرسنیک و کادمیوم و ریسک خیلی زیاد در مورد جیوه مشاهده می‌شود. تفاوت معنی‌داری بین مقادیر فلزات سنگین با حدود MPS مشاهده گردید ($p<۰/۰۵$).

نتیجه‌گیری: اگرچه غلظت‌های فلزات سنگین، زیر MPS ارائه شده توسط USEPA هستند، با این حال نمونه‌های لجن در مقایسه با غلظت متوسط پوسته زمین نشان‌دهنده درجه بالایی از ریسک اکولوژیکی بالقوه برای محیط هستند. پایش دوره‌ای کیفیت لجن قویا توصیه می‌شود.

Please cite this article as: Ghoreishi B, Aslani H, Shaker Khatibi M, Nemati Mansur S, M Mosaferi. Pollution potential and ecological risk of heavy metals in municipal wastewater treatment plants sludge. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(1):87-102.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

مقدمه

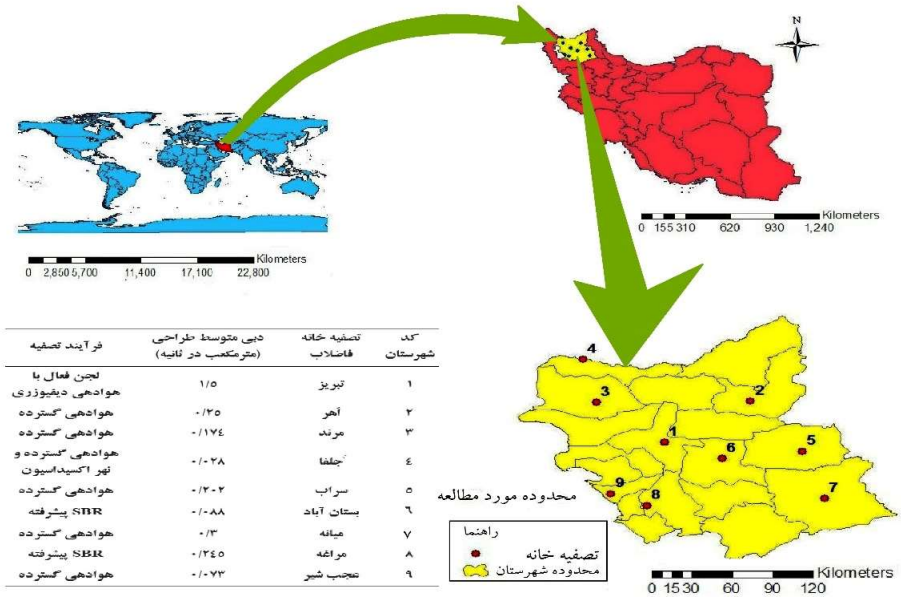
لجن محصول جانبی تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری (Municipal Wastewater Treatment Plant (MWTP)) است که تولید آن امری اجتناب ناپذیر است. اصولا لجن‌های حاصل از مراحل تصفیه اولیه و ثانویه فاضلاب معمولا مقادیر بالایی از آب به همراه مواد آلی و انواع میکروارگانیسم‌ها و نیز سایر آلاینده‌ها را به همراه دارند که به منظور پیشگیری از آلودگی محیط زیست و تعفن، عملیات تصفیه بیشتری مشتمل بر تغلیظ، هضم، آبگیری و خشک شدن بر روی آنها انجام گرفته و نهایتا به دلیل داشتن ویژگی‌های مناسب از نظر مقدار مواد آلی، ازت، فسفر و پتاسیم جهت استفاده برای تولید انواع محصولات کشاورزی بکار گرفته می‌شوند (۱، ۲). با این حال لجن حاصل از MWTP می‌تواند حاوی ترکیبات و عناصر سمی از جمله فلزات سنگین باشد (۳، ۴). فلزات سنگین معمولا از منابع مختلف از جمله تخلیه پنهانی فاضلاب‌های صنعتی (مثلا واحدهای آبکاری، چرم سازی و ...) به شبکه جمع‌آوری فاضلاب و همچنین از طریق بکارگیری محصولات حاوی فلزات سنگین در منازل و دفع آنها به فاضلاب‌روها و یا از طریق روان آب‌های سطحی آلوده وارد جریان فاضلاب شهری شده و ضمن راه یافتن به تصفیه خانه‌های فاضلاب، به دلیل ماهیت خود که اغلب در برابر تجزیه بیولوژیکی مقاوم هستند، در لجن حاصل از فرایندهای تصفیه فاضلاب تجمع یافته و تغلیظ شوند (۵). بدیهی است که بکارگیری لجن‌های آلوده به فلزات سنگین به عنوان کود یا اصلاح کننده خاک در کشاورزی می‌تواند منجر به آلودگی محیط (آب، خاک و محصولات کشاورزی) شده و غلظت آنها را چندین مرتبه افزایش دهد (۱).

تجمع فلزات سنگین در محیط علاوه بر ایجاد خطرات بهداشتی و سلامت (۷-۵) باعث افزایش "ریسک اکولوژیکی" نیز خواهد گردید (۸). از اینرو سازمان‌های مسئول از جمله سازمان حفاظت محیط زیست سعی می‌کنند با وضع استاندارد و محدودیت‌های لازم برای کیفیت لجن، خطرات بهداشتی و اکولوژیکی حاصل از کاربرد آن را برای انسان‌ها و محیط به حداقل برسانند (۹). به منظور آگاهی از میزان (یا شدت) آلودگی به فلزات سنگین و میزان ریسک اکولوژیکی مرتبط با آن در خاک و رسوبات یک منطقه شاخص‌های مختلفی توسط محققین به کار گرفته شده و توسعه پیدا نموده و استفاده از این شاخص‌ها به لجن حاصل از MWTP نیز تعمیم یافته است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به فاکتور غنی شدگی (Enrichment Factor (EF))، درجه آلودگی (Degree of contamination (C_d))، درجه آلودگی اصلاح شده (Modified degree of contamination (mC_d))، شاخص تجمع زمینی (Geoaccumulation Index (I_{geo}))، شاخص بار آلودگی (Pollution load index (PLI)) و شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه (Ecological risk potential index (RI)) اشاره نمود (۱۰). برای محاسبه این شاخص‌ها اغلب از غلظت اندازه گیری شده فلزات سنگین در خاک، رسوبات و لجن در مقایسه با میانگین غلظت زمینه‌ای این فلزات در مکان‌های غیرآلوده و در برخی موارد نیز از استانداردهای حدود مجاز استفاده می‌شود. بررسی مطالعات صورت گرفته درخصوص آلودگی فلزات سنگین در خاک و رسوبات سطحی و ریسک بهداشتی و اکولوژیکی مرتبط بیانگر این مطلب است که تحقیقات متعددی هم در داخل کشور (۱۱، ۱۲) و هم در کشورهای مختلف در مورد خاک و رسوبات سطحی به عمل آمده است (۱۰، ۱۲-۱۴). با این حال تحقیقات انجام شده درخصوص ریسک اکولوژیکی ناشی از لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب که حاوی فلزات سنگین است بسیار کم و اغلب محدود به کشور چین است. به عنوان مثال در تحقیق انجام شده در Shanxi چین بر روی لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری مقادیر کلیه فلزات سنگین اندازه گیری شده کمتر از حد مجاز ملی کشور چین برای مصارف کشاورزی گزارش گردید که بالاترین مقدار Igeo مربوط به کادمیوم بود و آلودگی کادمیوم و روی در برخی از تصفیه خانه‌ها در سطح بالا گزارش گردید.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

در این تحقیق گزارش شد که براساس شاخص آلودگی تک فاکتوره((Single-factor Pollution Index (PI هیچ یک از ایستگاه‌های بررسی شده آلودگی بالا نداشتند و برای مس، روی و کادمیوم سطح متوسط آلودگی و برای کادمیوم ریسک خیلی بالا تعیین گردید. از نظر ریسک اکولوژیک نیز ۳ مورد از ایستگاه‌های بررسی شده در تحقیق براساس شاخص RI ریسک خیلی بالایی داشتند (۱۵). در داخل کشور اغلب تحقیقات مربوط به پایش فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری در حد گزارش نتایج بصورت کاملا ساده و ابتدایی باقیمانده و در هیچ یک از مقالات منتشر شده، شاخص‌های ریسک اکولوژیکی لجن مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به اینکه محاسبه شاخص‌های ریسک اکولوژیکی دیدگاه جدیدی را می‌تواند درخصوص اهمیت آلودگی لجن به فلزات سنگین از نظر زیست محیطی ارائه نماید لذا در مقاله حاضر محاسبه این شاخص‌ها مد نظر قرار گرفته است.

استان آذربایجان شرقی از جمله استان‌های کشور با جمعیتی بیش از ۴/۹ میلیون نفر است. یازده تصفیه خانه موجود براساس آمار سال ۱۳۹۶، ۱۴۵۴۰۰۰ نفر را تحت پوشش قرار می‌دهند و دبی در دست بهره برداری این تصفیه خانه‌ها برابر با m^3 ۲۹۳۵۴۰ است (۱۶). از جمله اهداف شرکت آب و فاضلاب این استان توسعه تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری بوده و براساس گزارش‌های موجود، هفت تصفیه خانه فاضلاب نیز در شهرهای مختلف در حال ساخت است. بدیهی است که نتیجه بهره برداری از MWTPها افزایش تولید لجن خواهد بود. نظر به اینکه دفع لجن MWTP در صورت آلوده بودن آنها به فلزات سنگین و عدم رعایت استانداردهای کیفی می‌تواند باعث ایجاد آسیب به سلامت و بهداشت جامعه بواسطه آلودگی خاک، آب و محصولات کشاورزی شود. لذا لازم گردید مطالعه حاضر با هدف اصلی تعیین کیفیت لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری استان آذربایجان شرقی از نظر سطح فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم، کروم، جیوه، نیکل، سرب، روی و مس و تحلیل میزان آلودگی و ریسک اکولوژیکی مربوطه با استفاده از شاخص‌های کیفی مشتمل بر شاخص تجمع زمینی، شاخص آلودگی و شاخص ریسک اکولوژیکی انجام شود.



کد شهرستان	تصفیه خانه فاضلاب	دبی متوسط طراحی (مترمکعب در ثانیه)	فرآیند تصفیه
۱	تبریز	۱/۵	لجن فعال با هوادهی دیفیوزری
۲	آهر	۰/۳۵	هوادهی گسترده
۳	مرند	۰/۱۷٤	هوادهی گسترده
٤	جلفا	۰/۰۳۸	هوادهی گسترده و نهر اکسیداسیون
٥	سراب	۰/۳۰۲	هوادهی گسترده
٦	بستان آباد	۰/۰۸۸	SBR پیشرفته
۷	میانه	۰/۳	هوادهی گسترده
۸	مراغه	۰/۳٤٥	SBR پیشرفته
۹	عجب شیر	۰/۰۷۳	هوادهی گسترده

شکل ۱- موقعیت تصفیه خانه‌های فاضلاب بررسی شده بر روی نقشه استان آذربایجان شرقی

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در استان آذربایجان شرقی انجام شد و طی آن لجن نه تصفیه خانه فاضلاب شهری مشتمل بر اهر، بستان آباد، تبریز، سراب، جلفا، عجب شیر، مرند، مراغه و میانه مورد بررسی قرار گرفت که موقعیت مکانی آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

- نمونه برداری و آنالیز آزمایشگاهی

تحقیق حاضر از نوع توصیفی – مقطعی است که در آن غلظت فلزات سنگین در لجن تولید شده در تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری، به عنوان جمعیت مورد مطالعه بررسی گردید. نمونه برداری مرکب در فواصل منظم از لجن نهایی تصفیه خانه‌های فاضلاب و براساس روش استاندارد در اواخر پاییز به تعداد یکبار انجام شد. در طی نمونه برداری چندین نمونه از قسمت‌های مختلف بستر خشک کن لجن هر تصفیه خانه جمع آوری و پس از اختلاط با یکدیگر، بخشی از آن (در حد ۰/۵ kg) به داخل ظروف پلی اتیلنی ریخته شده و در کوتاه‌ترین زمان ممکن جهت انجام آنالیزهای بعدی به آزمایشگاه انتقال داده شد. استخراج نمونه‌ها برای فلزات سنگین با استفاده از روش استاندارد B3050 EPA انجام گردید (۱۷). در این روش نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه از الک‌های با مش شماره ۷ و ۲۰ عبور داده شد و مقدار 1g از آن توزین و به داخل ظرف هاضم (ارلن مایر) ریخته شد. mL ۱۰اسید نیتریک غلیظ به ظرف حاوی نمونه اضافه شده و پس از اختلاط و قرار دادن شیشه ساعت، مخلوط حاصل به مدت ۱۰ الی min ۱۵ برروی هیتر و در دمای ۹۰ الی °C ۹۵قرار داده شد. پس از این مرحله ظرف هاضم از روی هیتر برداشته و پس از سرد شدن مجددا mL ۵ اسید نیتریک غلیظ به آن اضافه گردید و عمل رفلاکس به مدت min ۳۰ ادامه یافت. در این مرحله تولید بخارات قهوه‌ای نشان‌دهنده اکسیداسیون نمونه بوسیله HNO_3 است و این مرحله (افزودن اسید نیتریک غلیظ) تا زمانی‌که هیچ‌گونه بخار قهوه‌ای رنگی تولید نشود، ادامه پیدا نمود که این حالت نشان‌دهنده اکسیداسیون کامل نمونه است. عمل رفلاکس تا زمانی ادامه پیدا نمود که حجم محلول به mL ۵ رسیده و یا عمل جوشیدن به مدت h ۲ ادامه پیدا کرده باشد. در مرحله بعد و پس از خنک کردن نمونه‌ها، mL ۲ آب مقطر و mL ۳ از پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد اضافه و به منظور شروع واکنش پراکسید هیدروژن، مجددا نمونه‌ها پس از قرار دادن شیشه ساعت بر روی هیتر قرار داده شدند. عمل افزودن H_2O_2 با غلظت ۳۰ درصد به مقادیر mL ۱ تا زمانی ادامه یافت که عمل جوشیدن به حداقل برسد (روی هم رفته نباید بیشتر از mL ۱۰ پراکسید هیدروژن اضافه شود). عمل هضم اسید- پراکسید تا رسیدن به حجم mL ۵ در دمای ۹۰ الی °C ۹۵ به مدت h ۲ انجام گردید. در مرحله آخر mL ۱۰ اسید کلریدریک غلیظ به نمونه‌ها اضافه نموده و پس از قرار دادن شیشه ساعت بر درب ظرف هاضم، نمونه در دمای ۹۰ الی °C ۹۵ به مدت min ۱۵ روی هیتر قرار داده شد. بعد از خنک شدن، نمونه توسط کاغذ واتمن ۴۱ فیلتر شده و پس از تخلیه به بالن ژوژه به حجم mL ۱۰۰ رسانده شد. در تحقیق حاضر برای تعیین غلظت فلزات سنگین از دستگاه ICP-OES (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry) استفاده به عمل آمد که درصد ریکاوری فلزات سنگین در این روش برابر ۱۲±۹۶ بدست آمد (۱۷). نتایج فلزات سنگین در قالب نرم افزار SPSS آنالیز شد و با توجه به غیرنرمال بودن داده‌ها در آزمون شاپیرو- ویلک (Shapiro-Wilk) ($p< ۰/۰۵$)، با استفاده از آزمون ویلکاکسون (Wilcoxon)، با حدود حداکثر مجاز EPA برای استفاده در خاک کشاورزی (MPS) مقایسه گردید.

- روش محاسبه شاخص‌های آلودگی و ریسک اکولوژیکی

در تحقیق حاضر از میان شاخص‌های مختلف و متنوع، اندیس تجمع زمینی، اندیس آلودگی و اندیس ریسک

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

اکولوژیکی انتخاب و برای نشان دادن وضعیت و میزان خطر ناشی از فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری، مورد استفاده قرار گرفت. نحوه محاسبه این شاخص‌ها در ادامه توضیح داده شده است (۸، ۱۰، ۱۵، ۱۸، ۱۹).

- شاخص تجمع زمینی (Igeo)

(Igeo) شاخصی از برآورد غنی شدگی غلظت‌های فلز بالاتر از غلظت پایه یا زمینه است. این روش درجه آلودگی فلز را در هفت کلاس غنی شدگی براساس مقادیر عددی بیان می‌کند. روش محاسبه این شاخص به قرار زیر است (معادله ۱):

$$Igeo=\log_2[C_n/(1.5\times B_n)] \quad (۱)$$

در این معادله: C_n غلظت عنصر در نمونه غنی شده و B_n غلظت زمینه یا بکر است. فاکتور ۱/۵ برای به حداقل رساندن تغییرات احتمالی در غلظت‌های زمینه استفاده می‌شود که ممکن است از تغییرات پوسته‌ای رسوبات ناشی شود. براساس پیشنهاد Muller، چنانچه غلظت عنصر در نمونه پنج برابر غلظت زمینه باشد نمونه به شدت آلوده است (۱۸)، طبقه بندی مولر در جدول ۱ آورده شده است.

- شاخص آلودگی فلزات سنگین

شاخص آلودگی تک فاکتوره (Single-factor Pollution Index (PI)) و شاخص آلودگی سنتتیک Nemerow (Nemerow's Synthetic Pollution Index (PN)) برای ارزیابی حضور فلزات سنگین به‌صورت واحد و ارزیابی سطح آلودگی به‌صورت معادله ۲ در تصفیه خانه‌های مورد بررسی، تعریف گردید:

$$PI=Ci/Si \quad (۲)$$

در این معادله: PI شاخص آلودگی تک فاکتوره فلز سنگین، Ci غلظت فلز سنگین i ام و Si استاندارد فلز سنگین در لجن جهت کاربرد در کشاورزی است. براساس مقادیر PI وضعیت آلودگی فلزات سنگین به ۵ دسته مطابق آنچه در جدول ۲ نشان داده است، طبقه بندی می‌شود.

جدول ۱- طبقه بندی مولر برای شاخص تجمع زیستی

I_{geo}	وضعیت آلودگی
> ۵	به شدت آلوده
۵-۴	قویا تا به شدت آلوده
۴-۳	قویا آلوده
۳-۲	آلودگی متوسط تا قویا آلوده
۲-۱	آلودگی متوسط
۱-۰	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
<۰	غیرآلوده

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

جدول ۲- وضعیت آلودگی فلز سنگین براساس مقادیر PI

مقدار PI	وضعیت آلودگی
PI≤۱	بدون آلودگی
۱<PI≤۲	آلودگی پایین
۲<PI≤۳	آلودگی متوسط
۳<PI≤۵	آلودگی شدید
PI>۵	آلودگی خیلی شدید

جدول ۳- طبقه بندی شاخص PN

مقدار **PN**	وضعیت آلودگی
PN≤۰/۷	ایمن
۰/۷ <PN≤ ۱	خط اخطار آلودگی
۱<PN≤ ۲	آلودگی خفیف
۲<PN≤۳	آلودگی متوسط
PN>۳	آلودگی شدید

شاخص آلودگی سنتتیک Nemerow نیز به‌طور گسترده‌ای برای انعکاس سطح آلودگی کل کیفیت محیط به شرح زیر تعریف می‌شود (معادله ۳):

$$PN=\sqrt{\frac{P_i^{۲},ave+P_i^{۲},max}{۲}} \quad (۳)$$

در این معادله: PN شاخص آلودگی سنتتیک، P_i, ave میانگین مقدار شاخص آلودگی تک فاکتوره فلز سنگین iام، P_i, max حداکثر مقدار شاخص آلودگی تک فاکتوره فلز سنگین iام است. در این روش شاخص آلودگی سنتتیک بر روی وضعیت کلی آلودگی ایجاد شده توسط فلزات متمرکز است و علاوه بر میانگین شاخص آلودگی تک فاکتوره، مقادیر حداکثر را نیز در نظر می‌گیرد. طبقه بندی این شاخص در جدول ۳ ارائه شده است (۱۵).

- شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه

براساس روش Hakanson این شاخص با استفاده از معادلات ۴ تا ۶ محاسبه می‌گردد:

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_r^i} \quad (۴)$$

$$E_r^i = T_f^i \times C_f^i \quad (۵)$$

$$ERi = \sum_{i=۱}^{n} E_r^i \quad (۶)$$

پارامترهای استفاده شده در این معادلات به شرح زیر هست: C_f^i: سطح آلودگی فلز سنگین، C_s^i: غلظت فلز سنگین در نمونه، C_r^i: مقدار رفرنس فلز سنگین در منطقه مورد مطالعه، E_r^i: پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلز سنگین، T_f^i: فاکتور پاسخ سمیت فلز سنگین که برای فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم، کروم، جیوه، نیکل، سرب، روی و مس به ترتیب برابر با ۱۰، ۳۰، ۲، ۴۰، ۵، ۵، ۱ و ۵ است. (Risk Index) ERi: خطر اکولوژیکی بالقوه (۱۹، ۲۰). معیار ریسک اکولوژیکی بالقوه فلزات سنگین برای محیط در جدول ۴ نشان داده شده است.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

یافته‌ها

در جدول ۵ نتایج حاصل از بررسی غلظت فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های مورد بررسی، مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل این فلزات، شاخص MPS (حداکثر مجاز EPA برای استفاده در خاک کشاورزی) و همچنین مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین اندازه گیری شده در نمونه‌های لجن با میانگین غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین (CA) ارائه شده است. براساس آزمون غیر پارامتری ویلکاکسون (Wilcoxon signed-rank test)، کلیه فلزات سنگین از نظر غلظت در مقایسه با مقادیر MPS دارای تفاوت معنی‌داری هستند ($Z= -۲/۶۷$، $p< ۰/۰۵$).

جدول ۴- معیار و میزان ریسک اکولوژیکی بالقوه (۲۰)

معیار ریسک اکولوژیکی برای محیط	ERi	معیار ریسک اکولوژیکی برای فلز سنگین	E_r^i
ریسک پایین	ERi<۹۵	ریسک پایین	E_r^i<۴۰
ریسک متوسط	۹۵≤ERi<۱۹۰	ریسک متوسط	۴۰≤E_r^i<۸۰
ریسک قابل توجه	۱۹۰≤ERi<۳۸۰	ریسک قابل توجه	۸۰≤E_r^i<۱۶۰
ریسک خیلی زیاد	ERi≥۳۸۰	ریسک زیاد	۱۶۰≤E_r^i<۳۲۰
		ریسک خیلی زیاد	E_r^i≥۳۲۰

جدول ۵- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین (mg/kg) اندازه‌گیری شده در لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

فلز / کد تصفیه خانه فاضلاب	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Cu
WTP1	۱۴/۱	۱/۱۱	۳۳/۴۴	۳/۷۶	۲۷/۴۵	۲۹/۲۳	۷۱۷/۷	۲۳۸/۳۵
WTP2	۵/۸۹	۰/۴۱	۱۸/۶۴	۲/۳۶	۱۶/۰۹	۲۸/۳	۶۲۳/۷	۱۳۴/۸۷
WTP3	۱۲/۳۲	۰/۶۷	۳۹/۹۵	۴/۰۵	۳۱/۰۵	۲۸/۷۸	۸۱۷/۵	۱۶۳/۸۵
WTP4	۳/۸۸	۰/۳۹	۱۷/۷۳	۱/۵۵	۱۵/۰۵	۲۹/۴۴	۴۲۸/۸	۱۱۵/۴۳
WTP5	۴/۲۷	۰/۳۴	۱۲/۹۷	۱/۲۴	۱۳/۷۵	۲۰/۰۳	۳۰۰/۹	۱۲۴/۶۱
WTP6	۱/۰۴	۰/۲۲	۱۹	۱/۷	۸/۳۵	۱۶/۶۳	۲۷۱/۹	۱۰۲
WTP7	۳۳/۱۳	۰/۲۸	۱۱/۹۱	۱/۹۹	۱۴/۳۱	۶۵/۲	۳۴۱/۳	۷۴/۴۱
WTP8	۶/۸۴	۰/۳	۱۲/۸۵	۲/۰۸	۱۰/۴۹	۲۴۶/۳۱	۲۲۶/۴	۸۱/۹۴
WTP9	۱۴/۳۵	۰/۴	۲۲/۶۳	۲/۴۱۸	۱۷/۸	۱۴/۲۴	۴۵۱/۶	۲۹۴/۹۵
میانه	۶/۸	۰/۳۹	۱۸/۶	۲/۱	۱۵/۱	۲۸/۸	۴۲۸/۸	۱۲۴/۶
کمینه	۱/۰۴	۰/۲۲	۱۱/۹	۱/۲۴	۸/۳۵	۱۴/۲	۲۲۶	۷۴/۴
بیشینه	۳۳/۱۳	۱/۱۱	۳۹/۹۵	۴/۰۵	۳۱/۰۵	۲۴۶	۸۱۷	۲۹۴/۹۵
*MPS	۴۱	۳۹	۱۲۰۰	۱۷	۴۲۰	۳۰۰	۲۸۰۰	۱۵۰۰
میانگین پوسته	۱/۸	۰/۲	۱۰۰	۰/۰۸	۷۵	۱۲/۵	۷۰	۵۵

* حداکثر استاندارد مجاز برای خاک‌های کشاورزی (mg/kg)

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

در جدول ۶ شاخص تجمع زمینی فلزات سنگین (I_{geo}) در نمونه‌های لجن بررسی شده، ارائه گردیده است.

جدول ۷، شاخص آلودگی تک فاکتوره (PI) و همچنین شاخص آلودگی سنتتیک Nemerow (PN) را نشان می‌دهد.

پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلز سنگین در لجن تصفیه خانه‌های بررسی شده با لحاظ هر دو مقدار MPS و CA در جدول ۸ ارائه شده است.

خطر اکولوژیکی بالقوه محیط (ERi) برای فلزات سنگین موجود در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری مطالعه شده بر مبنای میانگین غلظت پوسته زمین (CA) و حداکثر مقدار مجاز در لجن جهت استفاده در کشاورزی (MPS) در نمودار ۱ ارائه شده است.

جدول ۶- شاخص تجمع زمینی (I_{geo}) فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری مطالعه شده بر مبنای میانگین غلظت پوسته زمین (CA) و حداکثر مقدار مجاز در لجن جهت استفاده در کشاورزی (MPS)

فلز / کد تصفیه خانه	As		Cd		Cr		Hg		Ni		Pb		Zn		Cu	
	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA
WTP1	-۲/۱	۲/۴	-۵/۷	۱/۹	-۵/۶	-۲	-۲/۸	۵	-۴/۵	-۲	-۳/۹	۰/۶	-۲/۵	۲/۸	-۳/۲	۱/۵
WTP2	-۳/۴	۱/۱	-۷/۲	۰/۵	-۶/۶	-۳	-۳/۴	۴/۳	-۵/۳	-۲/۸	-۴	۰/۶	-۲/۸	۲/۶	-۴/۱	۰/۷
WTP3	-۲/۳	۲/۲	-۶/۴	۱/۲	-۵/۵	-۱/۹	-۲/۷	۵/۱	-۴/۳	-۱/۹	-۴	۰/۶	-۲/۴	۳	-۳/۸	۱
WTP4	-۴	۰/۵	-۷/۲	۰/۴	-۶/۷	-۳/۱	-۴	۳/۷	-۵/۴	-۲/۹	-۳/۹	۰/۷	-۳/۳	۲	-۴/۳	۰/۵
WTP5	-۳/۸	۰/۷	-۷/۴	۰/۲	-۷/۱	-۳/۵	-۴/۴	۳/۴	-۵/۵	-۳	-۴/۵	۰/۱	-۳/۸	۱/۵	-۴/۲	۰/۶
WTP6	-۵/۹	-۱/۴	-۸/۱	-۰/۴	-۶/۶	-۳	-۳/۹	۳/۸	-۶/۲	-۳/۸	-۴/۸	-۰/۲	-۳/۹	۱/۴	-۴/۵	۰/۳
WTP7	-۰/۹	۳/۶	-۷/۷	-۰/۱	-۷/۲	-۳/۷	-۳/۷	۴/۱	-۵/۵	-۳	-۲/۸	۱/۸	-۳/۶	۱/۷	-۴/۹	-۰/۱
WTP8	-۳/۲	۱/۳	-۷/۶	۰	-۷/۱	-۳/۵	-۳/۶	۴/۱	-۵/۹	-۳/۴	-۰/۹	۳/۷	-۴/۲	۱/۱	-۴/۸	۰
WTP9	-۲/۱	۲/۴	-۷/۲	۰/۴	-۶/۳	-۲/۷	-۳/۴	۴/۳	-۵/۱	-۲/۷	-۵	-۰/۴	-۳/۲	۲/۱	-۲/۹	۱/۸

جدول ۷- شاخص آلودگی تک فاکتوره (PI) و شاخص آلودگی سنتتیک (PN) فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب

کد تصفیه خانه	PI								PN
	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Cu	
WTP1	۰/۳۴۴	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱	۰/۲۲۱	۰/۰۶۵	۰/۰۹۷	۰/۲۵۶	۰/۱۵۹	۰/۲۶۵
WTP2	۰/۱۴۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۱۳۹	۰/۰۳۸	۰/۰۹۴	۰/۲۲۳	۰/۰۹	۰/۱۷۱
WTP3	۰/۳	۰/۰۱۷	۰/۰۳۳	۰/۲۳۸	۰/۰۷۴	۰/۰۹۶	۰/۲۹۲	۰/۱۰۹	۰/۲۳۶
WTP4	۰/۰۹۵	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۹۱	۰/۰۳۶	۰/۰۹۸	۰/۱۵۳	۰/۰۷۷	۰/۱۲
WTP5	۰/۱۰۴	۰/۰۰۹	۰/۰۱۱	۰/۰۷۳	۰/۰۳۳	۰/۰۶۷	۰/۱۰۷	۰/۰۸۳	۰/۰۸۷
WTP6	۰/۰۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۱۶	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۵۵	۰/۰۹۷	۰/۰۶۸	۰/۰۷۹
WTP7	۰/۸۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۱۱۷	۰/۰۳۴	۰/۲۱۷	۰/۱۲۲	۰/۰۵	۰/۵۸۴
WTP8	۰/۱۶۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱۱	۰/۱۲۲	۰/۰۲۵	۰/۸۲۱	۰/۰۸۱	۰/۰۵۵	۰/۵۹۲
WTP9	۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۰۱۹	۰/۱۴۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۷	۰/۱۶۱	۰/۱۹۷	۰/۲۶۲
میانگین	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱	۰/۲۷
انحراف معیار	۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۲

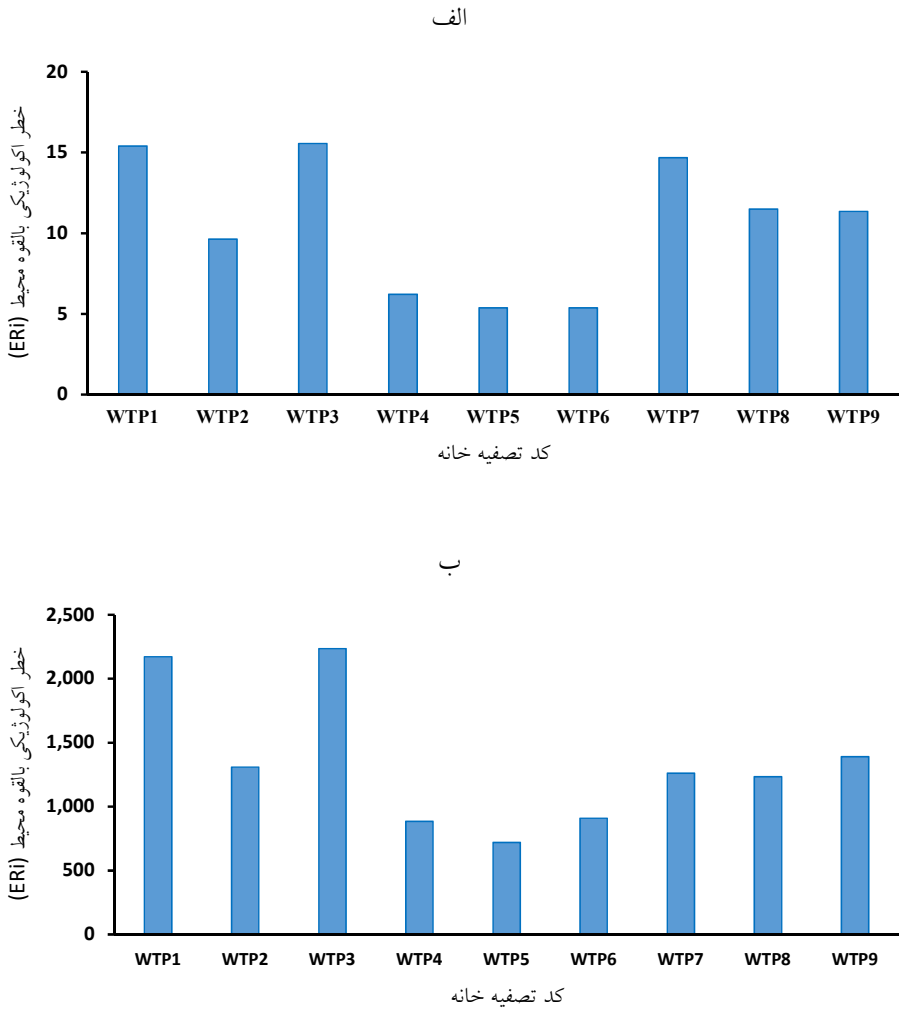
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

جدول ۸- پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلز سنگین (E_r^i) در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری مطالعه شده بر مبنای میانگین غلظت پوسته زمین (CA) و

فلز / کدتصفیه خانه فاضلاب	As		Cd		Cr		Hg		Ni		Pb		Zn		Cu	
	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS	CA	MPS
WTP1	۷۸	۳	۱۶۷	۱	۱	۰	۱۸۸۰	۹	۲	۰	۱۲	۰	۱۰	۰	۲۲	۱
WTP2	۳۳	۱	۶۲	۰	۰	۰	۱۱۸۰	۶	۱	۰	۱۱	۰	۹	۰	۱۲	۰
WTP3	۶۸	۳	۱۰۱	۱	۱	۰	۲۰۲۵	۱۰	۲	۰	۱۲	۰	۱۲	۰	۱۵	۱
WTP4	۲۲	۱	۵۹	۰	۰	۰	۷۷۵	۴	۱	۰	۱۲	۰	۶	۰	۱۰	۰
WTP5	۲۴	۱	۵۱	۰	۰	۰	۶۲۰	۳	۱	۰	۸	۰	۴	۰	۱۱	۰
WTP6	۶	۰	۳۳	۰	۰	۰	۸۵۰	۴	۱	۰	۷	۰	۴	۰	۹	۰
WTP7	۱۸۴	۸	۴۲	۰	۰	۰	۹۹۵	۵	۱	۰	۲۶	۱	۵	۰	۷	۰
WTP8	۳۸	۲	۴۵	۰	۰	۰	۱۰۴۰	۵	۱	۰	۹۹	۴	۳	۰	۷	۰
WTP9	۸۰	۴	۶۰	۰	۰	۰	۱۲۰۹	۶	۱	۰	۶	۰	۶	۰	۲۷	۱

سلامت و محیط زیست
دوره سیزدهم/ شماره اول/ بهار ۱۳۹۹
فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران
ijhe.tums.ac.ir

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]



نمودار ۱- خطر اکولوژیکی بالقوه برای محیط (ERi) توسط فلزات سنگین موجود در لجن تصفیه خانه‌های مطالعه شده (الف) بر مبنای حداکثر مقدار مجاز در لجن جهت استفاده در کشاورزی (MPS) و (ب) در مقایسه با میانگین غلظت پوسته زمین (CA)

بحث

لجن تولید شده در تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری کشور از دیرباز از نظر کیفیت میکروبی (۲، ۲۱) و همچنین وجود فلزات سنگین (۷، ۲۲) مورد توجه و تحقیق قرار گرفته است. اما با این حال در مورد ریسک اکولوژیکی لجن تا به حال هیچ مطالعه‌ای در کشور انجام نشده و بیشتر تحقیقات ریسک اکولوژیکی، مربوط به رسوبات سطحی و خاک است که غلظت فلزات سنگین اغلب با میانگین پوسته‌ای آن مقایسه شده است. در مورد لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری جهت دفع در محیط یا استعمال در کشاورزی، حدود مجازی توسط سازمان‌های خارجی وضع شده اما در داخل کشور هنوز استاندارد کاربردی در مورد حد مجاز فلزات سنگین در لجن وجود ندارد. در مطالعه حاضر با دیدگاهی نو، سعی بر آن شد تا شاخص‌های ریسک اکولوژیکی فلزات

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب کشور با در نظر گرفتن هر دو مقدار MPS مربوط به EPA و نیز مقدار CA به صورت تلفیقی مورد محاسبه و ارزیابی قرار گیرد. بدیهی است که اطلاعات تولید شده می‌تواند در کنار سایر اطلاعات کیفی لجن، برای مدیریت بهتر زیست محیطی این زائدات مورد استفاده قرار گیرد.

در جدول ۱ اطلاعات مربوط به غلظت فلزات سنگین منتخب در نمونه‌های لجن آنالیز شده، ارائه شده است. براساس غلظت میانگین این جدول، ترتیب غلظت فلزات سنگین به‌صورت کاهشی(Zn>Cu>Pb>Cr>Ni>As>Hg>Cd)است.

بالاترین غلظت مشاهده شده مربوط به فلز روی و پایین‌ترین غلظت سنجش شده مربوطه به کادمیوم است. این نتایج تقریبا مشابه با مطالعه انجام شده در کشور چین است (۱۵) که ترتیب فلزات (Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Cd) گزارش گردیده است. با این حال تفاوت‌هایی در مورد ترتیب کروم و سرب ملاحظه می‌شود.

از نکات قابل توجه در لجن‌های آنالیز شده آن است که آرسنیک در تصفیه خانه ۷ (مراغه) به‌طور قابل توجهی بالاتر از سایر تصفیه خانه‌ها و تقریبا نزدیک حد مجاز است. کروم، نیکل و روی در تصفیه خانه شماره ۳ (جلفا) دارای بالاترین مقدار هستند ضمن آنکه در تصفیه خانه ۱ (تبریز) مقادیر تقریبا مشابه با جلفا بوده و البته مقدار مس بیشتر است. بالاترین مقدار مس در تصفیه خانه ۹ (سراب) اندازه گیری شده و در تصفیه خانه ۸ (بستان آباد) مقدار سرب به‌طور قابل توجهی بالاتر از سایر تصفیه خانه‌ها است که جهت تعیین منابع احتمالی آلودگی از جمله تخلیه پساب کارگاه‌های صنعتی کوچک، نیاز به بررسی بیشتر میدانی در این خصوص احساس می‌شود. در تحقیق Sheng و همکاران مقدار فلز روی و مس در یکی از تصفیه خانه‌های پکن بالاتر از حدود مجاز ملی چین اندازه گیری شد (۸). در بین فلزات سنگین بررسی شده آرسنیک و سرب دو مورد فلزی هستند که حداکثر مقدار آنها نزدیک به حداکثر مقدار مجاز فلزات سنگین براساس استاندارد USEPA (United States Environment Protection Agency) است و جای توجه ویژه‌ای دارند. در مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در نمونه‌های لجن با میانگین غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین(Crustal Average (CA))، مشاهده می‌شود که غیر از کروم و نیکل در بقیه موارد غلظت فلزات سنگین لجن بیشتر است بطوری‌که مقدار آرسنیک، کادمیوم، کروم، جیوه، نیکل، سرب، روی، و مس به‌ترتیب ۵/۹۱، ۲/۳، ۰/۲۱، ۲۹/۳، ۰/۲۲، ۴/۲۴، ۶/۶ و ۲/۶۸ برابر غلظت میانگین پوسته زمین است. بالاتر بودن مقدار فلزات سنگین به‌ویژه در مورد جیوه، نشان‌دهنده آنتروپوژنیک بودن منبع آلودگی و ورود این ماده به جریان فاضلاب شهری است.

مطابق جدول ۲، ترتیب غنی شدگی و مقادیر Igeo محاسبه شده براساس MPS و با در نظر گرفتن میانگین به صورت As>Zn>Hg>Pb>Cu>Ni>Cr>Cd بوده ضمن آنکه کلیه مقادیر Igeo کمتر از صفر و منفی هستند. این به معنی آن است که مطابق با طبقه بندی Muller برای شاخص تجمع زیستی، کلیه نمونه‌های لجن غیر آلوده هستند. با این حال زمانی که در انجام محاسبه بجای MPS، مقدار CA در نظر گرفته شود وضعیت کاملا متفاوت خواهد بود بطوری‌که در این حالت مقادیر Igeo بطور معنی‌داری اعدادی بزرگ و مثبت هستند. به عنوان مثال، بزرگترین مقادیر Igeo در مورد آرسنیک، کادمیوم، جیوه، سرب، روی و مس به ترتیب ۳/۶، ۱/۹، ۵/۱، ۳/۷، ۳ و ۱/۸ است. در این حالت براساس شاخص مولر، جیوه دارای سطح خیلی شدید آلودگی، آرسنیک و سرب دارای سطح شدید آلودگی، روی دارای سطح متوسط آلودگی و کادمیوم و مس دارای سطح پایین آلودگی است. برای کروم و نیکل در این حالت نیز مقادیر منفی هستند. در مطالعه انجام شده در Shanxi چین (۱۵) ترتیب Igeo به شکل Cd>Zn>Cu>As>Cr>Ni>Pb گزارش گردید که متفاوت از مطالعه حاضر است. در مطالعه حاضر ترتیب آلودگی تصفیه خانه‌ها با در نظر گرفتن متوسط Igeo

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

هر تصفیه خانه، WTP1>WTP3>WTP9>WTP7> WTP2>WTP8>WTP4>WTP5>WTP6 است.

باید توجه داشت که مبنای استفاده شده برای محاسبه شاخص Igeo، CA جهانی و MPS مربوط به EPA است. در حال حاضر استاندارد ملی در ایران برای مقادیر فلزات سنگین در لجن برای کاربرد در کشاورزی وجود ندارد. ضمن آنکه درخصوص میانگین فلزات سنگین در خاک مناطقی که تصفیه خانه‌های فاضلاب قرار دارند عملا اطلاعات بومی موجود نیست. بدیهی است که نتایج جدول ۲ می‌تواند در صورت موجود بودن غلظت‌های منطقه‌ای فلزات سنگین در کشور و همچنین استفاده از استانداردهای ملی لجن، متفاوت از اعداد ارائه شده باشد.

محاسبه شاخص‌های آلودگی تک فاکتوره (PI) و همچنین شاخص آلودگی سنتتیک Nemerow (PN) بر مبنای MPS است. همان‌طورکه در جدول ۳ آورده شده است، براساس میانگین PI ترتیب فلزها به این قرار است: As>Zn>Hg>Cu>Pb>Ni>Cd=Cr. این ترتیب با مطالعه Duan و همکاران Zn>Cu>Ni>Cr>As>Cd>Pb به‌ویژه در مورد آرسنیک همخوانی ندارد (۱۵). می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تصفیه خانه‌های فاضلاب بررسی شده منابع آلودگی فلزات سنگین با کشور چین متفاوت است. درخصوص آرسنیک یکی از منابع ذکر شده برای آلودگی مذکور احتمالا استفاده از "پودر نظافت" حاوی آرسنیک در حمام است که البته جای تحقیق و بررسی بیشتری درخصوص منشاء احتمالی آرسنیک در لجن و همچنین مقادیر آرسنیک در پودرهای نظافت مورد استفاده در کشور وجود دارد. براساس تحقیق حاضر کلیه مقادیر PI کمتر از عدد ۱ و مقادیر PN نیز کمتر از عدد ۰/۷ است که به ترتیب نشان‌دهنده عدم آلودگی و نیز ایمن بودن کاربرد لجن در کشاورزی براساس این شاخص است. در مطالعه Sheng و همکاران، مقدار PN در لجن برخی از تصفیه خانه‌ها برای تعداد محدودی از فلزات سنگین اگرچه بیشتر از ۰/۷ محاسبه گردید با این حال این تصفیه خانه‌ها از نظر سطح آلودگی پاک در نظر گرفته شد (۸). مطابق با شاخص PN در مطالعه حاضر ترتیب زیر در مورد تصفیه خانه‌ها قابل مشاهده است: WTP8> WT7>WTP1>WTP9>WTP3>WTP2>WTP4 .>WTP5>WTP6

پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلز سنگین در لجن تصفیه خانه‌های بررسی شده در جدول ۴ و با لحاظ هر دو مقدار MPS و CA در محاسبات ارائه شده است. براساس معیار ریسک اکولوژیکی، چنانچه E_r^i کمتر از عدد ۴۰ باشد ریسک اکولوژیکی فلز سنگین پایین در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن اعداد حاصله براساس MPS، مشاهده می‌شود که کلیه فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در لجن دارای ریسک اکولوژیکی پایین هستند. اما زمانی‌که میانگین پوسته زمین CA در محاسبات وارد می‌شود در مورد برخی از فلزات سنگین وضعیت کاملا متفاوت می‌گردد بطوری‌که بزرگترین مقادیر در مورد آرسنیک، کادمیوم، جیوه و سرب به‌ترتیب ۱۸۴، ۱۶۷، ۲۰۲۵ و ۹۹ می‌شود که نشان‌دهنده ریسک قابل توجه اکولوژیکی در مورد سرب، ریسک زیاد در مورد آرسنیک و کادمیوم و ریسک خیلی زیاد در مورد جیوه است. به نظر می‌رسد لازم است درخصوص آلودگی فاضلاب‌های شهری و لجن تصفیه خانه‌ها به جیوه، کادمیوم، آرسنیک و سرب در کشور توجه کافی صورت گرفته و منابع احتمالی ورود این فلزات سنگین به محیط شناسایی و کنترل گردد.

در مورد شاخص ERi با در نظر گرفتن میانگین پوسته زمین در محاسبات، کلیه تصفیه خانه‌ها، دارای مقادیر ERi بالای ۳۸۰ هستند (نمودار ۱) که براساس شاخص Hakanson بیانگر ریسک اکولوژیکی خیلی زیاد لجن تصفیه خانه‌های مذکور در ورود به محیط بوده و لازم است این موضوع به شدت مورد توجه قرار گیرد.

از جمله کاستی‌های تحقیق حاضر، محدود بودن تعداد نمونه‌های آنالیز شده و همچنین نبود اطلاعات کافی درخصوص میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک مناطق

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

مختلف کشور به‌عنوان مبنایی جهت مقایسه و محاسبه شاخص‌های مربوط به ریسک اکولوژیکی است که با توجه به اهمیت موضوع، لازم است توسط سازمان‌های مسئول و ناظر، انجام منظم این آنالیزها، در دستور کار قرار گیرد.

نتیجه گیری

امروزه استفاده از لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری در کشاورزی به شدت مورد استقبال کشاورزان است. با این حال در کنار منافع مربوط به کشاورزی، خطرات و آلودگی‌های احتمالی ناشی از کاربرد لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری در کشاورزی بایستی در نظر گرفته شود. نگرانی ناشی از وجود فلزات سنگین در لجن حاصل از تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری و احتمال تجمع آنها در محصولات کشاورزی و مواجهه انسان‌ها با این فلزات موضوعی است که نباید از کنار آن به سادگی گذشت. از اینرو کشورهای توسعه یافته ضمن وضع استانداردهای لازم، پایش منظم سالیانه فلزات سنگین را در لجن‌های استعمال شده در زمین‌های کشاورزی در دستور کار خود قرار داده‌اند. در حال حاضر در اغلب تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری کشور، تنها فرآوری صورت گرفته بر روی لجن خام حاصل از تصفیه اولیه و ثانویه، فرآیند آبگیری و خشک سازی آن هم در لاگون‌ها یا بسترهای لجن خشک کن است. بدیهی است که این امر تاثیری بر روی سطح آلودگی و کاهش مقدار فلزات سنگین در لجن نهایی نخواهد داشت. لجن‌های خام خشک شده در فصل زراعی توسط کشاورزان خریداری شده و در اراضی کشاورزی به‌عنوان کود و بهبوددهنده خاک استعمال می‌شوند که در طی این پروسه، فلزات سنگین موجود در لجن وارد خاک شده و چه بسا می‌توانند در محصولات کشاورزی تجمع یافته یا آب‌های زیرزمینی را آلوده سازند. لذا از آنجا که پیشگیری بهتر از درمان و تصفیه است لازم است منشاء آلودگی لجن‌ها به فلزات سنگین در هر شهری مورد بررسی قرار گیرد و آن دسته از جریان‌هایی که فلزات سنگین را به فاضلابروهای شهری وارد می‌نمایند شناسایی شده و تحت کنترل در آیند. نتایج تحقیق حاضر که بر روی نه تصفیه خانه فاضلاب شهری در استان آذربایجان شرقی انجام شد نشان می‌دهد که فلزات سنگین اگرچه در مقایسه با MPS استاندارد EPA در حد مجاز است اما در مقایسه با غلظت‌های "میانگین پوسته زمین"، لجن‌های تحت بررسی دارای ریسک اکولوژیکی بالقوه خیلی بالایی برای محیط هستند. این موضوع به‌ویژه ناشی از وجود مقادیر نسبتا بالای جیوه، آرسنیک، کادمیوم، و سرب است که شاخص تجمع زمینی بالایی را در لجن‌های تحت بررسی نشان دادند. لازم است در کنار تدوین استاندارد ملی حداکثر مقادیر مجاز فلزات سنگین در لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهری، پایش کیفیت این لجن‌ها از نظر مناسب بودن برای کاربردهای کشاورزی حداقل سالیانه یکبار قبل از کاربرد در اراضی کشاورزی، در دستور کار سازمان‌های مربوطه از جمله سازمان حفاظت محیط زیست و شرکت‌های مهندسی آبفای شهری قرار گیرد. در حال حاضر با توجه به نبود اطلاعات نمی‌توان تغییرات فصلی و سالیانه این فلزات در لجن و علل آن را بررسی کرد. بدیهی است که با تولید منظم داده‌ها می‌توان به روند تغییرات این فلزات در جریان لجن پی برد. در تصفیه خانه‌های بررسی شده لازم است نسبت به منشاء یابی و شناسایی منابع ورود فلزات سنگین به‌ویژه آرسنیک و جیوه و رفع آلودگی مربوطه اقدام لازم به عمل آید. ضمنا ضروری است در هنگام استعمال لجن در اراضی کشاورزی حتما ظرفیت محیطی خاک در نظر گرفته شود چرا که استفاده طولانی مدت از لجن به ویژگی‌های خاک آسیب خواهد رساند و ریسک اکولوژیکی را در محیط زیست افزایش خواهد داد. ضمنا اگر خاک از قبل، حاوی مقادیر بالایی از فلزات سنگین باشد لازم خواهد بود ضمن ارزیابی ظرفیت زیست محیطی خاک، استعمال پیوسته لجن بر روی خاک مجددا مورد ارزیابی قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی،

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

انتشـار دوگانـه، تحریـف داده‌هـا و داده‌سـازی را در ایـن مقالـه رعایـت کرده‌انـد.

تشکر و قدردانی

ایـن مقالـه حاصـل (بخشـی از) طـرح تحقیقاتـی بـا عنـوان "بررسـی و شناسـایی انـواع لجـن فاضـلاب و پسـماندهای مربـوط بـه محیـط زیسـت و زمین‌هـای کشـاورزی بـا هـدف تدویـن نحـوه جلوگیری و کنتـرل آلودگی، اسـتان آذربایجان شـرقی" مصـوب اداره کل محیـط زیسـت اسـتان آذربایجـان شـرقی در سـال ۱۳۹۳ بـا کد ۹۳/۱۶۰۹ اسـت که بـا حمایت اداره کل محیـط زیسـت اسـتان آذربایجان شـرقی اجرا شـده اسـت. نویسـندگان مراتـب تشـکر و قدردانـی خـود را از ایـن اداره کل اعـلام می‌دارنـد. ضمنـا از آقـای مهنـدس شـاهرخ نظـم آرا بابـت همـکاری و مسـاعدت در آنالیز نمونه‌ها تشـکر می‌گـردد.

References

1. Balanica CMD, Simionescu AG, Birsan IG, Bichescu CI, Muntenita C. The assessment of using the sewage sludge in agriculture in Romania. Materiale Plastice. 2018;55(4):700-703.
2. Ghoreishi B, Aslani H, Dolatkhah A, Abdoli Seilabi A, Mosaferi M. Evaluation of Microbial Quality in Biosolids Generated from Municipal Wastewater Treatment Plants. Iranian Journal of Health and Environment. 2016;9(1):81-90 (in Persian).
3. Alvarez EA, Mochon MC, Sánchez JJ, Rodríguez MT. Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. Chemosphere. 2002;47(7):765-75.
4. Lamastra L, Suciu NA, Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2018;5(1):10.
5. Kendir E, Kentel E, Sanin FD. Evaluation of heavy metals and associated health risks in a metropolitan wastewater treatment Plant's sludge for its land application. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2015;21(6):1631-43.
6. Duan B, Zhang W, Zheng H, Wu C, Zhang Q, Bu Y. Comparison of health risk assessments of heavy metals and as in sewage sludge from wastewater treatment plants (WWTPs) for adults and children in the urban district of Taiyuan, China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;14(10):1194.
7. Aghili SM, Mehrdadi N, Zazouli MA, Aminzadeh B. Heavy metal concentrations in dewatered sludge of wastewater treatment plant in Sari, Iran. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2019;28(170):152-59 (in Persian).
8. Sheng Q, Zhang H, Wang C, Lang C, Guo Y, Dong J, et al., editors. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal of the sludge in treatment plants in Beijing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2018. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2018;186(3):012070.
9. USEPA. A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule. Washington DC: United States Environmental Protection Agency; 1995.
10. Maanan M, Saddik M, Maanan M, Chaibi M, Assobhei O, Zourarah B. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. Ecological Indicators. 2015;48:616-26.
11. Nazarpour A, Ghanavati N, Babaenejad T. Evaluation of the level of pollution and potential ecological risk of some heavy metals in surface soils in the Ahvaz oil-field. Iranian Journal of Health and Environment. 2017;10(3):391-400 (in Persian).
12. Malvandi H, Hassanzadeh N. Environmental and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of the CheshmeKile River, Mazandaran. Iranian Journal of Health and Environment. 2018;11(3):419-32 (in Persian).
13. Vu CT, Lin C, Nguyen KA, Shern C-C, Kuo Y-M. Ecological risk assessment of heavy metals sampled in sediments and water of the Houjing River, Taiwan. Environmental Earth Sciences. 2018;77(10):388.
14. Zahra A, Hashmi MZ, Malik RN, Ahmed Z. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

Nallah—feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. Science of the Total Environment. 2014;470:925-33.
15. Duan B, Zhang W, Zheng H, Wu C, Zhang Q, Bu Y. Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;14(7):823.
16. Water and Wastewater Company of East Azarbaijan Province. Performance report of Water and Wastewater Company of East Azarbaijan Province during 2018. Tabriz: Water and Wastewater Company of East Azarbaijan; 2019 (in Persian).
17. USEPA. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Washington DC: United States Environmental Protection Agency; 1996.
18. Christophoridis C, Dedepsidis D, Fytianos K. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators. Journal of Hazardous Materials. 2009;168(2-3):1082-91.
19. Effendi H, Kawaroe M, Mursalin, Lestari DF. Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediment of Mahakam Delta, East Kalimantan. Procedia Environmental Sciences. 2016;33:574-82.
20. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. Water Research. 1980;14(8):975-1001.
21. Ghoreishi B, Shaker Khatibi M, Aslani H, Dolatkhah A, Abdoli Seilabi A, Mosaferi M. Evaluation of microbial quality in biosolids generated from municipal wastewater treatment plants. Iranian Journal of Health and Environment. 2016;9(1):81-90 (in Persian).
22. Aghili Seyed S, Mehrdadi N, Zazouli M, Aminzadeh B. Heavy metal concentrations in dewatered sludge of wastewater treatment plant in Sari, Iran. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2019;28(170):152-159.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir

Original Article

Pollution potential and ecological risk of heavy metals in municipal wastewater treatment plants sludge

Bahareh Ghoreishi[1], Hassan Aslani[1], Mohammad Shaker Khatibi[1], Sepideh Nemati Mansur[2], Mohammad Mosaferi[3,*]

1- Department of Environmental Health Engineering, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

2- Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

3- Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 25 April 2020

Revised: 14 June 2020

Accepted: 16 June 2020

Published: 20 June 2020

Keywords: Heavy metals, Ecological risk, Sludge, Soil pollution, East Azerbaijan

***Corresponding Author:**
mosaferim@tbzmed.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Application of sewage sludge contaminated with heavy metals may cause health and ecological concern. Ecological risk and heavy metals content of sewage sludge from wastewater treatment plants of East Azerbaijan province were evaluated in the present study.

Materials and Methods: Nine composite samples were taken and analyzed for heavy metals. The geo-accumulation index (Igeo), contamination factor(CF) , and potential ecological risk index were calculated.

Results: Variation of the heavy metals concentrations were in the following order: Zn>Cu>Pb>Cr>Ni>As>Hg>Cd. The contents of some heavy metals were several order of magnitude higher than the crustal average (CA) values. Considering the Maximum Permissible Standards (MPS) and the Muller's index, the Cd, Cu, and Zn pollution were found to be in the moderate range, whereas As and Pb were in strongly polluted category; and Hg was in extremely polluted category. Considering MPS, the single-factor pollution index (PI) and the Nemerow's synthetic pollution index (PN) were lower than 1 and 0.7 respectively. This indicated that the sludges were unpolluted with most heavy metals and could be safely applied for agricultural uses. However, a high potential ecological risk for As and Cd; very high risk for Pb; and extremely high risk for Hg were calculated when considering the CA values. There were significant differences between the levels of heavy metals and MPS ($p < 0.05$).

Conclusion: Although the metal concentrations were below the MPS according to the US EPA regulations, sludge samples showed a high degree of potential ecological risk for the environment in comparision with the CA values,. Periodic monitoring of sludge quality are strongly recommended.

Please cite this article as: Ghoreishi B, Aslani H, Shaker Khatibi M, Nemati Mansur S, M Mosaferi. Pollution potential and ecological risk of heavy metals in municipal wastewater treatment plants sludge. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(1):87-102.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-19]