

Original Article



Investigation of the Relationship Between Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Physicochemical Parameters in the Leachate of Municipal Solid waste Landfill in Tehran

Received: 2024.01.30

Accepted: 2025.01.26

Mahin Rasouli,¹ Mahdi Jalili Ghazizadeh,¹ *  Touraj Nasrabadi,² Majid Baghdadi³

¹ Department of Environmental Technologies, Environmental Sciences Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² Department of Environmental Planning, Management and Education, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Environmental Engineering, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

How to cite this article:

Rasouli, M., Jalili Ghazizadeh, M., Nasrabadi, T. and Baghdadi, M., 2025. Investigation of the Relationship Between Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Physicochemical Parameters in the Leachate of Municipal Solid waste Landfill in Tehran. *Adv. Environ. Sci.* 23(1): 177-190.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are prevalent in a multitude of products landfilling in waste disposal sites and leachate emanating from these sites serving as the principal vectors for the introduction of these compounds into the environment. These substances can enter ecosystems through food chains and accumulate in the liver and kidney tissues of humans and animals, causing thyroid diseases, lung dysfunction, and liver, kidney, bladder, and testicular cancers. Also, the accumulation of these substances in mammals impairs their immune system and their reproduction and growth. Due to the stable nature and bioaccumulation of perfluorooctanoic acid (PFOS) and its salts and perfluorooctanesulfonyl fluoride (PFOSF) in 2009, these substances were added to the list of stable organic substances (POPs) in the Stockholm Convention. An approach for detecting per- and polyfluoroalkyl substances involves elucidating the relationship between these compounds and various physicochemical parameters. Some studies have been conducted for investigation of these relationships across multiple disciplines, providing a foundation for the potential association between these parameters.

Material and Methods: The case study was conducted at the Aradkouh municipal solid waste landfill located in the southern region of Tehran. Sampling was conducted on numerous occasions at the waste landfill. Samples were sent to an accredited laboratory for measurement of per- and polyfluoroalkyl substances and physicochemical parameters. To measure the amount of different per- and polyfluoroalkyl substances, liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS-MS) was used in this research. The lowest reporting limit for the liquid samples in the present study was 0.5 µg/L. The R statistical software was employed to scrutinize the collected data, facilitating the assessment of the correlation between the concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances and the respective physicochemical parameters. Pearson correlation analysis and linear regression were used to evaluate the correlation and relationship between the concentration of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and proxy parameters.

Results and Discussion: This is the first study to find the relationship between physicochemical parameters such as total suspended solids (TSS) and redox potential (ORP) with PFAS concentration in waste leachate. The findings revealed a pronounced correlation between the concentration of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and chloride. Equations that incorporated the parameters of chloride (0.95), and chemical oxygen demand (0.58) showed the highest R² values in comparison to other equations; notably, the exclusion of these parameters from the regression equations resulted in a diminished R² value. Consequently, there exists a significant correlation pertaining to the inclusion of these parameters within the multivariate equations. In general, regression models showed a correlation and potential relationship between PFAS and physicochemical parameters in this study. The robust correlation discerned between the concentration of per- and polyfluoroalkyl substances and physicochemical parameters may be attributable to factors such as the moisture content of the waste (organic waste), the composition of the waste (including paper and food packaging), and the decomposition of organic materials presented in the waste.

Conclusion: The results of this study have potential utility for the evaluation of per- and polyfluoroalkyl substances concentration through the application of physicochemical parameters in landfill leachate. While the identification of per- and polyfluoroalkyl substances in leachate underscores their persistence and environmental transformation, it simultaneously accentuates the necessity for the enhancement of waste management strategies, particularly those emphasizing source separation, within Iran. Effective management strategies are imperative to avert landfill sites from contributing to the release of these substances.

Keywords: Tehran, leachate, Waste management, Per- and polyfluoroalkyl substances

* Corresponding Author Email Address: ma_jalili@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1462



شناسایی و تحلیل ارتباط بین مواد پر و پلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند شهر تهران

مهین رسولی^۱، مهدی جلیلی قاضی زاده^{۱*}، تورج نصرآبادی^۲، مجید بغدادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: مواد پر و پلی فلوروآلکیل (PFAS) در محصولات مختلف یافت می‌شوند و به همین دلیل محل‌های دفع پسماند از طریق انتشار شیرابه تولیدی حاصل از پسماند بعنوان یکی از منابع اصلی ورود این مواد به محیط زیست هستند. این مواد می‌توانند از طریق زنجیره‌های غذایی وارد اکوسیستم‌ها شوند و در بافت کبد و کلیه انسان‌ها و حیوانات تجمع کنند و باعث بروز بیماری‌های تیروئیدی، اختلال در عملکرد ریه و سرطان‌های کبد، کلیه، مثانه و بیضه شوند. همچنین تجمع این مواد در پستانداران موجب اختلال در سیستم ایمنی و تولید مثل و رشد آنها می‌شود. با توجه به ماهیت پایدار و تجمع‌زستی اسید پرفلوروکتانویک سولفونیک (PFOS) و نمک‌های آن و پرفلوروکتانویک سولفونیل فلوروآید (PFOSF) در سال ۲۰۰۹ این مواد به لیست مواد آلی پایدار (POPs) در کنوانسیون استکهلم اضافه شدند. یکی از راه‌های تعیین‌مواد پر و پلی فلوروآلکیل در شیرابه، شناسایی ارتباط این مواد با پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه‌هاست. تاکنون مطالعه‌ای در ایران در خصوص شناسایی مواد (PFAS) در شیرابه محل‌های دفع پسماند انجام نشده است که با توجه به هزینه بالا و چالش‌های فنی موجود در خصوص اندازه‌گیری این مواد در شیرابه ضروری است نسبت به شناسایی و تحلیل ارتباط بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی متداول و غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل در شیرابه اقدام شود.

مواد و روش‌ها: مطالعه موردی در محل دفع پسماند شهری آرادکوه در جنوب شهر تهران انجام و عملیات نمونه‌برداری در محل دفع پسماند در چند نوبت انجام شد. نمونه‌های شیرابه جمع‌آوری شده از محل دفع پسماند آرادکوه جهت اندازه‌گیری مواد مختلف پرو پلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی تحت شرایط استاندارد به آزمایشگاه معتبر منتقل و آنالیزهای آزمایشگاهی انجام شد. به منظور اندازه‌گیری مقدار مواد مختلف پر و پلی فلوروآلکیل از دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی (LC-MS-MS) استفاده شد. پایین‌ترین مقدار حد گزارش برای نمونه‌های مایع تحقیق حاضر ۰/۵ میکروگرم بر لیتر بود. جهت آنالیز داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار آماری (R) برای ارزیابی میزان همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شد. آنالیز همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی برای ارزیابی میزان همبستگی و رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شد.

نتایج و بحث: این اولین مطالعه برای یافتن رابطه بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند کل جامدات معلق (TSS) و پتانسیل اکسایش-کاهش (ORP)، با غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل در شیرابه پسماند است. نتایج نشان‌دهنده بالاترین همبستگی بین غلظت مواد پروپلی فلوروآلکیل (PFAS) و کلراید بود. معادلات شامل پارامترهای کلرید (۰/۹۵) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (۰/۵۸)، بالاترین ضریب همبستگی را در بین سایر معادلات داشتند. بطور کلی، مدل‌های رگرسیون همبستگی و رابطه بالقوه بین مواد پروپلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی را در این مطالعه نشان دادند. از نتایج این مطالعه می‌توان برای محاسبه میزان مواد پر و پلی فلوروآلکیل با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند استفاده کرد. همبستگی قوی شناسایی شده بین غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه می‌تواند ناشی از تأثیر رطوبت پسماند (ضایعات آلی)، ترکیب پسماند (کاغذ، بسته‌بندی‌های غذایی) و تخریب مواد آلی موجود در پسماند باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه را می‌توان برای شناسایی و ارزیابی غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه پسماند استفاده کرد. وجود مواد پر و پلی فلوروآلکیل در شیرابه، بر ضرورت ارتقای استراتژی‌های مدیریت پسماند (با تمرکز بر جداسازی از مبدا) در ایران تأکید می‌کند. همچنین برای جلوگیری از مشارکت محل‌های دفع پسماند در انتشار این مواد، استراتژی‌های کنترلی نظیر احداث محل‌های دفع بهداشتی مجهز به لایه‌های نفوذناپذیر مناسب ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تهران، شیرابه، مدیریت پسماند، مواد پروپلی فلوروآلکیل

^۱ گروه فناوری‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ گروه برنامه ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

استناد به این مقاله: رسولی، م.، جلیلی قاضی زاده، ت.، نصرآبادی و م. بغدادی، ۱۴۰۴. شناسایی و تحلیل ارتباط بین مواد پر و پلی فلوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند شهر تهران. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۱۹۰-۱۷۷: (۱) ۲۳.

* Corresponding Author Email Address: ma_jalili@sbu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1462



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

مقدمه

مواد پروپلی فلوئوروآلکیل مواد شیمیایی ساخته دست بشر هستند که در سراسر جهان از دهه ۱۹۵۰ در محصولاتی مانند فوم‌های آتش نشانی، ظروف نجسب، بسته بندی مواد غذایی، واکس اسکی، حشره کش‌ها، لباس‌ها، پارچه‌ها و حلال‌های مورد استفاده در آبکاری فلزات و عکاسی مورد استفاده قرار گرفته اند (Wang *et al.*, 2017). ساختار مولکولی مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل حداقل از یک قسمت فلوئوروآلکیل (CF₂) و یک زنجیره آلیفاتیک (یا زنجیره‌های متعدد) تشکیل شده است که در آن همه (پر) یا بخشی (پلی) از هیدروژن‌ها با فلوئور جایگزین می‌شوند (Buck *et al.*, 2011). شواهد جدید حاکی از آن است که این مواد پایدار و با قابلیت تجمع زیستی بوده و نگرانی در مورد خطرات زیست محیطی در معرض قرار گرفتن با این آلاینده‌ها افزایش یافته است (Travar *et al.*, 2021; Lampert, 2018). با توجه به ماهیت پایدار و تجمع زیستی اسید پرفلوئوروکتانویک سولفونیک (PFOS) و نمک‌های آن و پرفلوئوروکتانویک سولفونیل فلوئوراید (PFOSF) در سال ۲۰۰۹ این مواد به لیست مواد آلی پایدار (POPs) در کنوانسیون استکهلم اضافه شدند. علاوه بر این، مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل با طول زنجیره C8-C14 و نمک‌های سدیم و آمونیوم آنها، در لیست نظارتی اتحادیه اروپا گنجانده شده‌اند (Naidu *et al.*, 2020). شیرابه تولیدی در محل‌های دفع پسماند شهری یکی از مهمترین منابع انتشار مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل به محیط زیست است (Busch *et al.*, 2010; Eggen *et al.*, 2010). تلاش‌هایی برای مشخص کردن این مواد در محل‌های دفع پسماند انجام شده است که کافی نیستند و باید در آینده مطالعات بیشتری روی تعیین مواد مختلف در مناطق آلوده انجام شود تا فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی که منجر به دگرگونی آنها می‌شود، ارزیابی شوند. همچنین سرنوشت و فرایندهای انتشار این مواد به محیط زیست از طریق دفن پسماند به خوبی درک نشده است و نیاز به مطالعه بیشتر دارد (Lang *et al.*, 2017). از طرفی، فناوری‌های

استاندارد تصفیه‌خانه عموماً در کاهش یا حذف مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل بی‌اثر هستند (Hamid *et al.*, 2018; Ahrens *et al.*, 2011). در نتیجه، تخلیه شیرابه محل دفع پسماند، حتی اگر تصفیه شود، می‌تواند منبع قابل توجهی برای انتشار برخی از این مواد به محیط زیست باشد. همچنین در روش سنتی بیشتر پسماندهای شهری بدون جداسازی و تفکیک از مبدأ دفن می‌شوند که این مسأله می‌تواند احتمال آزادسازی این مواد به محیط زیست از محل‌های دفع پسماند را تشدید کند (Ghazifard, 2016).

اولین گام در کاهش انتشار این مواد به محیط زیست، شناسایی غلظت مواد مختلف در شیرابه محل دفع پسماند شهری است. اگرچه در دنیا در خصوص شناسایی مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در منابع ورودی و خروجی در محل‌های دفع پسماند تحقیقات کمی وجود دارد (Naidu *et al.*, 2020)، با این وجود تاکنون اندازه‌گیری و شناسایی این مواد در محل‌های دفع پسماند در ایران گزارش نشده است. از طرفی الگوی تولید شیرابه در محل‌های دفع پسماند در ایران با موارد مشابه در کشورهای توسعه‌یافته متفاوت است. عامل اصلی تولید شیرابه در لندفیل‌های ایران تریبوت موجود در پسماند است؛ حال آنکه در لندفیل‌های کشورهای توسعه‌یافته بارندگی نقش بیشتری در تولید شیرابه دارد (Safari *et al.*, 2012; Abunama *et al.*, 2021). از این رو انتظار می‌رود مواد موجود در شیرابه در ایران با موارد مشابه در کشورهای اروپایی و آمریکا متفاوت بوده و لذا حضور مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در مطالعات محدودی که انجام شده است قابل تعمیم به شیرابه تولیدی در محل‌های دفع پسماند در ایران نبوده و لازم است در این خصوص تحقیقات بیشتری صورت گیرد. اهمیت این مسأله زمانی بیشتر مشخص می‌شود که بدانیم نرخ تفکیک از مبدأ در مدیریت پسماند شهری در ایران کمتر از ۱۰ درصد بوده و دفن پسماند مخلوط شهری در لندفیل‌ها احتمال حضور این مواد در پسماند و شیرابه محل دفع پسماند را افزایش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین دلایل عدم اندازه‌گیری مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در ایران تاکنون، علاوه

پتانسیل اکسایش-کاهش (ORP)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) با مواد پرو پلی فلوئورو آلکیل (PFAS) در شیرابه محل دفع پسماند شهری تهران است.

مواد و روش‌ها

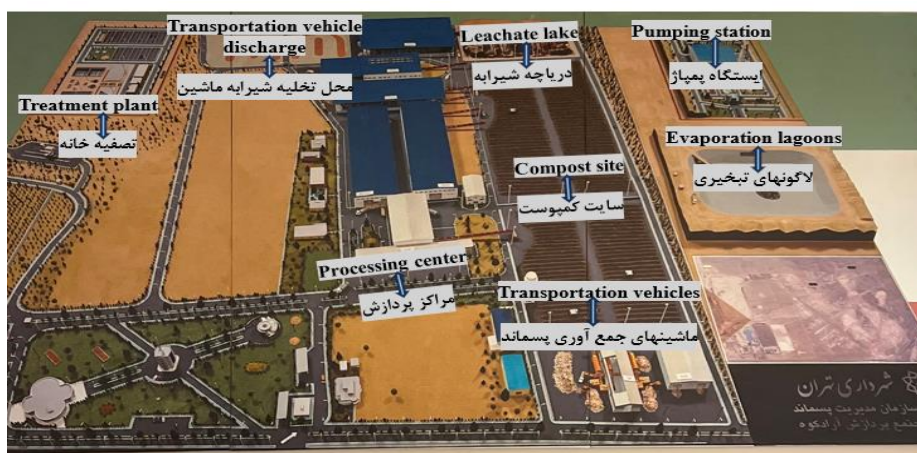
روش تحقیق

مطالعه موردی

مطالعه موردی در محل دفع پسماند شهری آرادکوه در جنوب شهر تهران انجام و عملیات نمونه برداری در محل دفع پسماند در چند نوبت انجام شد. سایت پردازش و دفع آرادکوه با مساحتی نزدیک به ۱۲۰۰ هکتار در جنوب شرق تهران واقع شده است و روزانه پذیرای نزدیک به ۷۵۰۰ تن انواع پسماند شهری است (Jamialahmadi *et al.*, 2022). در حال حاضر، حداکثر ظرفیت ورودی تصفیه خانه در حدود ۴۰۰ مترمکعب در روز است. سیستم مدیریت شیرابه به صورت ترکیبی از روش‌های پیشاتولید و پساتولید است. روش هاپیشاتولید شامل پردازش بیولوژیکی پسماند زیرسرندي با هدف تولید کمپوست و تثبیت پسماند و روش‌های پساتولید بصورت ترکیبی از بازچرخش شیرابه به درون محل دفع و تصفیه شیرابه در تصفیه خانه ی ۱۴۰۰ مترمکعبی موجود است. این تصفیه خانه به دلایلی از جمله طراحی، ساخت و بهره برداری نامناسب و کیفیت نامناسب شیرابه ی ورودی، موفق به تامین خروجی استاندارد نشده است.

بر جدید بودن موضوع، دشواری وهزینه بر بودن این روش بوده است. لذا با اندازه گیری مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل در محل دفع پسماند در ایران و یافتن رابطه غلظت این مواد با سایر پارامترهای قابل اندازه گیری و متداول تر می توان این مشکل را حل کرد. یکی از محدود تحقیقاتی که توسط سولو گابریل و همکاران در زمینه این ارتباط انجام شده است نشان داد که همبستگی معنی دار بالایی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل و پارامترهای قلیائیت، کل کربن آلی و آمونیاک و همبستگی معنی دار متوسطی بین غلظت این مواد و هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی شیمیایی و کل جامدات وجود دارد. طبق نتایج این تحقیق خواص فیزیکی-شیمیایی می توانند شاخص های مفیدی در تشخیص غلظت نسبی مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل در انواع شیرابه باشند. در سایر تحقیقات نیز تاثیرات برخی دیگر از این پارامترها از جمله نیترات، فلزات سنگین و اکسیژن محلول آزیابی شد و نتایج نشان دهنده همبستگی بین این پارامترها بود (Huang *et al.*, 2022; Hanafia *et al.*, 2019).

تحقیقات بیشتری برای تأیید مکانیسم هایی که پارامترهای فیزیکوشیمیایی را به غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل در شیرابه های محل دفع پسماند مرتبط می کنند، مورد نیاز است. از این رو هدف این تحقیق بررسی همبستگی پارامترهای مختلف در شیرابه از جمله pH، کدورت، هدایت الکتریکی، کلراید، روغن و چربی، کل جامدات معلق (TSS)،



شکل ۱- مجتمع آرادکوه

Fig. 1- Aradkouh Complex

جامعه آماری، روش نمونه‌گیری و حجم نمونه

نمونه‌گیری از شیرابه محل دفع پسماند آرادکوه در جنوب تهران در چند مرحله انجام شد. قبل از انجام نمونه‌گیری اطلاعاتی در رابطه با سن محل دفع پسماند، حجم و نوع پسماند دفنی، حجم شیرابه تولیدی و روش‌های مدیریت پسماند، کمپوست و شیرابه در محل جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری از چند نقطه از جمله ماشین‌های جمع‌آوری پسماند، محل تخلیه شیرابه ماشین، خطوط پردازش، ایستگاه‌های پمپاژ، لاگون‌های تبخیری، دریاچه شیرابه و تصفیه خانه شیرابه در محل دفع پسماند انجام شد. نمونه‌های اولیه از مخزن جمع‌آوری شیرابه خودروهای حمل‌ونقل پسماند در ورودی آرادکوه قبل از انتقال به مراکز پردازش پسماند گرفته شد. نمونه‌برداری بعدی در منطقه ای که برای تخلیه شیرابه وسایل نقلیه تعیین شده بود انجام شد که منطقه تخلیه نامیده می‌شود. نمونه بعدی از مراکز پردازش که پسماندهای مخلوط را از خودروهای حمل‌ونقل پسماند می‌پذیرند، تهیه شد. در این مراکز، پسماندها به طور سیستماتیک به مواد قابل بازیافت، مواد آلی و مواد دفعی که عمدتاً حاوی کاغذ و پلاستیک غیرقابل بازیافت هستند، تفکیک می‌شوند. پسماندها به واحدهای موجود در این مراکز منتقل می‌شوند تا توسط غربال‌های دوار الکتریکی (یعنی زیرسرد و رو سرد) به دو جریان تقسیم شوند. دو نمونه شیرابه تولید شده از دو واحد مختلف در این مرکز در دو فصل جمع‌آوری شد. بخش زیر سرد شامل ضایعات آلی با اندازه کوچکتر است که به محل کمپوست منتقل می‌شود که یک نمونه شیرابه نیز از این محل جمع‌آوری شد. شیرابه تولید شده از دفن پسماندها از طریق کانال‌های خاکی به ایستگاه‌های پمپاژ منتقل می‌شود. دو نمونه شیرابه نیز از این نقطه در دو فصل مختلف جمع‌آوری شد. شیرابه از ایستگاه‌های پمپاژ به سه مقصد منتقل می‌شود. اولین مقصد تصفیه خانه شیرابه با ظرفیت ۲۰۰ متر مکعب در روز است. روش‌های تصفیه در این مرکز شامل

حوضه همسان‌سازی، حوضچه‌های بی‌هوای/هوای و حوضچه‌های ته‌نشینی است. یک نمونه از حوضچه ته‌نشینی در پایان فرآیند تصفیه تهیه شد. هنگامی که ظرفیت تصفیه خانه پر می‌شود، شیرابه باقی‌مانده به مقصد بعدی لاگون‌های تبخیری، منتقل می‌شود. این لاگون‌ها برای تبخیر و تصفیه حرارتی شیرابه حاصل از دفن پسماند طراحی شده‌اند. دو نمونه از لاگون‌های تبخیری جمع‌آوری شد. آخرین مقصد شیرابه حاصل از دفن پسماند، دریاچه شیرابه است. هر گاه تصفیه خانه و لاگون‌های تبخیری بیش از حد بارگیری شود و ظرفیت بیشتری نداشته باشد پمپاژ به دریاچه شیرابه صورت می‌گیرد. آخرین نمونه از این محل که حاوی شیرابه بالای یک سال است گرفته شد. نقاط نمونه برداری براساس سن شیرابه تعیین شدند که به سه دسته شیرابه خام (تازه)، پردازش شده (کهنه) و تصفیه شده طبقه بندی شد. نمونه‌های حاصل از وسایل نقلیه حمل پسماند در ورودی، منطقه تخلیه پسماند، محل کمپوست و مراکز پردازش به عنوان شیرابه خام (تازه) طبقه بندی می‌شود. ایستگاه‌های پمپاژ، لاگون‌های تبخیری و دریاچه شیرابه حاوی شیرابه پردازش شده (کهنه) هستند و شیرابه تصفیه‌خانه بعنوان تصفیه شده طبقه بندی می‌شود.

جهت اطمینان از وجود مواد پرو پلی فلئوروآلکیل در شیرابه محل دفع پسماند شهری آراد کوه چند نمونه بعنوان پیش تست در ابتدای کار گرفته شد. اولین نمونه برداری در تیر ماه ۱۴۰۱ برای انجام پیش تست و پی بردن به وجود مواد پرو پلی فلئوروآلکیل در نمونه‌های محل دفع پسماند شهری آراد کوه انجام شد. دمای هوا در هنگام نمونه‌گیری ۳۶-۳۸ درجه سانتی‌گراد بود و نمونه‌گیری از دو محل مرکز پردازش پسماند و ایستگاه پمپاژ شیرابه انجام شد. پس از اطمینان از وجود مواد (PFAS) در شیرابه، دومین مرحله نمونه‌برداری در اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ از ۱۴ محل مختلف نمونه برداری شد. دمای هوا در هنگام نمونه‌گیری ۲۵-۲۷ درجه سانتی‌گراد بود. نمونه‌ها

در بازه زمانی یکسال در دو فصل تابستان و بهار جمع آوری شدند.

پس از جمع آوری، نمونه‌ها در یک خنک‌کننده با یخ قرار داده شدند و نمونه‌ها به مدت حداکثر ۳ ماه به صورت منجمد نگهداری شدند. جهت نمونه‌گیری برای آنالیز مواد پرو پلی فلوئورو آلکیل در شیرابه از بطری‌های پلاستیکی پلی اتیلن (HDPE) با تراکم بالا به حجم ۲۵۰ میلی لیتر طبق دستورالعمل آزمایشگاه مربوطه استفاده شد. از آنجایی که در هیچ آزمایشگاهی در ایران آنالیز مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل انجام نمی‌شود، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه (ALS) در استکهلم سوئد منتقل شد. همچنین میزان کافی تا حجم یک لیتر از بطری‌های پلاستیکی تیره از نمونه‌های مختلف برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی از جمله pH، کدورت، کلراید، کل جامدات معلق، پتانسیل اکسایش-کاهش، اکسیژن‌خواهی شیمیایی تهیه شده و در آزمایشگاه آنالیز شد.

نمونه‌های جمع‌آوری شده از محل‌های دفع پسماند به آزمایشگاه جهت اندازه‌گیری مواد مختلف پر و پلی فلوئورو آلکیل تحویل داده شد. نمونه‌ها زمان تحویل در دمای سرد چهار درجه سانتی‌گراد و محل تاریک نگهداری شد. به منظور اندازه‌گیری مقدار مواد مختلف پر و پلی فلوئورو آلکیل از دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف‌سنجی جرمی (LC-MS-MS) استفاده شد. به وسیله دستگاه فوق از ۲ تا ۳۵ نوع از مواد پرو پلی فلوئورو آلکیل را در نمونه‌های مختلف می‌توان شناسایی کرد. پایین‌ترین مقدار حد گزارش برای نمونه‌های مایع تحقیق حاضر ۰/۵ میکروگرم بر لیتر بود (U.S. EPA, 2018).

جهت کنترل کیفی و تضمین کیفیت آزمایش، تمام مراحل آماده‌سازی نمونه‌های واقعی روی نمونه‌های بلانک هم انجام شد. با این تفاوت که در نمونه‌های بلانک به جای نمونه‌های اصلی از آب مقطر استفاده شد. همچنین کنترل دستگاه به وسیله کالیبراسیون به صورت هفتگی انجام شد.

روش آماده‌سازی نمونه‌ها و اندازه‌گیری مواد پرو پلی فلوئورو آلکیل

نمونه‌های شیرابه طبق دستورالعمل استاندارد W-PFCLMS02 US EPA 537 برای اندازه‌گیری ذرات پر و پلی فلوئورو آلکیل در آزمایشگاه آماده شد. ابتدا نمونه‌های شیرابه از داخل یخچال برداشته شده و به مدت یک ساعت در دستگاه سانتریفیوژ برای جداسازی قرار داده شد. سپس میزان ۴-۵ میلی لیتر از نمونه همراه با استاندارد داخلی و محلول ارگانیک استونیتریل حل شده و در شیکر قرار گرفت. به دلیل خصوصیات نمونه‌ها اعم از غلظت زیاد و احتمال وجود میزان زیاد مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل رقیق‌سازی ۱۰۰ مرتبه انجام شد. نمونه‌ها از فیلتر با سایز ۰/۲ میکرومتر رد شده و به ویال یک میلی لیتری انتقال داده شد. میزان ۱۰ میکرولیتر از نمونه به ویال مخصوص دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف‌سنجی جرمی (LC-MS-MS) برای اندازه‌گیری مقدار مواد مختلف پر و پلی فلوئورو آلکیل تزریق شد. این دستگاه شامل یک بخش LC است که از طریق ستون C18 به بخش MS/MS متصل است. ابتدا نمونه‌های بلانک در دستگاه قرار گرفته و خوانده شد. سپس نمونه‌های شیرابه در دستگاه قرار داده شده و پیک‌های مربوطه شناسایی شد (Solo-Gabriele et al., 2020; U.S.EPA, 2018).

روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی

پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند pH (H 4500)، اکسیژن-خواهی شیمیایی (D 5220)، کدورت (B 2130)، کلراید (Cl-B 4500)، پتانسیل اکسیداسیون-احیا (A 2580)، و کل مواد جامد معلق (D 2540) در نمونه‌های شیرابه توسط آزمایشگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (U.S.EPA., 2018).

روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای بررسی میزان همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل

نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی و رابطه آنها

بین مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل

پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده نیز مقادیر متفاوتی را در مکان‌های مختلف و بر حسب سن شیرابه نشان داد. همچنین روابط بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی و مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل با استفاده از نرم‌افزار اکسل به شرح زیر ارزیابی شد.

کدورت

بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار پارامتر کدورت در بازه ۳/۷۲ (ان تی یو) و ۱۶۴۲ (ان تی یو) گزارش شد که کمترین میزان را در محل خروجی تصفیه‌خانه با مقدار ۳/۷۲ (ان تی یو) و بیشترین مقدار در سالن پردازش ۲ با مقدار ۱۶۴۲ (ان تی یو) نشان داد. میزان بالای ذرات معلق در نمونه‌ها افزایش کدورت را در پی دارد که در نمونه‌های سالن پردازش و لاگون‌های تبخیری این میزان به وضوح قابل مشاهده است. رابطه بین کدورت و مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل نسبتاً صعودی بوده و با افزایش میزان کدورت میزان غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل هم افزایش یافته است. همچنین در تحقیقی که اخیراً روی رابطه بین کدورت و مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل انجام شده رابطه صعودی بین این دو پارامتر مشاهده شد (Ohoroet al., 2024).

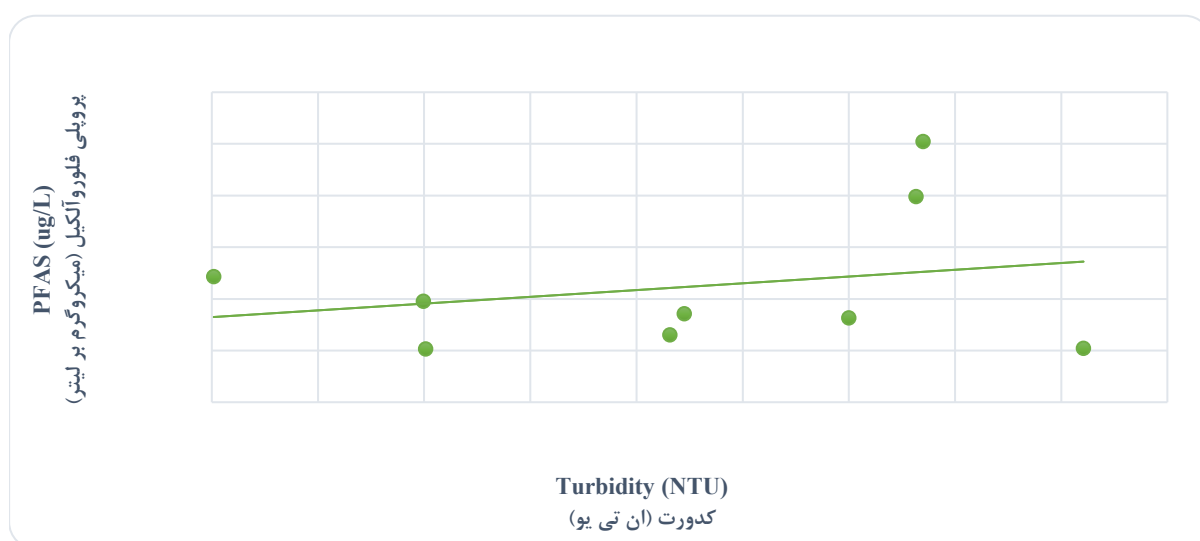
کدورت، pH، کلراید، پتانسیل اکسایش-کاهش (ORP)، کل جامدات معلق (TSS)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) در محل دفع پسماند از نرم‌افزار آماری (R) استفاده شد. داده‌های خام برای توزیع‌های آماری با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که اکثر داده‌ها به طور نرمال توزیع شده و فرضیه صفر توزیع نرمال برای اکثر داده‌ها پذیرفته شد. از آنجایی که مقادیر ارزیابی-شده نرمال بود، از تحلیل رگرسیون خطی با استفاده از همبستگی رتبه‌ای پارامتریک پیرسون برای ارزیابی همبستگی بین این پارامترها استفاده شد. شکل کلی رگرسیون خطی به صورت زیر است که در این معادله Y متغیر وابسته، X متغیر مستقل، a عرض از مبدأ و b شیب است:

$$Y=a+bx \quad (1)$$

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها

غلظت ۳۴ نوع مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) در شیرابه محل دفع پسماند آرادکوه اندازه‌گیری شد. از تعداد ۱۶ نمونه شیرابه گرفته شده از مکان‌های مختلف، تعداد ۹ نمونه حاوی مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل بود.



شکل ۲- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و کدورت در شیرابه
Fig. 2- The Relationship between Concentration of PFAS and Turbidity in Leachate

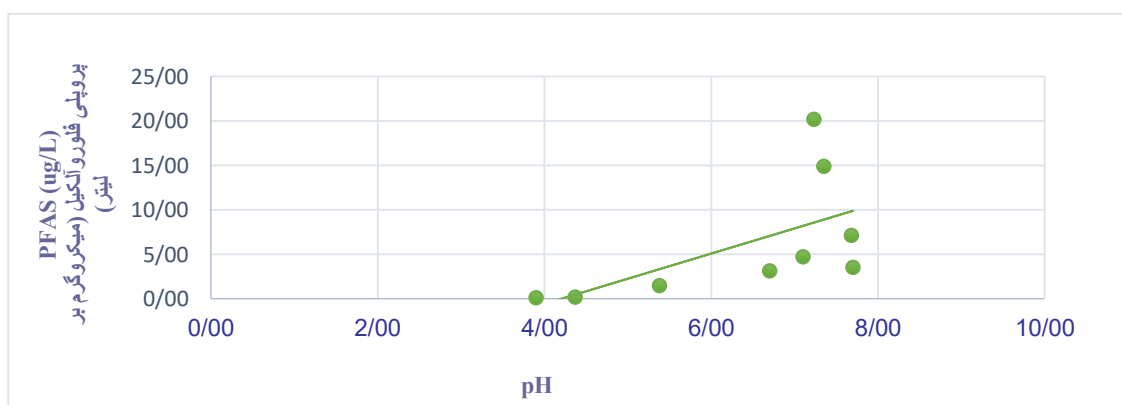
pH

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار پارامتر pH در بازه ۳/۹ و ۷/۷ گزارش شد که بیشترین مقدار را در دریاچه شیرابه ۷/۷ و کمترین مقدار در سالن پردازش (۱) ۳/۹ داشت. همچنین رابطه بین pH و مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل صعودی بوده و با افزایش میزان pH میزان غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل هم افزایش یافته است. شیرابه تازه به دلیل تشکیل اسید کربوکسیلیک و فاز اسیدیته در مقایسه با شیرابه قدیمی تر که با گذشت زمان وارد فاز متانوزنیک می شود میزان pH کمتری دارد. این نتایج با نتایج چندین مطالعه دیگر سازگار است که نشان می دهد با افزایش pH میزان غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل افزایش می یابد (Benskin *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017). سطح pH در شیرابه می تواند بر حلالیت و تحرک مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل تأثیر بگذارد و تحرک این

مواد با افزایش سطح pH افزایش می یابد. در سطوح pH بالاتر، این مواد به اشکال یونی خود تفکیک می شوند و حلالیت آن ها در محلول های آبی افزایش می یابد. این افزایش حلالیت تحرک آن ها را افزایش می دهد و به آن ها اجازه می دهد آزادانه تر از طریق شیرابه حرکت کنند و با سایر مواد شیمیایی ترکیب شوند که منجر به غلظت بالاتر آن ها در شیرابه می شود.

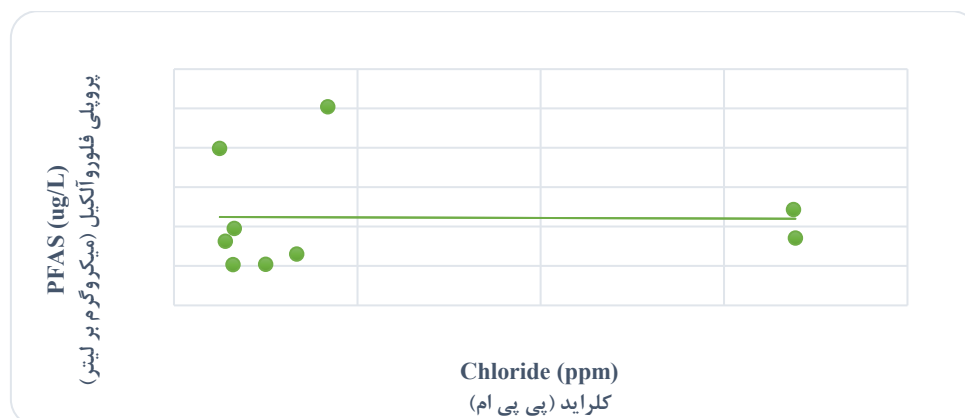
کلراید

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار پارامتر کلراید در کل نمونه ها در بازه ۴۹۹۸/۲ (پی پی ام) و ۶۷۷۷۸ (پی پی ام) گزارش شده که کمترین مقدار را در سالن پردازش (۱) به میزان ۴۹۹۸/۲ (پی پی ام) و بیشترین مقدار در لاگون تبخیری ۲ با مقدار ۶۷۷۷۸ (پی پی ام) نشان داد. سطح بالای کلراید در شیرابه به میزان بازیافت ضعیف و میزان بالای اجزای پلاستیک و کاغذ در پسماندهای ایران مربوط می شود.



شکل ۳- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل و pH در شیرابه

Fig. 3- The Relationship between Concentration of PFAS and pH in Leachate



شکل ۴- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل و کلراید در شیرابه

Fig. 4- The Relationship between Concentration of PFAS and Chloride in Leachate

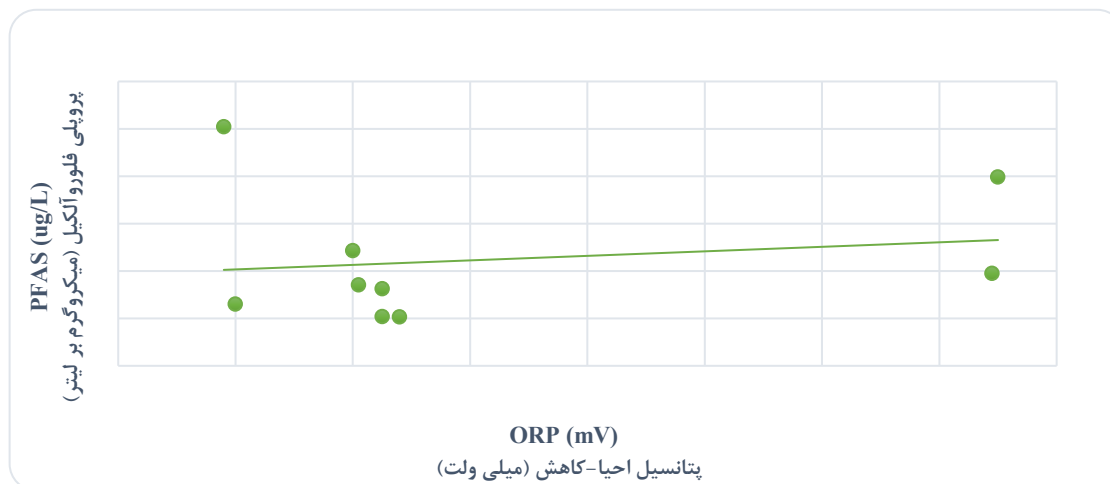
پتانسیل اکسایش-کاهش

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار پتانسیل اکسایش-کاهش در کل نمونه‌ها در بازه منفی ۴۰ (میلی‌ولت) و ۱۵۱ (میلی‌ولت) گزارش شد که کمترین میزان را در دریاچه شیرابه منفی ۴۰ (میلی‌ولت) و بیشترین میزان در سالن پردازش (۲) به مقدار ۱۵۱ (میلی‌ولت) نشان داد. بالاترین سطح در سالن پردازش نشان‌دهنده سطح اکسیژن بیشتر در نمونه‌های این مراکز با شیرابه تازه نسبت به شیرابه قدیمی است. طبق تحقیق Ohoro *et al.* (2024) پتانسیل کاهش بالا منجر به کاهش غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و اکسیداسیون بالا غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل را افزایش می‌دهد که در این تحقیق هم به

وضوح مشاهده شده است.

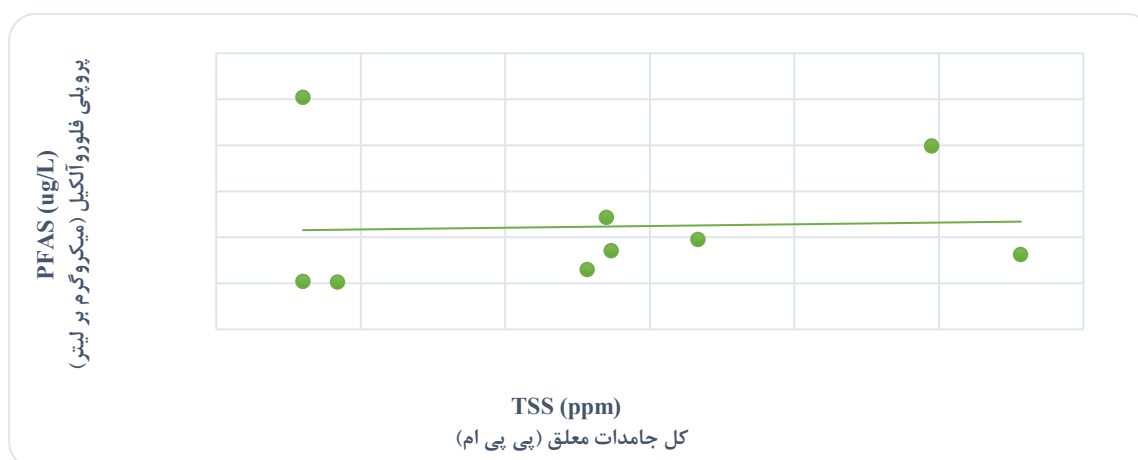
کل جامدات معلق

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار کل جامدات معلق در کل نمونه‌ها در بازه ۳۲ (پی پی ام) و ۵۵۶۶/۶۷ (پی پی ام) گزارش شده که بالاترین و کمترین مقدار را به ترتیب در سالن پردازش (۲) ۵۵۶۶/۶۷ (پی پی ام) و تصفیه‌خانه مقدار ۳۲ (پی پی ام) داشت. میزان بالای کل جامدات معلق به دلیل وجود ذرات جامد در خاک و عمق کم منطقه نمونه برداری در سالن پردازش است. رابطه بین کل جامدات معلق و مواد پر و پلی فلئوروآلکیل در برخی نقاط افزایشی بوده و با افزایش میزان کل جامدات معلق میزان مواد پر و پلی فلئوروآلکیل بالا رفته است.



شکل ۵- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و پتانسیل اکسایش-کاهش در شیرابه

Fig. 5- The Relationship between Concentration of PFAS and ORP in Leachate



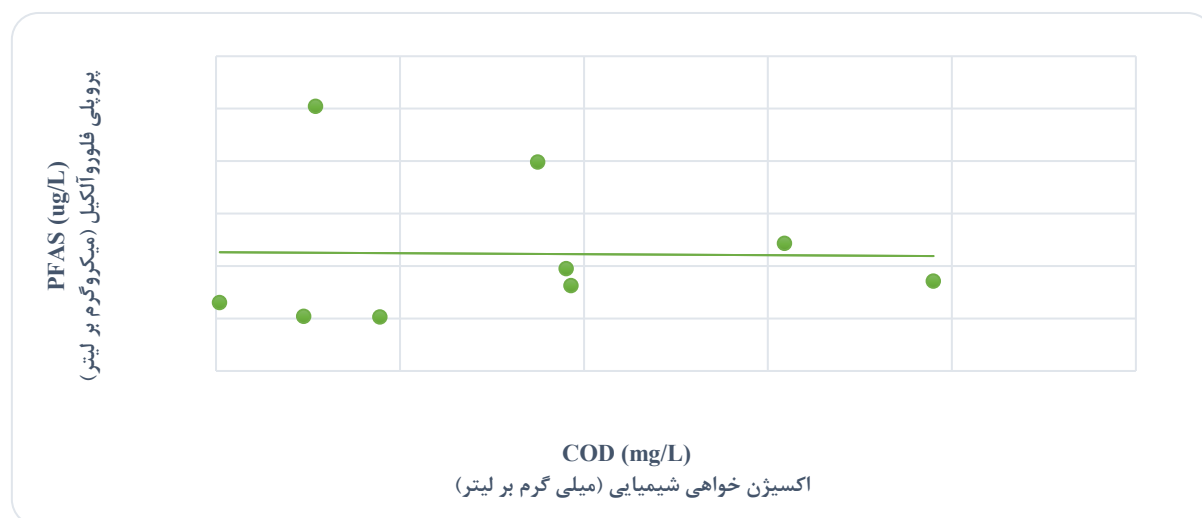
شکل ۶- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و کل جامدات معلق در شیرابه

Fig. 6- The Relationship between Concentration of PFAS and TSS in Leachate

اکسیژن خواهی شیمیایی

بر اساس نتایج به دست آمده مقدار پارامتر اکسیژن خواهی شیمیایی در کل نمونه ها بازه ۱۰۲۰ (میلی گرم بر لیتر) و ۱۹۵۰۰ (میلی گرم بر لیتر) گزارش شد که بیشترین مقدار را در لاگون تبخیری ۲ میزان ۱۹۵۰۰ (میلی گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در تصفیه خانه ۱۰۲۰ (میلی گرم بر لیتر) داشت. اکسیژن خواهی شیمیایی به دلیل محتوای بالای مواد آلی و دسترسی زیستی کمتر در شیرابه

قدیمی تر بالاترین میزان را در این نوع شیرابه دارد. ترکیب پسماند در ایران حاوی ضایعات غذایی بالایی است که منجر به مواد آلی بالا و سطوح بالای اکسیژن خواهی شیمیایی می شود. رابطه بین اکسیژن خواهی شیمیایی و مواد پر و پلی فلئوروآلکیل برعکس بیشتر پارامترهای دیگر کاهشی بوده و با افزایش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی میزان مواد پر و پلی فلئوروآلکیل هم نسبتاً کاهش یافته است.



شکل ۷- رابطه بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و اکسیژن خواهی شیمیایی در شیرابه

Fig. 7- The Relationship between Concentration of PFAS and COD in Leachate

همبستگی و ارتباط بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی

روابط به دست آمده از طریق محاسبه رگرسیون خطی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی در جدول شماره ۱ آمده است.

ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و پارامتر pH مقدار ۰/۵۱ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی مثبت و قابل ملاحظه ای را بین این دو پارامتر نشان می دهد. همچنین در تحقیق سولوگابریل و همکاران ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و pH مقدار ۰/۵۷ بوده که همبستگی مثبتی را نشان می دهد (Solo-Gabriele et al., 2020). نتایج حاصل از

تحقیقات دیگر نیز نتایج تحقیق حاضر را مبنی بر وجود همبستگی مثبت بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و pH تایید می کند (Benskin et al., 2012; Gallen et al., 2017). ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و کدورت ۰/۲۵ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی کم بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و کلراید ۰/۹۵ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی بالا بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و پتانسیل اکسایش-کاهش مقدار ۰/۴۲- محاسبه شد که نشان دهنده عدم وجود همبستگی بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلئوروآلکیل و کل جامدات معلق مقدار ۰/۱۹-

شیمیایی مقدار ۰/۰۰۵ بوده که همبستگی ضعیف و ناچیزی را نشان می‌دهد. طبق نتایج و مقایسه این دو تحقیق ضریب همبستگی این دو پارامتر در تحقیق حاضر بیشتر و با اهمیت‌تر است (Solo-Gabrielee *et al.*, 2020). نتایج نشان‌دهنده بالاترین همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و کلراید با میزان ۰/۹۵ است. بالاترین همبستگی بعد از کلراید با پارامترهای هدایت الکتریکی و روغن و چربی و پایین‌ترین همبستگی مربوط به پتانسیل اکسایش-کاهش است. به‌طور کلی، مدل‌های رگرسیون همبستگی و رابطه بالقوه بین مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی را در این مطالعه نشان دادند.

محاسبه شد که نشان دهنده عدم وجود همبستگی بین این دو پارامتر است. بالعکس در تحقیق سولوگابریل و همکاران ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و کل جامدات معلق بین حدود ۰/۷ - ۰/۹ بوده که همبستگی مثبتی را بین این دو پارامتر نشان می‌دهد (Solo-Gabrielee *et al.*, 2023). ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و اکسیژن‌خواهی شیمیایی مقدار ۰/۵۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده همبستگی متوسط بین این دو پارامتر است. همچنین در تحقیق سولوگابریل و همکاران ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و اکسیژن‌خواهی

جدول ۱- معادله رگرسیون و ضریب همبستگی بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی
Table 1. Regression Equations and Correlation Coefficient between Concentration of PFAS and Physicochemical Parameters

ردیف Row	پارامتر Parameter	معادله رگرسیون Regression equations	ضریب همبستگی Correlation coefficient
1	pH	$Y(\text{PFAS}) = -12.84 + 2.88 \times (\text{pH})$	0.51
2	کدورت Turbidity	$Y(\text{PFAS}) = 3.23 + 0.003 \times (\text{T})$	0.25
3	کلراید Chloride	$Y(\text{PFAS}) = 0.5931 + 0.0003 \times (\text{CL})$	0.95
4	پتانسیل اکسایش-کاهش Oxidation-reduction potential	$Y(\text{PFAS}) = 6.28 - 0.05 \times (\text{ORP})$	-0.42
5	کل جامدات معلق Total suspended solids	$Y(\text{PFAS}) = 8.2 - 0.0007 \times (\text{TSS})$	-0.19
6	اکسیژن‌خواهی شیمیایی Chemical oxygen demand	$Y(\text{PFAS}) = 1.076 + 0.00006 \times (\text{COD})$	0.58

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی رابطه بین مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که بین غلظت مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و کلراید و (COD)، همبستگی مثبت وجود دارد. مجتمع آرادکوه عمدتاً پسماندهای خانگی تفکیک‌نشده حاوی کاغذ و بسته‌بندی‌های غذایی را می‌پذیرد که می‌تواند منجر به افزایش احتمال وجود مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه شود. همبستگی قوی شناسایی شده بین غلظت کلراید، (COD)، و مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل می‌تواند از

در حال حاضر فقط در چند مطالعه محدود روابط بین مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و خصوصیات فیزیکوشیمیایی شیرابه محل دفع پسماند در کل دنیا ارزیابی شده است (Liu *et al.*, 2021). در اکثر این مطالعات تعداد محدودی از پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند pH، هدایت الکتریکی، کل جامدات معلق و اکسیژن‌خواهی شیمیایی اندازه‌گیری شده است (Solo-Gabrielee *et al.*, 2023). این اولین مطالعه‌ای است که از مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه

در انتشار این مواد، استراتژی‌های کنترلی نظیر احداث محل‌های دفن بهداشتی مجهز به لایه‌های نفوذناپذیر و توسعه تأسیسات تصفیه شیرابه با هزینه کم ضروری است. مطالعات آینده در زمینه مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه در ایران باید بر شناسایی منابع و محصولات حاوی این مواد، ارزیابی اثرات بر موجودات زنده و شناسایی روش‌های حذف این مواد متمرکز باشد. این مطالعات موجب شروع و توسعه استراتژی‌های مدیریتی در جهت حفاظت از محیط زیست و سلامت عمومی در ایران در این زمینه می‌شود.

سیاسگزاری

این پژوهش بدون حمایت مالی هیچ نهاد و یا سازمانی انجام شده است. از سازمان مدیریت پسماند شهر تهران که امکان نمونه‌برداری از شیرابه را در مرکز آرادکوه فراهم کردند قدردانی می‌شود.

References

- Abunama, T. and Othman, F., 2021. Comparison of landfill leachate generation and pollution potentials in humid and semi-arid climates. *International Journal of Environment and Waste Management*. 27(1).<https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.111906>.
- Ahrens, L., Shoeib, M., Harner, T., Lee, S.C., Guo, R. and Reiner, E. J., 2011. Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere. *Environmental Science & Technology*. 45, 8098-8105.<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es1036173>.
- Benskin, J.P., Li, B., Ikononou, M.G., Grace, J.R. and Li, L.Y., 2012. Per- and polyfluoroalkyl substances in landfill leachate: patterns, time trends, and sources. *Environmental Science & Technology*. 46, 11532-11540.<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es302471n>.
- Buck, R.C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J.M., Cousins, I.T., de Voogt, P., Jensen, A., Kannan, K., Mabury, S.A. and van Leeuwen, S.P., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 7, 513-541. <http://doi/10.1002/ieam.258>.
- Eggen, T., Moeder, M. and Arukwe, A., 2010.

تأثیر رطوبت پسماند (ضایعات آلی)، ترکیب پسماند (کاغذ، بسته‌بندی‌های غذایی) و تخریب مواد آلی ناشی شود. نتایج این مطالعه را می‌توان برای ارزیابی میزان مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند استفاده کرد. علاوه بر این، در آینده باید مطالعات بیشتری روی ارزیابی رابطه بین مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند انجام شود.

برای جلوگیری از انتشار مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در محل‌های دفع پسماند شناخت بهتر مکانیزم‌های تولید شیرابه از پسماند و ارزیابی تأثیرات تغییر در غلظت این مواد در پسماند بر تغییرات در غلظت آن‌ها در شیرابه الزامی است. وجود مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه، بر ضرورت ارتقای استراتژی‌های مدیریت پسماند با راهبردهای پیش گیرانه (تفکیک از مبدأ) در ایران تأکید می‌کند. همچنین برای جلوگیری از مشارکت محل‌های دفع پسماند

منابع

- Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. *Science of The Total Environment*. 408, 5147-5157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.049>.
- Farzadkia, M., Pasalari, H., Gholami, M. and Emamjomeh, M., 2018. Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches. *Environmental Chemistry Letters*. 17, 335-348.<https://doi.org/10.1007/s10311-018-0804-x>.
- Gallen, C., Drage, D., Eaglesham, G., Grant, S., Bowman, M. and Mueller, J.F., 2017. Australia-wide assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*. 331, 132-141.<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.006>.
- Hamid, H., Li, L. and Grace, J., 2020. Formation of perfluorocarboxylic acids from 6:2 fluorotelomer sulfonate (6:2 FTS) in landfill leachate: Role of microbial communities. *Environmental Pollution*. 259, 113835.<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113835>.
- Hanafia, M., Banch, T., Alkarkhi, A. and Abu amir, S., 2019. Statistical evaluation of landfill leachate system and its impact on groundwater and surface water in Malaysia. *Sains Malaysiana*. 48(11), 2391-2403. <http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4811-2403>.

10.

Huang, X., Wei, X. And Liu, H., 2022. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in municipal solid waste landfill leachates from western China. *Environmental Science and Pollution Research*. 29, 69588-69598. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20754-5>.

Jamialahmadi, N., Hashemi, M. and Jalili Ghazizade, M., 2022. Assessment of the current municipal solid waste management system in Tehran, Iran: challenges and opportunities for sustainable development. *Material Cycles & Waste Management*. 24, 2054-2067. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01423-8>.

Lampert, D.J. 2018. *Emerging Research Needs for Assessment and Remediation of Sediments Contaminated with Per- and Poly-fluoroalkyl Substances*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0098-4>.

Lang, J., Allred, B., Field, J., Levis, J. and Barlaz, M. 2017. National estimate of per- and polyfluoroalkyl substance PFAS release to U.S. municipal landfill leachate". *Environmental Science Technology*. 51 (4), 2197–2205. <http://doi/10.1021/acs.est.6b05005>.

Liu, Y., Robey, N.M., Bowden, J.A., Tolaymat, T.M., da Silva, B.F., Solo-Gabriele, H.M. and Townsend, T.G., 2021. From waste collection vehicles to landfills: indication of per- and polyfluoroalkyl substance (PFAS) transformation. *Environmental Science & Technology Letters*. 8, 66-72. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00819>.

Naidu, R., Nadebaum, P. And Fang, C., 2020. Per- and poly-fluoroalkyl substances current status and research needs. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100915>.

Ohoro, CH., Amaku, J. Conradie, J. Olisah, CH., Akpomie, K., Malloum, K., Akpotu, S., Adegoke, K., Okeke, E. and Omotola, E., 2010. Effect of physicochemical parameters on the occurrence of

per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aquatic environment. 2024. *Marine Pollution Bulletin*. 208. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117040>.

Safari, E., Jalili Ghazizade, M. and Abdoli, M.A., 2012. A performance-based method for calculating the design thickness of compacted clay liners exposed to high strength leachate under simulated landfill conditions. *Waste Manag Research*. 30(9), 898-907. <http://doi/10.1177/0734242X12448520>.

Solo-Gabriele, H., Jones, A., Lindstrom, A. and Lang, J., 2020. Waste type, incineration, and aeration are associated with per- and polyfluoroalkyl levels in landfill leachates. *Waste Management*. 107, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.034>.

Solo-Gabriele, H.M., Zhang, H., Chen, Y., Liu, Y., Bowden, J.A., Tolaymat, T. and Townsend, T.G., 2023. Relationships between per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and physicochemical parameters in aqueous landfill samples, *Chemosphere*. 329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138541>.

Travar, I., Uwayezu, J.N., Kumpiene, J. and Yeung, L., 2021. Challenges in the PFAS Remediation of Soil and Landfill Leachate: A Review. *Adv Environ Eng Res*. 2(2). <http://doi:10.21926/aeer.2102006>.

U.S. EPA. 2018. Basic information on PFAS. <https://www.epa.gov>.

Wang, Z., DeWitt, J.C., Higgins, C.P. and Cousins, I.T., 2017. A never-ending story of per-and polyfluoroalkyl substances. *Environmental Science & Technology*. 51, 2508-2518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04806>.

Williams, P.T. 2005. *Waste treatment and disposal*. Second edition. John Wiley & Sons Ltd. England.



*This page is intentionally
left blank.*