



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مروری بر انحلال فلزات سنگین از شیرابه‌ی محل دفن زباله‌های جامد شهری به داخل خاک

علی محمدی^{۱*}، هاجر مر یخ‌پور^۲، مریم عباسی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* نویسنده مسئول: ali.mohammadi9839@gmail.com

چکیده

پسماندهای شهری در کشورهای در حال توسعه اغلب به صورت غیراصولی دفع می‌شوند و منجر به تولید شیرابه‌های آلوده حاوی مواد آلی، یون‌های معدنی و فلزات سنگین می‌گردند. این شیرابه‌ها می‌توانند از طریق خاک به منابع آب زیرزمینی نفوذ کنند و خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد نمایند. این مطالعه با هدف بررسی اثر آبشویی عناصر سنگین موجود در شیرابه در خاک انجام شد. نتایج نشان داد فلزاتی مانند کادمیوم، سرب، مس، روی و منگنز در نزدیکی محل دفن بیشترین غلظت را دارند و با فاصله کاهش می‌یابند. عوامل خاکی شامل pH، بافت، ماده آلی و اندازه ذرات نقش مهمی در انتقال فلزات دارند. یافته‌ها بر ضرورت مدیریت اصولی پسماند، پایش مستمر و استفاده از روش‌هایی مانند گیاه‌پالایی برای حفاظت از محیط‌زیست و منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کنند.

واژگان کلیدی: آلودگی خاک، انحلال فلزات، شیرابه، فلزات سنگین، محل دفن زباله جامد شهری

مقدمه

پسماندهای جامد شهری در بسیاری از نقاط جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به‌طور غیراصولی جمع‌آوری و دفع می‌شوند. دفع نامناسب این پسماندها، به‌ویژه در مکان‌هایی که فاقد زیرساخت‌های مهندسی لازم هستند، منجر به تولید شیرابه می‌شود؛ مایعی که در اثر نفوذ آب باران، فاضلاب یا آب شست‌وشو به داخل توده‌های زباله و واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی ایجاد می‌گردد. شیرابه حاوی مجموعه‌ای از آلاینده‌ها از جمله مواد آلی محلول، ترکیبات نیتروژنی، فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب و نیکل، ترکیبات گوگردی، شاخص‌های آلودگی نظیر BOD^1 و COD^2 و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا است. ورود این ترکیبات به خاک می‌تواند باعث نفوذ تدریجی آن‌ها به آب‌های زیرزمینی و آلودگی پایدار منابع آبی شود (Ma et al. 2022). در ایران، مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه، پسماندهای شهری اغلب بدون تفکیک یا فرآیندهای پیش‌درمانی به محل‌های دفن منتقل می‌شوند. بسیاری از سایت‌های دفن زباله فاقد لایه‌های ایزولاسیون مهندسی شده یا سیستم‌های زهکشی مناسب برای شیرابه هستند، به‌طوری که این مایعات آلوده بدون تصفیه وارد لایه‌های زیرین خاک می‌شوند. اگرچه خاک در برخی موارد می‌تواند نقش جذب‌کننده یا تثبیت‌کننده برخی آلاینده‌ها را ایفا کند، اما توان تصفیه طبیعی آن محدود است و آلودگی‌ها به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کنند. این مسئله اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا منابع آب زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین آب شرب و مصارف کشاورزی ایفا می‌کنند (Rouhani et al. 2023). در اثر نفوذ شیرابه به خاک، آلودگی منابع آب زیرزمینی و خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفن غیراصولی پسماندهای شهری است. که با رشد سریع جمعیت و توسعه شهری مواجه است، مدیریت نامناسب پسماندها و دفن غیرمهندسی زباله‌ها منجر به تولید شیرابه‌هایی شده که احتمال نفوذ آن‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی وجود دارد. منابع آب زیرزمینی برای مصارف خانگی و کشاورزی، بررسی علمی و دقیق تأثیر شیرابه بر کیفیت این منابع، اهمیت ویژه‌ای دارد (Mishra et al. 2019). مطالعه حاضر با هدف اثر آبشویی عناصر سنگین در خاک قرار گرفت که اهمیت زیادی دارد، زیرا عوامل خاکی شامل pH، بافت، ماده آلی و اندازه ذرات در آزادسازی و انتقال فلزات نقش اساسی دارند. بررسی مطالعات پیشین در این زمینه می‌تواند بینش مفیدی برای مدیریت پسماند و حفاظت از محیط‌زیست فراهم کند. (Qiu et al. 2018).

مبانی نظری پژوهش

انواع پسماند شهری

پسماندهای شهری، به مجموعه‌ای از زباله‌هایی اطلاق می‌شود که از فعالیت‌های روزمره انسان در محیط‌های شهری تولید می‌شوند و مدیریت اصولی آن‌ها برای حفظ سلامت عمومی و محیط‌زیست ضروری است. بر اساس طبقه‌بندی‌های علمی و استانداردهای بین‌المللی، پسماند شهری معمولاً به چند دسته اصلی تقسیم می‌شود. پسماند خانگی رایج‌ترین نوع آن است که شامل زباله‌های تولیدشده در منازل مانند باقی‌مانده مواد غذایی، پلاستیک، کاغذ، شیشه و فلزات است. پسماند تجاری و صنفی، از فروشگاه‌ها، رستوران‌ها و واحدهای خدماتی به‌وجود می‌آید و معمولاً شباهت زیادی به پسماند خانگی دارد، ولی از نظر حجم و ترکیب می‌تواند متفاوت باشد. پسماند حجیم مانند لوازم خانگی مستعمل، مبلمان، وسایل الکترونیکی و ضایعات چوبی از نظر مدیریت نیازمند تجهیزات خاص برای جمع‌آوری و بازیافت هستند. پسماند عمرانی یا ساختمانی، شامل نخاله‌های ساختمانی، آجر، بتن و خاک است که به‌ویژه در مناطق در حال توسعه شهری سهم بالایی دارد. پسماند صنعتی شهری نیز توسط واحدهای تولیدی کوچک داخل شهرها تولید می‌شود و گاهی دارای ترکیبات شیمیایی خاص و خطرناک است. پسماند خطرناک شهری، هرچند سهم کمی در کل دارد، اما به‌دلیل اثرات زیست‌محیطی و سلامتی بالا، نیازمند مدیریت جداگانه است؛ مانند باتری‌ها، داروهای تاریخ‌مصرف‌گذشته و مواد شیمیایی خانگی. پسماند زیست‌پزشکی خانگی شامل سرنگ، تیغ، دارو و اقلام آلوده نیز در طبقه پسماندهای نوظهور شهری در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، منابع معتبر جهانی مانند WHO³ و UNEP⁴ بر تفکیک در

¹ BOD (Biochemical Oxygen Demand)

² COD (Chemical Oxygen Demand)

³ World Health Organization (WHO)

⁴ United Nations Environment Programme

مبدأ، کاهش تولید، و استفاده از فناوری‌های نوین بازیافت تأکید دارند تا بار زیست‌محیطی این پسماندها کاهش یابد و اقتصاد چرخشی شهری تقویت شود. (Association 2024)(Organization 2024)

شیرابه

شیرابه مایعی است که از نفوذ آب باران یا رطوبت به زباله‌ها ایجاد شده و مواد حل‌شده یا معلق را از آن‌ها استخراج می‌کند. (Pazoki and Ghasemzadeh 2020) ترکیب آن شامل مواد آلی محلول و معلق، یون‌های معدنی و فلزات سنگین است. (Pazoki and Ghasemzadeh 2020) مواد آلی قابل تجزیه مانند الکل‌ها، اسیدهای چرب و قندها و ترکیبات آلی پایدار مانند هیدروکربن‌های هالوژنه و پلی‌کلروبی‌فنیل‌ها در شیرابه یافت می‌شوند. یون‌های معدنی شامل آمونیوم، کلرید، سولفات، کلسیم، منیزیم و آهن هستند که می‌توانند شوری و هدایت الکتریکی شیرابه را افزایش دهند. (Abdel-Shafy et al. 2024) فلزات سنگین نظیر قلع (Zn)، مس (Cu)، سرب (Pb)، کروم (Cr)، کادمیوم (Cd)، نیکل (Ni)، جیوه (Hg) و آرسنیک (As) نیز به مقدار متغیر در شیرابه وجود دارند و به دلیل پایداری و سمیت بالا خطرناک هستند. ترکیب شیمیایی شیرابه تحت تأثیر سن محل دفن، نوع زباله، شرایط اقلیمی و طراحی فنی محل دفن قرار دارد. شناخت دقیق این ترکیب برای ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و مدیریت مؤثر پسماند ضروری است. (Wdowczyk and Szymańska-Pulikowska 2020)

فرآیند آبشویی فلزات سنگین

آبشویی فرآیندی است که طی آن فلزات سنگین از فاز جامد به مایع، معمولاً آب زیرزمینی یا سطحی، منتقل می‌شوند و موجب ورود تدریجی عناصر سمی به منابع آب می‌گردند. این فرآیند اغلب در محل‌های دفن زباله، خاک‌های آلوده و مجاورت پسماندهای صنعتی رخ می‌دهد و فلزاتی مانند سرب، کادمیوم و نیکل را وارد چرخه آب می‌کند، که پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی جدی دارد. (Dwanga et al. n.d.) مکانیسم‌های اصلی آبشویی شامل انحلال وابسته به pH، تبادل یونی، جذب و واجذب سطحی، رسوب‌گذاری و انحلال مجدد، فعالیت میکروبی و کمپلکس‌شدن فلزات با مواد آلی است. (Raji et al. 2025)(Ghosh and Kartha 2025)(Zheng et al. 2024)(Q. Li et al. 2022) شدت و سرعت آبشویی فلزات سنگین تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد. pH خاک و شیرابه تعیین‌کننده حلالیت فلزات است؛ کاهش pH موجب افزایش انحلال سرب و کادمیوم می‌شود. حضور مواد آلی و کلات‌کننده‌ها، میزان بارش، نفوذپذیری خاک و غلظت اولیه فلزات نیز نقش مهمی در انتقال عناصر دارند. (Ghosh and Kartha 2025) علاوه بر این، تخلخل و حجم منفذی خاک (پوروالیوم) میزان عبور محلول‌ها و دفعات آبشویی را تعیین می‌کند و ابزار کلیدی برای تحلیل رفتار حرکت فلزات در ستون‌های خاک است. (Darling et al. 2020) منابع اصلی آبشویی فلزات سنگین شامل محل‌های دفن زباله، پساب‌های صنعتی و خاک‌های آلوده می‌باشند (Reiber et al. 2021)(Xiao et al. 2020)

مروری بر مطالعات انجام شده

Awokunmi و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر فرایند شست‌وشو فلزات سنگین در محل‌های دفن پسماند در مناطق شهری ایکره و آدو اکتی در جنوب غربی نیجریه انجام شد. در این تحقیق، نمونه‌های خاک از مرکز و فواصل مختلف (۱۰ تا ۷۰ متر در امتداد شیب زمین) از چند محل دفن زباله جمع‌آوری و غلظت فلزات سنگین از جمله کروم، منگنز، آهن، کبالت، نیکل، مس، روی، کادمیوم، قلع، سرب در آن‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه‌های شاهد نیز از فاصله ۲۰۰ متری پایین دست هر محل برداشت و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که غلظت این فلزات در نقاط مختلف از مرکز محل دفن تا پایین دست دارای اختلاف معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) بوده و وجود مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین سمی در این مناطق تأیید شد. بر اساس نتایج، استفاده از روش‌های گیاه‌پالایی به عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش آلودگی پیشنهاد گردید. (Awokunmi, Asaolu, and Kanmani Ipinmoroti 2010) به بررسی در محل دفن روباز پسماندهای جامد شهری آریایامانگلام واقع در تریچیراپالی (تامیل نادو، هند)، غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک اطراف این محل بررسی شد تا میزان آلودگی ناشی از مهاجرت شیرابه مشخص شود. این محل روزانه حدود ۴۰۰-۴۷۰ تن زباله شهری دریافت می‌کند. به منظور شناسایی ترکیب زباله‌ها، خصوصیات پسماند تازه و قدیمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که غلظت فلزات سنگین در خاک به ترتیب $Mn > Pb > Cu > Cd$ بوده و آلودگی قابل توجهی در اثر مهاجرت شیرابه به خاک‌های اطراف مشاهده شده است. همچنین بیان شد که در صورت عدم مداخله و اجرای اقدامات کنترلی، این آلاینده‌ها ممکن است به مرور زمان به لایه‌های زیرین خاک نفوذ

کرده و منابع آب زیرزمینی را آلوده سازند. این یافته‌ها اهمیت پایش و مدیریت مناسب محل‌های دفن روباز را برای پیشگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی برجسته می‌سازد. (Li (Kanmani and Gandhimathi 2013) و همکاران (۲۰۱۵) با توجه به نگرانی فزاینده از آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های شهری و تأثیر آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان، مطالعه‌ای در شهر گوانگژو، چین انجام شد تا اثر باران اسیدی شبیه‌سازی شده (SAR) بر مهاجرت، دگرگونی و گونه‌بندی فلزات Cu, Pb, Cd و Zn در ۹ نوع خاک طبیعی شهری بررسی شود. آزمایش آبشویی همراه با تحلیل خوشه‌ای دوبعدی (2-D HCA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه غلظت کل Zn (19570 mg/kg) و Cu (322.4 mg/kg) در خاک‌ها بالا بود، اما غلظت‌های آن‌ها در شیرابه کمتر از حد مجاز رده III استاندارد کیفی چین برای آب‌های سطحی و زیرزمینی بود، بنابراین ریسک آلودگی آبی کمی ایجاد می‌کردند. در مقابل، غلظت Pb و Cd در شیرابه‌ها از حدود مجاز رده‌های III و V فراتر رفت. پس از آبشویی، نسبت فلزات در بخش‌های غیرماندگار در برخی خاک‌ها کاهش یافت که بیانگر افت ریسک آلودگی در سیستم خاک-آب بود، اما در برخی S6 در سرب و کادمیوم افزایش یافت. تحلیل‌ها نشان دادند که آزادسازی فلزات به شدت به فراکشن‌های آن‌ها و ویژگی‌های خاک مانند pH، بافت خاک و ماده آلی وابسته است. همچنین روابط مثبت معناداری میان غلظت فلزات در شیرابه و غلظت کل فلزات در خاک مشاهده شد. (Ni (J. Li et al. 2015) و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی خاکستر پرواز حاصل از زباله‌سوزی شهری به دلیل خاصیت قلیایی و غلظت بالای فلزات سنگین بالقوه خطرناک، به‌عنوان پسماند خطرناک طبقه‌بندی می‌شود و نیازمند بررسی دقیق است. در این مطالعه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکسترهای پرواز مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت تا رابطه بین خصوصیات فیزیکی و رفتار آبشویی فلزات سنگین مشخص شود. ترکیبات معدنی اصلی شامل CaClOH, NaCl, Ca(OH)₂ و KCl و SiO₂ شناسایی شدند و توزیع اندازه ذرات در بازه ۱۰ تا ۳۰۰ میکرومتر قرار داشت. نتایج نشان داد که کاهش اندازه ذرات با افزایش سطح ویژه BET همراه بوده و این امر آزادسازی فلزات سنگین را تسهیل می‌کند. به دلیل وجود تخلخل بالا، این خاکسترها نیز ظرفیت بالایی در انباشت فلزات سنگین دارند. آزمایش‌های آبشویی حاکی از قابلیت بالای آزادسازی فلزات بوده و در اکثر نمونه‌ها، غلظت سرب (Pb) به مراتب بالاتر از حد مجاز استاندارد ملی کنترل آلودگی محل‌های دفن پسماندهای شهری گزارش شد. بنابراین، طراحی سامانه‌های مدیریت و دفع مناسب با توجه به ویژگی‌های خاکستر MSWI در چین برای حفاظت از محیط‌زیست ضروری است. (Sanga (Ni et al. 2017) و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی، محل دفن زباله شهری ایرینگا پرداختند. نمونه‌های شیرابه از محل دفن و نمونه‌های آب زیرزمینی از چاه‌های مسکونی اطراف جمع‌آوری و از نظر pH، هدایت الکتریکی (EC)، جامدات محلول کل (TDS) و فلزات سنگین Zn, Mn, Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Fe تحلیل شدند. نتایج نشان داد که pH شیرابه‌ها بین ۷,۴۰ تا ۹,۱۰ متغیر بوده و رفتار قلیایی ناشی از فاز متانوژنیک زباله‌ها را نشان می‌دهد. سطوح EC، TDS و غلظت اکثر فلزات سنگین در شیرابه‌ها بالاتر از حدود ملی و بین‌المللی بود. در مقابل، آب‌های زیرزمینی دارای pH بین ۷,۱۵ تا ۷,۶۰ و در محدوده مجاز سازمان جهانی بهداشت بودند، اما مقادیر EC، TDS و فلزاتی نظیر Fe, Pb, Ni, Mn و Zn در بسیاری از نمونه‌ها فراتر از استانداردهای قابل شرب گزارش شد. شاخص کیفیت آب بین ۸,۳۰ تا ۱۷,۹۰ محاسبه شد که نشانگر کیفیت مطلوب منابع آب زیرزمینی بود، هرچند وجود غلظت بالای فلزات سنگین بالاتر از حدود مجاز بیانگر خطر بالقوه برای محیط‌زیست و سلامت عمومی است. این نتایج ضرورت مدیریت مناسب پسماندهای شهری را برای جلوگیری از آلودگی بیشتر منابع آب زیرزمینی و محیط اطراف محل دفن ایرینگا برجسته می‌سازد. (Sanga, Fabian, and Kimbokota 2023)

جدول ۱- خلاصه ای از مطالعات مروری انجام شده در خصوص فرآیند آبخویی فلزات سنگین ناشی از شیرابه پسماند

عنوان پژوهش	نتیجه نهایی	منبع	سال انجام پژوهش
بررسی رفتار آبخویی فلزات سنگین در خاک‌های معدنی آلوده	فلزات سنگین (Zn, Cu, Pb, Cd) غیره) در خاک‌های آلوده عمدتاً متحرک هستند و باران اسیدی آزادسازی آن‌ها را به شدت افزایش می‌دهد، افزایش خطرات زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.	(Wang et al. 2024)	۲۰۲۴
استفاده از آبخویی خلاً (BVM) برای حذف فلزات سنگین از خاک‌های کم‌نفوذ	افزایش ارتفاع ستون خاک سرعت آبخویی را کاهش می‌دهد، اما تجزیه ذرات و اعمال خلاً باعث تجمع فلزات در عمق مشخص و افزایش بازده حذف می‌شود.	(Wu et al. 2024)	۲۰۲۴
شبیه‌سازی مهاجرت فلزات سنگین (Pb) و (Cd) در خاک با استفاده از معادله CDE	کادمیوم سریع‌تر از سرب حرکت می‌کند و طی ۷ سال تا عمق ۱۵-۲۰ سانتی‌متر نفوذ می‌کند، در حالی که سرب عمدتاً در لایه بالایی ۰-۶ سانتی‌متر باقی می‌ماند.	(Luo et al. 2024)	۲۰۲۴
بررسی اثر شیرابه محل دفن پسماند بر تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاهان در کازابلانکا، مراکش	فلزات سنگین (Cd, Hg, Pb) در خاک و گیاهان تجمع می‌یابند؛ بیشترین انتقال مربوط به Pb است و مدیریت شیرابه برای کاهش خطرات زیست‌محیطی ضروری است.	(Belasri et al. 2024)	۲۰۲۴

نتیجه‌گیری

مطالعات مختلف روی محل‌های دفن پسماند شهری بر بررسی آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی با فلزات سنگین متمرکز بوده‌اند. این تحقیقات معمولاً هدفشان شناسایی غلظت فلزات در خاک و شیرابه، بررسی مهاجرت آن‌ها و ارزیابی ریسک زیست‌محیطی بوده است. نمونه‌برداری‌ها شامل خاک اطراف محل دفن، شیرابه و در برخی موارد خاکستر پرواز پسماند بوده و تحلیل‌ها شامل اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین، شبیه‌سازی آبخویی، تحلیل‌های آماری و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پسماند بوده است.

نتایج نشان داده است که فلزات سنگین مانند Cu, Pb, Cd و Zn و Mn در خاک و شیرابه موجود بوده و غلظت آن‌ها در نزدیکی محل دفن بالاتر است و با فاصله کاهش می‌یابد. ویژگی‌های خاک و پسماند مانند pH، بافت، ماده آلی، اندازه ذرات و سطح ویژه، نقش مهمی در آزادسازی و مهاجرت فلزات دارند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که در صورت عدم مدیریت مناسب، این آلاینده‌ها می‌توانند به منابع آب زیرزمینی نفوذ کرده و خطر بالقوه برای محیط‌زیست و سلامت انسان ایجاد کنند. در مجموع، این پژوهش‌ها اهمیت پایش مستمر، مدیریت اصولی محل‌های دفن و استفاده از روش‌های کاهش آلودگی مانند گیاه‌پالایی را برای محافظت از محیط‌زیست و منابع آب تأکید می‌کنند.

چالش‌های اصلی مرتبط با اثر آبخویی فلزات سنگین در خاک و مدیریت پسماند شهری شامل دفن غیرمهندسی پسماند و فقدان سیستم‌های ایزولاسیون و زهکشی مناسب است که منجر به نفوذ شیرابه آلوده به خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. فلزات سنگین مانند Cu, Pb, Cd و Zn و Mn در نزدیکی محل دفن بیشترین غلظت را دارند و ویژگی‌های خاک و پسماند از جمله pH، بافت، ماده آلی و اندازه ذرات، روند آزادسازی و مهاجرت این آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ظرفیت محدود خاک برای تصفیه طبیعی، خطرات زیست‌محیطی و تهدید سلامت انسان را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کمبود پایش مستمر و فناوری‌های مؤثر مانند گیاه‌پالایی یا سیستم‌های پیشرفته تصفیه شیرابه، مدیریت مناسب این آلاینده‌ها را با چالش مواجه کرده است.

فهرست منابع

- Abdel-Shafy, Hussein I, Amr M Ibrahim, Ahmed M Al-Sulaiman, and Raouf A Okasha. 2024. "Landfill Leachate: Sources, Nature, Organic Composition, and Treatment: An Environmental Overview." *Ain Shams Engineering Journal* 15(1): 102293.
- Association, International Solid Waste. 2024. "Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste: Turning Rubbish into a Resource."
- Awokunmi, E E, S S Asaolu, and K O Ipinmoroti. 2010. "Effect of Leaching on Heavy Metals Concentration of Soil in Some Dumpsites." *African Journal of Environmental Science and Technology* 4(8): 495–99.
- Belasri, Lamiaa, Mourad Arabi, Safaa Sabri, Fouzia Hmimid, and Samah Ait Benichou. 2024. "Transfer of Metals from the Soil to Medicago Sativa Irrigated with Municipal Landfill Leachate." *Journal of Ecological Engineering* 25(8): 336–46.
- Darling, John A, John Martinson, Katrina M Pagenkopp Lohan, Katharine J Carney, Erik Pilgrim, Aabir Banerji, Kimberly K Holzer, and Gregory M Ruiz. 2020. "Metabarcoding Quantifies Differences in Accumulation of Ballast Water Borne Biodiversity among Three Port Systems in the United States." *Science of the Total Environment* 749: 141456.
- Dwanga, Danladi Mudwa, Musa Yahaya Abubakar, Ansar Bilyaminu Adam, Shittu Abubakar Muhammad, and Edmond Luke Obasi. "HEAVY METAL LEACHING FROM LANDFILLS: A REVIEW OF GROUNDWATER CONTAMINATION AND LONG TERM ENVIRONMENTAL IMPACTS."
- Ghosh, Arghya, and Suresh A Kartha. 2025. "Effect of Different PHs and Liquid-to-Solid Ratios on Leaching Behavior of Heavy Metals from Landfill-Mined-Soil-like-Fractions." *Journal of Environmental Management* 376: 124421.
- Kanmani, Subramaniam, and Rajan Gandhimathi. 2013. "Assessment of Heavy Metal Contamination in Soil Due to Leachate Migration from an Open Dumping Site." *Applied water science* 3(1): 193–205.
- Li, Junhui, Chongjian Jia, Ying Lu, Suofang Tang, and Hojae Shim. 2015. "Multivariate Analysis of Heavy Metal Leaching from Urban Soils Following Simulated Acid Rain." *Microchemical Journal* 122: 89–95.
- Li, Qi, Yanhong Wang, Yichun Li, Linfeng Li, Mingdeng Tang, Weifang Hu, Li Chen, and Shaoying Ai. 2022. "Speciation of Heavy Metals in Soils and Their Immobilization at Micro-Scale Interfaces among Diverse Soil Components." *Science of the Total Environment* 825: 153862.
- Luo, Ying, Zhe Wang, Yong-De Zhang, Jia-Qian Zhang, Qiu-ping Zeng, Zhen-Long Zhang, Duan Tian, et al. 2024. "Vertical Migration Behavior Simulation and Prediction of Pb and Cd in Co-Contaminated Soil around Pb-Zn Smelting Slag Site." *Journal of Hazardous Materials* 469: 133990.
- Ma, Shijun, Chuanbin Zhou, Jingjin Pan, Guang Yang, Chuanlian Sun, Yijie Liu, Xinchuang Chen, and Zhilan Zhao. 2022. "Leachate from Municipal Solid Waste Landfills in a Global Perspective: Characteristics, Influential Factors and Environmental Risks." *Journal of Cleaner Production* 333: 130234.
- Mishra, Sachin, Dhanesh Tiwary, Anurag Ohri, and Ashwani Kumar Agnihotri. 2019. "Impact of Municipal Solid Waste Landfill Leachate on Groundwater Quality in Varanasi, India." *Groundwater for Sustainable Development* 9: 100230.
- Ni, Peng, Hailong Li, Yongchun Zhao, Junying Zhang, and Chuguang Zheng. 2017. "Relation between Leaching Characteristics of Heavy Metals and Physical Properties of Fly Ashes from Typical Municipal Solid Waste Incinerators." *Environmental Technology* 38(17): 2105–18.
- Organization, World Health. 2024. *Compendium of WHO and Other UN Guidance on Health and Environment: Version with International Classification of Health Intervention (ICHI) Codes*. World Health Organization.
- Pazoki, Maryam, and Reza Ghasemzadeh. 2020. *Municipal Landfill Leachate Management*. Springer.
- Qiu, Qili, Xuguang Jiang, Zhiliang Chen, Shengyong Lu, and Mingjiang Ni. 2018. "Leaching of Heavy Metals from MSWI Fly Ash: Experiments vs. Simulation." *Archives of Environmental Protection* 44(2).
- Raji, Zarifeh, Ahasanul Karim, Antoine Karam, Mohammed Aider, and Seddik Khalloufi. 2024. "Valorization of Fava, Lentil, Pea, and Soya Husks as Sustainable Adsorbents for Lead Removal from Contaminated Water: Characterization, Adsorption Kinetics, and Isotherms." *Biomass Conversion and Biorefinery*: 1–17.
- Reiber, Lena, Saskia Knillmann, Oliver Kaske, Liseth C Atencio, Lisa Bittner, Julia E Albrecht, Astrid Götz, et al. 2021. "Long-Term Effects of a Catastrophic Insecticide Spill on Stream Invertebrates." *Science of The Total Environment* 768: 144456.
- Rouhani, Abdulmannan, Shabnam Shadloo, Abbas Naqibzadeh, Michal Hejcman, and Morad derakhsh. 2023. "Pollution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil around an Open Landfill Site in a Developing Country (Kazerun, Iran)." *Chemistry Africa* 6(4): 2139–49.
- Sanga, Victor Fanuel, Christina Fabian, and Fikira Kimbokota. 2023. "Heavy Metal Pollution in Leachates and Its Impacts on the Quality of Groundwater Resources around Iringa Municipal Solid Waste Dumpsite."

- Environmental Science and Pollution Research* 30(3): 8110–22.
- Wang, Fei, Wei Li, Hao Wang, Yuanan Hu, and Hefa Cheng. 2024. "The Leaching Behavior of Heavy Metal from Contaminated Mining Soil: The Effect of Rainfall Conditions and the Impact on Surrounding Agricultural Lands." *Science of the Total Environment* 914: 169877.
- Wdowczyk, Aleksandra, and Agata Szymańska-Pulikowska. 2020. "Differences in the Composition of Leachate from Active and Non-Operational Municipal Waste Landfills in Poland." *Water* 12(11): 3129.
- Wu, Yajun, Haofan Yue, Xudong Zhang, Xueke Zang, Yuncong Sun, Changsong Zhang, Jinhong Wu, Thanh-Hai Le, and Nguyen Xuan Quang Chau. 2024. "Research on the Heavy Metal Migration and Distribution Patterns of Low Permeability Copper and Zinc Contaminated Soil during Bottom Vacuum Leaching." *Process Safety and Environmental Protection* 186: 252–63.
- Xiao, Ling, Chi Zhang, Gang Wang, Dongsheng Guan, Renduo Zhang, Yujuan Chen, and Jun Dai. 2020. "Influencing Pathways of Soil Microbial Attributes on Accumulation of Heavy Metals in Brassica (Brassica Campestris L. Ssp. Chinensis Var. Utilis Tsen et Lee) Leaves." *Environmental Pollution* 262: 114215.
- Zheng, Xiaojun, Hongjun Lin, Daolin Du, Guanlin Li, Ohidul Alam, Zheng Cheng, Xinlin Liu, Shan Jiang, and Jian Li. 2024. "Remediation of Heavy Metals Polluted Soil Environment: A Critical Review on Biological Approaches." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 284: 116883.

A Review on the Leaching of Heavy Metals from Municipal Solid Waste Landfill Leachate into Soil

Ali Mohammadi^{1*}, Hajar Merrikhpour², Maryam Abbasi³

¹ MSc student, Civil, Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Civil, Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* Corresponding author: ali.mohammadi9839@gmail.com

Abstract

Municipal solid waste in developing countries is often disposed of improperly, leading to the generation of contaminated leachate containing organic matter, mineral ions, and heavy metals. This leachate can percolate through the soil into groundwater, posing environmental and health risks. This study aimed to investigate the leaching behavior of heavy metals from leachate into the soil. The results showed that metals such as cadmium,

lead, copper, zinc, and manganese exhibited the highest concentrations near the landfill and decreased with distance. Soil factors, including pH, texture, organic matter content, and particle size, play a significant role in metal transport. The findings highlight the necessity of proper waste management, continuous monitoring, and the application of remediation techniques, such as phytoremediation, to protect the environment and groundwater resources.

Keywords: Heavy metals, Leachate, Metal Leaching, Municipal solid waste landfill, Soil contamination