**Original Article**

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

**Mahin Rasouli,[1] Mahdi Jalili Ghazizade,[1*] Touraj Nasrabadi,[2] Majid Baghdadi[3]**

[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

**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.

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

**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 $R^2$ values in comparison to other equations; notably, the exclusion of these parameters from the regression equations resulted in a diminished $R^2$ 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

نسخه پیش انتشار

**مقاله پژوهشی**

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

**مهین رسولی[۱]، مهدی جلیلی قاضی زاده[۱]*، تورج نصرآبادی[۲]، مجید بغدادی[۳]**

[۱] گروه فناوری های 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

**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 به‌عنوان 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 تجمع زیستی اسید پرفلوئوروکتانوئیک سولفونیک (PFOS) و نمک‌های آن و پرفلوئوروکتانوئیک سولفونیل فلوئوراید (PFOSF) در سال ۲۰۰۹ این مواد به لیست مواد آلی پایدار (POPs) در کنوانسیون استکهلم اضافه شدند. یکی از راه‌های تعیین مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل در شیرابه، شناسایی ارتباط این مواد با پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه است. 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 فلوئورو آلکیل در شیرابه اقدام شود.

**مواد و روش ها:** 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 جمع‌آوری‌شده از محل دفع پسماند آرادکوه جهت اندازه‌گیری مواد مختلف پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی تحت شرایط استاندارد به آزمایشگاه معتبر منتقل و آنالیزهای آزمایشگاهی انجام شد. به منظور اندازه گیری مقدار مواد مختلف پر و پلی فلوئوروآلکیل از دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی (LC-MS-MS) استفاده شد. پایین ترین مقدار حد گزارش برای نمونه های 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 فلوئورو آلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شد. آنالیز همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی برای ارزیابی میزان همبستگی و رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شد.

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

**نتایج و بحث:** این اولین مطالعه برای یافتن رابطه بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند کل جامدات معلق(TSS) و پتانسیل احیا-کاهش(ORP)، با غلظت مواد پر و پلی فلوروآلکیل در شیرابه پسماند است. نتایج نشان‌دهنده بالاترین همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) و کلراید بود. معادلات شامل پارامترهای کلرید (۰/۹۵) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (۰/۵۸)، بالاترین ضریب همبستگی را در بین سایر معادلات داشتند. به طور کلی، مدل‌های رگرسیون همبستگی و رابطه بالقوه بین مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی را در این مطالعه نشان دادند. از نتایج این مطالعه می توان برای محاسبه میزان مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند استفاده کرد. همبستگی قوی شناسایی‌شده بین غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه می‌تواند ناشی از تاثیر 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه پسماند استفاده کرد. وجود مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه، بر ضرورت ارتقای استراتژی‌های مدیریت پسماند (با تمرکز بر جداسازی از مبدا) در ایران تأکید می‌کند. همچنین برای جلوگیری از مشارکت محل های دفع پسماند در انتشار این مواد، استراتژی های کنترلی نظیر احداث محل‌های دفع بهداشتی مجهز به لایه‌های نفوذناپذیر مناسب ضروری است.

**واژه های کلیدی:** تهران، شیرابه، مدیریت پسماند، مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل

**مقدمه**

مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل مواد شیمیایی ساخته دست بشر هستند که در سراسر جهان از دهه ۱۹۵۰ در محصولاتی مانند فوم‌های آتش نشانی، ظروف نچسب، بسته بندی مواد غذایی، واکس اسکی، حشره‌کش‌ها، لباس‌ها، پارچه‌ها و جلال‌های مورد استفاده در آبکاری فلزات و عکاسی مورد استفاده قرار گرفته اند (Wang *et al.*, 2017). ساختار مولکولی مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل 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 پرفلوئوروکتانوئیک سولفونیک (PFOS) و نمک‌های آن و پرفلوئوروکتانوئیک 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).

نسخه پیش انتشار

شیرابه تولیدی در محل های دفع پسماند شهری یکی از مهمترین منابع انتشار مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل به محیط زیست است (Busch *et al.* 2010; Eggen *et al.*, 2010). تلاش‌هایی برای مشخص کردن این مواد در محل های 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 می شود، ارزیابی شوند. همچنین سرنوشت و فرآیندهای 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 فلوئورو آلکیل بی‌اثر هستند (Hamid *et al.*, 2018; Ahrens *et al.*, 2011). در نتیجه، تخلیه شیرابه محل دفع پسماند، حتی اگر تصفیه شود، می تواند 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 فلوئورو آلکیل 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 رطوبت 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 این‌رو 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 فلوئورو آلکیل 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 تا کنون، علاوه بر جدید بودن موضوع، دشواری و هزینه بر بودن این روش بوده است. لذا با اندازه گیری مواد پر و پلی فلوئوروآلکیل در محل دفع پسماند در ایران و یافتن رابطه غلظت این مواد با سایر پارامترهای قابل اندازه‌گیری و متداول‌تر می‌توان این مشکل را حل کرد. یکی از معدود 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 وپارامترهای قلیائیت، کل کربن آلی و آمونیاک و همبستگی معنی‌دار متوسطی بین غلظت این مواد و هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی شیمیایی و کل جامدات وجود دارد. طبق

نسخه پیش انتشار

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 ارزیابی شد و نتایج نشان دهنده همبستگی بین این پارامترها بود (Huang *et al.*, 2022; Hanafia *et al.*, 2019).

تحقیقات بیشتری برای تأیید مکانیسم‌هایی که پارامترهای فیزیکی-شیمیایی را به غلظت مواد پر و پلی فلوئورو آلکیل در شیرابه‌های محل دفع پسماند مرتبط می‌کنند، مورد نیاز است. از این‌رو هدف این تحقیق بررسی همبستگی پارامترهای مختلف در شیرابه از جمله pH، کدورت، هدایت الکتریکی، کلراید، روغن و چربی، کل جامدات معلق(TSS)، پتانسیل احیا-کاهش(ORP)، اکسیژن خواهی شیمیایی(COD) با مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) در شیرابه محل دفع پسماند شهری تهران است.

## مواد و روش ها

### روش تحقیق

### مطالعه موردی

مطالعه موردی در محل دفع پسماند شهری آراد کوه 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 رو شهای پیشاتولید و پساتولید است. روش های پیشا تولید شامل پردازش بیولوژیکی پسماند زیرسرندی با هدف تولید کمپوست و تثبیت پسماند و روش های پسا تولید به صورت ترکیبی از بازچرخش شیرابه به درون محل دفع و تصفیه شیرابه در تصفیه خانه ی ۱۴۰۰ مترمکعبی موجود است. این تصفیه‌خانه به دلایلی از جمله طراحی، ساخت و بهره برداری نامناسب و کیفیت نامناسب شیرابه ی ورودی، موفق به تامین خروجی استاندارد نشده است.

نسخه پیش انتشار

**شکل ۱ـ مجتمع آراد کوه**

**Fig. 1- Aradkouh Complex**

## جامعه آماری، روش نمونه گیری و حجم نمونه

نمونه گیری از شیرابه محل دفع پسماند آرادکوه در جنوب تهران در چند مرحله انجام شد. قبل از انجام نمونه گیری 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 جمع آوری شد. نمونه برداری از چند نقطه از جمله ماشینهای جمع آوری پسماند، محل تخلیه شیرابه ماشین، خطوط پردازش، ایستگاه های 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 ازانتقال به مراکز پردازش پسماند گرفته شد .نمونه برداری بعدی در منطقه ای که برای تخلیه شیرابه وسایل نقلیه تعیین شده بود انجام شد که منطقه تخلیه نامیده می شود. نمونه بعدی از مراکز پردازش که پسماند های مخلوط را از خودروهای حمل‌ونقل پسماند می پذیرند، تهیه شد. در این مراکز، پسماند ها به طور سیستماتیک به مواد قابل بازیافت، مواد آلی و مواد دفعی که عمدتاً حاوی کاغذ و پلاستیک غیرقابل بازیافت هستند، تفکیک می شوند . پسماندها به واحدهای موجود در این مراکز منتقل می‌شوند تا توسط غربال‌های دوار الکتریکی (یعنی زیر سرند و رو سرند) به دو جریان تقسیم شوند . دو نمونه شیرابه تولید شده از دو واحد مختلف در این مرکز در دو فصل جمع آوری شد. بخش زیر سرند شامل ضایعات آلی با اندازه کوچکتر است که به محل کمپوست منتقل می شود که یک نمونه شیرابه نیز از این محل جمع آوری شد. شیرابه تولید شده از دفن پسماند ها از طریق کانال های خاکی به ایستگاه های پمپاژ منتقل می شود. دو نمونه شیرابه نیز از این نقطه در دو فصل مختلف جمع آوری شد . شیرابه از ایستگاه های پمپاژ به سه مقصد منتقل می شود. اولین مقصد تصفیه خانه شیرابه با ظرفیت ۲۰۰ متر مکعب در روز است. روش های تصفیه در این مرکز شامل حوضه همسان سازی، حوضچه های بی هوازی/هوازی و حوضچه های ته نشینی است. یک نمونه از حوضچه ته

نسخه پیش انتشار

نشینی در پایان فرآیند تصفیه تهیه شد. هنگامی که ظرفیت تصفیه خانه پر می شود، شیرابه باقی مانده به مقصد بعدی که لاگون های تبخیری هستند، منتقل می شود .این لاگون ها برای تبخیر و تصفیه حرارتی شیرابه حاصل از دفن پسماند طراحی شده اند. دو نمونه از لاگون های تبخیری جمع آوری شد .آخرین مقصد شیرابه حاصل از دفن پسماند، دریاچه شیرابه است. هر گاه تصفیه خانه و لاگون های تبخیری بیش از حد بارگیری شوند و ظرفیت بیشتری نداشته باشند پمپاژ به دریاچه شیرابه صورت می گیرد. آخرین نمونه از این محل که حاوی شیرابه بالای یک سال است گرفته شد. نقاط نمونه برداری بر اساس سن شیرابه تعیین شدند که به سه دسته شیرابه خام (تازه)، پردازش شده (کهنه) و تصفیه شده طبقه بندی شدند. نمونه های حاصل از وسایل نقلیه حمل پسماند در ورودی، منطقه تخلیه پسماند، محل کمپوست و مراکزپردازش به عنوان شیرابه خام (تازه) طبقه بندی می شوند. ایستگاه‌های پمپاژ، لاگون های تبخیری و دریاچه شیرابه حاوی شیرابه پردازش شده (کهنه) هستند و شیرابه تصفیه‌خانه به عنوان تصفیه‌شده طبقه‌بندی می‌شود.

جهت اطمینان از وجود مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه محل دفع پسماند شهری آراد کوه چند نمونه به عنوان 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 فلوئوروآلکیل در نمونه های محل دفع پسماند شهری آراد کوه انجام شد. دمای هوا در هنگام نمونه گیری ۳۶-۳۸ درجه سانتی گراد بود و نمونه گیری از دو محل مرکز پردازش پسماند و ایستگاه پمپاژ شیرابه انجام شد. پس از اطمینان از وجود مواد (PFAS) در شیرابه، دومین مرحله نمونه برداری در اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ از ۱۴ محل مختلف نمونه برداری شد. دمای هوا در هنگام نمونه گیری ۲۵-۲۷ درجه سانتی گراد بود. نمونه ها در بازه زمانی یکسال در دو فصل تابستان و بهار جمع آوری شدند.

پس از جمع آوری، نمونه ها در یک خنک کننده با یخ قرار داده شدند و نمونه ها به مدت حداکثر ۳ ماه به صورت منجمد نگهداری شدند. جهت نمونه گیری برای آنالیزمواد پرو پلی فلوئوروآلکیل 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل انجام نمی شود، نمونه ها برای اندازه گیری به آزمایشگاه آ ال اس(ALS) در استکهلم سوئد منتقل شدند. همچنین میزان کافی تا حجم ۱ لیتر از بطریهای پلاستیکی تیره از نمونه های مختلف برای اندازه گیری سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی از جمله pH، کدورت، کلراید، کل جامدات معلق، پتانسیل احیا-کاهش، اکسیژن خواهی شیمیایی تهیه شده و در آزمایشگاه آنالیز شدند.

نمونه های جمع آوری شده از محل های دفع پسماند به آزمایشگاه جهت اندازه گیری مواد مختلف پرو پلی فلوئوروآلکیل تحویل داده شدند. نمونه ها زمان تحویل در دمای سرد ۴ درجه سانتی گراد و محل تاریک نگهداری شدند. به منظور اندازه گیری مقدار مواد مختلف پر و پلی فلوئوروآلکیل از دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی (LC-MS-MS) استفاده شد. بوسیله

نسخه پیش انتشار

دستگاه فوق از ۲ تا ۳۵ نوع از مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل را در نمونه های مختلف می توان شناسایی کرد. پایین ترین مقدار حد گزارش برای نمونه های مایع تحقیق حاضر ۰.۵ میکروگرم بر لیتر بود (U.S. EPA., 2018).

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

## روش آماده سازی نمونه ها و اندازه گیری مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل

نمونه های شیرابه طبق دستورالعمل استاندارد W-PFCLMS02 US EPA 537 برای اندازه گیری ذرات پرو پلی فلوئوروآلکیل در آزمایشگاه آماده شدند. ابتدا نمونه های شیرابه از داخل یخچال برداشته شده و به مدت یک ساعت در دستگاه سانتریفیوژ برای جدا سازی 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 این نمونه ها اعم از غلظت زیاد و احتمال وجود میزان زیاد مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل رقیق سازی ۱۰۰ مرتبه انجام شد. نمونه ها از فیلتر با سایز ۰.۲ میکرومتر رد شده و به ویال ۱ میلی لیتری انتقال داده شدند. میزان ۱۰ میکرولیتر از نمونه به ویال مخصوص دستگاه کروماتوگرافی مایع با طیف سنجی جرمی (LC-MS-MS) برای اندازه‌گیری مقدار مواد مختلف پرو پلی فلوئوروآلکیل تزریق شد. این دستگاه شامل یک بخش LC می باشد که از طریق ستون C18 به بخش MS/MS متصل است. ابتدا نمونه های بلانک در دستگاه قرار گرفته و خوانده شدند. سپس نمونه های شیرابه در دستگاه قرار داده شده و پیک های مربوطه شناسایی شدند (Solo-Gabriele *et al.*, 2020; U.S.EPA., 2018) .

## روش های اندازه گیری پارامترهای فیزیکوشیمیایی

پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند pH (4500 H)، اکسیژن خواهی شیمیایی (D ۵۲۲۰)، کدورت (B ۲۱۳۰)، کلرید (Cl-۴۵۰۰ B)، پتانسیل اکسیداسیون-احیا (A۲۵۸۰)، و کل مواد جامد معلق (D ۲۵۴۰) در نمونه های شیرابه توسط آزمایشگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (U.S.EPA., 2018).

## روش تجزیه و تحلیل داده ها

برای بررسی میزان همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل کدورت، pH، کلراید، پتانسیل احیا-کاهش (ORP)، کل جامدات معلق (TSS)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) در محل دفع پسماند از نرم افزار آماری (R) استفاده شد. داده های خام برای توزیع های آماری با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که اکثر داده ها به طور نرمال توزیع شده اند و فرضیه صفر توزیع نرمال برای اکثر داده ها پذیرفته شد. از آنجا که مقادیر ارزیابی شده نرمال بودند، از تحلیل رگرسیون خطی با استفاده از همبستگی رتبه ای پارامتریک پیرسون برای ارزیابی

نسخه پیش انتشار

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 مبدا و b شیب است:

$$Y=a+bx \qquad (۱)$$

## نتایج تجزیه و تحلیل داده ها

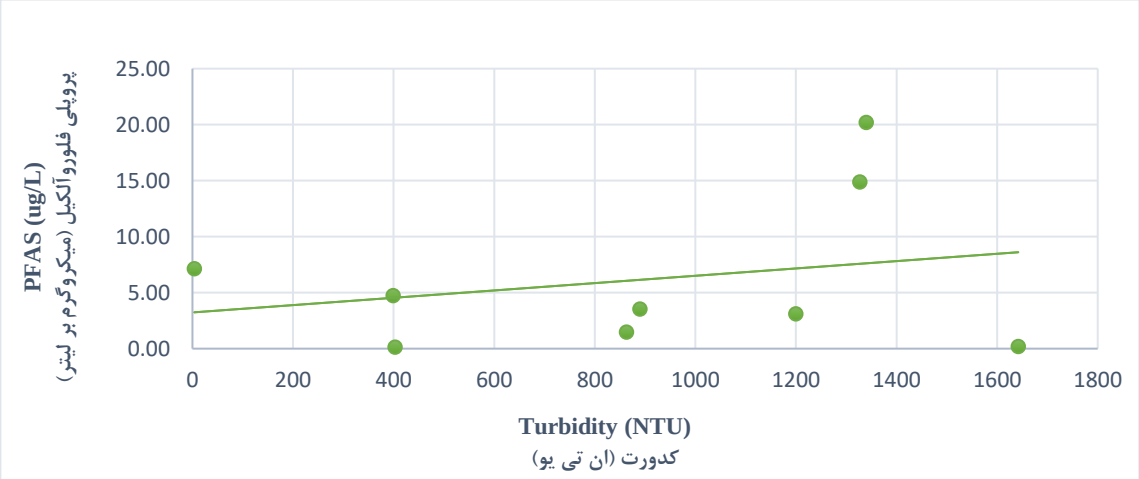
غلظت ۳۴ نوع مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) در شیرابه محل دفع پسماند آرادکوه اندازه گیری شد. از تعداد ۱۶ نمونه شیرابه گرفته شده از مکانهای مختلف، تعداد ۹ نمونه حاوی مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل بودند.

### نتایج پارامترهای فیزیکوشیمیایی و رابطه آنها بین مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل

پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه گیری شده نیز مقادیر متفاوتی را در مکانهای مختلف و بر حسب سن شیرابه نشان دادند. همچنین روابط بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی و مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل با استفاده از نرم افزار اکسل به شرح زیر ارزیابی شد.

#### کدورت

بر اساس نتایج بدست آمده مقدار پارامتر کدورت در بازه ۳.۷۲(ان تی یو) و۱۶۴۲(ان تی یو) گزارش شد که کمترین میزان را در محل خروجی تصفیه خانه با مقدار۳.۷۲(ان تی یو) و بیشترین مقدار در سالن پردازش ۲ با مقدار ۱۶۴۲(ان تی یو) نشان داد. میزان بالای ذرات معلق در نمونه ها افزایش کدورت را در پی دارد که در نمونه های سالن پردازش و لاگن های تبخیری این میزان به وضوح قابل مشاهده است. رابطه بین کدورت و مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل نسبتاً صعودی بوده و با افزایش میزان کدورت میزان غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل هم افزایش یافته است. همچنین در تحقیقی که اخیراً روی رابطه بین کدورت و مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل انجام شده رابطه صعودی بین این دو پارامتر مشاهده شد (Ohoro *et al.*, 2024).



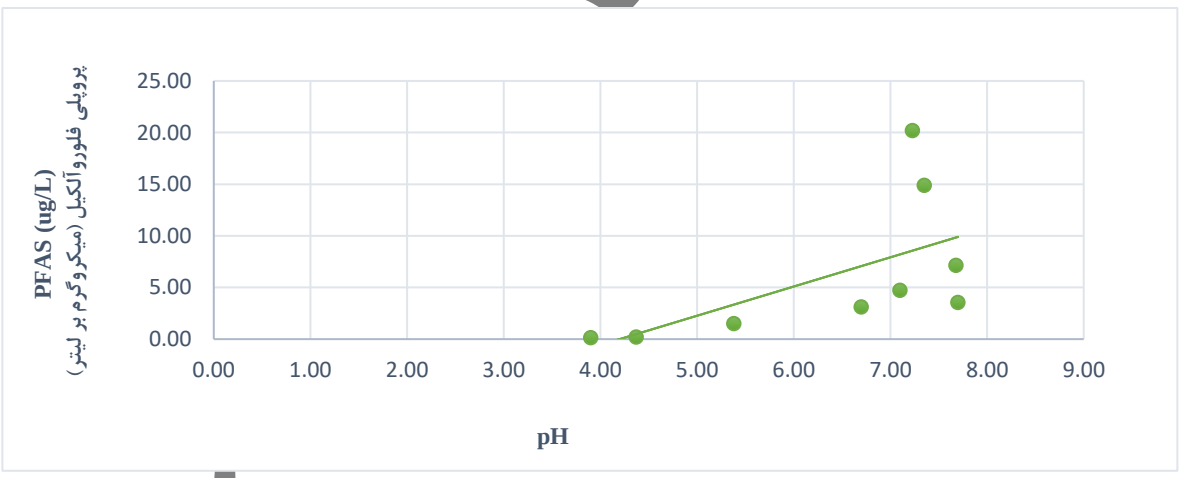

**شکل ۱ــ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کدورت در شیرابه**

نسخه پیش انتشار

**Fig. 1- The Relationship between Concentration of PFAS and turbidity in Leachate**

## pH

بر اساس نتایج بدست 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل صعودی بوده و با افزایش میزان pH میزان غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل 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 متانوژنیک می شود میزان pH کمتری دارد. این نتایج با نتایج چندین مطالعه دیگر سازگار است که نشان می دهند با افزایش pH میزان غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل افزایش می یابد (Benskin *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017). سطح pH در شیرابه می تواند بر حلالیت و تحرک مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل 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 آنها در محلول های آبی افزایش می یابد. این افزایش حلالیت تحرک آنها را افزایش می دهد و به آنها اجازه می دهد آزادانه تر از طریق شیرابه حرکت کنند و با سایر مواد شیمیایی ترکیب شوند که منجر به غلظت بالاتر آنها در شیرابه می شود.




**شکل ۲_ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و pH در شیرابه**

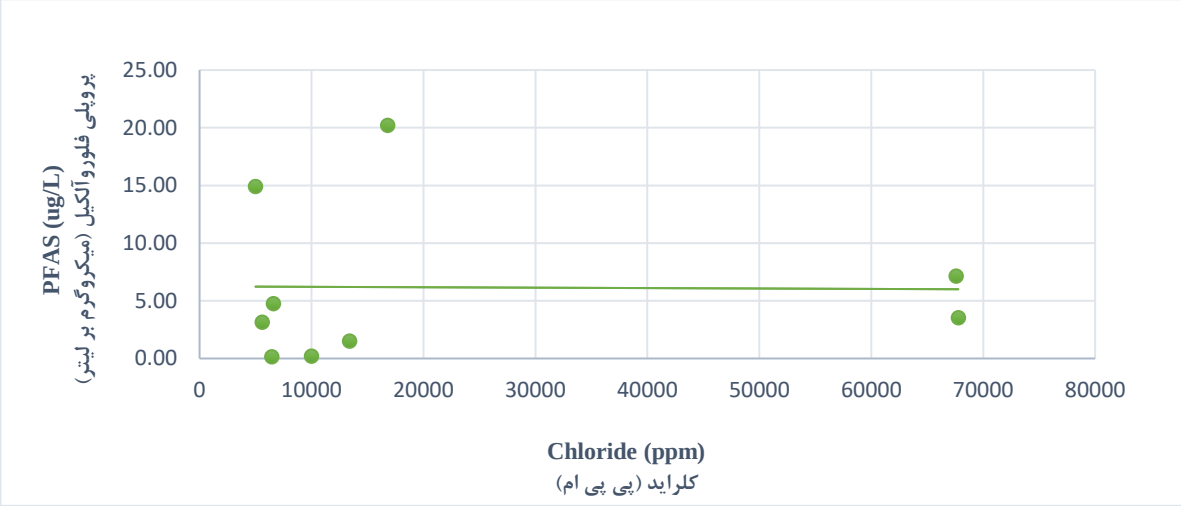
**Fig. 2- The Relationship between Concentration of PFAS and pH in Leachate**

## کلراید

بر اساس نتایج بدست 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 لاگن تبخیری ۲ با مقدار ۶۷۷۷۸

نسخه پیش

(پی پی ام) نشان داد. سطح بالای کلرید در شیرابه به میزان بازیافت ضعیف و میزان بالای اجزای پلاستیک و کاغذ در پسماندهای ایران مربوط می شود.

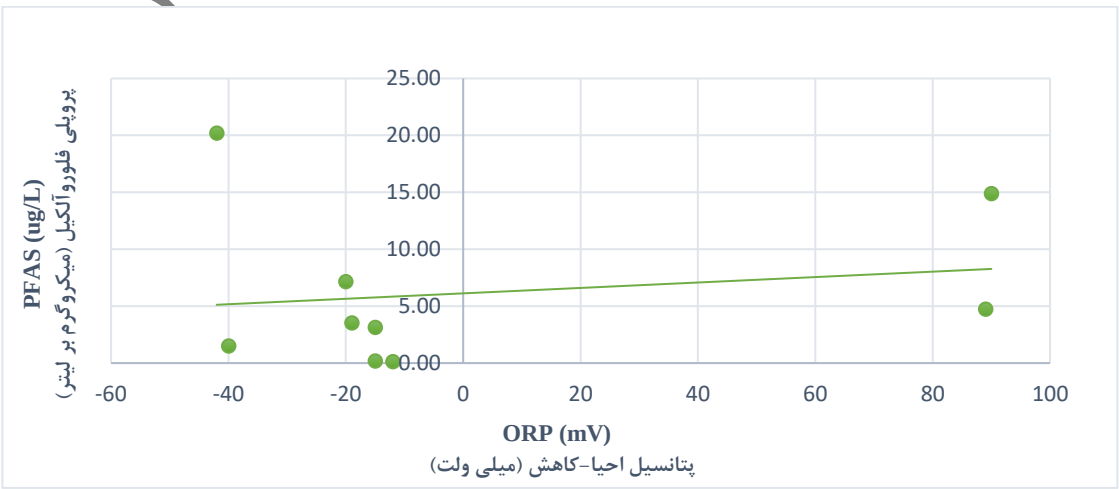



**شکل ۳ـ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کلراید در شیرابه**

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

**پتانسیل احیا-کاهش**

بر اساس نتایج بدست آمده مقدار پتانسیل احیا-کاهش در کل نمونه ها در بازه منفی ۴۰ (میلی ولت) و۱۵۱ (میلی ولت) گزارش شد که کمترین میزان را در دریاچه شیرابه منفی۴۰ (میلی ولت) و بیشترین میزان در سالن پردازش (۲) به مقدار ۱۵۱ (میلی ولت) نشان داد.بالاترین سطح در سالن پردازش نشان دهنده سطح اکسیژن بیشتر در نمونه های این مراکز با شیرابه تازه نسبت به شیرابه قدیمی است. طبق تحقیق Ohoro *et al.* (2024) پتانسیل کاهش بالا منجر به کاهش غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و اکسیداسیون بالا غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل را افزایش می دهد که در این تحقیق هم به وضوح مشاهده شده است.



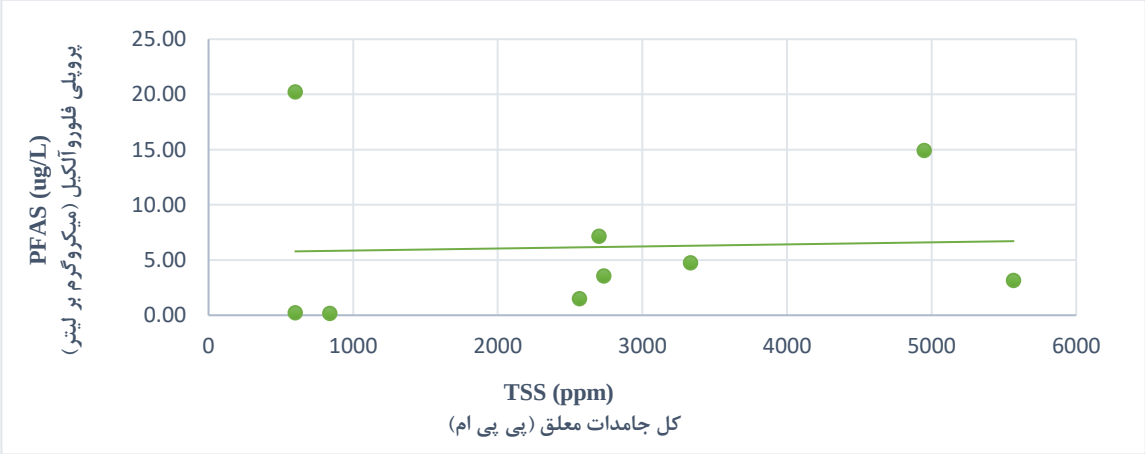

نسخه پیش انتشار

**شکل ۴ـ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پتانسیل احیا-کاهش در شیرابه**

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

### کل جامدات معلق

بر اساس نتایج بدست آمده مقدار کل جامدات معلق در کل نمونه ها 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 تصفیه خانه 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل در برخی نقاط افزایشی بوده و با افزایش میزان کل جامدات معلق میزان مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل بالا رفته است.

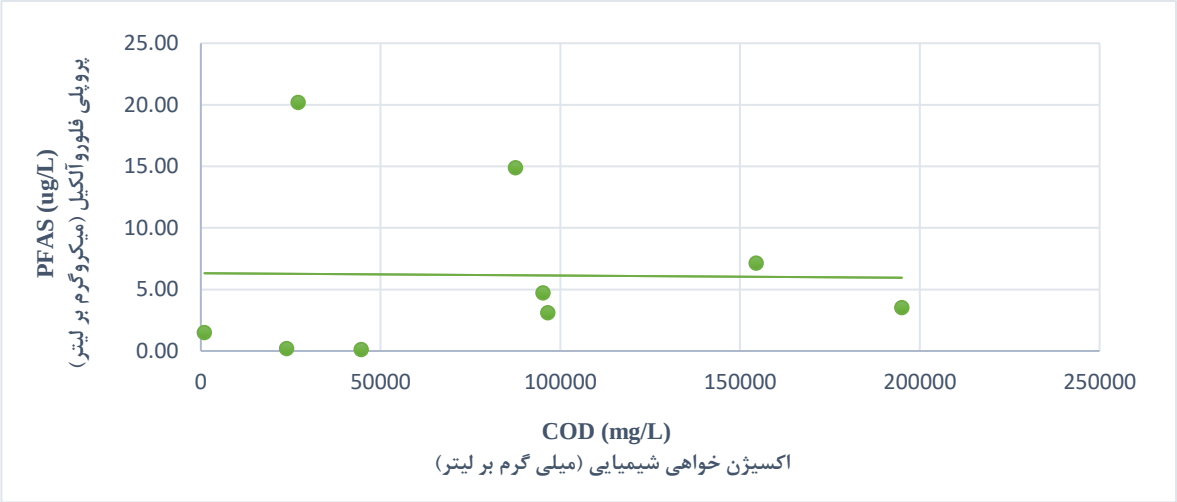



**شکل ۵ـ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کل جامدات معلق در شیرابه**

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

### اکسیژن خواهی شیمیایی

بر اساس نتایج بدست آمده مقدار پارامتر اکسیژن خواهی شیمیایی در کل نمونه ها بازه ۱۰۲۰ (میلی گرم بر لیتر) و ۱۹۵۰۰۰ (میلی گرم بر لیتر) گزارش شد که بیشترین مقدار را در لاگن تبخیری ۲ میزان ۱۹۵۰۰۰ (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 پرو پلی فلوئوروآلکیل برعکس بیشتر پارامترهای دیگرکاهشی بوده و با افزایش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی میزان مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل هم نسبتا کاهش یافته است.




**شکل ۶ـ رابطه بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و اکسیژن خواهی شیمیایی در شیرابه**

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

## همبستگی و ارتباط بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل (PFAS) و پارامترهای فیزیکوشیمیایی

روابط بدست آمده از طریق محاسبه رگرسیون خطی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی در جدول شماره ۱ آمده است.

ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل و pH تایید می کنند (Benskin *et al.*, 2012; Gallen *et al.*, 2017). ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کدورت ۰.۲۵ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی کم بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کلراید ۰.۹۵ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی بالا بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پتانسیل احیا-کاهش مقدار -۰.۴۲ محاسبه شد که نشان دهنده عدم وجودهمبستگی بین این دو پارامتر است. ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کل جامدات معلق مقدار -۰.۱۹ محاسبه شد که نشان دهنده عدم وجودهمبستگی بین این دو پارامتر است. بالعکس در تحقیق سولوگابریل و همکاران ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کل جامدات معلق بین حدود ۰.۷ـ ۰.۹ بوده که همبستگی مثبتی را بین این دو پارامتر نشان می دهد (Solo-Gabriele *et al.*, 2023). ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و اکسیژن خواهی شیمیایی مقدار ۰.۵۸ محاسبه شد که نشان دهنده همبستگی متوسط بین این دو پارامتر است. همچنین در تحقیق سولوگابریل و همکاران

نسخه پیش انتشار

ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و اکسیژن خواهی شیمیایی مقدار ۰.۰۰۵ بوده که همبستگی ضعیف و ناچیزی را نشان می دهد. طبق نتایج و مقایسه این دو تحقیق ضریب همبستگی این دو پارامتر در تحقیق حاضر بیشتر و با اهمیت تر است (Solo-Gabriele *et al.*, 2020).

نتایج نشان دهنده بالاترین همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کلراید با میزان ۰.۹۵ است. بالاترین همبستگی بعد از کلراید با پارامترهای هدایت الکتریکی و روغن و چربی و پایین ترین همبستگی مربوط به پتانسیل احیا-کاهش است. به طور کلی، مدل‌های رگرسیون همبستگی و رابطه بالقوه بین مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی را در این مطالعه نشان دادند.

**جدول ۱ـ معادله رگرسیون و ضریب همبستگی بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی**

**Table 1. Regression Equations and Correlation Coefficient between Concentration of PFAS and Physicochemical Parameters**

| ردیف<br>Row | پارامتر<br>Parameter | معادله رگرسیون<br>Regression Equations | ضریب همبستگی<br>Correlation Coefficient |
|---|---|---|---|
| ۱ | pH | Y(PFAS)= -12.84+2.88× (pH) | 0.51 |
| ۲ | کدورت<br>Turbidity | Y(PFAS)= 3.23+0.003× (T) | 0.25 |
| ۳ | کلراید<br>Chloride | Y(PFAS)= 0.5931+0.0003× (CL) | 0.95 |
| ۴ | پتانسیل احیا-کاهش<br>Oxidation-reduction potential | Y(PFAS)= 6.28-0.05× (ORP) | -0.42 |
| ۵ | کل جامدات معلق<br>Total suspended solids | Y(PFAS)= 8.2-0.0007× (TSS) | -0.19 |
| ۶ | اکسیژن خواهی شیمیایی<br>Chemical oxygen demand | Y(PFAS)=1.076+0.00006× (COD) | 0.58 |

## نتیجه گیری

در حال حاضر فقط در چند مطالعه محدود روابط بین مواد پرو 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 اکسیژن خواهی شیمیایی اندازه گیری شده اند (Solo-Gabriele *et al.*, 2023).

این اولین مطالعه ای است که از مدل های رگرسیون خطی چندگانه برای ارزیابی رابطه بین مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده می کند. نتایج مطالعه حاضر نشان می دهد که بین غلظت مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل و کلرید و (COD)، همبستگی مثبت وجود دارد. مجتمع آرادکوه عمدتا پسماندهای خانگی تفکیک نشده حاوی کاغذ و بسته بندیهای غذایی را می پذیرد که می تواند منجر به افزایش احتمال وجود مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه شود. همبستگی قوی شناسایی شده بین غلظت کلرید، (COD)، و مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل میتواند از تاثیر رطوبت پسماند(ضایعات آلی)، ترکیب پسماند (کاغذ، بسته بندیهای غذایی) و تخریب مواد آلی ناشی شود. نتایج این مطالعه را می توان برای ارزیابی میزان مواد پرو 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 پرو پلی فلوئوروآلکیل و پارامترهای فیزیکوشیمیایی در شیرابه محل دفع پسماند انجام شود.

برای جلوگیری از انتشار مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در محل های دفع پسماند شناخت بهتر مکانیزمهای تولید شیرابه از پسماند و ارزیابی تاثیرات تغییر در غلظت این مواد در پسماند بر تغییرات در غلظت آنها در شیرابه الزامی است. وجود مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه، بر ضرورت ارتقای استراتژی‌های مدیریت پسماند با راهبردهای پیش گیرانه (تفکیک از مبدا) در ایران تأکید می‌کند. همچنین برای جلوگیری از مشارکت محل های دفع پسماند در انتشار این مواد، استراتژی های کنترلی نظیر احداث محل‌های دفن بهداشتی مجهز به لایه‌های نفوذناپذیر، لاینرها و توسعه تأسیسات تصفیه شیرابه با هزینه کم ضروری است. مطالعات آینده در زمینه مواد پرو پلی فلوئوروآلکیل در شیرابه در ایران باید بر شناسایی منابع و محصولات حاوی این مواد، ارزیابی اثرات بر موجودات زنده وشناسایی روشهای حذف این مواد متمرکز باشد. این مطالعات موجب شروع و توسعه استراتژی های مدیریتی در جهت حفاظت از محیط زیست و سلامت عمومی در ایران در این زمینه می شوند.

## سپاسگزاری

این پژوهش بدون حمایت مالی هیچ نهاد و یا سازمانی انجام شده است. از سازمان مدیریت پسماند شهر تهران که امکان نمونه برداری از شیرابه را در مرکز آرادکوه فراهم کردند کمال تشکر را داریم.

## منابع References

Abunama, T & Othman, F. 2021. Comparison of landfill leachate generation and pollution potentials in humid and semi-arid climates. Int. J. Environment and Waste Management. 27(1).

Ahrens, L. Shoeib, M. Harner, T. Lee, S. C. Guo, R. Reiner, E. J. 2011. Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere. Environ. Sci. Technol. 45, 8098−8105.

Benskin, J.P. Li, B. Ikonomou, M.G. Grace, J.R. Li, L.Y. 2012. Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Landfill Leachate: Patterns, Time Trends, and Sources. Environ. Sci. Technol. 46, 11532−11540.

نسخه پیش انتشار

Buck, R.C. Franklin, J. Berger, U. Conder, J.M. Cousins, I.T. de Voogt, P. Jensen, A. Kannan, K. Mabury, S.A. van Leeuwen, S.P. 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. Integrated environmental assessment and management. 7, 513-541.

Busch, J. Ahrens, L. Sturm, R. Ebinghaus, R. 2010. Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachate. Environ. Pollut. 158 (5), 1467–1471.

Ohoro, CH. Amaku, J. Conradie, J. Olisah, CH. Akpomie, K. Malloum, K. Akpotu, S. Adegoke, K. Okeke, E. Omotola, E. 2010. Effect of physicochemical parameters on the occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aquatic environment. 2024. Marine Pollution Bulletin, 208.Eggen, T. Moeder, M. Arukwe, A. Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. Sci. Total Environ. 408, 5147−5157.

Farzadkia, M. Pasalari, H. Gholami, M. Emamjomeh, M. 2018. Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches. Environmental Chemistry Letters. DOI: 10.1007/s10311-018-0804-x.

Gallen, C. Drage, D. Eaglesham, G. Grant, S. Bowman, M. Mueller, J.F. 2017. Australia-wide assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachates. Journal of Hazardous Materials. 331, 132-141.

Hanafia, M. Banch, T. Alkarkhi, A. 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-2019-4811-10.

Huang, X. Wei, X. Liu, H. et al. 2022. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in municipal solid waste landfill leachates from western China. Environ Sci Pollut Res. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20754-5.

Hamid, H. Li, L. Grace, J. Formation of perfluorocarboxylic acids from 6:2 fluorotelomer sulfonate (6:2 FTS) in landfill leachate: Role of microbial communities. 2020. Environ Pollut. 259.

Jamialahmadi, N. Hashemi, M. 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 AG. School of Civil & Environmental Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/s40726-018-0098-4.

Lang, J. Allred, B. Field, J. Levis, J. Barlaz, M. 2017. National estimate of per- and polyfluoroalkyl substance PFAS release to U.S. municipal landfill leachate". Environ. Sci. Technol. 51 (4), 2197–2205.

Liu, Y. Robey, N. Bowden, J. Tolaymat, T. da Silva, B. Solo-Gabriele, H. Townsend, T. 2021. From Waste Collection Vehicles to Landfills: Indication of Per- and Polyfluoroalkyl Substance PFAS Transformation. Department of Environmental Engineering Sciences, College of Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida 32611, United States. orcid.org/0000-0002-1222-0954.

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

نسخه پیش انتشار

Safari, E. Jalili Ghazizade, M. 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 Res. 30(9), 898-907. doi: 10.1177/0734242X12448520. Epub 2012 May 21. PMID: 22617473.

Solo-Gabriele, H. Jones, A. Lindstrom, A. Lang, J. 2020. Waste type, incineration, and aeration are associated with per- and polyfluoroalkyl levels in landfill leachates Waste Management. 107, 191–200.

Solo-Gabriele, H.M., Zhang, H., Chen, Y., Liu, Y., Bowden, J.A., Tolaymat, T., 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. Yeung, L. 2021. Challenges in the PFAS Remediation of Soil and Landfill Leachate: A Review. Adv Environ Eng Res. 2(2).

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

Wang, Z. DeWitt, J.C. Higgins, C.P. Cousins, I.T. 2017. A never-ending story of per-and polyfluoroalkyl substances. Environ. Sci. Technol. 51, 2508–2518.

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

نسخه پیش انتشار