

Review Paper

مقاله مروری

Investigating the Amount of Microplastics in Wastewater Treatment Plant Effluent and Sludge and the Efficiency of Units in Removing Microplastics

بررسی میزان میکروپلاستیک‌ها در پساب و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب و کارایی واحدها در حذف میکروپلاستیک‌ها

Masoume Taherian¹, Afshin Takdastan^{2*}, Reza Dehbandi^{3,4}, Nematolah Jafarzadeh Haghhighifard² and Mohammadjavad Mohammadi⁵

معصومه طاهریان^۱، افشین تکدستان^{۲*}، رضا دهبندی^{۳،۴}، نعمت‌الله جعفرزاده حقیقی‌فرد^۲ و محمدجواد محمدی^۵

1- M.Sc. Student, Student Research Committee, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، اهواز، ایران.

2- Professor, Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

۲- استاد مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، اهواز، ایران.

3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

۳- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

4. School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, UK.

۴- دانشکده جغرافیا، علوم زمین و محیط‌زیست، دانشگاه بیرمنگهام، اجباستون، بیرمنگهام، انگلستان.

5- Assistant Professor, Environmental Technologies Research Center, Medical Basic Sciences Research Institute, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran.

۵- استادیار مرکز تحقیقات فناوری‌های زیست‌محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز، اهواز، ایران.

*Corresponding Author, Email: afshin_ir@yahoo.com

*نویسنده مسئول، ایمیل: afshin_ir@yahoo.com

Received: 17/01/2024

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

Revised: 01/10/2024

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

Accepted: 10/11/2024

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

The aim of this paper is to investigate the quantitative and qualitative characteristics of microplastics in the effluent and sludge of municipal wastewater treatment plants (WWTPs), as well as the removal efficiency of individual treatment units in eliminating microplastics from wastewater. In this review study, based on global experience and an assessment of recent and reliable international and Iranian studies, relevant articles published between 2011 and 2023 were searched in the SID, ScienceDirect, Google Scholar, and Scopus databases using the keywords wastewater, microplastics, wastewater treatment plant, sewage sludge, and treatment units. According to the reviewed studies, the lowest reported removal efficiency was 73% (188 MPs/L in influent wastewater and 50 MPs/L in effluent), while the highest removal efficiency reached 97.8% (69 MPs/L in influent wastewater and 1.73 MPs/L in effluent). In addition, the average microplastic removal efficiencies achieved by grit chambers, primary sedimentation, and secondary sedimentation were 44.95%, 52.9%, and 73.73%, respectively. The lowest and highest concentrations of microplastics in treated sludge were 510 and 4.95×10^5 particles per kilogram of dry sludge weight, respectively. Based on the findings, the main mechanisms responsible for microplastic removal from wastewater include screening, surface adsorption, sedimentation, and attachment to biological aggregates, depending on the polymer type.

هدف از این مقاله بررسی کمی و کیفی میکروپلاستیک‌ها در پساب و لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و کارایی هریک از واحدهای تصفیه‌خانه در حذف آن‌ها از پساب است. در این مطالعه مروری، با توجه به تجربیات جهانی و بررسی مطالعات معتبر و جدید خارجی و ایرانی مقالات مرتبط در پایگاه‌های داده Scopus، Google scholar، Science direct، SID و Scopus با کلمات کلیدی پساب، میکروپلاستیک، تصفیه‌خانه فاضلاب، لجن فاضلاب و واحدهای تصفیه‌خانه بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ جستجو شدند. براساس مطالعات مختلف، کم‌ترین راندمان حذف ۷۳٪ (۱۸۸ MPs/L) در فاضلاب ورودی و ۵۰ MPs/L (در پساب خروجی) و بالاترین راندمان ۹۷/۸٪ (۶۹ MPs/L) در فاضلاب ورودی و ۱/۷۳ MPs/L (در پساب خروجی) به‌دست آمد. هم‌چنین میانگین حذف میکروپلاستیک‌ها توسط دانه‌گیر ۴۴/۹۵٪، ته‌نشینی اولیه ۵۲/۹٪ و ته‌نشینی ثانویه ۷۳/۷۳٪ حاصل شد. کم‌ترین و بیش‌ترین میزان میکروپلاستیک لجن تصفیه‌شده به‌ترتیب ۵۱۰ و 4.95×10^5 ذره در هر کیلوگرم وزن خشک لجن بود. باتوجه به نتایج تحقیقات، مهم‌ترین مکانیسم‌های حذف میکروپلاستیک، غربال کردن، جذب سطحی، ته‌نشینی و جذب به توده بیولوژیکی بسته به نوع پلیمر از پساب است.

Keywords: Effluent, Microplastics, Wastewater Treatment Plant, Sewage Sludge and Treatment Plant Units.

کلمات کلیدی: پساب، میکروپلاستیک، تصفیه‌خانه فاضلاب، لجن فاضلاب و یکان‌های تصفیه‌خانه.

فاضلاب، در لجن فاضلاب یافت می‌شوند (طاهریان و تکدستان، ۱۴۰۲).

میکروپلاستیک‌ها هم‌چنین می‌توانند به‌عنوان یک لایه خاص عمل نمایند که مجموعه‌ای از گونه‌های بیماری‌زا / باکتریایی متمایز را جذب و انتقال داده و تداوم ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی را در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب افزایش می‌دهند. در مطالعه‌ای دیگر، حضور میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب شهر ساری، به‌عنوان یکی از منابع احتمالی ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌زیست، بررسی شد (پطروودی و همکاران، ۱۴۰۱). نتایج نشان داد در هر گرم وزن خشک حدود $16 \pm 128/81$ میکروپلاستیک وجود دارد که از این میزان $15/3 \pm 112/66$ میکروفاایبر و $1/93 \pm 16/15$ میکروذره بودند. از این‌رو فیضی و همکاران (۱۴۰۲)، مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی آلودگی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه در تهران انجام دادند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی میزان انتشار ذرات میکروپلاستیک از تصفیه‌خانه فاضلاب در منطقه ۲۲ شهر تهران بود. پس از تصفیه به‌طور متوسط $2/15$ ذره میکروپلاستیک در هر لیتر فاضلاب یافت شد. بنابراین، میلیاردها میکروپلاستیک هر سال از طریق کاربردهای پساب و لجن فاضلاب در محیط‌زیست رها می‌شوند. وجود میکروپلاستیک‌ها در محیط‌زیست و بلع آن‌ها توسط جانوران می‌تواند عواقب محیط‌زیستی و بهداشتی به‌دنبال داشته باشد و درنهایت سبب بروز پیامدهای مختلفی برای سلامت انسان و ارگانسیم شود (طاهریان و تکدستان، ۱۴۰۱). از جمله این عواقب برای انسان می‌توان به بروز اختلال در کار غدد درون‌ریز و اختلال در کار غدد جنسی اشاره نمود. هم‌چنین انواع میکروپلاستیک‌ها از طریق مکانیسم جذب، واجذب و جذب سطحی و هم‌چنین هوازگی و بالابودن نسبت سطح به حجم قادر به انتقال بسیاری از آلاینده‌های آلی سمی پایدار هستند. هدف از این مطالعه، فراوانی میکروپلاستیک‌ها در پساب و لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری است.

۲- تهنشینی اولیه

براساس مطالعات شناسایی‌شده، به‌طور متوسط ۷۲ درصد (محدوده ۳۲-۹۳ درصد) ذرات میکروپلاستیک در مرحله پیش‌تصفیه و تصفیه اولیه فاضلاب حذف شدند. در مطالعه‌ای که توسط Ren et al. (2020) در تصفیه‌خانه فاضلابی در چین صورت گرفت، مشخص شد که نرخ حذف میکروپلاستیک‌ها در طی فرآیند تصفیه اولیه فاضلاب حدود $35/6$ درصد بود. فناوری تهنشینی اولیه عمدتاً ذرات قابل‌ته‌نشینی از جمله

امروزه، بین عوامل مختلفی که به‌عنوان منابع آلوده‌کننده محیط به‌شمار می‌روند، پلاستیک‌ها و مشتقات آن در جایگاه خاصی قرار دارند. بخش اعظمی از این پلاستیک‌ها در ابعاد میکرو و نانو هستند. به‌همین دلیل، میلیاردها تن از این ترکیبات که به‌سادگی زیست‌تخریب‌پذیر نبوده و در برابر تجزیه بیولوژیکی بسیار مقاوم‌اند، وارد محیط زیست شده‌اند (طاهریان و تکدستان، ۱۴۰۲). در دهه‌های اخیر، آلودگی منابع آبی به میکروپلاستیک‌ها یکی از نگرانی‌های محیط‌زیستی است (تکدستان و همکاران، ۱۴۰۰). میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان نوعی آلاینده محیطی نوظهور که اندازه‌ای کم‌تر از ۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر دارند، اخیراً بر روی انواع زیرلایه‌ها در جهان شناسایی شده‌اند. میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه را می‌توان در محیط‌های مختلف از جمله دریاچه‌ها، فاضلاب‌ها، اعماق دریا، رودخانه‌ها، آب آشامیدنی، آب‌های سطحی و رسوبات دریایی یافت (طاهریان و تکدستان، ۱۴۰۱).

برخی از ذرات میکروپلاستیک اولیه به‌کاررفته در لباس، کیسه‌های پلاستیکی و بطری‌هایی که در مدت‌زمان طولانی در معرض سایش، هوازگی، اشعه فرابنفش خورشید، تجزیه زیستی یا تخریب مکانیکی قرارداشتند، تخریب شده و میکروپلاستیک‌های ثانویه را تشکیل دادند. اغلب، مقدار زیادی از ایاف و ذرات پلاستیکی، خصوصاً در طی فرآیندهای شست‌وشوی پارچه و البسه از طریق فاضلاب خانگی یا سیستم‌های زهکشی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌رسند که ممکن است در آب‌ها تخلیه شوند یا توسط لجن پراکنده شوند (علویان پطروودی و هاشمی، ۱۴۰۰).

براساس بسیاری از مطالعات صورت‌گرفته، میکروپلاستیک‌هایی که دانسیته بالاتری دارند، از فاضلاب حذف و در لجن واحدهای مختلف، تهنشین شده و تجمع می‌یابند. از این‌رو، بیش‌ترین حذف میکروپلاستیک‌ها را در لجن واحدهای مختلف یک تصفیه‌خانه فاضلاب می‌توان یافت. بخش قابل‌توجهی از ذرات در مراحل تصفیه اولیه و ثانویه حذف می‌شوند و وارد لجن می‌شوند. لجن، پرحجم‌ترین زائده تصفیه‌خانه است که انواع آلاینده‌های نوظهور از جمله میکروپلاستیک‌ها از طریق تهنشینی و جذب سطحی در خلال تصفیه وارد لجن تصفیه‌خانه می‌شوند (طاهریان و تکدستان، ۱۴۰۲). نرخ حذف، تحت تأثیر ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها مانند اندازه، شکل و تراکم است. بر همین اساس، اکثر میکروپلاستیک‌های حذف‌شده در طی تصفیه

نگهداری هیدرولیک، هوادهی) نیز ممکن است بر بهبود مکانیسم مؤثر حذف MP تأثیر بگذارد (Acarer, 2023). در فرآیندهای بی‌هوازی، به دلیل سرعت ته‌نشینی بالاتر MPsهای بزرگ (> ۰/۱ میلی‌متر)، ۵ میلی‌متر) در مقایسه با MPهای کوچک (< ۰/۱ میلی‌متر)، میکروپلاستیک‌های بزرگ با راندمان بالاتر با مکانیسم ته‌نشینی حذف می‌شوند (شریفی و همکاران، ۱۴۰۲).

در حوض هوادهی، میکروارگانیزم‌ها مواد پلیمری خارج‌سلولی را ترشح می‌کنند که چسبناک و لزج هستند و می‌توانند باعث چسبیدن میکروارگانیزم‌ها به یکدیگر و تشکیل لخته‌هایی برای جذب و تجزیه مواد آلی شوند. این لخته‌ها مواد پلاستیکی مانند ذرات و الیاف را نیز جذب می‌کنند و در نهایت به دلیل افزایش جرم آن‌ها با مواد متصل شده در حوض ته‌نشینی ثانویه، ته‌نشین می‌شوند. فراوانی میکروپلاستیک به تدریج از ته‌نشینی اولیه به سمت ته‌نشینی ثانویه کاهش می‌یابد. از طرفی در مطالعات مختلف، فراوانی پس از فرآیندهای تصفیه ثانویه از عدم شناسایی تا $10^3 \times 7/86$ ذره در لیتر (مقدار متوسط: $10^2 \times 4/67$ ذره در هر لیتر؛ مقدار متوسط: $6/90$ ذرات در هر لیتر) متغیر بود که منجر به کاهش فراوانی $20/45$ تا $95/45$ ٪ شد. از آنجا که حجم کل لجن در تصفیه‌خانه مورد مطالعه $7/95 \times 10^7$ لیتر تخمین زده شد، غلظت جامدات نظری در لجن معادل $34/3$ برابر میانگین بار ورودی روزانه پردازش شده در نظر گرفته شد. با این حال، نمونه لجن فعال برگشتی فقط حاوی یک قطعه پلاستیکی قابل مشاهده بود که نشان‌دهنده راندمان حذف ۹۵ درصدی در طول تصفیه اولیه بود. در یک مطالعه انتقادی که در رابطه با حذف میکروپلاستیک در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توسط Liu et al. (2021) انجام گرفت، مشخص شد پس از مرحله دوم که همان تصفیه ثانویه است، کاهش بیشتری تا حدود $20/45$ - $95/45$ ٪ از میکروپلاستیک‌ها مشاهده شد. در مطالعه Acarer et al. (2023)، اشاره شد که راندمان حذف MP در مخزن ته‌نشینی ثانویه $76/5$ ٪ بود.

۴- تغلیظ لجن

مطالعه‌ای توسط هاشمی و همکاران (۱۴۰۰) در رابطه با میکروپلاستیک‌های موجود در تصفیه‌خانه فاضلاب ساری انجام شد و محاسبات آن نشان داد، روزانه به طور متوسط حدود 642 میلیون میکروپلاستیک وارد مخزن تغلیظ‌کننده لجن شدند که پس از آگیری به حدود 599 میلیون کاهش یافت که حدود 6 درصد آن وارد سوپرناتانت شد. آگیری، حجم مایع لجن را نیز حدود 90 ٪ کاهش می‌دهد. نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش

میکروپلاستیک‌های معلق را حذف می‌کند. بیش‌تر میکروپلاستیک‌های شناور به لخته‌ها چسبیده و باهم رسوب می‌کنند؛ این میکروپلاستیک‌ها با لجن اولیه مخلوط می‌شوند.

در مطالعه‌ای که بر روی حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در دنیا انجام شده بود، فراوانی میکروپلاستیک پس از فرآیندهای تصفیه اولیه از $0/22$ ذره در لیتر تا $10^4 \times 1/26$ ذره در لیتر متغیر بود. به طوری که فراوانی آن‌ها $4/06$ - $98/96$ ٪ در مقایسه با فراوانی میکروپلاستیک‌ها در ورودی کاهش یافت (Jiang et al., 2020). لجن واحدهای مختلف تصفیه‌خانه در جداسازی میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب بود. فراوانی عمده میکروپلاستیک‌ها به‌ازای هر گرم وزن خشک لجن اولیه نشان می‌دهد که فرآیند ته‌نشینی فیزیکی در تصفیه اولیه، بخش قابل توجهی از میکروپلاستیک‌ها که چگالی بالاتر از آب یا اندازه بزرگ داشتند را حذف می‌کند (Ahmed et al., 2024). در نتیجه، این نوع میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب جدا شده و به همراه مواد جامد قابل ته‌نشینی که از مواد آلی یا معدنی تشکیل شده‌اند، وارد لجن در مخزن ته‌نشینی اولیه می‌شوند. جامدات آلی غیرقابل ته‌نشینی و میکروپلاستیک‌های سبک یا کوچک که در مخزن ته‌نشینی اولیه قابل جداسازی نیستند، وارد هوادهی می‌شوند (پطروودی و هاشمی، ۱۳۹۸).

بر اساس مطالعات صورت‌گرفته میزان حذف پلیمرهایی از جمله PE, PS و PET در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، با افزایش چگالی افزایش یافت و راندمان حذف 92 ، $87/8$ ، $94/8$ و $96/4$ درصد برای PE, PP, PS و PET به ترتیب به دست آمد. از سوی دیگر، تجمع آلاینده‌ها یا تشکیل بیوفیلم بر روی سطح MP نیز می‌تواند باعث افزایش چگالی میکروپلاستیک‌ها مستقل از ساختار پلیمری و موقعیت متفاوت MP در ستون آب نسبت به آن چه انتظار می‌رود، شود و راندمان حذف متفاوت از حد انتظار به دست آید (Acarer, 2023).

۳- ته‌نشینی ثانویه

میکروپلاستیک‌های کوچک‌تری که از ته‌نشینی اولیه عبور کردند و وارد حوض هوادهی شدند، در آنجا با اکسیژن و لجن که عمدتاً حاوی میکروارگانیزم‌ها است، ترکیب می‌شوند و متعاقباً برای ته‌نشین شدن وارد حوض ته‌نشینی ثانویه می‌شوند. در بیوراکتورهایی که تصفیه بیولوژیکی انجام می‌شود، MP با دو مکانیسم اصلی حذف می‌شوند: اتصال MPs به ارگانیزم‌ها یا لجن به دلیل ساختار آب‌گریز و رسوب MPs. نوع فرآیند تصفیه بیولوژیکی (بی‌هوازی/هوازی) و شرایط خاص فرآیند تصفیه (زمان

Liu et al (2019) مطالعه‌ای با عنوان انتقال و سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در طی فرآیند لجن فعال معمولی در یک تصفیه‌خانه فاضلاب چین انجام دادند. هدف از این مطالعه، بررسی انتقال و سرنوشت ذرات MPs در یک WWTP براساس فرآیند لجن فعال مرسوم بود. نتایج نشان داد که فراوانی MPs در پساب به شدت کاهش یافته است (از ۷۹/۹ nL-1 در ورودی به ۱-۱ nL-1 در ۲۸/۴ در پساب با نرخ حذف ۶۴/۴٪).

میکروپلاستیک‌های حذف‌شده عمدتاً به لجن منتقل و ذخیره شدند و فراوانی MPs در لجن آبیگری $31/240 \pm 4/3$ ng-1 (لجن خشک) با اندازه متوسط $222/6$ μm بود. کسر بیش‌تر میکروبیید و فوم در لجن (۱/۱۷/۱) و (۱/۱۲/۹) نشان می‌دهد که MP با اندازه کوچک‌تر (به ترتیب اندازه متوسط $90/3$ و $240/1$ میکرومتر) در فاضلاب مستعد جذب و انتقال به لجن هستند. پلی‌آمید (نایلون) با ۵۴/۸ درصد براساس طیف رامان، جزء پلاستیکی اصلی فاضلاب بود که نشان می‌داد ذرات MPs عمدتاً از فاضلاب تخلیه‌شده توسط شستن لباس‌ها و صنایع تولید و فراوری پلیمر و به دنبال آن محصولات مراقبت شخصی منشاء می‌گیرند (Liu et al., 2019).

وجود تعداد بالای MPs در لجن واحدهای مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب نشان‌دهنده نقش اصلی این فرآیندها در جداسازی میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب است. بررسی نقش فرآیندهای تصفیه لجن نشان داد که فرآیند حذف TSS در حوض ته‌نشینی اولیه، ته‌نشینی MLSS در حوض ته‌نشینی ثانویه و همچنین فرآیندهای تغلیظ و آبیگری نقش مهمی در کاهش تعداد MPs در پساب نهایی دارد. بنابراین، دانستن نقش این فرآیندها که منجر به جداسازی تعدادی از میکروپلاستیک‌ها از پساب دفعی می‌شود، می‌تواند به مدیریت بهتر پساب دفعی و کاهش میزان ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط کمک نماید. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صورت‌گرفته، با وجود کارایی تصفیه‌خانه‌ها در حذف نسبتاً خوب میکروپلاستیک‌ها از پساب، تعداد زیادی MP به دلیل حجم بالای پساب تولیدی در روز وارد محیط می‌شوند.

بنابراین تحقیقات آینده باید بر اهمیت نقش پساب تخلیه‌شده تمرکز کند. از این رو می‌توان با ارتقای سیستم‌های تصفیه فاضلاب و همچنین واحدهای تصفیه‌خانه به منظور افزایش کارایی حذف میکروپلاستیک‌ها (سیستم‌های تصفیه فاضلاب برای حذف آلاینده میکروپلاستیک طراحی نشده‌اند) تصفیه‌خانه را برای حذف این آلاینده راهبری کرد. ایجاد استراتژی‌های کاهش و برنامه‌های پاکسازی و پایش محیط‌زیستی در تمام نقاط به‌ویژه

سریع سانتریفیوژها، بیش‌تر آب را از جامدات موجود در لجن جدا کرده و ماده‌ای به‌نام جامد زیستی ایجاد می‌کند. سپس آب استخراج‌شده از فرآیند، برای پردازش مجدد به ابتدای تصفیه‌خانه بازگردانده می‌شود. کیک بیوسالید تقریباً ۲۵ تا ۲۷ درصد وزنی جامد، وزن دارد. بر این اساس می‌توان به اهمیت فراوان آب دفع‌شده از فرآیندهای تصفیه لجن در بازگشت تعداد زیادی میکروپلاستیک‌ها به ابتدای فرآیند تصفیه ثانویه (مخزن هوادهی) اشاره کرد. فرآیندهای تصفیه پیشرفته، مانند فیلتراسیون، برای کاهش بیش‌تر میکروپلاستیک‌ها در آب دفع‌شده و همچنین محدودکردن بار اضافی واردشده به تصفیه‌خانه ممکن است به کاهش تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن و پساب نهایی WWTP نیز کمک نماید. علاوه بر این، مقایسه تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن اولیه و ثانویه تأیید می‌کند که اکثر میکروپلاستیک‌ها در ته‌نشینی اولیه از فاضلاب ورودی جدا شده‌اند. این یافته با مطالعات قبلی که بیانگر نقش بیش‌تر ته‌نشینی اولیه در جداسازی میکروپلاستیک‌ها نسبت به رسوب ثانویه است، مطابقت دارد (Alvim et al., 2020; Talvitie et al., 2017).

۵- هاضم لجن

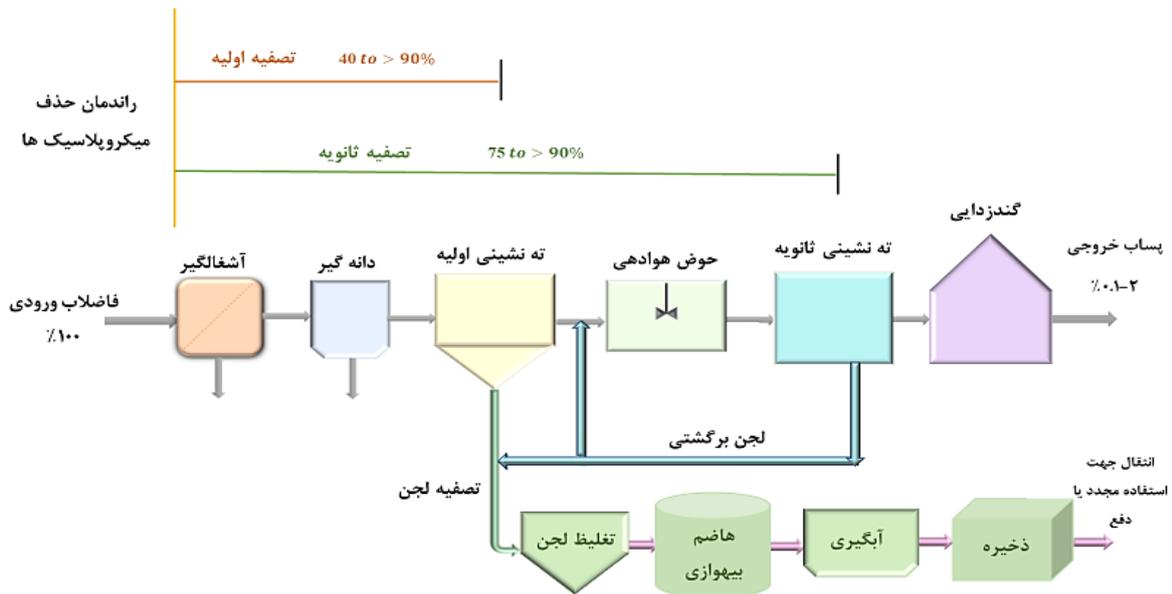
تحقیقات محدودی در مورد تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن تثبیت‌شده، صورت‌گرفته است. در این رابطه Lares et al. (2018) در مطالعه خود بر روی تعداد میکروپلاستیک‌ها در یک WWTP در فنلاند، حدود ۱۷۱ میکروپلاستیک در هر گرم لجن خشک هضم‌شده را شمارش کردند. مقایسه تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن هضم‌شده (خروجی مخزن هضم هوازی) و در لجن تغلیظ (خروجی مخزن تغلیظ‌کننده لجن یا ورود به مخزن هضم هوازی) در مطالعات نشان می‌دهد که فرآیند هضم، تأثیر زیادی بر تعداد میکروپلاستیک‌ها نداشته است. براساس مطالعه هاشمی و همکاران (۱۳۹۸) در تصفیه‌خانه فاضلاب ساری، نتایج نشان داد که در هر گرم از لجن خشک حدود ۲۳۸ ذره میکروپلاستیک وجود دارد.

۶- میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه فاضلاب

بسیاری از ذرات میکروپلاستیک بنابه دلایلی از جمله دانسیته سنگین‌تر، ته‌نشینی ثقلی، جذب سطحی و تماس بین‌ذره‌ای در لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، تجمع می‌یابند. شکل ۱ راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد (شکل ۱ اقتباس شده از مقاله مرجع و با اندکی اصلاحات است).

مفید باشد. جدول ۱ مطالعات انجام شده بر تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نقاط مختلف را نشان می‌دهد.

در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، در درازمدت بسیار کارآمد هستند. هم‌چنین اتخاذ راه‌کارهایی برای کاهش ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط از جمله بازیافت پلاستیک‌ها تا حد امکان می‌تواند بسیار



شکل ۱- راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها در واحدهای مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب (Reddy and Nair, 2022)

جدول ۱- مطالعات انجام شده بر روی تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نقاط مختلف

ردیف	نوع تصفیه‌خانه	اندازه میکروپلاستیک	روش شناسایی	کشور	تعداد میکروپلاستیک‌ها (particles kg ⁻¹ d.w.a and w.wb)	مرجع
۱	اولیه و ثانویه	۱۰۰ تا ۸۰۰ میکرومتر	Visual inspection and FT-IR	چین	۲۴۰۳۰	Liu et al. (2019)
۲	اولیه و ثانویه	--	FT-IR	هند	۸۳۰	Patil et al. (2023)
۳	اولیه و ثانویه	۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر	ATR-FTIR	مراکش	۸۷/۵۹ ± ۲۶/۲۰ تا ۱۱/۲۷ ± ۷/۰۲	Hajji et al. (2023)
۴	اولیه و ثانویه	۲۷۰ میکرومتر تا ۵۰ میلی‌متر	FESEM-EDX	ایران	۶۳۵-۵۴۰	گنجی (۱۴۰۱)
۵	اولیه و ثانویه	--	FT-IR	ایران	۱۲۸/۸۱ ± ۱۶/۷۴	علویان پطرودی و هاشمی (۱۳۹۸)

کیلومتر مکعب در سال تخلیه می‌شود. بنابراین پساب‌ها از عوامل مهم در انتقال این آلاینده‌های نوظهور به محیط زیست هستند. مطالعه‌ای در رابطه با وقوع، ویژگی‌ها و حذف میکروپلاستیک‌ها در دو تصفیه‌خانه فاضلاب انجام شد که نشان داد میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب از ۱۸۸ MP/L به ۵۰ MP/L در پساب کاهش یافته است. هم‌چنین فراوانی در تصفیه‌خانه فاضلاب دیگری (ورودی‌های شهری و صنعتی) بیش‌تر بود و میانگین مقدار ۵۱۹ MP/L در ورودی و ۸۶ MP/L در پساب را ثبت کرد (Hajji et al., 2023). مطالعه دیگری توسط حضرتی و همکاران (۱۴۰۰)، در ایران انجام شد که در رابطه با وجود و توزیع ذرات میکروپلاستیک در میکروپلاستیک‌ها و فاضلاب در تصفیه‌خانه فاضلاب بود. در این مطالعه نمونه‌ها از ۴ ایستگاه در مراحل مختلف تصفیه تصفیه‌خانه فاضلاب جمع‌آوری شدند و نتایج بیان کردند که تعداد میکروپلاستیک‌ها از ۹/۲ (ایستگاه ۱-

۷- حذف ذرات میکروپلاستیک توسط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

تخلیه میکروپلاستیک‌ها به محیط زیست با فاضلاب تصفیه‌شده، به یک نگرانی بزرگ در سراسر جهان تبدیل شده است. پساب تصفیه‌خانه فاضلاب، به‌عنوان منبع بالقوه میکروپلاستیک در محیط آبی شناسایی شده است. با وجود تعداد اندک میکروپلاستیک‌های شمارش شده در پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها و با توجه به حجم زیادی از این پساب که سالانه به محیط‌های آبی تخلیه می‌شوند، مقادیر بالایی از میکروپلاستیک‌ها به ماتریس‌های محیطی مختلف راه پیدا می‌کنند. پساب خانگی و شهری تولیدشده در سطح جهان بالغ بر ۳۶۰ کیلومتر مکعب در سال تخمین زده می‌شود که ۱۹۰ کیلومتر مکعب در سال (۵۲/۸٪) در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تصفیه می‌شود، سپس ۱۴۹

(2022).

مطالعه دیگری در ایران انجام شد که نتایج آن بیان کرد، تعداد میکروپلاستیک‌ها در ورودی و پساب به ترتیب ۱۴۷/۵ ± ۸۴۳/۲ و ۳/۱۴ ± ۱۱/۱۳ ذره در لیتر بود. علی‌رغم حذف مؤثر میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه، به‌طور متوسط سالانه $10^{11} \times 1/0.3$ و $4/47 \times 10^{11}$ میکروپلاستیک از طریق پساب این تصفیه‌خانه به آب‌های دریافت‌کننده تخلیه می‌شود. این بدان معنا است که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌توانند یکی از منابع اصلی در محیط‌زیست باشند و باید تلاش شود تا کارایی تصفیه‌خانه‌ها افزایش یابد و آن‌ها به فناوری‌های پیشرفته مجهز شوند (شریفی و همکاران، ۱۴۰۲). جدول ۲ راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب سراسر دنیا را نشان می‌دهد.

فاضلاب ورودی) به ۰/۸۴ MP/L (ایستگاه ۴-پساب تصفیه‌شده نهایی) در طول فرآیند تصفیه فاضلاب کاهش یافت. این مطالعه نشان داد که علی‌رغم حذف مقادیر بالای میکروپلاستیک‌ها در پساب نهایی تصفیه‌خانه، به‌دلیل حجم بالای این پساب ($2/828 \times 10^8$ لیتر در روز) مقدار قابل‌توجهی میکروپلاستیک ($2/419 \times 10^7$ ذره میکروپلاستیک) روزانه وارد محیط‌های آبی می‌شود که ممکن است سلامت ماهی‌ها و موجودات آبی و درنهایت سلامت جمعیت محلی را تهدید نماید.

در مطالعه دیگری، مشخص شد که ورودی دارای میانگین $4/3 \pm 180$ MP/L بود و در پساب نهایی به $0/31 \pm 5/3$ MP/L کاهش یافت. علی‌رغم این کاهش قابل‌توجه، براساس محاسبات صورت‌گرفته، این WWTP روزانه $2/3 \times 10^9$ میکروپلاستیک از طریق پساب نهایی و $1/61 \times 10^{10}$ ذره در روز از طریق لجن خشک‌شده در محیط آزاد می‌کند (Oveisy et al.,).

جدول ۲- راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

ردیف	محل	ظرفیت تصفیه‌خانه (m ³ /day)	تعداد میکروپلاستیک‌های ورودی (MP/L)	نوع تصفیه	تعداد میکروپلاستیک‌های پساب (MP/L)	راندمان حذف میکروپلاستیک (%)	مرجع
۱	اسپانیا	۳۵۰۰۰	۱۳/۰۴	حذف روغن و گریس/لجن فعال	۰/۳۱ ± ۰/۰۶	۹۰/۳	Bayo et al. (2020)
۲	اسپانیا	۴۵۰۰۰	۱۷۱ ± ۴۳	تصفیه بیولوژیکی/ A2O	۱۰/۷ ± ۵/۲	۹۳/۷	Edo et al. (2020)
۳	استرالیا	۴۸ ML/d	۱۱/۸۰ ± ۱/۱۰	پیش‌تصفیه/تصفیه‌اولیه و ثانویه/گندزدایی با UV	۵/۲۳ ± ۰/۲۵ و ۲/۷ ± ۰/۱۱	۷۶/۶۱	Raju et al. (2020)
۴	ترکیه	۸۷۵۰۰	۱۳۵/۳ ± ۲۸	لجن فعال	۸/۵ ± ۴/۷	۹۳/۷	Üstün et al. (2022)
۵	چین	--	۰/۷-۸/۷۲	A/O (W1) و A/A/O (W2)	۰/۰۷-۰/۷۸	۸۹/۲-۹۳/۶	Zhang et al. (2021)
۶	ایران	۲۲۰۰۰	۵۲/۴۸	لجن فعال متعارف	۲/۲	۹۵	Darvishi et al. (2022)
۷	ایران	۶۰۰۰	۵/۱۵	--	۰/۸۹	۸۲/۷۱	فیضی و همکاران (۱۴۰۱)

۸- نتیجه‌گیری

کوچک‌تر پس از حذف ۶۴/۴٪ (شامل ۳۱/۴ ± ۲۴۰/۳ ذره در هر گرم وزن خشک) و ۷۲٪ (شامل ۵۱۰ تا ۷۶۰ ذره در هر کیلوگرم وزن مرطوب) در طی فرآیندهای تصفیه وارد لجن شده‌اند. همچنین بر اساس مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف جهان میزان میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، در ورودی از مقادیر ۱۸۰، ۱۸۸، ۵۱۹ و ۹/۲ به‌ترتیب به ۵۳، ۵۰، ۸۶ و ۰/۸۴ در پساب کاهش یافت. با این‌حال به‌دلیل تخلیه حجم زیادی از پساب، روزانه میلیون‌ها میکروپلاستیک از این تصفیه‌خانه‌ها آزاد می‌شوند. با توجه به نسبت سطح به حجم بالا، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند در جذب و انتقال آلاینده‌ها به‌ویژه ترکیبات آلی پایدار و فلزات سنگین نقش مهمی داشته باشند. همچنین ورود

مطالعات بسیاری در رابطه با فراوانی حضور میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در دنیا انجام شده است. بخش بزرگی از میکروپلاستیک‌های جذب‌شده توسط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب احتمالاً به فاز لجن منتقل می‌شوند که منجر به غلظت بالای میکروپلاستیک‌های مشاهده‌شده در این نوع ماتریس می‌شود. مکانیسم‌های مختلفی وجود دارد که از طریق آن‌ها این ذرات ممکن است در محیط رها شوند، که در آن لجن فاضلاب ممکن است یک مسیر آزادسازی بسیار مهم را نشان‌دهد. براساس مطالعات مختلف، میکروپلاستیک‌ها خصوصاً با اندازه‌های

طاهریان، م.، و تکدستان، ا.، (۱۴۰۱)، "خطرات زیست محیطی ناشی از میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان حامل و ناقل انتقال انواع آلاینده‌های آلی سمی پایدار در محیط‌های آبی و شناسایی سازوکارهای انتقال آلاینده‌ها"، چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، قم، ایران.

<https://doi.org/civilica.com/doc/1630946>.

طاهریان، م.، و تکدستان، ا.، (۱۴۰۲)، "بررسی حضور میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و کارایی واحدها در حذف آن‌ها از پساب"، دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت، تهران، ایران.

<https://doi.org/civilica.com/doc/1975477>.

طاهریان، م.، و تکدستان، ا.، (۱۴۰۲)، "لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌عنوان منبع میکرو پلاستیک‌ها و خطرات ناشی از رهاسازی آن‌ها"، دومین همایش ملی مدیریت کیفیت آب و چهارمین همایش ملی مدیریت مصرف آب با رویکرد کاهش هدررفت و بازیافت، تهران، ایران.

<https://doi.org/civilica.com/doc/1975478>.

فیضی، ف.، حمیدیان، ا.، اخباری‌زاده، ر.، و جنوبی، م.، (۱۴۰۱)، "بررسی حضور آلودگی میکروپلاستیک در تصفیه‌خانه منطقه ۲۲ شهر تهران"، نشریه محیط‌زیست طبیعی، ۷۵(۱)، ۶-۱.

<https://doi.org/10.22059/jne.2021.294850.1876>.

گنجی، ف.، کمائی، ح.، و غایب‌زاده، م.، (۱۴۰۱)، "بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری زاهدان"، چهارمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، قم، ایران.

Acarer, S., (2023), "Microplastics in wastewater treatment plants: sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants", *Water Science and Technology*, 87(3), 685-710, <https://doi.org/10.2166/wst.2023.022>.

Ahmed, S.F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A., Momtahn, A., Chowdhury, A.A., Almomani, F., and Mofijur, M., (2024), "Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants", *Chemosphere*, 347, 140648, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140648>.

Alavian Petroody, S.S., and Hashemi, S.H., (2020), "Occurrence and characterization of microplastics in urban wastewater, a case study: Sari wastewater treatment plant", *Modares Civil Engineering Journal*, 19(6), 145-154, <http://doi.org/mcej.modares.ac.ir/article-16-35717-en.html>.

Alvim, C.B., Bes-Piá, M., and Mendoza-Roca, J.A., (2020), "Separation and identification of microplastics from primary and secondary effluents and activated sludge from wastewater treatment plants", *Chemical Engineering Journal*, 402, 126293, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126293>.

Bayo, J., Olmos, S., and Lopez-Castellanos, J., (2020), "Microplastics in an urban wastewater treatment plant:

میکروپلاستیک‌ها از طریق پساب و لجن به محیط‌های آبی و زمین‌های کشاورزی می‌تواند سبب افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی شود؛ بنابراین انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه منابع انتشار میکروپلاستیک‌ها و تعیین سهم آن‌ها، به‌ویژه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، و ارتباط آن‌ها با مقادیر مشاهده‌شده در محیط‌های آبی، رسوبات و جانداران ضروری است. همچنین اتخاذ روش‌های مدیریتی جامع برای کاهش مصرف پلاستیک‌ها و حذف هرچه بیشتر آن‌ها از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و در نتیجه جلوگیری از ورود این آلاینده‌های نوظهور به محیط‌زیست می‌تواند به مقدار زیادی از اثرات مخرب میکروپلاستیک‌ها بکاهد. بنابراین لازم است پروتکل‌هایی برای دفع مناسب لجن نهایی و پساب تهیه شود تا از رهاسازی باقی‌مانده MPs در محیط جلوگیری شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در آینده، راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها در سایر روش‌های تصفیه فاضلاب بررسی شود و مطالعه بر روی نانوپلاستیک‌ها در فاضلاب و لجن سیستم‌های مختلف تصفیه‌خانه فاضلاب انجام گیرد.

۹- قدردانی

مقاله حاضر به‌عنوان بخشی از کلیات طرح تحقیقاتی پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز با شماره طرح ETRC-0119 است. بدینوسیله نویسندگان از دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز برای حمایت مالی از این پژوهش تشکر می‌نمایند.

۱۰- مراجع

پطردی، س.، و هاشمی، ح.، (۱۳۹۸)، "بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری"، دومین کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط‌زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران.

<https://doi.org/civilica.com/doc/1007553>.

پطردی، س.، و هاشمی، ح.، (۱۴۰۰)، "تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مسیری برای ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌زیست: بررسی لجن و پساب تصفیه‌خانه فاضلاب ساری"، نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۵۳(۹)، ۳۷۵۱-۳۷۶۲.

<https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18097.6766>.

درویشی، غ.ر.، احتشامی، م.، مهرداد، ن.، و عابدینی، ر.، (۱۴۰۲)، "بررسی روش تشخیص و جداسازی میکروپلاستیک‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بر پایه ایجاد اختلاف چگالی و تعیین سهم فرایند تصفیه در حذف ذرات"، مجله پژوهش در بهداشت محیط، ۷(۴)، ۳۳۲-۳۴۲.

<https://doi.org/10.22038/jreh.2022.61041.1452>.

- 128179, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128179>.
- Petroody, S.S.A., Hashemi, S.H., and van Gestel, C.A., (2021), "Transport and accumulation of microplastics through wastewater treatment sludge processes", *Chemosphere*, 278, 130471, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130471>.
- Raju, S., Carbery, M., Kuttykattil, A., Senthirajah, K., Lundmark, A., Rogers, Z., Suresh, S., Evans, G., and Palanisami, T., (2020), "Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant", *Water Research*, 173, 115549, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115549>.
- Reddy, A.S., and Nair, A.T., (2022), "The fate of microplastics in wastewater treatment plants: An overview of source and remediation technologies", *Environmental Technology and Innovation*, 28, 102815, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102815>.
- Ren, P., Dou, M., Wang, C., Li, G., and Jia, R., (2020), "Abundance and removal characteristics of microplastics at a wastewater treatment plant in Zhengzhou". *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 36295-36305, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09611-5>.
- Sharifi, H., Movahedian Attar, H., and Bina, B., (2023), "Occurrence and removal of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with conventional activated sludge process: A case study in Isfahan, Iran", *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 10(1), 59-66, <http://doi.org/10.34172/EHEM.2023.07>.
- Takdastan, A., Niari, M.H., Babaei, A., Dobaradaran, S., Jorfi, S., and Ahmadi, M., (2021), "Occurrence and distribution of microplastic particles and the concentration of Di 2-ethyl hexyl phthalate (DEHP) in microplastics and wastewater in the wastewater treatment plant", *Journal of Environmental Management*, 280, 111851, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111851>.
- Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M., and Koistinen, A., (2017), "How well is microlitter purified from wastewater? A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant", *Water Research*, 109, 164-172, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.046>.
- Üstün, G.E., Bozdaş, K., and Can, T., (2022), "Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater treatment plant in Turkey", *Environmental Pollution*, 310, 119890, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119890>.
- Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., and Gao, P., (2021), "Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China", *Journal of Cleaner Production*, 291, 125968, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125968>.
- The influence of physicochemical parameters and environmental factors", *Chemosphere*, 238, 124593, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124593>.
- Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., and Rosal, R., (2020), "Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge", *Environmental Pollution*, 259, 113837, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113837>.
- Hajji, S., Ben-Haddad, M., Abelouah, M.R., De-la-Torre, G.E., and Alla, A.A., (2023), "Occurrence, characteristics, and removal of microplastics in wastewater treatment plants located on the Moroccan Atlantic: The case of Agadir metropolis", *Science of the Total Environment*, 862, 160815, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160815>.
- Hajji, S., Ben-Haddad, M., Abelouah, M.R., De-la-Torre, G.E., and Alla, A.A., (2023), "Sludge drying and dewatering processes influence the abundance and characteristics of microplastics in wastewater treatment plants", *Chemosphere*, 339, 139743, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139743>.
- Jiang, J., Wang, X., Ren, H., Cao, G., Xie, G., Xing, D., and Liu, B., (2020), "Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China", *Science of the Total Environment*, 746, 141378, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141378>.
- Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpää, M., and Sillanpää, M., (2018), "Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology", *Water Research*, 133, 236-246, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>.
- Liu, K., Wang, X., Wei, N., Song, Z., and Li, D., (2019), "Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health", *Environment International*, 132, 105127, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105127>.
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z., and Zhang, T., (2021), "A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms", *Environment International*, 146, 106277, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277>.
- Oveysi, N., Rafiee, M., Rahmatpour, A., Nejad, A.S., Hashemi, M., and Eslami, A., (2022), "Occurrence, identification, and discharge of microplastics from effluent and sludge of the largest WWTP in Iran-South of Tehran", *Water Environment Research*, 94(8), 10765, <https://doi.org/10.1002/wer.10765>.
- Patil, S., Kamdi, P., Chakraborty, S., Das, S., Bafana, A., Krishnamurthi, K., and Sivanesan, S., (2023), "Characterization and removal of microplastics in a sewage treatment plant from urban Nagpur, India", *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 47, <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10680-x>.
- Petroody, S.S.A., Hashemi, S.H., and van Gestel, C.A., (2020), "Factors affecting microplastic retention and emission by a wastewater treatment plant on the southern coast of Caspian Sea", *Chemosphere*, 261,



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.