

Investigation of Abundance, Characteristics, and Fate of Microplastics in Water and Sludge of Water Treatment Plants: A Narrative Review

Mohammad Ali Zazouli^{1,2,3}

Kosar Kouhi⁴

Akram Abbasi Tajadod⁵

Yalda Hashempour⁶

¹ Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

² Health Sciences Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

³ The Health of Plant and Livestock Products Research Center, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

⁴ Master's Student in Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

⁵ Master's Student in Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

⁶ Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received January 6, 2023; Accepted May 25, 2024)

Abstract

Microplastics (MPs) as an emerging pollution with a size of less than 5 mm, can act as carriers of chemical and biological pollutants and have destructive effects on the environment and human health. Drinking water is one of the methods of exposure and entry of these particles into the human body. The importance of water treatment plants is to eliminate and reduce the maximum of existing microplastics and prevent them from entering water sources. Optimizing the removal of microplastics in drinking water treatment plants can reduce the risk of human exposure to these substances. This study reviews the frequency and characteristics of microplastics in water and sludge of drinking water treatment plants and the efficiency of different processes in their removal. This study is a narrative review. To identify the studies that investigated microplastics in water and sludge of a water treatment plant, Persian and English studies in the period from 2013 to 2024 with two groups of Persian keywords including microplastics, water, sludge, water treatment plant, and English keywords. Including Drinking water treatment plants, DWTP Sludge and Microplastic. Google Scholar, PubMed, John Wiley, and ScienceDirect sources were searched. A total of 816 articles were obtained. After removing duplicate articles, the number of articles was reduced to 798 articles. Then, by checking the titles and abstracts, the number of articles was limited to 38. By reviewing the articles whose full text was available, 12 articles were finally left, 9 articles were about microplastics in water, 2 articles were about microplastics in water treatment plant sludge, and 1 article was jointly about microplastics in water. Water and sludge from the water treatment plant. The results showed that the number of microplastics in raw water with the origin of surface sources (reservoirs and rivers) varied between 4.23 ± 1.26 to 3918 ± 425 numbers per liter and the size distribution of microplastics in water can be different depending on the source of raw water. Investigations showed that the predominant size of these particles was less than 100 micrometers. In addition, the most abundant types of microplastics include polyethylene, polypropylene, and polyethylene terephthalate with two forms of fragment and fibers. The number of microplastics in sludge is very high and can be as high as 86,000 particles per gram of dry sludge. Also, common water purification processes including coagulation, flocculation, sedimentation, and sand filtration can remove microplastics by 39-70%, but if granular activated carbon is used in the continuation of the conventional purification process, the efficiency will reach 97%. These particles can eventually be swallowed by humans or aquatic organisms as a result of water consumption or left on the ground as a result of the use of sludge in agriculture.

This study showed that microplastics with different characteristics in terms of size, shape, color, and polymer are present in raw water, and most of them accumulate in sludge. Therefore, to prevent the harmful environmental effects of these particles, it is necessary to purify the sludge from the water treatment plant before entering the environment.

Keywords: Sludge, water, microplastics, treatment plant, drinking water

J Mazandaran Univ Med Sci 2024; 34 (234): 200-213 (Persian).

Corresponding Author: Kosar Kouhi, Akram Abbasi Tajadod - Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran. (E-mail: kouhikosar98@gmail.com_ a.abbasitajadod@mazums.ac.ir)

بررسی فراوانی، ویژگی‌ها و سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه خانه های آب: یک مرور روایتی

محمد علی ززولی^۱کوثر کوهی^۴اکرم عباسی تجدد^۵یلدا هاشم پور^۶

چکیده

میکروپلاستیک‌ها (MPs) به عنوان یک آلودگی نوظهور با اندازه کم‌تر از ۵ میلی‌متر، می‌توانند به‌عنوان ناقل آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی عمل کنند و اثرات مخربی بر روی محیط زیست و سلامت انسان داشته باشند. آب شرب یکی از روش‌های مواجهه و ورود این ذرات به بدن انسان است. اهمیت تصفیه‌خانه‌های آب در حذف و کاهش حداکثری میکروپلاستیک‌های موجود و جلوگیری از وارد شدن آن‌ها به منابع آب است. بهینه‌سازی حذف میکروپلاستیک در تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی می‌تواند خطر مواجهه انسان با این مواد را کاهش دهد. این مطالعه به مرور فراوانی و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی و میزان کارایی فرایندهای مختلف در حذف آن‌ها می‌پردازد. این مطالعه به صورت مروری روایتی می‌باشد. جهت شناسایی مطالعاتی که به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه آب پرداخته‌اند، مطالعات فارسی و انگلیسی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ با دو گروه کلید واژه‌های فارسی شامل، میکروپلاستیک، آب، لجن، تصفیه‌خانه آب و کلید واژه‌های انگلیسی شامل، Drinking water treatment plant، Sludge DWTP، Microplastic پرداخته شد. در منابع اطلاعاتی John Wiley، PubMed، Google Scholar، ScienceDirect جستجو شد. مجموعاً ۸۱۶ مقاله به‌دست آمد. پس از حذف مقالات تکراری، تعداد مقالات به ۷۹۸ مقاله کاهش یافت. سپس با بررسی عناوین و چکیده‌ها، تعداد مقالات به ۳۸ عدد محدود شد. با بررسی مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس بود در نهایت ۱۲ مقاله باقی ماند که ۹ مقاله به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب، ۲ مقاله به بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه آب و ۱ مقاله به صورت مشترک به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه آب پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که تعداد میکروپلاستیک در آب خام با منشأ منابع سطحی (مخازن و رودخانه‌ها) بین $1/26 \pm 4/23$ تا 3918 ± 425 تعداد در لیتر متغیر بوده است و توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها در آب بسته به منبع آب خام می‌تواند متفاوت باشد. بررسی‌ها نشان داد اندازه غالب این ذرات کم‌تر از ۱۰۰ میکرومتر بوده است. علاوه بر این فراوان ترین نوع میکروپلاستیک‌ها شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن تترافالات با دو شکل قطعه و فیبر بوده است. تعداد میکروپلاستیک‌ها در لجن بسیار بالا بوده و می‌تواند در حد ۸۶۰۰۰ ذره در هر گرم لجن خشک باشد. هم‌چنین فرایندهای متداول تصفیه آب شامل انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و صاف‌سازی ماسه‌ای قادرند میکروپلاستیک‌ها را ۳۹ تا ۷۰ درصد حذف نمایند؛ اما چنان‌چه در ادامه فرآیند تصفیه متداول از کربن فعال گرانولی استفاده شود، کارایی به ۹۷ درصد خواهد رسید. این ذرات در نهایت می‌توانند در اثر مصرف آب توسط انسان یا موجودات آبی بلعیده شوند و یا در اثر استفاده از لجن در کشاورزی در زمین رها شوند.

این مطالعه نشان داد که میکروپلاستیک‌ها با ویژگی‌های متفاوت از نظر اندازه، شکل، رنگ و پلیمر در آب خام وجود دارند که بخش زیادی از آن‌ها در لجن تجمع می‌یابند. بنابراین، برای جلوگیری از اثرات زیست محیطی مخرب این ذرات، لازم است که لجن حاصل از تصفیه‌خانه آب نیز قبل از ورود به محیط زیست تصفیه شود.

واژه‌های کلیدی: لجن، آب، میکروپلاستیک، تصفیه‌خانه آب، آب آشامیدنی

E-mail: kouhikosar98@gmail.com

E-mail: a.abbasitajadod@mazums.ac.ir

مؤلف مسئول: کوثر کوهی - ساری: کیلومتر ۱۷ جاده فرح‌آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت

و اکرم عباسی تجدد - ساری: کیلومتر ۱۷ جاده فرح‌آباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت

۱. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۲. مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. مرکز تحقیقات سلامت فرآورده‌های گیاهی و دامی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۵. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۶. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

© تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۳/۳/۵

مقدمه

پلاستیک زمانی به عنوان اختراع بزرگ قرن بیستم مورد توجه قرار گرفت و از دهه ۱۹۵۰ به طور گسترده در سراسر جهان استفاده شد؛ اما امروزه آسیب ناشی از مدیریت نادرست محصولات پلاستیکی به طور فزاینده‌ای شناخته شده است. پیش‌بینی می‌شود که در مجموع ۲۵۰ میلیون تن پلاستیک تا سال ۲۰۲۵ در محیط‌های آبی تخلیه شود. پلاستیک‌ها در محیط زیست به تدریج تحت شرایط مختلف به میکروپلاستیک‌ها تجزیه می‌شوند (۱، ۲). میکروپلاستیک‌ها آلاینده‌هایی نوپدید هستند که به عنوان ذرات پلاستیکی مصنوعی با قطر کم‌تر از ۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر تعریف می‌شوند.

ویژگی‌های فیزیکی میکروپلاستیک‌ها مانند اندازه و شکل، نقش مهمی در حذف آن‌ها در طول تصفیه دارد. این ویژگی‌ها همچنین بر چسبندگی سایر آلاینده‌ها، نرم‌کننده‌ها و میکروارگانیزم‌ها بر روی میکروپلاستیک‌ها تأثیر می‌گذارد (۳). رنگ میکروپلاستیک‌ها عامل مهمی است که بر عملکرد شکاری، بلع و انتقال تغذیه‌ای آن‌ها توسط ارگانیزم‌ها تأثیر می‌گذارد و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای ردیابی منشأ آن‌ها و شناسایی مواد افزودنی شیمیایی و همچنین خطرات بالقوه زیست محیطی ارائه دهد (۴). بنابراین، دسته‌بندی آن‌ها براساس اندازه، مورفولوژی و رنگ بسیار مهم است. قطعات آبی رنگ اغلب از درب بطری‌های آب به دست می‌آیند، در حالی که میکروپلاستیک‌های سیاه رنگ معمولاً از لاستیک خودرو و منابع صنعتی منشأ می‌گیرند (۵). ذرات میکروپلاستیک سفید رنگ یا شفاف معمولاً از بسته‌بندی، ظروف غذا، کیسه‌ها و موارد مشابه به دست می‌آیند. رنگ‌های روشن مانند قرمز یا سبز اغلب با مواد مصنوعی شسته شده در ماشین لباسشویی همراه است (۶). آن‌ها به طور کلی از انواع مختلف پلیمرها از جمله پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌وینیل الکل (PVA) و پلی‌آمید (PA) تشکیل شده‌اند (۷). از نظر منشأ تولید به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند؛

میکروپلاستیک‌های اولیه به طور عمده در اندازه‌های کوچک مانند ریزدانه‌های موجود در محصولات مراقبت شخصی و لوازم آرایشی و بهداشتی، تمیزکننده‌ها و الیاف لباس وجود دارند، میکروپلاستیک‌های ثانویه به طور ناخواسته در نتیجه تخریب قطعات پلاستیکی بزرگ‌تر تولید می‌شوند (۸، ۹). این ذرات می‌توانند آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را نیز جذب کنند و در نتیجه، به عنوان ناقل آلاینده‌های مختلف، خطری برای سلامت عمومی و محیط‌زیست ایجاد کنند (۱۰). براساس مطالعات انجام شده تاکنون، مشاهده شده است که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به عواملی مانند استرس اکسیداتیو، سمیت سلولی، تغییرات در متابولیسم، اختلالات در سیستم ایمنی، سمیت عصبی و احتمالاً سرطان منجر شوند. برخی آلاینده‌های مقاوم، زیست‌انباشت‌شونده و سمی، مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای، بی‌فیل‌های چند کلری و اترهای دی‌فیل‌چندبرمی، می‌توانند از طریق میکروپلاستیک‌ها وارد زنجیره غذایی شوند (۱۱، ۱۲). مصرف آب و غذا به عنوان مسیری برای مواجهه انسان با میکروپلاستیک‌ها شناسایی شده است (۱۳، ۱۴). رواناب‌های سطحی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی، مدیریت نامناسب پسماندهای پلاستیکی، ذرات موجود در مواد آرایشی و بهداشتی، رها شدن پلاستیک‌ها در لندفیل‌ها به دلیل پوشش‌گذاری نامطلوب روزانه، ذرات اتمسفری، فبرهای جدا شده از منسوجات در طی شستشو و سایش پلاستیک‌های وسایل نقلیه از عمده‌ترین منابع ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط هستند (۸). مطالعات اخیر نشان می‌دهند که میکروپلاستیک‌ها به عنوان یک آلاینده نوظهور در آب‌های لوله‌کشی، آب‌های بطری شده و آب‌های تصفیه شده حضور دارند (۱۵). اگر متوسط مصرف آب شرب توصیه شده برای مردان و زنان به ترتیب برابر ۳/۷ و ۲/۷ لیتر در روز باشد، می‌تواند مواجهه روزانه با میکروپلاستیک‌ها در محدوده ۰/۱-۰/۲ ذره در کیلوگرم وزن بدن را به همراه داشته باشد. هم‌چنین در صورت

را فراهم کند (۲۳، ۲۲). بنابراین هدف این مطالعه، ارزیابی میزان حضور، ویژگی و پتانسیل تأثیرپذیری میکروپلاستیک‌ها و هم‌چنین سرنوشت آن‌ها در فرآیندهای تصفیه آب و لجن تصفیه‌خانه آب می‌باشد.

بحث

این مطالعه به صورت مروری روایتی می‌باشد و فراوانی، ویژگی‌ها و سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه‌های آب بررسی می‌کند. جهت شناسایی مطالعاتی که به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه آب پرداختند، به جستجو مطالعات فارسی و انگلیسی در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ در منابع اطلاعاتی PubMed، Google Scholar، John Wiley و ScienceDirect با دو گروه کلید واژه‌های فارسی شامل، میکروپلاستیک، آب، لجن، تصفیه‌خانه آب و کلید واژه‌های انگلیسی شامل، Drinking water treatment plant، Sludge DWTP و Microplastic، پرداخته شد. پس از حذف مقالات تکراری، با مطالعه عناوین، چکیده و متن کامل آن‌ها، مقالاتی را که به زبان فارسی و انگلیسی نوشته شده بودند و دسترسی به متن کامل آن‌ها وجود داشت، مورد بررسی قرار داده شد. مقالات به شرح، فراوانی میکروپلاستیک‌ها در آب تصفیه‌خانه آب آشامیدنی، فراوانی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه آب آشامیدنی، ویژگی میکروپلاستیک‌ها، کارایی و مکانیزم حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی، سرنوشت میکروپلاستیک‌ها و مدیریت ورود میکروپلاستیک‌ها به آب، تقسیم شدند.

پس از جستجو با کلید واژه‌های مذکور، مجموعاً ۸۱۶ مقاله (۷۸۵ مقاله از Google Scholar، ۲۰ مقاله از John Wiley، ۵ مقاله از PubMed و ۶ مقاله از ScienceDirect) به دست آمد. پس از حذف مقالات تکراری، تعداد مقالات به ۷۹۸ مقاله کاهش یافت. سپس با بررسی عناوین و چکیده‌ها، تعداد مقالات به ۳۸ عدد محدود شد. با بررسی مقالاتی که متن کامل آن‌ها در

مصرف بیش از حد آب، میزان مواجهه روزانه با میکروپلاستیک‌ها بین ۱/۷ تا ۱/۹ ذره در کیلوگرم وزن بدن براساس میزان مصرف توصیه شده برای آب در هوای گرم توسط WHO افزایش می‌یابد (۱۶). تصفیه خانه‌های آب (WTPs) به عنوان موانعی برای جلوگیری از ورود میکروپلاستیک‌ها به سیستم تامین آب آشامیدنی عمل می‌کنند (۱۷). فناوری تصفیه و کارایی WTPs مستقیماً بر غلظت و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در آب آشامیدنی تأثیر دارد. بنابراین، درک و بهینه‌سازی حذف میکروپلاستیک‌ها در WTPs می‌تواند خطر مواجهه انسان با میکروپلاستیک را کاهش دهد (۱۸). تصفیه‌خانه‌ها آب را از منابع مختلفی برای تصفیه می‌گیرند که اغلب این منابع در معرض آلودگی میکروپلاستیک‌ها هستند. همچنین فعالیت‌های انسانی در محیط‌های شهری، ورود میکروپلاستیک‌های بیش‌تری را به داخل اکوسیستم‌های آب شیرین تسهیل می‌کند. علاوه بر این پلاستیک‌های باقیمانده در لجن فاضلاب ممکن است به علت استفاده از آن‌ها در کشاورزی و جنگل‌داری، به محیط‌زیست انتقال یابند. تصفیه آب نیز باعث تولید ضایعاتی مانند لجن می‌شود. طی هر دو فرایند تصفیه انعقاد/لخته‌سازی و فیلتراسیون، به طور مداوم میکروپلاستیک‌ها حذف و به لجن افزوده می‌شوند (تا ۹۹ درصد) (۲۰، ۱۹). در بسیاری از کشورها، لجن برای دفن زباله بازیافت می‌شود یا برای تولید انرژی سوزانده می‌شود، هم‌چنین برای کشاورزی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد بنابراین لازم است تصفیه شود تا برای کاربرد در زمین مناسب باشد (۲۱). با این حال، استفاده مجدد از لجن، ممکن است منجر به حضور مجدد میکروپلاستیک‌ها در محیط‌زیست شود که یک تهدید بالقوه زیست محیطی را به دنبال دارد. این میکروپلاستیک‌ها می‌توانند توسط موجودات زنده زمینی از خاک بلعیده شوند، وارد زنجیره غذایی شده و سلامت انسان را به خطر بیندازند، به همین دلیل، استفاده بعدی از لجن در زمین‌های کشاورزی، ممکن است یک مسیر اضافی برای ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌زیست

دسترس بود در نهایت ۱۲ مقاله باقی ماند که ۹ مقاله به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب، ۲ مقاله به بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه‌خانه آب و ۱ مقاله به صورت مشترک به بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه آب پرداختند. جدول شماره ۱، فراوانی و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در آب، جدول شماره ۲، فراوانی و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در لجن و جدول شماره ۳، کارایی فرایندهای مختلف تصفیه‌خانه آب را در حذف میکروپلاستیک‌ها نشان می‌دهند.

با توجه به جدول شماره ۱، تعداد میکروپلاستیک در آب خام از $4/23 \pm 1/26$ ذره تا 3918 ± 425 ذره در هر لیتر بوده است و بیش‌ترین نوع میکروپلاستیک‌ها شامل پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن تترافتالات با دو شکل قطعه و فیبر بوده است. بررسی میکروپلاستیک‌ها

در لجن تصفیه‌خانه‌های آب نشان می‌دهد تعداد ذرات در مقایسه با آب بسیار بالا بوده و می‌تواند در حد ۸۶۰۰۰ ذره در هر گرم باشد و همانند نمونه‌های آب میکروپلاستیک‌ها از نوع پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن بیش‌ترین فراوانی را به خود اختصاص می‌دهند.

هم‌چنین جدول شماره ۳ نیز نشان می‌دهد تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند از ۳۹/۱۳ تا ۹۸/۳ درصد کارایی در حذف میکروپلاستیک‌ها داشته باشند، هم‌چنین فرایندهای متداول تصفیه آب شامل انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و صاف‌سازی ماسه‌ای قادرند میکروپلاستیک‌ها را ۳۹ تا ۷۰ درصد حذف نمایند اما چنان‌چه در ادامه فرآیند تصفیه متداول از کربن فعال گرانولی استفاده شود، کارایی به ۹۷ درصد خواهد رسید که در جدول شماره ۳ به آن اشاره شده است و میزان کارایی حذف میکروپلاستیک در هر بخش تصفیه‌خانه با هم مقایسه گردیده است.

جدول شماره ۱: فراوانی میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در آب تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی

کشور	نویسنده/سال/مکان	منشأ آب خام	فراوانی میکروپلاستیک (تعداد در لیتر)			شکل غالب	نوع پلیمر
			آب ورودی	آب تصفیه شده	ورودی		
چک	Pivokonsky و همکاران/۲۰۱۸/ (۲۴)	مخزن	143 ± 34	443 ± 10	$10 >$	قطعه، کروی و فیبر	PET, PP, PE
		مخزن	181 ± 35	338 ± 76	$10 >$	قطعه، کروی و فیبر	PET, PP, PE
		رودخانه	360 ± 497	678 ± 28	$10 >$	قطعه، کروی و فیبر	PET, PP, PE
آلمان	Mintenig و همکاران/۲۰۱۹/ (۲۵)	آب زیرزمینی	۰-۷ در متر مکعب	۰-۷ در متر مکعب	۵۰-۱۵۰	قطعه	PE, PA, PES, PVC, epoxy resin
چک	Pivokonsky و همکاران/۲۰۲۰/ (۲۶)	رودخانه	23 ± 2	14 ± 1	$10 >$	فیبر، قطعه و کروی	CA, PET, PP, PE
		رودخانه	1296 ± 35	151 ± 4	$10 >$	فیلم، قطعه و کروی	CA, PET, PE, PP, EVA, PBA, PTT
آمریکا	Zhang و همکاران/۲۰۲۰/ (۲۷)	دریاچه و رودخانه	-	-	۱-۱۲۵	قطعه	PE, PS
چین	Wang و همکاران/۲۰۲۰/ (۲۸)	رودخانه	6614 ± 1132	930 ± 72	$10 >$	فیبر، قطعه و کروی	PET, PE, PP, PAM, PS, PVC
هند	Sarkar و همکاران/۲۰۲۱/ (۲۹)	رودخانه	$17/86 \pm 2/66$	$2/85 \pm 0/92$	۲۵-۵۰	فیبر و قطعه	PE, PP, PET, PS
ایران	Tabatabaei و همکاران/۲۰۲۲/ (۱۲)	رودخانه	2569 ± 309	1492 ± 33	$50 >$	فیلم و قطعه	PE, PP, PS, PET, PVC, PU
		رودخانه	3918 ± 425	2279 ± 146	$50 >$	قطعه و فیلم	PE, PP, PS, PET, PVC, PC, PU
		رودخانه	3067 ± 373	1663 ± 294	$50 >$	قطعه و فیلم	PE, PP, PS, PET, PVC, PC, PU
اسپانیا	Dronjak و همکاران/۲۰۲۲/ (۱۳)	رودخانه	$4/23 \pm 1/26$	$0/75 \pm 0/19$	۲۰-۵۰	فیلم، فیبر و قطعه	PVC, PET
سوئیس	Velasco و همکاران/۲۰۲۳/ (۳۰)	رودخانه	$25/7 - 55/6$ در متر مکعب	۰-۴ در متر مکعب	۶۳-۱۲۵	قطعه، صفحه و فیبر	PE, PET, PMMA, PP, PS, PVA, PVC, EVA
چین	Han و همکاران/۲۰۲۴/ (۳۱)	مخزن	-	$5134-4599$ ذره در لیتر	-	-	PET, PE, PP, PS, PA, PVC

PET = پلی‌اتیلن تترافتالات، PP = پلی‌پروپیلن، PE = پلی‌اتیلن، PA = پلی‌آمید، PES = پلی‌استر، PVC = پلی‌وینیل کلراید، epoxy resin = رزین اپوکسی، CA = سلولز استات، EVA = اتیلن وینیل استات پلیمر، PBA = پلی‌بوتیل آکریلات، PTT = پلی‌تری متیلن تترافتالات، PS = پلی‌استایرن، PAM = پلی‌آکریل آمید، PU = پلی‌اورتان، PC = پلی‌کربنات، PMMA = پلی‌متیل متاآکریلات، PVA = پلی‌وینیل الکل

جدول شماره ۲: فراوانی میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در لجن تصفیه‌خانه آب آشامیدنی

کشور	نویسنده/سال/مکان	منشأ آب خام	فراوانی میکروپلاستیک (به ازای وزن خشک)	نوع پلیمر	شکل غالب
آلمان	Siegel و همکاران/۲۰۲۱/ (۱۹)	رودخانه	196 ± 42 ذره در هر متر مکعب	PE, PP, PS	قطعه
انگلستان و ولز	Johnson و همکاران/۲۰۲۰/ (۳۲)	رودخانه، آب زیرزمینی و مخزن	۸۶۰۰۰ ذره در هر گرم	PET, PP, PE	-
اسپانیا	Dronjak و همکاران/۲۰۲۲/ (۱۳)	رودخانه	35680 ذره در هر کیلوگرم	PE, PA	فیبر

جدول شماره ۳: بررسی کارایی تصفیه خانه های آب آشامیدنی در حذف میکروپلاستیک ها در آب

کشور	سال	منشأ آب خام	نوع سیستم تصفیه آب	واحد تصفیه	راندمان حذف هر واحد (درصد)	راندمان حذف کلی (درصد)	مرجع
چک	۲۰۱۸	مخزن	اتعداد لخته سازی و صاف سازی ماسه ای	-	-	۷۰	(۲۴)
		مخزن	اتعداد لخته سازی، ته نشینی، صاف سازی ماسه ای و کربن فعال گراتولی			۸۱	
		رودخانه	اتعداد لخته سازی، شاور سازی، فیلتراسیون شنی و کربن فعال گراتولی			۸۳	
آلمان	۲۰۱۹	آب زیرزمینی	هودهی و صاف سازی	-	-	-	(۲۵)
چک	۲۰۲۰	رودخانه	اتعداد لخته سازی، فیلتراسیون شنی، تصفیه با آهک و CO ₂	-	-	۳۹/۱۳	(۲۶)
			اتعداد لخته سازی، ته نشینی، اکسیداسیون با پرمنگات پاسبیم، فیلتر شنی، ازن زنی، صاف سازی با کربن فعال گراتولی، گندزدایی با UV، تصفیه با آهک و کلر و دی اکسید کربن			۸۸/۳۴	
چین	۲۰۲۰	رودخانه	اتعداد لخته سازی، ته نشینی، فیلتراسیون شنی، ازن زنی همراه با صاف سازی با کربن فعال گراتولی	-	-	۸۲/۱ - ۸۸/۶	(۲۸)
هند	۲۰۲۱	رودخانه	کلر زنی، اتعداد زلال سازی با پولساتور و فیلتراسیون شنی	اتعداد لخته سازی و ته نشینی پالسی فیلتر شنی	۶۰/۹ ۳۳/۷۲	۸۵/۳۹	(۲۹)
ایران	۲۰۲۲	رودخانه	اتعداد و لخته سازی با کثروفریک و گندزدایی با گاز کلر	-	-	۳۲/۱ - ۵۹/۹	(۱۲)
اسپانیا	۲۰۲۲	رودخانه	اتعداد لخته سازی، ته نشینی از نوع پولساتور، اکسیداسیون، صاف سازی ماسه ای و کربن فعال گراتولی	ته نشینی اولیه (۲) فیلتر شنی فیلتر کربنی	۶۲/۷ - ۶۷/۲ ۹۹/۱ ۹۹/۲	۹۸/۳	(۱۳)
سوئیس	۲۰۲۳	رودخانه	پیش تصفیه آب خام، اتعداد، فیلتر شنی، ازن زنی، فیلتر کربن فعال گراتولی، تنظیم pH و گندزدایی	اتعداد فیلتر شنی کربن فعال گراتولی	۷۰ ۲۸	۹۸	(۳۰)
چین	۲۰۲۴	مخزن	ازن زنی، کربن فعال دانه ای و فیلتراسیون شنی	ازن زنی و کربن فعال دانه ای فیلتراسیون شنی	۵۲/۷ ۴۷/۵	۷۲/۷ - ۸۳	(۳۱)

فراوانی میکروپلاستیک ها در آب تصفیه خانه آب آشامیدنی

میکروپلاستیک ها در آب های سطحی مختلف شناسایی شده اند. میانگین فراوانی میکروپلاستیک ها در محیط آب شیرین از چند عدد تا چند میلیون می باشد (۲). در تصفیه خانه های آب، فرایند تصفیه از طریق لوله ورودی به تصفیه خانه شروع و با عبور از واحدها و فرایندهایی نظیر آشغال گیر، هودهی، میکرواسترینر، اختلاط سریع، لخته سازی، ته نشینی، صاف سازی و در نهایت مخزن نگهداری وارد جریان آب شهری می گردد. در این بین واحدهایی نظیر تغلیظ کننده، تانک بازیافت و آب گیری مکانیکی لجن آلوده را به دو بخش تقسیم کرده و مواد جامد غیر قابل تجزیه را به خارج از مخزن هدایت می نمایند (۳۳).

Pivokonsky و همکاران (۲۰۱۸)، نشان دادند که تصفیه خانه های آب آشامیدنی (DWTPs) می توانند به طور موثری میکروپلاستیک ها را از آب حذف کنند. آن ها گزارش کردند که میکروپلاستیک ها در تمام نمونه های آب یافت شدند و میانگین فراوانی آن ها از 34 ± 1473 تا 3605 ± 497 ذرات بر لیتر در آب خام و از

76 ± 338 تا 628 ± 28 ذره بر لیتر در آب تصفیه شده متغیر بود (۲۴).

در مطالعه Dronjak و همکاران (۲۰۲۲)، بیان شد که ذرات میکروپلاستیک ها در تمام نمونه های واحدهای مختلف DWTPs شناسایی شدند اما فراوانی آن ها به طور قابل توجهی متفاوت بود. آن ها فراوانی میکروپلاستیک ها در آب ورودی و خروجی به تصفیه خانه را به ترتیب $4/23$ و $0/075$ میکروپلاستیک در لیتر گزارش کردند. به طور کلی، عملیات یک تصفیه خانه آب آشامیدنی با توجه به کاهش ذرات میکروپلاستیک موثر و با راندمان حذف بالا (۹۸/۳ درصد) می باشد (۱۳).

در حالی که Velasco و همکاران (۲۰۲۳)، وجود میکروپلاستیک ها و الیاف را در DWTPs متعارف ارزیابی کردند، و میزان میکروپلاستیک در آب ورودی و خروجی تصفیه خانه را $38/2$ و 2 میکروپلاستیک در متر مکعب گزارش کردند (۳۰).

Mintening و همکاران (۲۰۱۹)، وجود میکروپلاستیک ها را در آب آشامیدنی در کل زنجیره تامین آب آشامیدنی بررسی کردند. محتوای میکروپلاستیک تنها ۷-۰ ذره در

متر مکعب یافت شد (۲۵). کارایی حذف میکروپلاستیک در تصفیه پیشرفته آب توسط Wang و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی شد و نتایج نشان داد فراوانی میکروپلاستیک‌ها در آب ورودی 1132 ± 6614 ذره در هر لیتر بوده است (۲۸). Bauerlein و همکاران (۲۰۲۲)، غلظت میکروپلاستیک‌ها را در منابع آب آشامیدنی اندازه‌گیری و به بررسی اثربخشی تاسیسات مختلف تصفیه آب آشامیدنی جهت کاهش غلظت میکروپلاستیک‌ها در آب برای به‌دست آوردن بیهوش در مورد سرنوشت میکروپلاستیک‌ها پرداختند. در مجموع پنج سایت متفاوت با استفاده از چهار نوع مختلف آب ورودی تصفیه نشده برای تولید آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفت. طبق این مطالعه تصفیه آب آشامیدنی اکثر میکروپلاستیک‌ها را حذف می‌کند و غلظت میکروپلاستیک‌های بزرگ‌تر از ۲۰ میکرومتر در آب لوله‌کشی کم‌تر از ۲ ذره در لیتر است. مشخص شده است که بین منابع مختلف آب خام، آب‌های زیرزمینی تا حد زیادی کم‌ترین غلظت میکروپلاستیک را دارند (کم‌تر از ۱۰۰۰ میکروپلاستیک در متر مکعب) و بیش‌ترین غلظت در آب رودخانه تا ۴۶۰۰۰۰ ذره در هر متر مکعب مشاهده شد (۳۴).

در مطالعه Zhou و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد حذف و مکانیسم میکروپلاستیک‌های PS و PE با استفاده از انعقاد پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) و کلرید فریک ($FeCl_3$) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که PAC در راندمان حذف میکروپلاستیک‌های PE و PS بهتر از کلرید فریک بود. طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نشان داد پیوندهای جدید در طول تعامل بین میکروپلاستیک‌های PS و منعقدکننده‌ها تشکیل می‌شود و میزان حذف در شرایط قلیایی بیش‌تر از اسیدی بوده است (۳۵). اگرچه تصفیه‌خانه توانایی حذف میکروپلاستیک‌ها را از آب ورودی با راندمان بالا دارد ولی بعضی از بخش‌های تصفیه‌خانه می‌تواند در افزودن میکروپلاستیک به آب هم نقش داشته باشد. تفاوت در نتایج مطالعات لیست شده در جدول شماره ۲ می‌تواند

به دلیل روش شناسی متفاوت، عدم استاندارد سازی و محدوده اندازه میکروپلاستیک‌ها مورد بررسی باشد، در نتیجه مقایسه را دشوار می‌کند (۱۳).

نتایج مطالعات نشان داد که تعداد میکروپلاستیک در آب خام با منشأ منابع سطحی (مخازن و رودخانه‌ها) بین $1/26 \pm 4/23$ تا 3918 ± 425 تعداد در لیتر می‌باشد (جدول شماره ۱). بررسی‌ها نشان داده است که میکروپلاستیک‌ها به‌طور گسترده در منابع آبی مختلف مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و حتی بعد از تصفیه حضور دارند و این ذرات پلاستیکی به دلیل استفاده گسترده از مواد پلاستیکی و عدم تجزیه طبیعی آن‌ها، به‌طور مداوم به منابع آب وارد می‌شوند. فراوانی میکروپلاستیک‌ها در آب بستگی به منطقه، منبع آب، فعالیت‌های انسانی و سایر عوامل دارد. این واقعیت نشان‌دهنده اهمیت بررسی دقیق‌تر و اقدامات مناسب برای کنترل و کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها در آب و جلوگیری از ورود آن‌ها به تصفیه‌خانه‌های آب است.

فراوانی میکروپلاستیک‌ها در لجن تصفیه خانه‌های آب آشامیدنی

در طی فرایندها و عملیات تصفیه آب، حجم زیادی لجن تولید می‌شود که محل تجمع میکروپلاستیک‌های حذف شده می‌باشد. میکروپلاستیک‌ها در طی فرایندهای مختلف تصفیه به‌طور مداوم حذف و به لجن اضافه می‌شوند (۱۹).

Johnson و همکاران (۲۰۲۰)، بیان کردند میزان میکروپلاستیک‌های موجود در لجن بسیار متغیر بوده و در محدوده کم‌تر از حد تشخیص تا ۸۶۰۰۰ میکروپلاستیک در گرم وزن خشک بوده است، در حالی که Siegel و همکاران (۲۰۲۱)، لجن تصفیه‌خانه آب کنار رودخانه وارنو (شمال شرقی آلمان) را برای میکروپلاستیک‌های بیش از ۵۰ میکرومتر، آنالیز کردند و تعداد ذرات میکروپلاستیک به‌دست آمده از لجن تصفیه شده برای رودخانه وارنو 196 ± 42 در متر مکعب شناسایی شد که

از نظر آماری ناچیز بود و متفاوت از 233 ± 36 در متر مکعب نمونه آب معمولی مورد بررسی بود (۳۲، ۱۹).

ویژگی میکروپلاستیک‌ها

ویژگی‌های فیزیکی

با توجه به جدول شماره ۱، توزیع اندازه میکروپلاستیک‌ها در آب بسته به منبع آب خام می‌تواند متفاوت باشد و تصفیه‌خانه‌هایی که آب را از رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌کشند، حاوی طیف وسیعی از میکروپلاستیک‌ها هستند که اندازه آن‌ها در آب ورودی و آب تصفیه شده به ترتیب از ۱ تا ۲۰۰۰ میکرومتر و ۱ تا ۵۰ میکرومتر متفاوت است. Pivokonsky و همکاران (۲۰۱۸)، میکروپلاستیک‌ها در آب شیرین و آب آشامیدنی را بر اساس اندازه به پنج دسته (۵-۱۰، ۱۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۵۰۰ و بیش‌تر از ۱۰۰ میکرومتر) و براساس شکل به سه گروه (الیاف، کروی و قطعات) تقسیم کردند. آن‌ها گزارش کردند ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر به‌طور قابل توجهی در هر دو نمونه خام و تصفیه شده در تمام تصفیه‌خانه‌ها غالب بوده است به‌طوری که ۱ تا ۵ میکرومتر ۴۰ تا ۶۰ درصد کل تعداد میکروپلاستیک‌ها را تشکیل دادند (۲۴). طباطبایی و همکاران (۲۰۲۲)، ذرات نانوپلاستیک با سایز کوچک‌تر از ۱ میکرومتر را نیز مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که ذرات کم‌تر از ۱ میکرومتر بیش‌ترین فراوانی را داشتند (۱۲). هم‌چنین مطالعه‌ای بر روی لجن تصفیه‌خانه آب توسط Siegel و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد، اندازه غالب ذرات ۱۰۱ تا ۳۰۰ میکرومتر بوده است (۱۹). علاوه بر این Johnson و همکاران (۲۰۲۰)، گزارش کردند که با کاهش اندازه میکروپلاستیک‌ها تعداد آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد (۳۲). اندازه میکروپلاستیک‌ها به دلیل تأثیر آن بر راندمان برخورد و رفتار ته‌نشینی در طول انعقاد به‌طور قابل توجهی بر حذف در اثر انعقاد تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، تفاوت در حذف، اندازه ذرات میکروپلاستیک تحت

تأثیر چگالی و شکل آن‌ها نیز قرار دارد (۳۶). بنابراین تغییرات در شرایط می‌تواند منجر به تغییرات در حذف شود، که نیاز به تحقیقات بیش‌تر برای مقایسه اثرات اندازه میکروپلاستیک بر حذف تحت متغیرهای کنترل شده‌تری دارد. هم‌چنین این ذرات از نظر شکل غالب به‌صورت فیبری، کروی، قطعه و فیلم در مطالعات دیده شد. در طول شستن منسوجات و لباس، الیاف اغلب ریخته می‌شوند، در حالی که قطعات از تجزیه اقلام پلاستیکی بزرگ‌تر مانند کیسه‌ها و بطری‌ها تولید می‌شوند (۳۸، ۳۷). انتشار میکروپلاستیک‌ها مستقیماً تحت تأثیر تکنیک‌های شستشوی مورد استفاده و هم‌چنین انواع ماشین‌های لباسشویی و شوینده‌های مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، شناسایی روش شستشوی بهینه براساس انواع لباس‌های خاص، مدل‌های ماشین لباسشویی و انواع مواد شوینده بسیار مهم است (۲).

ویژگی‌های شیمیایی

توصیف و شناسایی انواع پلیمرهای مختلف میکروپلاستیک‌های موجود در یک نمونه بسیار مهم است زیرا هر پلیمر می‌تواند اثرات منحصر به فردی بر زیست کره داشته باشد.

باتوجه به جدول شماره ۱ و ۲، می‌توان نتیجه گرفت فراوان‌ترین و پرتکرارترین نوع پلیمر در مطالعات مربوط به بررسی آب و لجن تصفیه‌خانه‌های آب شامل PE، PP، PET، PA، PVC، PS می‌باشد. کاربرد عمده PE در بطری و کیسه‌های پلاستیکی است، در حالی که PP ماده پایه برای بسیاری از بسته‌بندی‌ها، درب بطری، طناب، تجهیزات آزمایشگاهی و نی نوشیدنی را فراهم می‌کند (۳۹).

Pivokonsky و همکاران (۲۰۱۸)، ۱۲ نوع پلیمر مختلف میکروپلاستیک‌ها را گزارش دادند که اکثریت آن‌ها (۷۰ درصد) PP، PET، PE بودند (۲۴). هم‌چنین به‌طور مشابه Siegel و همکاران (۲۰۲۱)، نیز ۱۲ نوع پلیمر شناسایی کردند و گزارش دادند PE با ۳۷/۸ درصد،

PP با ۳۱ درصد و PS با ۲۴/۴ درصد فراوان‌ترین نوع را به خود اختصاص دادند (۱۹).

Johnson و همکاران (۲۰۲۰)، بیان کردند مقادیر بالایی برای PE، PET و PP در لجن شناسایی شد (۳۲). در بیش‌تر مطالعات صورت گرفته در سطح جهان، ذرات بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر بررسی شدند. فاطمه طباطبایی و همکاران (۲۰۲۲)، بیان کردند در مجموع ۷ نوع پلیمر شناسایی شد که PP بیش‌ترین میزان را به خود اختصاص داد (۱۲).

از کاربردهای PS می‌توان در بسته‌بندی‌ها، فوم، لیوان‌های یک بار مصرف، ظروف غذا و مصالح ساختمانی اشاره کرد. همچنین PA در منسوجات، مسواک و تور ماهیگیری کاربرد دارد. کاربرد PET در ساخت بطری، بسته‌بندی‌ها و عایق حرارتی می‌باشد (۴۰). PVC به دلیل داشتن مونومر سرطان‌زا و افزودنی‌های خطرناک جز خطرناک‌ترین پلاستیک‌ها از نظر سمیت می‌باشد (۴۱). این اطلاعات می‌تواند کمک کند تا منشأ و منابع این آلودگی‌ها را شناسایی کرد و اثرات زیست محیطی و اقتصادی این آلودگی‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا راهکارهای مناسب برای مدیریت و کنترل آن‌ها ارائه داده شود.

کارایی و مکانیسم حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه خانه‌های آب آشامیدنی

تصفیه آب آشامیدنی متداول عمده‌تأ شامل انعقاد، ته‌نشینی و صاف‌سازی است (۲۴). تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی به‌طور کلی جهت بهبود کیفیت آب برای مطابقت با استاندارد مصرف اجتماعی به‌کار گرفته می‌شود. هدف از تصفیه متداول آب آشامیدنی اطمینان از ایمنی آب آشامیدنی برای انسان از طریق حذف آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، مانند ذرات معلق، فلزات سنگین و میکروب‌ها می‌باشد. بنابراین، DWTPs نقش حیاتی در جلوگیری از انتقال میکروپلاستیک‌ها به آب شرب از آب خام را دارند با این حال، در حال حاضر،

قوانین هیچ حد استاندارد برای حضور میکروپلاستیک در آب آشامیدنی در نظر نگرفته‌اند و به این دلیل است که کشورها و مناطق مختلف استانداردهای مختلفی برای تصفیه آب آشامیدنی دارند. در جدول شماره ۳ کارایی تصفیه‌خانه و واحدهای آن به همراه راندمان حذف میکروپلاستیک طی عبور آب از آن‌ها نشان داده شده است و نشان داده شد، فرایندهای متداول تصفیه آب شامل انعقاد، لخته‌سازی، ته‌نشینی و صاف‌سازی ماسه‌ای قادرند میکروپلاستیک را ۳۹ تا ۷۰ درصد حذف نمایند، اما چنان چه در ادامه فرآیند تصفیه متداول از کربن فعال گرانولی استفاده شود، کارایی به ۹۷ درصد خواهد رسید و بیان می‌کند.

مطالعه Pivokonsky و همکاران (۲۰۱۸)، نشان داد که DWTPs می‌توانند به‌طور موثر میکروپلاستیک‌ها را از آب حذف کنند و مطالعات بعدی نیز گزارش کرده‌اند که فرآیند انعقاد جزء مهمی برای حذف میکروپلاستیک‌ها در DWTPs می‌باشد و بیان شده است که با استفاده از انعقاد/لخته‌سازی ۷۰ تا ۸۰ درصد میکروپلاستیک‌ها را می‌توان حذف کرد (۳۶، ۲۴). علاوه بر این به گزارش ارائه شده توسط Dronjak و همکاران (۲۰۲۲)، ته‌نشینی به همراه واحد صافی ماسه‌ای می‌تواند بیش‌ترین تاثیر را تا ۹۹ درصد در کاهش میکروپلاستیک‌ها داشته باشد (۱۳).

Tang و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیان کردند کارایی حذف میکروپلاستیک‌ها با انعقاد و ته‌نشینی افزایش می‌یابد و این راندمان حذف با اضافه کردن فیلتراسیون غشایی و انتخاب منعقدکننده مناسب و بهینه‌سازی تصفیه آب افزایش بیش‌تری پیدا می‌کند (۲۱). درحالی‌که Pivokonsky و همکاران (۲۰۲۰) حذف میکروپلاستیک‌ها را در یک تصفیه‌خانه آب کشور چک بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که انعقاد و ته‌نشینی تعداد قابل توجهی از میکروپلاستیک‌ها (۶۲ درصد) را حذف کردند در حالی که فیلتراسیون عمیق و فیلتراسیون کربن فعال گراولی به ترتیب تنها ۲۰ و ۶ درصد میکروپلاستیک‌ها را حذف کردند، که نشان می‌دهد

که فرآیند انعقاد بیشترین کارایی را به حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه آب داشت (۲۶). پس از آن، در مطالعه Velasco و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داده شد ۷۰ درصد از میکروپلاستیک‌های با اندازه برابر یا بیش از ۶۳ میکرومتر پس از فیلتراسیون شنی و ۹۸ درصد پس از فیلتراسیون کربن فعال گرانولی حذف شدند. هم‌چنین بیان کردند که عدم وجود مرحله ته‌نشینی قبل از فیلتر ماسه‌ای بر راندمان حذف میکروپلاستیک‌ها تأثیر نمی‌گذارد (۳۰).

Mintening و همکاران (۲۰۱۹)، یافتند اگر چه در بعضی نمونه‌های آب خام میکروپلاستیک وجود نداشته است اما در آب تصفیه شده از شیرخانه‌ها وجود پنج نوع پلیمر میکروپلاستیک در نمونه‌ها تایید شده است که چهار مورد از آن‌ها با پلاستیک‌های موجود در تجهیزات تصفیه و انتقال آب یکسان بود بنابراین، نتیجه گرفتند زنجیره تامین آب آشامیدنی نیز ممکن است یک منبع بالقوه آلودگی میکروپلاستیک در آب آشامیدنی باشد (۲۵). علاوه بر این کارایی حذف میکروپلاستیک در تصفیه پیشرفته آب توسط Wang و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی شد و مشخص شد که فرآیندهای انعقادی و ته‌نشینی منجر به کاهش غلظت با راندمان حذف ۸۸/۶-۸۲/۱ درصد می‌شود. نتایج نشان داد که کارایی حذف ذرات بزرگ‌تر بیش‌تر از ذرات کوچک‌تر بوده است و فرآیند تصفیه مرسوم (شامل انعقاد/لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلتراسیون شنی) دارای راندمان حذف ۵۸/۹-۷۰/۵ درصد می‌باشند. انعقاد/ته‌نشینی تأثیر بیش‌تری بر حذف میکروپلاستیک‌های الیافی شکل داشتند. در آب خروجی واحد ته‌نشینی در مقایسه با آب خام مقدار زیادی پلی‌اکریل‌آمید شناسایی شد که ناشی از منعقدکننده حاوی پلی‌اکریل‌آمید بوده است و خروجی واحد از نرنی نیز افزایش میزان میکروپلاستیک را نشان داده است (۲۸). هم‌چنین Han و همکاران (۲۰۲۴)، گزارش کردند غلظت پلی‌استایرن در تصفیه‌خانه آب بعد از کلرزی به میزان ۵۳/۴-۳۰ درصد افزایش یافت (۳۱).

بررسی این مطالعات نشان می‌دهند که انتخاب و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه آب و مواد مصرفی در طی تصفیه آب می‌تواند تأثیر زیادی بر کارایی حذف میکروپلاستیک‌ها داشته باشد؛ بنابراین ضرورت بررسی و بهبود فرآیندهای تصفیه آب برای حذف موثرتر میکروپلاستیک‌ها و حفاظت از منابع آب اساسی است.

سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در آب

سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی می‌تواند به چندین شکل متفاوت باشد. حفظ در محیط زیست: بخشی از میکروپلاستیک‌ها ممکن است در آب‌های محیطی حفظ شده و به‌عنوان یک منبع آلودگی زیست محیطی باقی بمانند. این مواد می‌توانند برای مدت طولانی در محیط زیست باقی بمانند و تأثیرات مخربی روی اکوسیستم‌های آبی داشته باشند (۴۲). بلعیده شدن توسط جانداران: برخی از میکروپلاستیک‌ها ممکن است توسط جانداران آبی مثل ماهی‌ها و حیوانات دریایی بلعیده شوند. این امر می‌تواند به تأثیرات منفی بر روی سلامت این جانداران و در نتیجه بر زنجیره غذایی انسان‌ها منجر شود (۴۳،۴۴). تجمع در لجن: میکروپلاستیک‌ها در فرآیند تصفیه آب به لجن تصفیه‌خانه آب آشامیدنی رسیده و در آن تجمع می‌یابند. اگر لجن تصفیه شده به‌عنوان کود کشاورزی یا در صنایع دیگر استفاده شود، ممکن است میکروپلاستیک‌ها به زمین وارد شده و در محیط خاک تجمع یابند (۲۲،۲۱). رها شدن در زمین: در صورتی که لجن تصفیه شده به‌صورت پسماند به زمین برگردانده شود، ممکن است میکروپلاستیک‌ها در خاک تجمع یابند و به‌عنوان یک آلاینده در محیط خاکی عمل کنند (۴۴). تأثیر بر سلامت انسان: در صورتی که میکروپلاستیک‌ها به آب آشامیدنی وارد شوند، ممکن است به‌عنوان یک منبع آلاینده برای انسان‌ها عمل کنند و تأثیرات مخربی بر روی سلامت انسان‌ها داشته باشند، اگرچه تأثیرات دقیق آن‌ها هنوز به‌طور کامل درک نشده

است (۴۵). با توجه به این موارد، مدیریت صحیح میکروپلاستیک‌ها در فرآیندهای تصفیه آب و مدیریت لجن می‌تواند بسیار کمک دهنده باشد.

مدیریت ورود میکروپلاستیک‌ها به آب

این روش‌ها می‌توانند در کاهش میزان میکروپلاستیک‌ها در آب مؤثر باشند و به حفظ سلامت محیط زیست کمک کنند که می‌توان به، نظارت دقیق بر تخلیه فاضلاب حاوی میکروپلاستیک و بهبود یا توسعه تجهیزات جهت حذف میکروپلاستیک‌ها در آب آشامیدنی مانند فناوری‌های نانو یا حرارتی، تصفیه پیشرفته و فیلتراسیون مکانیکی، کاهش مصرف پلاستیک و جایگزین‌های غیر پلاستیکی مانند استفاده از مواد قابل تجزیه شدن بیش‌تر مانند نشاسته، سلولز و لیگنین برای تولید پلاستیک و تدوین سیاست و مقررات برای کنترل منابع آلودگی میکروپلاستیک و افزایش فهم عمومی در مورد میکروپلاستیک‌ها، اشاره کرد. به‌طور کلی، استراتژی‌های مدیریت میکروپلاستیک در آب سبب بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها و حفظ محیط زیست می‌گردد.

این مطالعه، مروری بر بررسی میکروپلاستیک‌ها در آب و لجن تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی می‌باشد و نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که میکروپلاستیک‌ها در هر دو منبع آب و لجن تصفیه‌خانه‌های آب حضور

دارند و مقدار آن در لجن بیش‌تر است. فراوان‌ترین نوع میکروپلاستیک‌های شناسایی شده نیز پلی‌اتیلن تترافتالات، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌آمید، پلی‌استر و پلی‌استایرن با دو شکل قطعه و فیبر بوده است. بنابراین، برای جلوگیری از اثرات زیست محیطی مخرب میکروپلاستیک، لازم است که لجن حاصل از تصفیه‌خانه آب قبل از ورود به محیط زیست تصفیه شود و هم‌چنین روش‌های حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های آب نیز مورد بررسی بیش‌تر قرار گیرد، علاوه بر این مشخص شد واحدهای انعقاد و لخته سازی و فیلتراسیون تا ۹۹ درصد کارایی حذف را دارا هستند. این اقدامات می‌تواند به کاهش آلودگی محیط زیست و حفظ سلامت انسان‌ها کمک کند. هم‌چنین با توجه به حضور میکروپلاستیک در آب ورودی به تصفیه‌خانه لازم است محصولات حاصل از تجزیه میکروپلاستیک نظیر نانوپلاستیک‌ها و پلیمرهای مرتبط مورد بررسی قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران جهت حمایت از این طرح با کد اخلاق IR.MAZUMS.1402.122 تقدیر و تشکر می‌نمایند.

References

1. Cydzik-Kwiatkowska A, Milojevic N, Jachimowicz P. The fate of microplastic in sludge management systems. *Science of the Total Environment* 2022;848:157466.
2. Shen M, Song B, Zhu Y, Zeng G, Zhang Y, Yang Y, et al. Removal of microplastics via drinking water treatment: current knowledge and future directions. *Chemosphere* 2020; 251: 126612.
3. Ben-David EA, Habibi M, Haddad E, Hasanin M, Angel DL, Booth AM, Sabbah I. Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence and microplastics. *Iran J Health Environ* 2022; 15(1): 169-180.
4. Zazouli M, Nejati H, Hashempour Y, Dehbandi R, Fakhri Y. Occurrence of microplastics (MPs) in the gastrointestinal tract of fishes: A global systematic review and meta-analysis and meta-regression. *Sci Total Environ* 2022; 815: 152743.

5. Uogintė I, Pleskytė S, Pauraitė J, Lujanienė G. Seasonal variation and complex analysis of microplastic distribution in different WWTP treatment stages in Lithuania. *Environ Monit Assess* 2022; 194(11): 829.
6. Razzak SA, Faruque MO, Alsheikh Z, Alsheikhmohamad L, Alkuroud D, Alfayez A, et al. A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater. *Environmental Advances* 2022; 7: 100168.
7. Hashempour Y, Jabari A, Fendereski A. Introducing Statistical Methods to Identify the Sources of Microplastics in the Aquatic Environment: An Overview. *Journal of Health Research in Community*. 2024; 9(4): 111-120.
8. Eriksen M, Mason S, Wilson S, Box C, Zellers A, Edwards W, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Mar Pollut Bull* 2013; 77(1-2): 177-182.
9. Sharifi H, Movahedian Attar H. A review of microplastics measuring methods in water and wastewater bodies. *Iranian Journal of Health and Environment* 2021; 14(1): 173-190.
10. Hajji S, Ben-Haddad M, Abelouah MR, De-la-Torre GE, Alla AA. Sludge drying and dewatering processes influence the abundance and characteristics of microplastics in wastewater treatment plants. *Chemosphere* 2023; 339: 139743.
11. Brennecke D, Duarte B, Paiva F, Caçador I, Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2016; 178: 189-195.
12. Tabatabaei F, Mafigholami R, Moghimi H, Khoramipour S. Evaluation of the performance of Tehran drinking water treatment plants in removing nanoplastics and microplastics. *Iran J Health Environ* 2022; 15(1): 169-180.
13. Dronjak L, Exposito N, Rovira J, Florencio K, Emiliano P, Corzo B, et al. Screening of microplastics in water and sludge lines of a drinking water treatment plant in Catalonia, Spain. *Water Research* 2022; 225: 119185.
14. Salari M, Khorasani M. Investigation of microplastics as emerging contaminants in sources and health effects on humans, review study. *J Environ Res Technol* 2022; 7(11): 13-26.
15. Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE. Human consumption of microplastics. *Environ Sci Technol* 2019; 53(12): 7068-7074.
16. Almainan L, Aljomah A, Bineid M, Aljeldah FM, Aldawsari F, Liebmann B, et al. The occurrence and dietary intake related to the presence of microplastics in drinking water in Saudi Arabia. *Environ Monit Assess* 2021; 193(7): 390.
17. Kankanige D, Babel S. Contamination by ≥ 6.5 μm -sized microplastics and their removability in a conventional water treatment plant (WTP) in Thailand. *Journal of Water Process Engineering* 2021; 40: 101765.
18. Zhou G, Wu Q, Wei X-F, Chen C, Ma J, Crittenden JC, Liu B. Tracing microplastics in rural drinking water in Chongqing, China: Their presence and pathways from source to tap. *J Hazardous Mater* 2023; 459: 132206.
19. Siegel H, Fischer F, Lenz R, Fischer D, Jekel M, Labrenz M. Identification and quantification of microplastic particles in drinking water treatment sludge as an integrative approach to determine microplastic abundance in a freshwater river. *Environmental Pollution* 2021; 286: 117524.
20. Feizi F, Hamidian AH, Akhbarizadeh R, Jonoobi M. Study on presence of microplastic pollution in the wastewater treatment plant of

- district 22 of Tehran. *Journal of Natural Environment* 2022; 75(1): 1-6 (Persian).
21. Tang KHD, Hadibarata T. Microplastics removal through water treatment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management. *Environmental Challenges* 2021; 5: 100264.
22. Dronjak L, Exposito N, Sierra J, Schuhmacher M, Florencio K, Corzo B, Rovira J. Tracing the fate of microplastic in wastewater treatment plant: A multi-stage analysis of treatment units and sludge. *Environ Pollut* 2023; 333: 122072.
23. Edgecock T, Siwek M, Chmielewski A, Rafalski A, Walo MW, Sudlitz M, et al. The Potential of Electron Beams for the Removal of Microplastics from Wastewater and Sewage Sludge 2023; 13(9): 100760.
24. Pivokonsky M, Cermakova L, Novotna K, Peer P, Cajthaml T, Janda V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment* 2018; 643: 1644-1651.
25. Mintenig SM, Löder MG, Primpke S, Gerdts G. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Sci Total Environ* 2019; 648: 631-635.
26. Pivokonský M, Pivokonská L, Novotná K, Čermáková L, Klimtová M. Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment. *Science of the Total Environment* 2020; 741: 140236.
27. Zhang Y, Diehl A, Lewandowski A, Gopalakrishnan K, Baker T. Removal efficiency of micro-and nanoplastics (180 nm–125 µm) during drinking water treatment. *Science of The Total Environment* 2020; 720: 137383.
28. Wang Z, Lin T, Chen W. Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of the Total Environment* 2020; 700: 134520.
29. Sarkar DJ, Sarkar SD, Das BK, Praharaj JK, Mahajan DK, Purokait B, et al. Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with pulse clarifier. *Journal of Hazardous Materials* 2021; 413: 125347.
30. Velasco AN, Gentile SR, Zimmermann S, Le Coustumer P, Stoll S. Contamination and removal efficiency of microplastics and synthetic fibres in a conventional drinking water treatment plant in Geneva, Switzerland. *Science of The Total Environment* 2023; 880: 163270.
31. Han Z, Jiang J, Xia J, Yan C, Cui C. Occurrence and fate of microplastics from a water source to two different drinking water treatment plants in a megacity in eastern China. *Environmental Pollution* 2024; 346: 123546.
32. Johnson AC, Ball H, Cross R, Horton AA, Jürgens MD, Read DS, et al. Identification and quantification of microplastics in potable water and their sources within water treatment works in England and Wales. *Environ Sci Technol* 2020; 54(19): 12326-12334.
33. Yousefvand F, Bayat R. Investigation of Functional Units and Method of Construction of Water Treatment Plants. *Human & Environment* 2022; 20(2): 85-95.
34. Bäuerlein PS, Hofman-Caris RC, Pieke EN, Ter Laak TL. Fate of microplastics in the drinking water production. *Water Research* 2022; 221: 118790.
35. Zhou G, Wang Q, Li J, Li Q, Xu H, Ye Q, et al. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl₃ coagulation: Performance and mechanism. *Science of the Total Environment* 2021; 752:

- 141837.
36. Tang W, Li H, Fei L, Wei B, Zhou T, Zhang H. The removal of microplastics from water by coagulation: A comprehensive review. *Science of The Total Environment* 2022; 851: 158224.
 37. Miranda Zoppas F, Sacco N, Soffietti J, Devard A, Akhter F, Marchesini FA. Catalytic approaches for the removal of microplastics from water: Recent advances and future opportunities. *Chemical Engineering Journal Advances* 2023; 16: 100529.
 38. Hidayaturrahman H, Lee T-G. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process. *Marine Pollution Bulletin* 2019; 146: 696-702.
 39. Fox S, Stefánsson H, Peternell M, Zlotskiy E, Ásbjörnsson EJ, Sturkell E, et al. Physical characteristics of microplastic particles and potential for global atmospheric transport: A meta-analysis. *Environmental Pollution* 2024; 342: 122938.
 40. Fox S, Stefánsson H, Ásbjörnsson EJ, Peternell M, Wanner P, Sturkell E, et al. Physical characteristics of microplastic particles and potential for global atmospheric transport: A meta-analysis. *Environmental Pollution* 2024; 342: 122938.
 41. Blackburn K, Green D. The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio* 2022; 51(3): 518-530.
 42. Jiang Y, Yang F, Kazmi SSUH, Zhao Y, Chen M, Wang J. A review of microplastic pollution in seawater, sediments and organisms of the Chinese coastal and marginal seas. *Chemosphere* 2022; 286: 131677.
 43. Issac MN, Kandasubramanian B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research* 2021; 28: 19544-19562.
 44. Braun M, Mail M, Krupp AE, Amelung W. Microplastic contamination of soil: Are input pathways by compost overridden by littering? *Sci Total Environ* 2023; 855: 158889.
 45. Kouhi K, Abbasi Tajadod A, Hashempour Y. An Overview of the Potential Impact of Nano and Microplastics on the Health of Sensitive Groups, Especially Children: A Narrative Review. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2023; 33(227): 187-201 (Persian).