

Assessment of the Abundance and Characteristics of Microplastics in the Effluent of the Urban Wastewater Treatment Plant in Zabol

Received: 21 September 2025, Accepted: 08 November 2025

Mohadeseh Miri^{1*}, Sahel Pakzad Toochei¹, Hashem Khandan Barani²

¹ Department of Natural Ecosystems Management, Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

² Department of Aquatic Sciences, Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

***Corresponding Author:**
mirimohadesa@yahoo.com

How to Cite This Article:

Miri M, Pakzad Toochei S, Khandan Barani H. Assessment of the Abundance and Characteristics of Microplastics in the Effluent of the Urban Wastewater Treatment Plant in Zabol. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(3):345-56.

DOI:

ABSTRACT

Background: Microplastic pollution has emerged as a significant environmental crisis, posing a serious challenge to human health and ecosystem sustainability, particularly within urban wastewater treatment systems. This study aimed to investigate the abundance, physical characteristics, and chemical composition of microplastics in the effluent of the Zabol urban wastewater treatment plant.

Materials and Methods: Sampling of the treated effluent was conducted in the winter of 2024. Three samples, each with a volume of 10 liters, were collected from the effluent of the wastewater treatment plant. For microplastic separation, the samples were passed through sieves of various mesh sizes, followed by chemical digestion and density-based separation. Microplastics were identified and categorized using optical microscopy and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR).

Results: The results indicated that the highest mean abundance was 26.38 ± 1.08 microplastics per liter, with particle sizes ranging from 45 to 425 μm in the treated effluent. The results of the ANOVA test showed that film particles, with a mean abundance of 27.58 ± 1.08 microplastics per liter, accounted for the largest proportion compared to other forms (fibers, fragments, and foams), with a statistically significant difference ($p < 0.05$). FTIR analysis revealed a considerable diversity of polymers among the detected particles. Among them, polyethylene (PE) showed the highest relative abundance (21.46 ± 0.9), representing the dominant polymer type.

Conclusion: The results of this study provide a clear picture of the status of microplastics in the effluent of this wastewater treatment plant. They also highlight the necessity of continuous monitoring, identification of potential sources, management of lightweight plastic waste, reduction of single-use packaging consumption, and the need for further studies on the pathways and environmental impacts of microplastics in arid and water-scarce regions, especially due to the continuous use of this effluent for irrigation of surrounding agricultural lands.

Keywords: Microplastic, Wastewater treatment, Polyethylene, Sistan, FTIR Spectroscopy

ارزیابی فراوانی و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌های پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری زابل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

محدثه میری^{۱*}، ساحل پاکزاد توچایی^۱، هاشم خندان بارانی^۲^۱ گروه مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران^۲ گروه علوم آبزیان، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

زمینه و هدف: آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها به یک بحران محیط زیستی نوظهور تبدیل شده است؛ این موضوع به‌ویژه در سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری چالشی جدی برای سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها به شمار می‌رود. این پژوهش با هدف بررسی فراوانی، ویژگی‌های ظاهری و ترکیب شیمیایی میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری زابل انجام شد.

مواد و روش‌ها: نمونه‌برداری از پساب تصفیه شده در فصل زمستان ۱۴۰۳ انجام شد. سه نمونه، هر کدام با حجم ۱۰ لیتر از خروجی تصفیه خانه برداشت شد. برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها، نمونه‌ها از الک‌هایی با سایزهای مختلف عبور داده شدند و سپس هضم شیمیایی و جداسازی براساس چگالی انجام شد. میکروپلاستیک‌ها با میکروسکوپ نوری و طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) شناسایی و طبقه‌بندی شدند.

یافته‌ها: نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بیشترین میانگین فراوانی به میزان $1/08 \pm 26/38$ میکروپلاستیک در لیتر با اندازه ۴۵-۲۵ میکرومتر در پساب خروجی تصفیه خانه شهر زابل است. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که ذرات از نوع فیلم با میانگین $1/08 \pm 27/58$ میکروپلاستیک در لیتر بیش از سایر اشکال (فیبر، فراگمنت و فوم) بیشترین سهم را با اختلاف معنی‌دار به خود اختصاص دادند ($p < 0/05$). طیف‌سنجی FTIR، نشان داد که تنوع قابل توجهی از پلیمرها در این ذرات وجود دارد. براساس نتایج به دست آمده، پلی‌اتیلن (PE) با بالاترین فراوانی نسبی به میزان $0/9 \pm 21/46$ بیشترین سهم را در میان انواع میکروپلاستیک‌ها داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش تصویری روشن از وضعیت میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی این تصفیه‌خانه ارائه می‌کند. همچنین بر ضرورت پایش مستمر، شناسایی منابع احتمالی، مدیریت پسماندهای پلاستیکی سبک، کاهش مصرف بسته‌بندی‌های یک‌بار مصرف و انجام مطالعات تکمیلی درباره مسیرهای ورود و پیامدهای محیط زیستی میکروپلاستیک‌ها در مناطق خشک و کم‌آب به‌ویژه به دلیل استفاده مداوم از این پساب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی اطراف تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: میکروپلاستیک، تصفیه فاضلاب، پلی‌اتیلن، سیستان، طیف‌سنجی FTIR

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

mirimohadesea@yahoo.com

نحوه استناد به این مقاله:

Miri M, Pakzad Toocheai S, Khandan Barani H. Assessment of the Abundance and Characteristics of Microplastics in the Effluent of the Urban Wastewater Treatment Plant in Zabol. Journal of Environmental Health Engineering. 2025;13(3):345-56.

DOI:

مقدمه

آلودگی ناشی از میکروپلاستیک‌ها به یکی از چالش‌های نوظهور و بحران محیط زیستی و بهداشتی در سطح جهان تبدیل شده است. این ذرات ریز، با قطر کمتر از ۵ میلی‌متر، اغلب حاصل تخریب تدریجی پلاستیک‌های بزرگ‌تر در اثر فرسایش فیزیکی، شیمیایی و زیستی هستند.^۱ میکروپلاستیک‌ها به طور کلی به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه مستقیماً وارد محیط می‌شوند و شامل ذراتی مانند میکروذرات موجود در محصولات آرایشی و بهداشتی هستند،^۲ در حالی که میکروپلاستیک‌های ثانویه از تجزیه اقلام پلاستیکی بزرگ‌تر تحت تأثیر فرایندهای طبیعی مانند نور، گرما و نیروهای مکانیکی پدید می‌آیند.^۳ در حالی که منابع ثانویه در حال حاضر بر آلودگی میکروپلاستیک محیطی غالب هستند، مدیریت مناسب زباله برای پیشگیری در آینده بسیار مهم است.^۲

اگرچه منابع متعددی در ایجاد آلودگی میکروپلاستیکی نقش دارند، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری (WWTPs^۱) یکی از مهم‌ترین منابع ورودی این آلاینده‌ها به محیط زیست محسوب می‌شوند.^۴ پساب شهری، متأثر از فعالیت‌های خانگی نظیر استفاده از محصولات مراقبت شخصی، شستشوی منسوجات مصنوعی و دورریز اقلام پلاستیکی می‌تواند حاوی مقادیر قابل توجهی از میکروپلاستیک‌ها باشد.^۵ اگرچه فرایندهای مرسوم تصفیه قادر به حذف ۷۰ تا ۹۰ درصد از این ذرات هستند، اما خروجی نهایی همچنان حاوی مقادیر قابل توجهی از میکروپلاستیک است که به محیط تخلیه می‌شود.^۶ فناوری‌های پیشرفته‌تری نظیر بیوراکتورهای غشایی، فیلتراسیون سریع و شناورسازی با هوای محلول می‌توانند راندمان حذف بالاتری (تا بیش از ۹۹ درصد) ارائه دهند، با این حال، حذف کامل میکروپلاستیک‌ها همچنان چالشی جدی باقی مانده است.^۷ میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در پساب شامل انواع پلیمرها نظیر پلی‌استر، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن در اشکال

مختلفی چون فیبر، ذرات کروی و قطعات شکسته‌اند که در بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه، از جمله لجن، پساب تصفیه شده و فاضلاب خام، قابل شناسایی هستند.^{۸، ۹} میکروپلاستیک‌ها به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان آلاینده‌های سمی در محیط زیست شناخته می‌شوند و خطرات قابل توجهی برای حیات موجودات و سلامت بالقوه انسان ایجاد می‌کنند. این ذرات می‌توانند مواد شیمیایی خطرناک مختلف از جمله PCB ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین را جذب و آزاد کنند که می‌توانند در موجودات زنده تجمع کنند.^{۱۱} بلع میکروپلاستیک‌ها توسط موجودات آبی می‌تواند منجر به توزیع آن‌ها در سراسر بدن شود و به طور بالقوه باعث اختلال در عملکرد کبد، اختلال غدد درون ریز و اثرات سرطان‌زا شود.^{۱۲} اندازه میکروپلاستیک‌ها نقش مهمی در سمیت آنها ایفا می‌کند و ذرات کوچک‌تر اغلب اثرات برجسته‌تری از خود نشان می‌دهند. انتقال تغذیه‌ای میکروپلاستیک‌ها در طول زنجیره غذایی مشاهده شده است که نگرانی‌هایی را در مورد بزرگنمایی زیستی ایجاد می‌کند.^{۱۳} میکروپلاستیک‌ها تهدیدات قابل توجهی برای اکوسیستم‌های آبی و زمینی هستند و بر ساختار و عملکرد آنها تأثیر می‌گذارند. آنها می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی زیستگاه‌ها را تغییر دهند، با فرایندهای بیوژئوشیمیایی تداخل کنند و جریان انرژی در شبکه‌های غذایی را مختل کنند.^{۱۴} میکروپلاستیک‌ها به طور بالقوه چرخه مواد مغذی و جوامع میکروبی را در رسوبات تغییر می‌دهند.^{۱۵} این آلاینده‌ها می‌توانند ترکیب و تنوع جامعه میکروبی را هم در محیط و هم در روده حیوانات تغییر دهند و در نهایت تنوع زیستی را تهدید کنند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در شهرستان زابل، واقع در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرق ایران انجام شد. این منطقه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با بارندگی سالانه محدود و وابستگی زیاد به منابع آب بازیافتی برای مصارف کشاورزی است. تصفیه‌خانه فاضلاب شهری زابل به عنوان محل نمونه‌برداری انتخاب شد که پساب آن مستقیماً یا غیرمستقیم به زمین‌های کشاورزی منطقه منتقل می‌شود.

نمونه‌برداری از پساب خروجی تصفیه‌خانه در زمستان ۱۴۰۳ انجام شد. سه نمونه از خروجی تصفیه‌خانه جمع‌آوری گردید. برای هر نمونه ۱۰ لیتر پساب در ظروف شیشه‌ای تیره جمع‌آوری و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد.

نمونه‌های آب ابتدا از لک‌هایی به ضخامت ۱ میلی‌متر، ۴۲۵ میکرومتر و ۴۵ میکرومتر عبور داده شدند. هضم نمونه‌های جداسازی شده با استفاده از روش پراکسیداسیون مرطوب انجام شد. برای این منظور، نمونه‌ها به یک بشر ۱ لیتری منتقل و در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس ۲۰ میلی لیتر $\text{FeSO}_4 \cdot 0.05\text{M}$ و ۲۰ میلی لیتر $\text{H}_2\text{O}_2 \cdot 35\%$ به نمونه‌ها اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه روی صفحه داغ با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند.^{۱۸}

تمام نمونه‌های هضم شده پس از افزودن ۲۰ میلی لیتر NaCl ($p=1.2 \text{ g/ml}$) در یک قیف جداکننده حجمی ۱ لیتری قرار داده می‌شوند و به مدت ۲۴ ساعت برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها براساس چگالی نگهداری شدند. مایع رویی با استفاده از کاغذ فیلتر میکروفیبر شیشه‌ای با اندازه منافذ ۱/۲ میکرومتر (Whatman GF/C) فیلتر شد.^{۱۹}

فیلترها برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها توسط میکروسکوپ نوری (با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۰۰ برابر) بررسی شدند و بر اساس ویژگی‌های ظاهری مانند رنگ، شکل، اندازه و بافت به انواع الیاف (fibers)، ذرات کروی (Foam)، قطعات (fragments) و فیلم (Film)

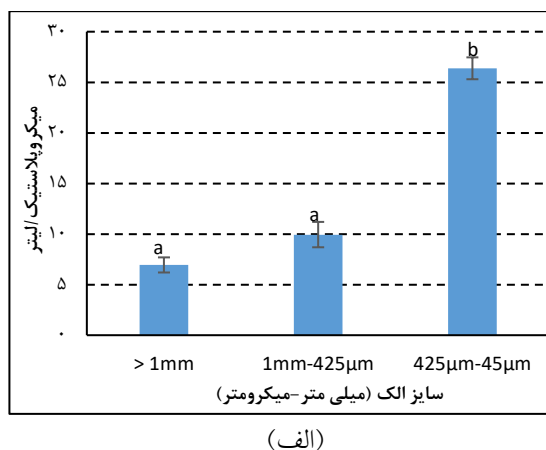
همچنین با تاثیر بر شار گازهای گلخانه‌ای و شیمی اتمسفر بر تغییرات آب و هوای جهانی تاثیر می‌گذارند.^{۱۶} اثرات محیط زیستی MPs با تغییرات در ترکیب ساختار اجتماعات موجودات، چرخه مواد مغذی و تولیدات اولیه گسترش می‌یابد.^{۱۵}

تصفیه‌خانه فاضلاب زابل در سال ۱۳۷۵ با هدف جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب حدود ۱۳۰ هزار مشترک احداث شد و پس از اجرای نزدیک به ۱۶۰ کیلومتر شبکه فاضلاب و ایجاد ۹ ایستگاه پمپاژ، در سال ۱۳۸۷ به بهره‌برداری کامل رسید. فرایند تصفیه در این واحد بر اساس سیستم برکه‌های تثبیت طراحی شده و اکنون شامل سه لاگون تثبیت است که فاضلاب خام پس از هوادهی اولیه به این برکه‌ها منتقل می‌شود.^{۱۷} در این برکه‌ها، تصفیه فاضلاب با استفاده از عوامل طبیعی مانند نور خورشید، دما، جریان باد و فعالیت جلبک‌ها انجام می‌گیرد. با ماندگاری فاضلاب در برکه‌ها، مواد آلی و آلاینده‌ها به تدریج توسط باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی و جلبک‌ها تجزیه شده و بخش قابل توجهی از آن‌ها به مرور در کف حوضچه‌ها ته‌نشین می‌شوند.

شهرستان زابل با موقعیت جغرافیایی خاص و اقلیم خشک و نیمه‌خشک، با مشکلات کم‌آبی و آلودگی فاضلاب مواجه است. استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری برای مصارف کشاورزی در این منطقه رایج است، اما نبود اطلاعات دقیق درباره حضور و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در این پساب‌ها در اقلیم‌های خشک مانند زابل وجود دارد. هدف از این مطالعه پر کردن این شکاف اطلاعاتی با بررسی فراوانی، نوع و اندازه میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری زابل است. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای بهبود فرآیندهای تصفیه فاضلاب و کاهش انتقال میکروپلاستیک‌ها به زمین‌های کشاورزی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد.

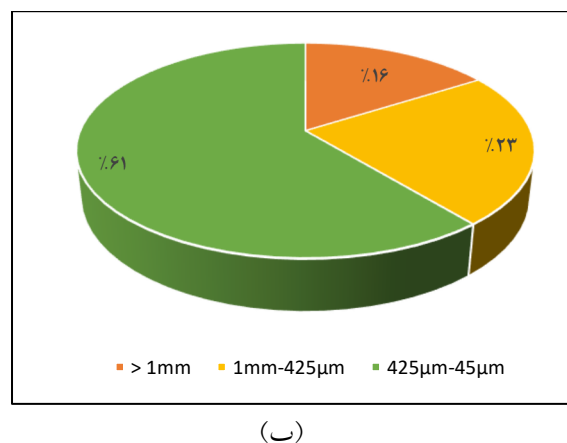
نتایج

تحلیل نتایج به دست آمده از بررسی فراوانی میکروپلاستیک‌ها براساس اندازه در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهرستان زابل، الگوی مشخصی از توزیع این ذرات را در میان سه گروه مورد مطالعه (۱ میلی‌متر، ۴۲۵ میکرومتر و ۴۵ میکرومتر) نشان می‌دهد (شکل ۱). همان‌طور که در شکل ۱ (الف) مشاهده می‌شود فراوانی و درصد میکروپلاستیک‌ها با کاهش اندازه افزایش قابل توجهی دارد. نتایج نشان داد، بالاترین میانگین فراوانی به میزان $26/38 \pm 1/08$ میکروپلاستیک در لیتر با اندازه ۴۵-۴۲۵ میکرومتر است. در مقابل، گروه ذرات بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر دارای کمترین فراوانی با میانگین $6/94 \pm 0/7$ میکروپلاستیک در لیتر بود. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که فراوانی میکروپلاستیک‌ها با اندازه ۴۵-۴۲۵ میکرومتر به‌طور معنی‌دار بیشتر از دو گروه دیگر است ($p < 0/05$) و این گروه ۶۱٪ از کل میکروپلاستیک‌های شناسایی شده را به خود اختصاص داد. در حالی که بین دو گروه دیگر تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده نشد ($p > 0/05$) (شکل ۱ ب).



دسته‌بندی شدند^{۲۰}. برای تأیید ماهیت پلیمری، بخشی از ذرات با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) آنالیز شدند^{۲۱}. برای شناسایی نوع پلیمر میکروپلاستیک‌ها، از دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز FTIR مدل TENSOR 27 از شرکت Bruker استفاده شد. تحلیل طیفی نمونه‌ها با استفاده از تکنیک ATR-FTIR انجام گرفت. طیف‌سنجی در محدوده عدد موج (cm^{-1}) $4000 - 400$ انجام گرفت.

داده‌های آماری از جهت نرمال بودن توسط آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk Test) و همگن بودن توسط آزمون (Mauchly's Test) مورد بررسی قرار گرفتند. مقایسه ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها توسط آزمون واریانس ANOVA انجام شد. در مطالعه حاضر از نرم‌افزارهای SPSS و EXCEL استفاده شده است.



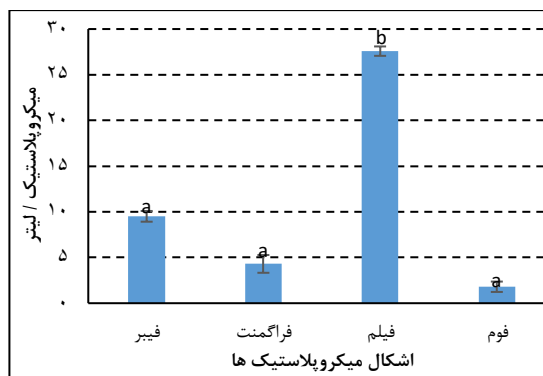
شکل ۱. مقایسه میانگین و درصد فراوانی میکروپلاستیک‌ها براساس سایزهای مختلف در پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری زابل (حروف نامشابه اختلاف معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ را نشان می‌دهد)

داد که بین اشکال مختلف، ذرات از نوع فیلم با میانگین فراوانی $27/58 \pm 1/08$ میکروپلاستیک در لیتر بیش از سایر

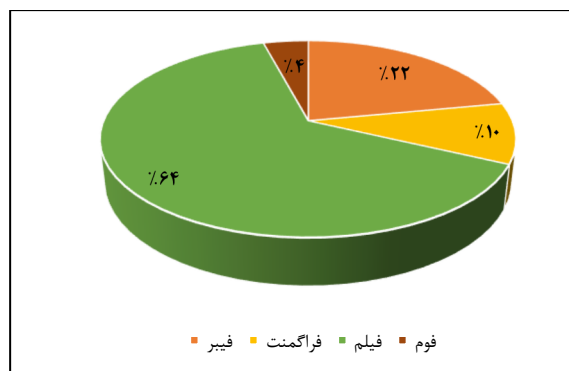
نتایج حاصل از بررسی اشکال مختلف میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری زابل نشان

بوده و از نظر آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند ($p > 0/05$) (شکل ۲).

اشکال، بیشترین سهم را با اختلاف معنی دار به خود اختصاص دادند ($p < 0/05$). در مقابل، سایر اشکال شامل فراگمنت، فیبر و فوم دارای میانگین فراوانی نسبتاً کمتری



(الف)

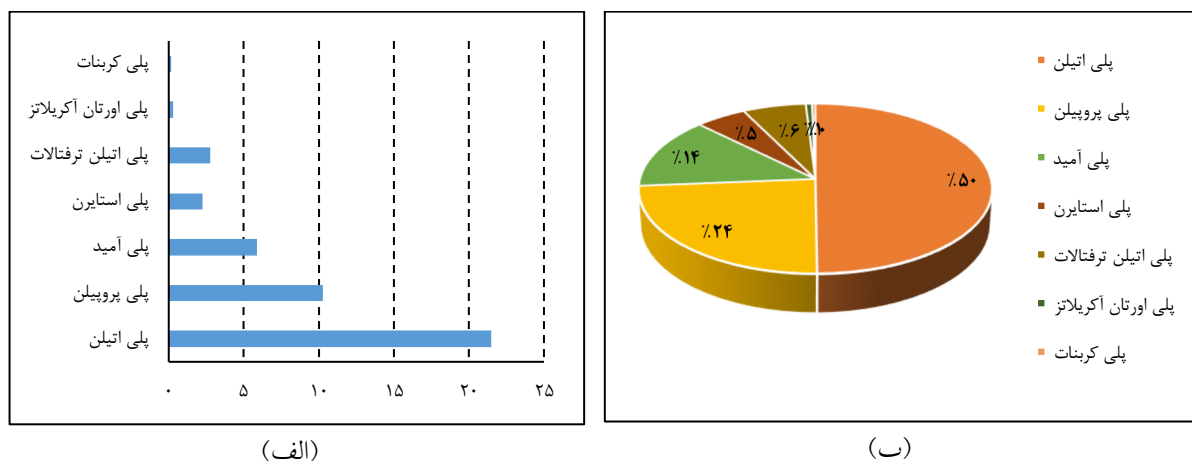


(ب)

شکل ۲. مقایسه میانگین و درصد میکروپلاستیک ها براساس اشکال مختلف در پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهر زابل (حروف نامشابه اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۵ را نشان می دهد)

پلی آمید (PA) به ترتیب ۲۳/۸٪ و ۱۳/۶۶٪ در رتبه های بعدی قرار گرفتند. سایر پلیمرهای شناسایی شده شامل پلی - استایرن (PS)، پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی کربنات (PC) سهم های کمتری از کل ترکیب پلیمری را تشکیل دادند. تحلیل ANOVA بین انواع پلیمرها نشان دهنده تفاوت معنی دار در میزان حضور آنها بود ($p < 0/05$)، به طوری که PE و PP به طور محسوسی بیش از دیگر پلیمرها در نمونه ها مشاهده شدند (شکل ۳).

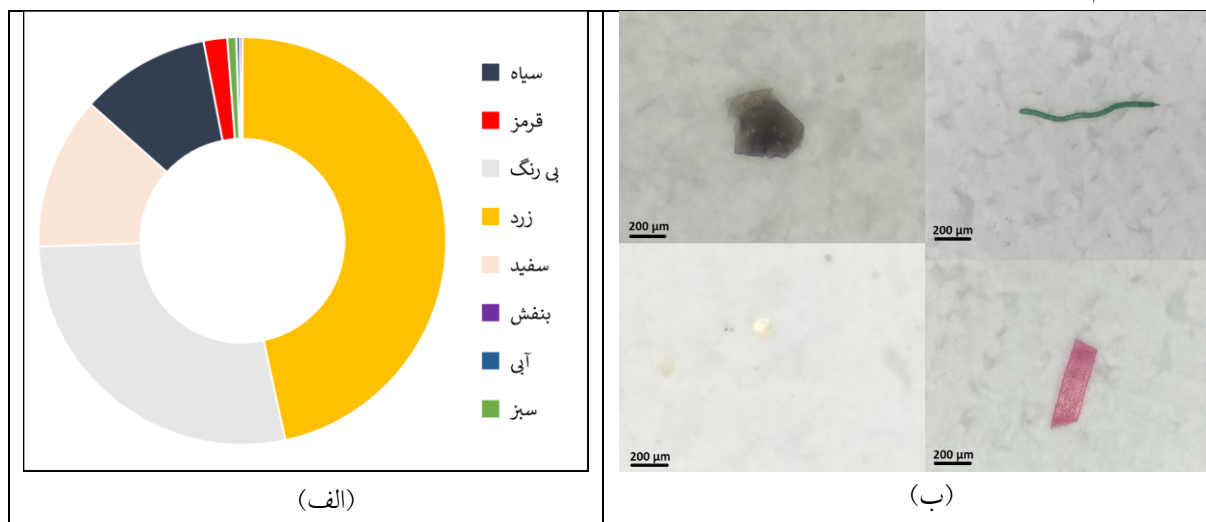
بررسی نوع پلیمرهای سازنده ذرات میکروپلاستیک استخراج شده از پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهری شهرستان زابل توسط طیف سنجی FTIR، نشان داد که تنوع قابل توجهی از پلیمرها در این ذرات وجود دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، پلی اتیلن (PE) با بالاترین فراوانی نسبی به میزان $21/46 \pm 0/9$ بیشترین سهم را در میان انواع میکروپلاستیک ها داشت و به عنوان غالب ترین پلیمر شناسایی شد (شکل ۳ ب). پس از آن، پلی پروپیلن (PP) و



شکل ۳. مقایسه مقادیر و درصد میکروپلاستیک‌ها براساس نوع پلیمرهای مختلف در پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهر زابل

میکروپلاستیک‌های بی‌رنگ (۲۷٪/۹۳)، سفید (۱۲٪/۱۱) و مشکی (۱۰٪/۲۶) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. میکروپلاستیک‌های قرمز، بنفش، آبی و سبز درصدهای بسیار کمتری را به خود اختصاص دادند که نشان‌دهنده فراوانی کمتر این رنگ‌ها در پساب خروجی است.

شکل ۴ توزیع درصدی رنگ‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها و در اشکال و رنگ‌های مختلف در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، میکروپلاستیک‌های زرد رنگ به میزان ۴۶/۶۲٪ بیشترین سهم را در میان نمونه‌های بررسی شده داشتند.



شکل ۴. توزیع درصدی رنگ‌های مختلف و تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروپلاستیک‌های مشاهده شده در

پساب خروجی در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر زابل

بحث

نتایج حاصل از بررسی فراوانی میکروپلاستیک‌ها براساس اندازه ذرات نشان می‌دهد که ذرات ریزتر (۴۵-۴۲۵ میکرومتر) به‌طور معنی‌داری در پساب تصفیه‌خانه فاضلاب زابل غالب هستند. این یافته با پژوهش‌هایی که در سایر تصفیه‌خانه‌های مبتنی بر برکه‌های تثبیت و حتی سیستم‌های پیشرفته‌تر تصفیه فاضلاب کاملاً هم‌راستا است ۲۲-۲۴. علویان و هاشمی (۱۳۹۸) در تصفیه‌خانه ساری گزارش کرده‌اند که حدود ۷۷٪ میکروپلاستیک‌های پساب در بازه اندازه ۳۷-۳۰۰ میکرومتر قرار دارند و اغلب به‌صورت الیاف مشاهده می‌شوند ۲۵. توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها در پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب عمدتاً کوچک است، به طوری که ذرات کمتر از ۱۵۰ میکرومتر احتمال بیشتری دارد که از فرآیند تصفیه عبور کنند ۲۶، ۲۷. ساختار و نوع فناوری به‌کار رفته در تصفیه‌خانه‌ها از دلایل مهم و تاثیرگذار می‌باشد سیستم برکه تثبیت که در تصفیه‌خانه زابل به‌کار گرفته می‌شود بر پایه ته‌نشینی ثقلی، تجزیه زیستی و اکسیداسیون نوری عمل می‌کند اما فاقد مراحل پیشرفته‌ای چون فیلتراسیون فشرده یا انعقاد شیمیایی است. به همین دلیل راندمان حذف ذرات ریزتر به‌ویژه در مقیاس میکرومتری، پایین‌تر از سایر سیستم‌های فعال مانند لجن فعال یا MBR است ۲۸، ۲۹. مطالعه Kim و همکاران ۲۰۲۲ نشان داد که در سیستم‌های MBR، راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها تا ۹۹/۸ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که در سامانه‌های طبیعی‌تر مانند برکه‌های تثبیت به دلیل نبود مرحله فیلتراسیون فیزیکی مؤثر، ذرات کوچک‌تر به‌راحتی از فرآیند عبور می‌کنند ۲۹. همچنین برتری فراوانی ذرات در بازه ۴۵-۴۲۵ میکرون را می‌توان به نفوذپذیری بیشتر این ذرات در مراحل تصفیه ابتدایی و میانی برکه‌ها و سرعت ته‌نشینی پایین‌تر این ذرات به دلیل اندازه کوچک و چگالی نزدیک به آب نسبت داد که باعث می‌شود زمان ماند در سیستم برای ته‌نشینی کافی نباشد ۳۰. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که تغییرات

اقلیمی و شرایط محیطی نیز می‌توانند مسیر و تولید میکروپلاستیک‌ها را تغییر دهند ۳۱.

از نظر شکل ظاهری، نتایج نشان داد که ذرات فیلمی (Films) بیشترین سهم را در پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب زابل داشتند. فیلم‌ها معمولاً به‌صورت قطعات نازک، تخت و انعطاف‌پذیر مشاهده می‌شوند که از تجزیه و تکه‌تکه شدن پلاستیک‌های نازک مانند کیسه‌های خرید، پلاستیک‌های فریزر، بسته‌بندی‌های مواد غذایی به وجود می‌آیند. این نوع میکروپلاستیک‌ها به دلیل ضخامت کم و سطح ویژه بالا، پایداری بیشتری در محیط دارند و می‌توانند به‌راحتی از مراحل تصفیه متداول عبور کنند. مطالعات متعددی نیز بر غلبه فیلم‌ها در پساب‌های شهری و محیط‌های آبی تأکید کرده‌اند ۱۰، ۲۲، ۳۲. فیلم‌ها نه تنها از نظر حضور فراوان اهمیت دارند، بلکه به دلیل ساختار سطحی و خاصیت هیدروفوبیک قابلیت بالایی برای جذب آلاینده‌های آلی پایدار (POPs) فلزات سنگین و سایر مواد سمی دارند ۳۳. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که فیلم‌ها به‌عنوان ناقل آلاینده‌ها در اکوسیستم عمل کرده و خطرات ترکیبی برای موجودات زنده ایجاد کنند. با توجه به استفاده گسترده از کیسه‌های پلاستیکی و بسته‌بندی‌های یک‌بار مصرف در جوامع شهری، منبع مداومی برای ورود این ذرات به شبکه فاضلاب است ۴. الیاف (Fibers) بعد از فیلم‌ها بیشترین فراوانی را داشتند که نشان‌دهنده سهم بالای الیاف مصنوعی حاصل از شست‌وشوی لباس‌ها در ورود میکروپلاستیک‌ها به فاضلاب شهری است. مطالعات نشان داده‌اند که یک لباس می‌تواند در هر شستشو تا ۱۹۰۰ الیاف آزاد کند که تعداد کل فیبرهای آزاد شده از ۶۴۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰۰۰ در هر کیلوگرم پارچه شسته شده متغیر است. در حالی که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در جذب فیبرها مؤثر هستند، حجم بالای فاضلاب ورودی باعث می‌شود که میلیاردها فیبر روزانه وارد محیط شوند ۳۴. در برخی مطالعات قطعات (Fragments) شکل غالب میکروپلاستیک‌ها گزارش شده‌اند ۳۵، ۳۶؛ این الگو معمولاً در تصفیه‌خانه‌هایی مشاهده شده که منابع صنعتی یا ورودی‌های

حاوی ضایعات بسته‌بندی سخت، قطعات پلاستیکی و فعالیت‌های ساختمانی بالا بوده است.^{۳۵}

در مورد رنگ میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهر زابل، نتایج نشان داد که ذرات زرد و بی‌رنگ غالب هستند که می‌تواند منعکس‌کننده منشاء پلاستیک‌های مصرفی خانگی و تجاری باشد. رایج‌ترین انواع رنگ میکروپلاستیک‌ها در پساب فاضلاب شهری شامل زرد، بی‌رنگ، سفید، آبی و سیاه هستند.^{۳۷}

طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) نشان داد که پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) به‌ترتیب رایج‌ترین پلیمرهای شناسایی‌شده در ذرات میکروپلاستیک در پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب شهر زابل هستند. این ترکیبات معمولاً در محصولات بسته‌بندی، بطری‌های یکبار مصرف و ظروف غذایی استفاده می‌شوند.^{۳۸} نتایج مطالعه حاضر با سایر مطالعات گزارش شده نشان می‌دهد که PE و PP بیشترین سهم را در میکروپلاستیک‌های موجود در فاضلاب دارند.^{۳۹-۴۱} دلایل آن می‌تواند گستردگی استفاده از این پلیمرها در بسته‌بندی‌ها و ظروف یکبارمصرف^{۳۸}، ویژگی‌های فیزیکی-چگالی کمتر یا نزدیک آب این پلیمرها که منجر به افزایش عبور آن‌ها از فرایندهای تصفیه شده^{۴۲}، دیر تجزیه شدن نسبت به برخی پلیمرهای دیگر و عرضه مداوم آن‌ها از منابع خانگی به فاضلاب باشد.^{۴۳} حضور پلیمرهایی مانند PVC، پلی‌استایرن و پلی‌آمید نیز نمایانگر ورود آلاینده‌ها از منابع ساختمانی، فوم‌های مصرفی و نساجی‌هاست.^{۴۱}

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ذرات با اندازه کوچک‌تر به مراتب غالب‌تر از ذرات بزرگ‌تر در پساب نهایی تصفیه‌خانه حضور دارند. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی میکروپلاستیک‌های ریز، از جمله وزن کمتر، سطح ویژه بالاتر و قابلیت معلق ماندن بیشتر، احتمال عبور این ذرات از فرایندهای تصفیه متداول به ویژه در سیستم‌های برکه‌های تثبیت افزایش می‌یابد. ذرات شناسایی شده در این مطالعه می‌توانند پس از ورود به محیط، پیامدهای متعددی

برای اکوسیستم‌های آبی و خاکی منطقه داشته باشند. در مناطقی مانند زابل که پساب به‌طور مستقیم برای آبیاری استفاده می‌شود، این ذرات می‌توانند به خاک کشاورزی منتقل شده و ویژگی‌های فیزیکی خاک را تغییر دهند، نفوذپذیری را کاهش داده و بر فعالیت میکروبی و رشد گیاه اثر منفی بگذارند.^{۴۴} همچنین، میکروپلاستیک‌ها به دلیل ویژگی‌های سطحی خود، می‌توانند ترکیبات سمی نظیر فلزات سنگین، مواد آلی پایدار و داروهای انسانی را جذب کرده و به موجودات زنده منتقل کنند.^{۳۳} بلع این ذرات توسط موجودات نه تنها منجر به اختلالات فیزیولوژیکی و رفتاری می‌شود بلکه ممکن است اثرات سرطان‌زا و ژنتیکی نیز داشته باشد.^{۴۵}

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تصفیه‌خانه فاضلاب زابل همانند بسیاری از سیستم‌های تصفیه، قادر به حذف کامل میکروپلاستیک‌ها نیست و مقادیر قابل توجهی از این ذرات به‌ویژه در قالب فیلم‌های پلاستیکی و پلیمر پلی‌اتیلن (PE) در پساب خروجی باقی می‌مانند. ورود این آلاینده‌ها از منابع خانگی، بسته‌بندی‌های یکبارمصرف، کیسه‌های پلاستیکی و پوشش‌های کشاورزی است. با توجه به استفاده از پساب این تصفیه‌خانه در آبیاری مزارع، حضور غالب فیلم‌ها و پلیمرهای پایدار می‌تواند منجر به تجمع تدریجی در خاک و انتقال احتمالی به گیاه و زنجیره غذایی شود. بنابراین، ارتقای فناوری‌های تصفیه از طریق به‌کارگیری واحدهای تکمیلی مانند میکروفیلتراسیون، فیلترهای شنی تحت فشار یا انعقاد-لخته‌سازی به همراه مدیریت مؤثر منابع تولید میکروپلاستیک در سطح جامعه ضروری به نظر می‌رسد.

از سوی دیگر، مدیریت مصرف و دفع پسماندهای پلاستیکی سبک، کاهش استفاده از بسته‌بندی‌های مبتنی بر پلی‌اتیلن و تقویت طرح‌های بازیافت می‌تواند نقش مهمی در کنترل منشاء این آلاینده‌ها ایفا کند. آگاه‌سازی کشاورزان نسبت به مخاطرات زیست‌محیطی میکروپلاستیک‌ها، استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار به جای آبیاری سطحی، نصب

حمایت مالی

این مقاله حاصل از طرح تحقیقاتی با عنوان «شناسایی و تعیین شاخص خطر اکولوژیک ریزپلاستیک‌ها در تصفیه خانه فاضلاب زابل مصوب پژوهشگاه زابل در سال ۱۴۰۳» با کد طرح PR-RIOZ-1403-5483-1 می‌باشد که با حمایت پژوهشگاه زابل اجرا شده است.

ملاحظات اخلاقی

این تحقیق بر روی موجودات زنده و انسان انجام نشده است. نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

- جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها: محدثه میری
- نمونه‌برداری و انجام مراحل آزمایشگاهی: محدثه میری، ساحل پاکزاد توچایی
- ویرایش و بازبینی مقاله: ساحل پاکزاد توچایی، هاشم خندان بارانی
- کنترل نتایج: ساحل پاکزاد توچایی، هاشم خندان بارانی

فیلترهای ساده در کانال‌های انتقال پساب و جلوگیری از رهاسازی پوشش‌های پلاستیکی کشاورزی در محیط پیشنهاد می‌شود. همچنین انجام تحقیقات بیشتر در زمینه رفتار، انتقال و اثرات بلندمدت فیلم‌های میکروپلاستیکی در خاک و آب، میزان جذب زیستی آنها و پیامدهای احتمالی برای سلامت انسان ضروری است. به طور کلی، مدیریت پایدار این مسئله مستلزم ترکیبی از ارتقای فناوری تصفیه، کاهش تولید پلاستیک در مبدأ، آموزش بهره‌برداران و پایش مستمر پساب و خاک‌های کشاورزی است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله، تشکر و قدردانی خود را در راستای انجام این تحقیق از همکاران محترم در آزمایشگاه‌های پژوهشگاه زابل و دانشگاه زابل اعلام می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

References

- Bhatia SK, Kumar G, Yang Y. Understanding microplastic pollution: Tracing the footprints and eco-friendly solutions. *Sci Total Environ*. 2024; 169926.
- An L, Liu Q, Deng Y, Wu W, Gao Y, Ling W. Sources of Microplastic in the Environment. 2020; 4:1–41.
- Silva AB, Bastos AS, Justino CI, da Costa JP, Duarte AC, Rocha-Santos TA. Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry – A review. *Anal Chim Acta*. 2018; 1017:1–19.
- Uddin S, Fowler SW, Behbehani M. An assessment of microplastic inputs into the aquatic environment from wastewater streams. *Mar Pollut Bull*. 2020; 160:111538.
- Jessieleena A, Rathinavelu S, Velmaiel KE, et al. Residential houses—a major point source of microplastic pollution: insights on the various sources, their transport, transformation, and toxicity behaviour. *Environ Sci Pollut Res*. 2023; 30:67919–40.
- Habib RZ, Thiemann T, Al Kendi R. Microplastics and Wastewater Treatment Plants—A Review. *J Water Resour Prot*. 2020; 12:1–35.
- Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, Setälä O. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res*. 2017; 123:401–7.
- Bodzek M, Pohl A, Rosik-Dulewska C. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies. *Water*. 2024; 16:3574.
- Gatidou G, Arvaniti OS, Stasinakis AS. Review on the occurrence and fate of microplastics in sewage treatment plants. *J Hazard Mater*. 2019; 367:504–12.
- Edo C, González-Pleiter M, Leganés F, Fernández-Piñas F, Rosal R. Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge. *Environ Pollut*. 2019; 259:113837.
- Weis JS, Alava JJ. (Micro)Plastics Are Toxic Pollutants. *Toxics*. 2023; 11:935.
- Lehel J, Murphy S. Microplastics in the Food Chain: Food Safety and Environmental Aspects. *Rev Environ Contam Toxicol*. 2021; 259:1–49.
- Liu W, Liao H, Wei M, Junaid M, Chen G, Wang J. Biological uptake, distribution and toxicity of micro(nano)plastics in the aquatic biota: A special emphasis on size-dependent impacts. *TrAC Trends Anal Chem*. 2024; 170:117477.
- Wang Y, Bai J, Liu Z, Zhang L, Zhang G, Chen G, et al. Consequences of Microplastics on Global Ecosystem Structure and Function. *Rev Environ Contam Toxicol*. 2023; 261:1–24.
- Green DS. Biological and ecological impacts of plastic debris in aquatic ecosystems. In: Wagner M, Reemtsma T, editors. *Plastics in the Aquatic Environment - Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*. Cham: Springer; 2020. p. 111–133.
- Agathokleous E, Iavicoli I, Barceló D, Calabrese EJ. Ecological risks in a 'plastic' world: A threat to biological diversity? *J Hazard Mater*. 2021; 417:126035.
- Badiei A, Karandish F, Tabatabaei SM. The Influence of Irrigation with Raw and Treated Municipal Wastewater on Wheat Yield and Microbial Characteristics of Soil and Plant. *J Water Soil Sci*. 2017;26(4.2):215–228.
- Nafea TH, Al-Maliki AJ, Murtadha Al-Tameemi I. Sources, fate, effects, and analysis of microplastic in wastewater treatment plants: A review. *Environ Eng Res*. 2024;29(1):230040.
- Al-Amri A, Yavari Z, Reza Nikoo M, Karimi M. Microplastics removal efficiency and risk analysis of wastewater treatment plants in Oman. *Chemosphere*. 2024; 359:142206.
- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ Sci Technol*. 2012;46(6):3060–5.
- Song YK, Hong SH, Jang M, Han GM, Rani M, Lee J, Shim WJ. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. *Mar Pollut Bull*. 2015;93(2):202–9. doi:10.1016/j.marpollbul.2015.01.015
- Huang J, Wang L, Liu J, Qian X, Wu Y. Abundance, characteristics, and removal of microplastics in different wastewater treatment plants in a Yangtze River Delta city of China. *J Water Process Eng*. 2023; 54:103987.
- Sheriff I, Yusoff MS, Halim HB. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures. *J Water Process Eng*. 2023; 54:104039.
- Farahmand A, Heidari M, Riyahikhoram M. Performance evaluation of wastewater treatment plant of Qorveh City and survey the possibility usage of effluent for agriculture. *Environ Water Eng*. 2020;6(1):58–68. doi:10.22034/jewe.2020.223427.1353 [In Persian]
- Alavian Petroody SS, Hashemi SH. Occurrence and characterization of microplastics in urban wastewater, a case study: Sari Wastewater Treatment Plant. *Modares Civ Eng J*. 2019;19(6):145–54 [In Persian]
- Estahbanati S, Fahrenfeld N. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water. *Chemosphere*. 2016; 162:277–84.
- Yahyanezhad N, Bardi MJ, Aminirad H. An evaluation of microplastics fate in the wastewater treatment plants: Frequency and removal of microplastics by microfiltration membrane. *Water Pract Technol*. 2021;(3):782–792 [In Persian]
- Farahmand SA, Liu J, Tesoro AG. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Res*. 2016; 91:174–82.
- Kim MJ, Na SH, Batool R, Byun IS, Kim EJ. Seasonal variation and spatial distribution of microplastics in tertiary wastewater treatment plant in South Korea. *J Hazard Mater*. 2022; 438:129474.
- Foroutan A, Naderi H, Khalesi M, Dehghan R. Investigation of relationship between residence time distribution and size distribution of solid particles in tank leaching modelling. *J Mineral Resour Eng*. 2022;7(1):113–28. doi:10.30479/jmre.2021.13751.1427
- Haque F, Fan C. Fate of microplastics under the influence of climate change. *iScience*. 2023;26(9):107649.
- Andrady AL. Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull*. 2011;62(8):1596–605.
- Xiang Y, Jiang L, Zhou Y, Luo Z, Zhi D, Yang J, Lam SS. Microplastics and environmental pollutants: Key interaction and toxicology in aquatic and soil environments. *J Hazard Mater*. 2021; 422:126843.
- De Falco F, Di Pace E, Cocca M, Avella M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep*. 2019; 9:6633.
- Maw MM, Boontanon SK, Jindal R, Boontanon N, Fujii S. Occurrence and removal of microplastics in activated sludge treatment systems: a case study of a wastewater treatment plant in Thailand. *Eng Access*. 2022;8(1):106–11.
- Üstün GE, Bozdas K, Can T. Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater

- treatment plant in Turkey. Environ Pollut. 2022; 310:119890 .
37. Do Van M, Thanh TL, Ngo VD, Thi TD. Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants. Environ Technol Innov. 2022; 26:102286 .
 38. Hendrickson E, Minor EC, Schreiner KM. Microplastic abundance and composition in Western Lake Superior as determined via microscopy, Pyr-GC/MS, and FTIR. Environ Sci Technol. 2018;52(4):1787–96 .
 39. Wagner J, Wang Z, Ghosal S, Rochman CM, Gassel M, Wall S. Novel method for the extraction and identification of microplastics in ocean trawl and fish gut matrices. Anal Methods. 2017; 9:1479–90 .
 40. Biyik Y, Baycan N. Comparison of microplastic detection methods in wastewater treatment plants. Environ Sci Proc. 2021; 9:29 .
 41. Wahab HA, Gund T. Polymers in the textiles and in the construction industry. Am J Polym Sci Technol. 2024;10(1):15–25 .
 42. Long Z, Li X, Wang Y, et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, fate, and pathways. Water Sci Technol. 2019;87(3):685–98 .
 43. Liu W, Zhang J, Liu H, Guo X, Zhang X, Yao X, Cao Z. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. Environ Int. 2021; 146:106277 .
 44. Bradney L, Wijesekara H, Palansooriya KN, Obadamudalige N, Bolan NS, Ok YS, et al. Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. Environ Int. 2019; 131:104937.