نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۹، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۷۵۱ تا ۳۷۶۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.18097.6766

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مسیری برای ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط زیست: بررسی لجن و پساب تصفیه‌خانه فاضلاب ساری

سمیه سادات علویان پطرودی، سید حسین هاشمی*

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

خلاصه: مشکلات ناشی از حضور گسترده میکروپلاستیک ها در محیط زیست و منابع انتشار آن‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است. در این میان، تصفیه‌خانه های فاضلاب شهری به عنوان یکی از منابع انتشار آن‌ها شناخته شده اند. در این پژوهش میکروپلاستیک‌ها در لجن و پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری، به عنوان یکی از منابع انتشار میکروپلاستیک ها به رودخانه تجن و دریای خزر و زمین های کشاورزی بررسی شد. نمونه‌برداری از لجن و پساب خروجی در سه تکرار در اردیبهشت و خرداد ۱۳۹۷ انجام شد. نمونه‌های پساب از الک‌های استیل ۵۰۰، ۳۰۰ و ۳۷ میکرومتر گذرانده و سپس مواد آلی موجود در آن‌ها و نمونه‌های لجن با پراکسید هیدروژن هضم و میکروپلاستیک‌ها به‌روش جداسازی مبتنی بر چگالی با نمک سدیم یدید استخراج و توسط استریومیکروسکوپ و طیف سنج میکروامان بررسی شدند. میانگین تعداد میکروپلاستیک‌ها بر مترمکعب پساب ۴۲۳/۴ به دست آمد که بیش از ۷۷٪ آن‌ها فیبر و اندازه ۳۰۰-۳۷ میکرومتر فراوان‌ترین طول بود. هم‌چنین ۱۲۸/۸ میکروپلاستیک بر گرم وزن خشک لجن یافت شد که نوع غالب آن‌ها فیبر با فراوانی ۸۷/۵٪ بود. بررسی ساختار میکروپلاستیک ها نشان داد که نوع غالب برای فیبرها پلی استر (پساب ۴۰٪ و لجن ۵۹٪) و برای ذرات پلی‌اتیلن (پساب ۷۳٪ و لجن ۶۸٪) بود که بیش‌تر ناشی از فاضلاب شست و شوی منسوجات و میکروبیدهای مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی می باشند. بدین ترتیب با توجه به میزان میکروپلاستیک های موجود در پساب و لجن، انجام پژوهش‌های بیش‌تر بر روی میزان میکروپلاستیک های رهاسازی شده توسط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و سایر منابع احتمالی انتشار و سهم آن‌ها در آلودگی میکروپلاستیکی در منابع آب و خاک ضروری می باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

کلمات کلیدی:
میکروپلاستیک
پساب
لجن
تصفیه‌خانه فاضلاب
مازندران

۱- مقدمه

پلاستیک یک اصطلاح رایج برای خانواده گسترده‌ای از مواد آلی با وزن مولکولی نسبتا بالا است [۱]. تقاضا برای پلاستیک‌ها در جهان در سال ۲۰۱۵ معادل ۳۲۲ میلیون تن بوده است و پیش‌بینی می‌شود رشد مصرف آن‌ها در آینده ادامه داشته باشد [۲]. در حالی که مزایای استفاده از پلاستیک گسترده می‌باشد [۳]، در سال‌های اخیر نگرانی‌های زیادی در مورد بقایای آن‌ها در محیط به ویژه خرده پلاستیک‌ها در محیط زیست ایجاد شده است. در این میان، اصطلاح "میکروپلاستیک[1]" توسط پژوهشگران برای خرده پلاستیک‌های با اندازه کم‌تر از ۵ میلی‌متر تعریف شده است [۴].

میکروپلاستیک‌ها یک آلودگی انسانی نوآیند هستند که در محیط‌های مختلف آبی، رسوبات و موجودات زنده [۶ و ۵] شناسایی شده‌اند. میکروپلاستیک‌ها به دلیل پتانسیل ایجاد صدمه فیزیکی و شیمیایی در انواع آبزیان، از زئوپلانکتون‌ها تا پستانداران [۷]، از طریق انسداد دستگاه گوارش و امکان انتقال آلودگی‌های آلی به بدن موجودات [۹ و ۸] به عنوان یک نگرانی محیط زیستی و هم‌چنین یک تهدید بالقوه برای سلامتی انسان به ویژه از طریق خوردن غذاهای دریایی آلوده [۱۰-۷] مطرح هستند.

با وجود تلاش‌های اخیر برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی سراسر جهان، شناسایی منابع مختلف انتشار آن‌ها یک موضوع چالش برانگیز است [۱۱]. در این میان، یکی از منابع مهم انتشار آن‌ها به محیط‌های آبی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناخته شده‌اند که مقدار زیادی الیاف و ذرات پلاستیکی را از طریق پساب وارد محیط میکنند [۱۵-۱۲]. با وجود غلظت کم میکروپلاستیک‌ها در پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، ضیاجهرمی و همکاران[2] (۲۰۱۷) دبی بالای پساب را دلیل مقدار زیاد میکروپلاستیک‌های رهاسازی شده توسط تصفیه‌خانه‌های فاضلاب دانسته‌اند [۱۶]. هم چنین برخی پژوهشگران دریافتند که بیش‌تر میکروپلاستیک‌ها، در لجن حاصل از تصفیه فاضلاب باقی می‌مانند [۱۸ و ۱۷]. هر چند لجن حاصل از تصفیه فاضلاب شهری حاوی مواد مغذی آلی و معدنی مفید برای گیاهان است

1 Microplastic (MP)

2 Ziajahromi

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h_hashemi@sbu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

و می‌تواند در کشاورزی جایگزین کودهای شیمیایی شود، اما ممکن است آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها را وارد خاک و پس از آن توسط باد و یا رواناب‌ها، وارد محیط‌های آبی کند. بنابراین، بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن بسیار مورد توجه است [۱۹].

با توجه به اهمیت میکروپلاستیک‌ها در محیط زیست و نقش آن‌ها در جذب آلاینده‌ها و ورود به زنجیره غذایی جانداران، تاکنون چند مطالعه در زمینه شناسایی و بررسی آن‌ها در رسوبات ساحلی خلیج فارس (جزیره خارک، هرمزگان، تنگه هرمز، بندر عباس، خلیج فارس) در جنوب ایران [۲۴-۲۰]، مناطق شهری و صنعتی بوشهر، تهران، عسلویه [۲۷-۲۵]، رسوبات ناشی از فرسایش بادی در محیط‌های بیابانی استان فارس (شیراز، آباده، اقلید، جم) [۲۸] و هم‌چنین صدف‌های دریایی، بافت ماهی و میگو (در بخش شمالی خلیج فارس، استان هرمزگان)، خور موسی، جزیره خارک، آبزیان خلیج فارس، ماهیان صید شده از خلیج فارس و دریای خزر)، سواحل جنوبی دریای خزر (گمیشان، بابلسر، محمود آباد، تنکابن، چمخاله، بندرانزلی) [۳۴-۲۹] پرداخته‌اند. در این میان، مهدینیا[1] و همکاران که میکروپلاستیک‌های موجود در رسوبات دریای خزر را بررسی و مقادیر زیادی میکروپلاستیک در نزدیکی دهانه رودخانه های دائمی منتهی به این دریا یافتند، بررسی منابع احتمالی انتشار آن‌ها در دریای خزر، از جمله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را ضروری دانسته‌اند [۵].

با وجود پژوهش‌های انجام شده بر روی میکروپلاستیک‌ها در ایران، تاکنون مطالعه‌ای بر روی لجن و پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، به عنوان یکی از منابع انتشار میکروپلاستیک‌ها به محیط انجام نشده است. از این‌رو، در این مقاله به بررسی میکروپلاستیک‌ها در لجن و پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب ساری، به عنوان یکی از منابع نقطه‌ای انتشار میکروپلاستیک‌ها به رودخانه تجن، دریای خزر و زمین‌های کشاورزی، پرداخته شده است.

۲- مواد و روش

این مطالعه در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ساری، مرکز استان مازندران واقع در شمال ایران و جنوب دریای خزر انجام شد. به هنگام انجام پژوهش، ظرفیت تصفیه‌خانه ۲۲۰۰۰ مترمکعب بر روز و جمعیت تحت پوشش آن ۱۰۵۸۰۰ نفر بود و فاضلاب دریافتی را پس از تصفیه به رودخانه تجن تخلیه می‌کرد. هم چنین، این تصفیه‌خانه به طور متوسط روزانه ۱۴ تن لجن تولید می‌کرد که پیش از دفع نهایی در محل تصفیه‌خانه ذخیره و بخشی از آن برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شد. فرایند تصفیه فاضلاب، لجن فعال متعارف و واحدهای اصلی آن شامل آشغال‌گیر، دانه‌گیر با هوادهی، اندازه‌گیری دبی، ته‌نشینی اولیه، حوض آنوکسیک، حوض هوادهی، ته‌نشینی ثانویه و گندزدایی و واحدهای تصفیه لجن شامل تغلیظ لجن، هاضم هوازی و آبگیری مکانیکی می‌باشد.

۲- ۱- نمونه‌برداری

نمونه‌برداری در اردیبهشت و خرداد ۱۳۹۷ از پساب و لجن انجام شد. از آنجا که روش استانداردی برای نمونه‌برداری از میکروپلاستیک‌ها وجود ندارد، بدین منظور از روش پیشنهادی ضیاجهرمی و تالویتی[2] [۱۶-۳۵] با اندکی تغییرات جهت نمونه برداری از پساب و لجن استفاده شد. با توجه به غلظت کم میکروپلاستیک ها و توزیع زمانی ناهمگن آن‌ها در پساب، به منظور تهیه نمونه معرف، نمونه‌برداری از پساب به‌صورت مرکب ۲۴ ساعته [۳۶] و در سه تکرار در ۳ روز متوالی انجام و در هر تکرار ۲۷۰ لیتر پساب از خروجی واحد زلال‌ساز (پساب نهایی) برداشت شد. نمونه‌ها، در محل به صورت ثقلی از الک‌های استیل ۵۰۰، ۳۰۰ و ۳۷ میکرومتر عبور داده شدند و ذرات باقی‌مانده بر روی الک‌ها با ml ۱۰۰۰ آب مقطر شست و شو و درون بطری‌های تمیز ریخته شدند [۱۶].

نمونه‌های لجن، در سه تکرار، پس از مرحله آبگیری مکانیکی با بیلچه برداشت و به طور کامل مخلوط و در ظروف شیشه‌ای که پیش‌تر به طور کامل شسته و خشک شده بودند، قرار گرفتند و درب آن‌ها با فویل‌های آلومینیومی تمیز پوشیده شد. همه نمونه‌ها پساب و لجن، در تاریکی در دمای ۴ درجه سلسیوس، به منظور انتقال به آزمایشگاه جهت بررسی‌های بعدی، ذخیره شدند [۳۵].

۲- ۲- روش استخراج

ابتدا نمونه پساب از بطری به بشر تمیز منتقل و در آون در دمای $70\ C^\circ$ قرار گرفت تا حجم نمونه به ml ۱۰۰ کاهش یابد. سپس، با افزودن محلول پراکسید هیدروژن ۳۰٪ به نمونه و هم زدن آن در دمای $60\ C^\circ$ مواد آلی هضم شد. پس از هضم کامل مواد آلی، نمونه بر روی هیتر تا تبخیر کامل آب و پراکسید هیدروژن باقی ماند. در مرحله بعد، از روش جداسازی مبتنی بر اختلاف چگالی با استفاده از محلول یدید سدیم با چگالی $1/75\ g/cm^3$

1 Mehdinia

2 Talvitie

جدول ۱. میانگین تعداد میکروپلاستیک‌ها، میکروفیبرها و میکروذرات (۳±SE, n = ۳) در لجن آبگیری شده و پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب ساری

Table 1. The mean number of microplastics, microfibers and microparticles (SE, n=3) in the dewatered sludge and effluent of Sari wastewater treatment plant

	میکرو پلاستیک‌ها $\bar{N} \pm SE$	میکروفیبرها $\bar{N} \pm SE$	میکروذرات $\bar{N} \pm SE$
پساب (تعداد برمترمکعب)	۴۲۳/۴۴±۴/۹	۳۲۸/۳۳±۴/۴	۹۵/۱۲±۱/۲
لجن (تعداد بر گرم وزن خشک)	۱۲۸/۱۶±۸/۷	۱۱۲/۱۵±۷/۳	۱۶/۱±۱/۹

برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها از مواد معدنی موجود در نمونه استفاده شد. بدین‌منظور ml ۱۵ محلول یدید سدیم به نمونه خشک شده، اضافه شد تا پلیمرها در آن شناور شوند. سپس محلول نمک حاوی ذرات در لوله‌های سانتریفیوژ ریخته شد و نمونه به مدت ۳۰ دقیقه با دور rpm ۴۰۰۰ سانتریفیوژ و ذرات شناور در سوپرناتانت از صافی استیل µm ۳۷ با قطر cm ۵ با کمک پمپ خلا عبور داده و نمک اضافی با آب مقطر شسته شد [۳۷ و ۱۶ و ۱۱ و ۹].

نمونه لجن با افزودن محلول ۳۰ درصد پراکسید هیدروژن تا زمانی که ۳٪ حجم نمونه را تشکیل دهد و به دنبال آن هم زدن و گرم کردن نمونه تا C° ۷۰ انجام شد. پس از آن نمونه به مدت پنج ساعت در دمای C° ۷۰ نگهداری و این مرحله تا دستیابی به یک نمونه شفاف تکرار شد [۱۹]. سپس مشابه پساب، از روش مبتنی بر اختلاف چگالی برای جداسازی ذرات میکروپلاستیک استفاده شد.

۲- ۳- شناسایی میکروپلاستیک‌های مشکوک

برای شناسایی میکروپلاستیک‌های مشکوک از روش رنگ‌آمیزی با محلول رز بنگال (۴،۵،۶،۷-تترا کلرو-۲، ۴ ', ۵،۷'-تترایودوفلورسین) استفاده شد. در این روش ذرات طبیعی مانند الیاف پنبه که از نظر ظاهری مشابه الیاف پلاستیکی هستند، رنگ‌آمیزی و جداسازی چشمی ممکن می‌شود. بدین منظور، صافی حاوی میکروپلاستیک های مشکوک با ۵ میلی‌لیتر محلول رز بنگال ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر در مدت ۵ دقیقه در دمای اتاق رنگ‌آمیزی شد. سپس برای زدودن رنگ اضافی، صافی با استفاده از آب مقطر و با کمک دستگاه صافی خلا شست و شو شد. پس از آن، صافی به مدت ۱۵ دقیقه در آون در دمای $60^{\circ}C$ خشک و برای بررسی توسط استریومیکروسکوپ و طیف‌سنج میکروارامان ذخیره شد [۳۸-۱۶].

برای کاهش احتمال آلودگی نمونه‌ها، پردازش آن‌ها زیر هود انجام و تمام ظروف با فویل آلومینیوم پوشانده شدند [۳۹]. علاوه بر این، بررسی نمونه‌های شاهد، جهت تعیین هر گونه آلودگی احتمالی میکروپلاستیکی ورودی به نمونه‌ها ناشی از شرایط آزمایشگاه، هیچ‌گونه آلودگی نشان نداد.

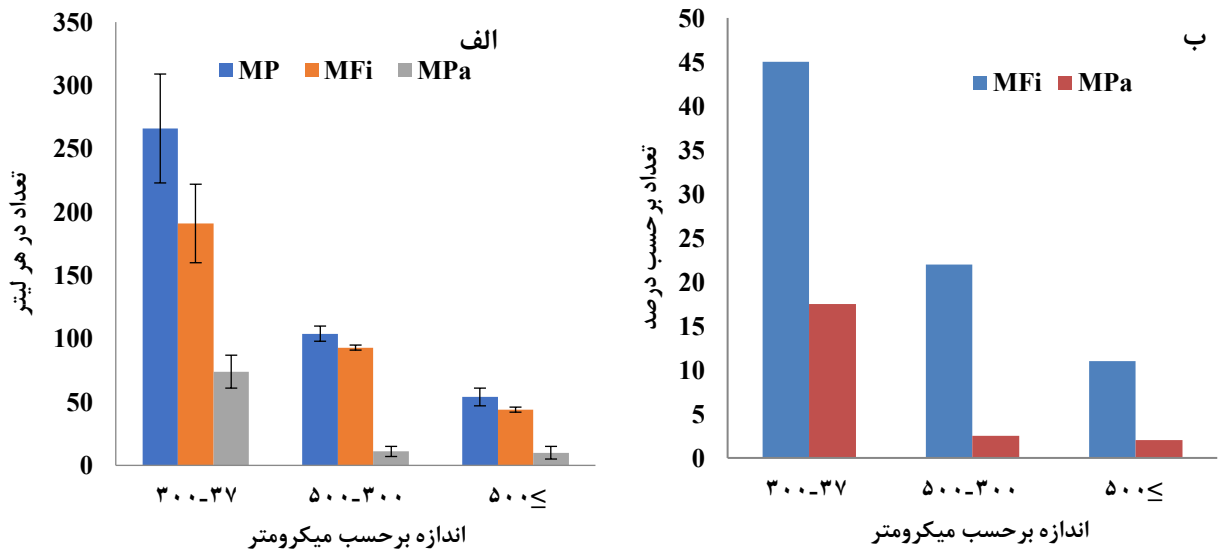
۲- ۴- مورفولوژی میکروپلاستیک‌ها

صافی حاوی نمونه‌های میکروپلاستیک‌ها استخراجی از مرحله خالص‌سازی، توسط استریومیکروسکوپ دو چشمی مجهز به دوربین (KERN stereo microscope OZL-۴۵, KECAM ۱۰ MP camera) بررسی و میکروپلاستیک‌ها شامل فیبرها (دارای طول بیش‌تر از قطر و ضخامت تقریبا یکسان در طول) و ذرات (کروی یا بی‌شکل و گاهی متخلخل) توسط سوزن جدا و تعداد آن‌ها ثبت شد. ساختار میکروپلاستیک‌های استخراجی با استفاده از طیف‌سنج میکروارامان (Confocal Raman microscope, LabRAM HR Evolution - HORIBA) بررسی و به منظور تعیین نوع آن‌ها، طیف‌های به دست آمده با طیف‌های مرجع مقایسه شدند. برای بررسی تفاوت در تعداد فیبرها و ذرات در نمونه ها از آزمون آماری Independent-Sample T-Test و نرم افزارSPSS ویرایش ۱۶ استفاده شد

۳- نتایج

۳- ۱- تعداد میکروپلاستیک ها در پساب و لجن

به طور متوسط ۴۲۳/۴ و ۱۲۸/۸میکروپلاستیک به ترتیب در هر مترمکعب پساب و هر گرم وزن خشک لجن آبگیری شده یافت شد. هم‌چنین حدود ۷۷٪ میکروپلاستیک‌های یافت شده در پساب ، و بیش از ۸۷٪ آن‌ها در لجن میکروفیبر بود (جدول ۱).



شکل ۱. (الف) تعداد و (ب) درصد میکروفیبرها و میکروذرات تشکیل دهنده میکروپلاستیک‌ها بر حسب اندازه در پساب

Fig. 1. (A) The number and (B) the percentage of microfibers (MFi) and microparticles (MPa) in the effluent based on the size

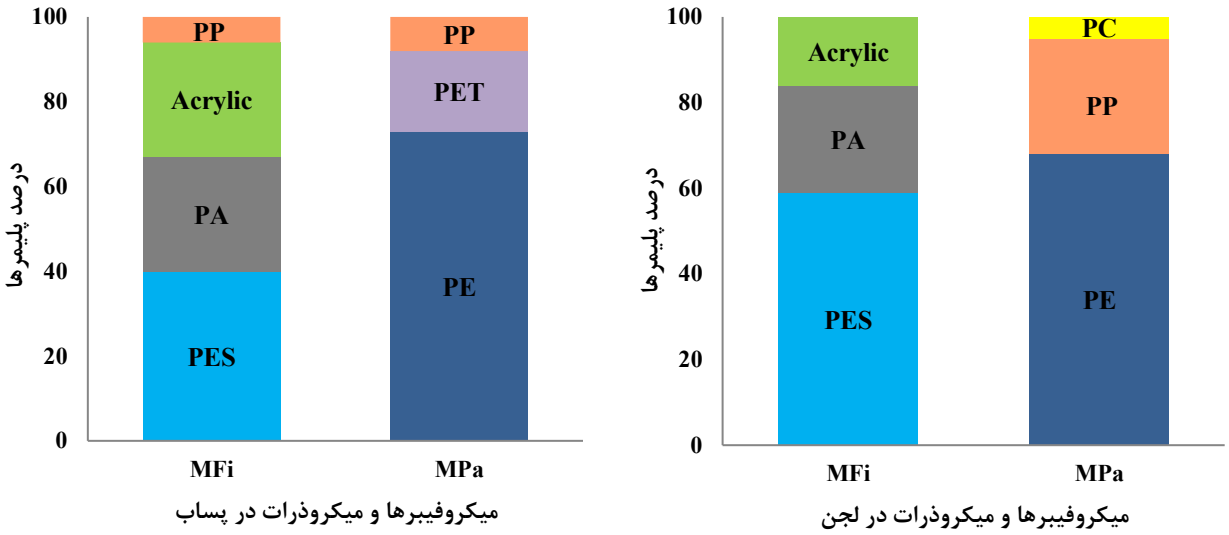
متوسط تعداد میکروپلاستیک‌ها با اندازه ۳۰۰-۳۷ میکرومتر به طور قابل توجهی بیش از دو گروه دیگر در پساب بود، و آزمون T مستقل نشان داد که تعداد میکروپلاستیک‌ها در سه اندازه ۳۰۰-۳۷، ۵۰۰-۳۰۰ و ۵۰۰≤ میکرومتر تفاوت معناداری با یکدیگر دارند ($T=3/7-5/7$، $p<0/05$). هم‌چنین تعداد میکروفیبرها در هر سه اندازه به طور قابل توجهی متفاوت بود ($T=3/2-16/8$، $p<0/05$) و تعداد آن‌ها در اندازه ۳۰۰-۳۷ میکرومتر به طور قابل توجهی بیش از دو گروه دیگر بود، به طوری که میکروفیبرهای کم‌تر از ۳۰۰ میکرومتر ۴۵٪ کل میکروپلاستیک‌های موجود در پساب را در بر می‌گرفتند (شکل ۱-الف و ب) که بیانگر اهمیت میکروفیبرها[1] در پساب خروجی است. در میان میکروذرات[2]، اندازه ۳۰۰-۳۷ میکرومتر در مقایسه با ذرات با اندازه بزرگ‌تر ($T=4/3-4/4$، $p<0/05$) به طور قابل توجهی فراوان‌تر بود، اما تفاوت معناداری در فراوانی دو اندازه بزرگ‌تر وجود نداشت ($T=0/2$، $p>0/05$). هم‌چنین تعداد میکروفیبرها و میکروذرات موجود در هر گرم لجن خشک اختلاف معناداری با یکدیگر نشان دادند ($T=-6/3$، $p<0/05$) و بیانگر از فراوانی فیبرها نسبت به ذرات در لجن بود.

1 Microfiber (MFi)
2 Microparticle (MPa)

بررسی نوع پلیمرها با استفاده از طیف‌سنج میکروارمان نشان‌دهنده وجود ۶ نوع پلیمر در پساب بود. پلی استر[3] با ۳۲٪ میکروپلاستیک غالب بود و پس از آن اکریلیک[4]، پلی آمید (نایلون)[5]، پلی‌اتیلن[6]، پلی‌اتیلن تری فتالات[7] و پلی‌پروپیلن[8] به ترتیب ۲۱، ۲۱، ۲۰، ۴ و ۲ درصد از میکروپلاستیک‌های موجود در پساب را به خود اختصاص دادند. پلی استر با سهم ۴۰٪، نوع غالب برای فیبرها و پلی‌اتیلن (۷۳٪) نوع غالب برای ذرات شناسایی شد. در مجموع شش نوع پلیمر شامل پلی‌اتیلن، پلی‌آمید، پلی‌کربنات[9]، پلی‌استر، پلی‌پروپیلن و آکریلیک در لجن یافت شد که نوع غالب برای فیبرها پلی‌استر (۵۹٪) و برای ذرات پلی‌اتیلن (۶۸٪) تشخیص داده شد (شکل ۲).

هم‌چنین، بررسی فیبرهای مشکوک صورتی رنگ موجود در پساب و لجن با استفاده از طیف‌سنج میکروارمان نشان داد که این الیاف مواد آلی طبیعی می‌باشند که به علت استفاده از رزبنگال به رنگ صورتی درآمده‌اند.

3 PES
4 Acrylic
5 PA
6 PE
7 PET
8 PP
9 PC



شکل ۲. درصد پلیمرهای تشکیل‌دهنده میکروفیبرها و میکروذرات در پساب و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب ساری

Fig. 2. Percentage of polymers forming the microfibers (MFi) and the microparticles (MPa) in the effluent and sludge of Sari wastewater treatment plant

جدول ۲. سرانه و تعداد کل میکروپلاستیک‌های رهاسازی شده توسط تصفیه‌خانه فاضلاب ساری

Table 2. The per capita and total number of microplastics released by Sari wastewater treatment plant

	پساب	لجن
میکروفیبر در روز	۷۳۵۳۸۱±۷۲۲۴۶۵۳/۸	۲۴۱۷۳۹۵۱۴/۳۲۷۸۸۰۵۸±۳/۶
میکرو ذره در روز	۲۶۷۴۹۶±۲۰۹۱۳۹۳/۷	۳۴۶۱۳۶۸۶/۴۱۴۶۸۱۱±۵/۹
میکرو پلاستیک در روز	۹۸۸۳۱۳±۹۳۱۶۰۴۷/۲	۲۷۶۳۵۳۲۰۰/۳۵۸۵۹۳۱۹±۹/۸
سرانه میکرو فیبر (تعداد بر نفر بر روز)	۶۸/۶±۳/۹	۲۲۸۴/۳۰۹±۹/۹
سرانه میکرو ذره (تعداد بر نفر بر روز)	۱۹/۲±۸/۵	۳۲۷/۳۹±۲/۲
سرانه میکرو پلاستیک (تعداد بر نفر بر روز)	۸۸/۹±۱/۳	۳۳۸±۲۶۱۲/۹

۳- ۲- سرانه میکروپلاستیک‌های موجود در پساب و لجن

به منظور برآورد بار آلودگی میکروپلاستیک‌های خروجی از طریق پساب و لجن از تصفیه‌خانه فاضلاب ساری، سرانه و تعداد کل مقادیر رهاسازی شده در یک روز توسط این تصفیه‌خانه برآورد شد (جدول ۲).

۴- بحث

نتایج به دست آمده نشان داد که میلیون ها میکروپلاستیک می‌تواند از طریق پساب و لجن تصفیه خانه فاضلاب که برای اهداف مختلف از جمله آبیاری و حاصلخیزی خاک استفاده میشوند، وارد اکوسیستم های آبی و

جدول ۳. مقایسه حضور میکروپلاستیک‌ها (MPs) در پساب و لجن تصفیه فاضلاب در پژوهش حاضر و سایر پژوهش‌ها

Table 3. Comparison of the presence of microplastics (MPs) in the effluent and sludge of waste-water treatment plants in the present study and other studies

کشور	نوع نمونه	تخلیه MPs/m^3 or g (d.w.)	کوچک‌ترین اندازه صافی	جمعیت تحت پوشش	رفرنس
ایران	پساب ثانویه لجن	۴۲۳/۴۴±۴/۹ ۱۲۸/۱۶±۸/۷	۳۷	۱۰۵۸۰۰	**مطالعه حاضر**
فنلاند	پساب ثانویه	۱۴۳۰	۲۰	۸۰۰۰۰۰	**Talvitie et al. (2017) [35]**
چین	پساب ثانویه لجن نهایی	۷۰۰۰±۲۸۴۰۰ ۳۱±۲۴۰	۴۷(۲۰*) ۲۰	--	**Liu et al. (2019) [41]**
ایتالیا	پساب فیلتراسون تکمیلی (شن و ماسه)	۱۰۰±۴۰۰	۶۳(۱۰*)	۱۲۰۰۰۰۰	**Magni et al. (2019) [14]**
کانادا	پساب ثانویه	۲۰۰±۵۰۰	۱/۶۳	۱۳۰۰۰۰۰	**Gies et al. (2018) [42]**
اسکاتلند	پساب ثانویه	۴۰±۲۵۰	۶۵	۶۵۰۰۰۰	**Murphy et al. (2016) [12]**
سوئد	پساب بعد از فیلتراسیون (۱۵µ)	۸/۰±۲۵/۸۵	۳۰۰	۱۲۰۰۰	**Magnusson and Norén (2014) [17]**
اسپانیا	لجن نهایی	۱۹±۱۰۱	--	--	**Edo et al. (2020) [43]**
آلمان	لجن نهایی	۲۴-۱	۵۰۰	--	**Mintening et al. (2017) [6]**

*اعداد داخل پرانتز کوچک‌ترین اندازه بررسی شده در مقالات Liu و Magni می‌باشد.

خاکی شوند. این شواهد تاکید کننده نقش قابل توجه تصفیه‌خانه فاضلاب به عنوان گردآورنده میکروپلاستیک های ناشی از فعالیته ای انسانی می باشد، که در سال های اخیر در سایر تصفیه خانه ها در سراسر جهان مشاهده شده است [۴۰].

میزان میکروپلاستیک ها به طور متوسط برابر با ۴۴/۹±۴۲۳/۴ عدد بر مترمکعب پساب خروجی بود که روزانه ۹۳۱۶۰۴۷ میکروپلاستیک را وارد پیکره های آبی می کند و می تواند اثرات منفی بر روی گونه های آبزی داشته باشد [۱۴]. این میزان کم‌تر از مقادیر به دست آمده برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در فنلاند [۳۵]، چین [۴۱]، کانادا [۴۲] با حدود ۵۰۰ تا ۲۸۴۰۰ میکروپلاستیک بر مترمکعب و بیش از مقادیر مشاهده شده در پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در اسکاتلند [۱۲]، ایتالیا [۱۴] و سوئد [۱۷] با محدوده ۸/۲۵ تا ۴۰۰ میکروپلاستیک بر مترمکعب می‌باشد (جدول ۳). تفاوت‌های مشاهده شده می‌تواند ناشی از روش‌های مختلف تشخیص میکروپلاستیک‌ها، کوچک‌ترین اندازه مش مورد استفاده یا کوچک‌ترین اندازه میکروپلاستیک شناسایی شده، جمعیت تحت پوشش تصفیه‌خانه، میزان میکروپلاستیک ورودی، دبی پساب تولیدی و روش‌های نمونه‌برداری باشد. این موضوع اهمیت تدوین پروتکل‌های استاندارد برای پایش و سنجش میکروپلاستیک‌ها را در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه میزان میکروپلاستیک های رهاسازی شده به محیط توسط پساب با سایر مطالعات، ارتباط تعداد میکروپلاستیک های موجود در پساب خروجی و جمعیت تحت پوشش تصفیه خانه بررسی شد. بدین ترتیب، سرانه انتشار میکروپلاستیک در ساری حدود ۸۸ عدد بر نفر بر روز برآورد شد که با نتایج به دست آمده توسط ماگنی[1] [۱۴] و مورفی[2] [۱۲] که به ترتیب سرانه ۱۳۳ و ۱۰۰ عدد بر نفر بر روز ارائه کرده‌اند، قابل مقایسه است که نشان می‌دهد سرانه میکروپلاستیک رهاسازی شده در ساری کم‌تر از ایتالیا و اسکاتلند می باشد که ممکن است ناشی از تفاوت در سبک زندگی مردم و شرایط تصفیه خانه‌های فاضلاب باشد.

نتایج نشان دهنده تاثیر کوچک‌ترین اندازه مش استفاده شده در نمونه‌برداری بر تعداد میکروپلاستیک های یافت شده در پساب های خروجی تصفیه خانه‌های فاضلاب مختلف می باشد، به طوری‌که هر چه اندازه مش یا کوچک‌ترین اندازه مورد بررسی کم‌تر باشد، تعداد میکروپلاستیک یافت شده در نمونه بیش‌تر خواهد بود. تعداد بیش‌تر میکروپلاستیک ها در پساب خروجی تصفیه خانه ساری در مقایسه با مطالعات صورت گرفته در اسکاتلند [۱۲]، سوئد [۱۷] و فنلاند [۳۵]، و هم‌چنین تعداد بیش‌تر میکروپلاستیک های موجود در پساب نهایی در چین [۴۱] و کانادا [۴۲] نسبت به تصفیه خانه مورد مطالعه می‌تواند نشان دهنده این موضوع می‌باشد.

علاوه بر این فراوانی کم‌تر میکروپلاستیک های موجود در پساب خروجی تصفیه خانه ایتالیا [۱۴] و سوئد [۱۷] را میتوان به دلیل کاربرد فیلتراسیون های تکمیلی پیش از خروج مستقیم پساب ثانویه به محیط های آبی دانست. به طوری که ماگنی [۱۴] در تحقیق خود اظهار داشت که صافی‌های شنی ماسه‌ای در انتهای تصفیه خانه به بهبود کارایی تصفیه کمک کرده و موجب کاهش حدود ۵۰ درصدی میکروپلاستیک های خروجی از ته نشینی ثانویه شده است.

بررسی میکروپلاستیک‌های موجود در پساب بر اساس اندازه بیانگر آن بود که بیش‌تر آن‌ها اندازه کم‌تر از ۳۰۰ میکرومتر (۶۳٪) دارند که ۷۲٪ این میکروپلاستیک‌های ریز (μm ۳۰۰-۳۷) را فیبرها به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن به ترتیب میکروپلاستیک‌ها با اندازه ۵۰۰-۳۰۰ (۲۴٪) و بیش از ۵۰۰ میکرومتر (۱۳٪) قرار گرفته اند. فراوانی میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر را شاید بتوان به پایین بودن توانایی فرآیندهای موجود در تصفیه‌خانه برای حذف ذرات کوچک‌تر از ۳۰۰ میکرومتر [۱۶-۱۳] نسبت داد. تالویتی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که میکروپلاستیک‌های کوچک با اندازه ۱۰۰-۲۰ میکرومتر، به میزان فراوان در پساب وجود دارند، زیرا اندازه‌های بزرگ‌تر طی فرایندهای تصفیه حذف می‌شوند [۱۳]. در همین راستا، مینتنیگ[3] و همکاران در سال ۲۰۱۷ تعداد بیش‌تری از میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر را در مقایسه با اندازه‌های بزرگ‌تر از ۵۰۰ میکرومتر در پساب یافتند و نتیجه گرفتند که خرده‌های پلاستیکی بزرگ‌تر طی فرایندهای تصفیه حذف می‌شوند [۶]. هم‌چنین برخی پژوهشگران به پتانسیل بالای تصفیه‌خانه‌ها در حذف میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب ورودی و به دام افتادن آن‌ها در لجن اشاره کرده‌اند [۱۸ و ۱۵ و ۱۲]. علویان و هاشمی[4] (۲۰۱۹) در تحقیق خود بر روی میزان میکروپلاستیک‌های موجود در فاضلاب شهری ورودی به تصفیه خانه ساری به طور میانگین حدود ۱۲۶۶۷ میکروپلاستیک بر مترمکعب یافتند [۴۴] که مقایسه آن با میزان میکروپلاستیک‌های موجود در هر مترمکعب از پساب خروجی در این پژوهش (۴۲۳/۴ عدد بر مترمکعب)، بیانگر اهمیت توجه به لجن تولیدی به عنوان دریافت کننده اصلی میکروپلاستیک‌های ورودی به تصفیه‌خانه است [۴۵]. بررسی نمونه‌های لجن تصفیه‌خانه ساری به عنوان دریافت کننده اصلی میکروپلاستیک‌ها از فاضلاب نشان داد که در هر گرم وزن خشک لجن آبگیری شده ۱۶/۷±۱۲۸/۸میکروپلاستیک (۲۷۶۳۵۳۲۰۰/۹ MPs/day) وجود دارد در مقایسه با مقدار آن‌ها در مطالعات مشابه در آلمان [۶] و اسپانیا [۴۳] بیش‌تر و از چین [۴۱] و فنلاند [۳۵] کم‌تر می باشد. تفاوت در میزان میکروپلاستیک موجود در لجن مانند پساب به عوامل متعددی مانند جمعیت تحت پوشش، میزان میکروپلاستیک ورودی به تصفیه‌خانه، روش نمونه‌برداری و استخراج میکروپلاستیک مانند نوع نمک و اندازه مش مورد استفاده می‌تواند بستگی داشته باشد. به دلیل عدم بیان جمعیت تحت پوشش در مطالعات صورت گرفته امکان مقایسه بین تصفیه خانه‌ها بر اساس سرانه میکروپلاستیک تولیدی وجود ندارد.

لجن در بسیاری از کشورها در کشاورزی به عنوان کود استفاده و حضور میکروپلاستیک ها تهدیدی بالقوه برای محیط های زمینی محسوب میشود. استفاده از لجن در کشاورزی هنگامی‌که حاوی مقادیر زیادی از آلاینده های سمی مانند فلزات سنگین باشد، ممنوع است. این در حالی است که با توجه به تاثیرات منفی گزارش شده برای میکروپلاستیک ها بر روی کرم های خاکی [۴۶]، تخریب میکرو به نانو پلاستیک و شست و شوی آن‌ها به آب های زیرزمینی [۴۷]، تاکنون هیچ محدودیتی برای میکروپلاستیک ها توسط اروپا و آمریکا وضع نشده است [۴۸]. هم‌چنین از دیگر مشکلات مربوط به

1 Magni
2 Murphy
3 Mintenig
4 Alavian and Hashemi

میکروپلاستیک های آزاد شده توسط لجن در خاک می‌توان به ورود آن‌ها به منابع آب و دریا اشاره کرد. تخلیه روزانه ۲۹ برابری میکروپلاستیک توسط لجن در مقایسه با پساب بیانگر نقش مهم لجن در انتشار میکروپلاستیک به محیط و لزوم مدیریت و کنترل آن‌ها و هم‌چنین تلاش جهت تدوین ضوابط لازم برای دفع و استفاده لجن می‌باشد.

سهم بالاتر میکروفیبرها در نمونه‌های پساب (۷۷/۵٪) و لجن (۸۷/۵٪) در تصفیه‌خانه فاضلاب ساری هم راستا با تحقیق براون[1] و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد که الیاف مصنوعی را میکروپلاستیک اصلی در تصفیه‌خانه‌ها دانسته‌اند [۴۹]. بررسی ساختار فیبرها حاکی از وجود میزان بالایی از پلی‌استر و پلیمرهایی هم‌چون آکریلیک و نایلون در لجن و پساب و مقادیر اندکی از پلی‌پروپیلن در پساب این تصفیه خانه بوده است. حضور این الیاف در پساب و لجن ممکن است به دلیل فاضلاب ناشی از شست و شوی لباس‌ها و منسوجاتی مانند فرش باشد [۵۱ و۵۰]. براون و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که فاضلاب ماشین لباسشویی خانگی می‌تواند در هر نوبت شست و شوی یک لباس بیش از ۱۹۰۰ فیبر تولید کند [۴۹]. هم‌چنین عالیپور[2] و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که شست و شوی یک مترمربع فرش ماشینی می‌تواند ۳۰۹۸-۱۸۲۵ عدد فیبر به فاضلاب رها کند [۵۲]. از آنجا که آکریلیک یکی از انواع اصلی فیبر در منسوجات مورد استفاده در ایران است، بخشی از این نوع الیاف در پساب خروجی ممکن است به دلیل شست و شوی آن‌ها باشد.

بررسی مورفولوژیکی میکروذرات استخراج شده از پساب و لجن با استفاده از استریومیکروسکوپ نشان داد که بیش‌تر آن‌ها ذرات آبی کروی یا نامنظم و اغلب در محدوده ۳۰۰-۳۷ میکرومتر می‌باشند. طیف‌سنجی میکرورامان نشان داد که ذرات آبی موجود در نمونه‌ها ساختار پلی‌اتیلنی دارند و مورفولوژی آن‌ها شبیه به میکروذرات و میکروبیدهای مورد استفاده در محصولات آرایشی و بهداشتی، مانند خمیر دندان و اسکراب صورت می‌باشد [۱۸-۱۶]. علاوه بر این، سایش محصولات ساخته شده از پلی‌اتیلن نیز ممکن است منجر تولید تعداد زیادی میکروپلاستیک از این نوع شود. به جز پلی‌اتیلن، که فراوان‌ترین نوع پلیمر برای ذرات بود، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن تری‌فتالات و پلی‌کربنات انواع دیگر ذرات مشخص شده در پساب بودند که ممکن است از لوازم پلاستیکی بزرگ‌تر جدا شده باشند.

تخلیه روزانه ۲۲۰۰۰ مترمکعب پساب و ۱۴ تن لجن آبگیری شده به طور میانگین به ترتیب حاوی ۹۳۱۶۰۴۷ و ۲۷۶۳۵۳۲۰۰/۹ میکروپلاستیک، نشان دهنده مقدار قابل توجه میکروپلاستیک ورودی از طریق این تصفیه‌خانه به محیط زیست می‌باشد. در همین راستا، حضور مقادیر زیاد میکروپلاستیک های اندازهگیری شده در نزدیکی دهانه رودخانه های منتهی به دریای خزر می تواند دلیلی بر نقش مهم تصفیه خانه های فاضلاب به عنوان منابع رها کننده آن‌ها به رودخانه ها باشد. به طوری‌که مهدی نیا با مطالعه بر روی رسوبات دریای خزر و دهانه رودخانه های ورودی به آن، بیان داشت که بیش‌تر میکروپلاستیک ها با اندازه کم‌تر از ۵۰۰ میکرومتر و اغلب از نوع فیبرها می باشند [۵] که با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

اگر چه میزان میکروپلاستیک موجود در پساب کم‌تر از لجن به دست آمد که نشان دهنده نقش مثبت تصفیه‌خانه فاضلاب در کاهش بار میکروپلاستیکی فاضلاب ورودی به آن می‌باشد، اما استفاده یا دفن لجن می‌تواند موجب ورود آن‌ها از محیط خاک به آب بر اثر وزش باد یا رواناب‌های ناشی از بارندگی شود [۱۹]. بنابراین در مدیریت و کنترل میزان انتشار میکروپلاستیک ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بایستی به سهم هر دو جریان خروجی، پساب و لجن، و مسیر انتقال آلودگی میکروپلاستیک از آن‌ها به محیط زیست توجه داشت.

۵- نتیجه‌گیری

شناسایی منابع احتمالی ورود میکروپلاستیک‌ها به عنوان یکی از عوامل آلودگی اکوسیستم‌های آبی و زمینی و هم‌چنین تهدیدی برای سلامتی انسان، ضروری است. روزانه میلیون‌ها میکروپلاستیک از طریق پساب و لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به محیط تخلیه می‌شود که می‌توانند اثرات سویی بر اکوسیستم‌ها و انسان داشته باشند. این مطالعه، داده‌های موثقی در مورد حضور، شکل و نوع میکروپلاستیک‌ها در پساب و لجن یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در ایران ارائه می‌دهد و تأیید کننده نقش تصفیه‌خانه فاضلاب به عنوان یک جمع کننده میکروپلاستیک‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و انتشار آن‌ها در محیط زیست است.

رودخانه تجن یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان مازندران است که نقش مهمی در تأمین آب گستره وسیعی از زمین‌های کشاورزی دارد و یکی از زیستگاه‌های ماهیان بومی و مهاجر و از رودخانه‌های مهم تغذیه کننده دریای خزر می‌باشد. این در حالی است که میکروپلاستیک‌های تخلیه شده از طریق پساب و لجن تصفیه‌خانه فاضلاب ساری، می‌توانند اکوسیستم‌های آبی رودخانه تجن و دریای خزر را تهدید کنند و هم‌چنین ممکن است منجر

1 Browne
2 Aalipour

به آلودگی میکروپلاستیکی مزارع کشاورزی از طریق آبیاری توسط رودخانه یا استفاده از پساب و لجن تصفیه‌خانه شوند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روزانه مقدار بالایی میکروپلاستیک توسط پساب و لجن وارد محیط زیست منطقه می‌شود که بیش‌تر آن‌ها را میکروفیبرهای با اندازه کم‌تر از ۳۰۰ میکرومتر، تشکیل می‌دهد که با توجه به نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها، می‌توانند در جذب و انتقال آلاینده ها به ویژه ترکیبات آلی پایدار و فلزات سنگین نقش مهمی داشته باشد. هم‌چنین ورود میکروپلاستیک‌ها از طریق پساب و لجن به محیط‌های آبی و زمین های کشاورزی می‌تواند سبب افزایش نگرانی های زیست محیطی شود، بنابراین انجام پژوهش‌های بیش‌تر در زمینه منابع انتشار میکروپلاستیک ها و تعیین سهم آن‌ها، به ویژه تصفیه‌خانه های فاضلاب، و ارتباط آن‌ها با مقادیر مشاهده شده در محیط‌های آبی، رسوبات و جانداران ضروری است.

۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان مازندران به خاطر حمایت ارزشمند و سازنده خود از این پروژه پژوهشی قدردانی می‌شود.

منابع

[1] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, T.S. Galloway, Microplastics as contaminants in the marine environment: a review, Marine pollution bulletin, 62(12) (2011) 2588-2597.

[2] A. Lusher, P. Hollman, J. Mendoza-Hill, Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, (615) (2017).

[3] A.L. Andrady, M.A. Neal, Applications and societal benefits of plastics, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526) (2009) 1977-1984.

[4] J. Bayo, S. Olmos, J. López-Castellanos, Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors, Chemosphere, 238 (2020) 124593.

[5] A. Mehdinia, R. Dehbandi, A. Hamzehpour, R. Rahnama, Identification of microplastics in the sediments of southern coasts of the Caspian Sea, north of Iran, Environmental Pollution, 258 (2020) 113738.

[6] S. Mintenig, I. Int-Veen, M.G. Löder, S. Primpke, G. Gerdts, Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging, Water research, 108 (2017) 365-372.

[7] D.d.A. Miranda, G.F. de Carvalho-Souza, Are we eating plastic-ingesting fish?, Marine pollution bulletin, 103(1-2) (2016) 109-114.

[8] C.G. Avio, S. Gorbi, M. Milan, M. Benedetti, D. Fattorini, G. d'Errico, M. Pauletto, L. Bargelloni, F. Regoli, Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels, Environmental Pollution, 198 (2015) 211-222.

[9] E.M. Chua, J. Shimeta, D. Nugegoda, P.D. Morrison, B.O. Clarke, Assimilation of polybrominated diphenyl ethers from microplastics by the marine amphipod, Allorchestes compressa, Environmental science & technology, 48(14) (2014) 8127-8134.

[10] C.M. Rochman, A. Tahir, S.L. Williams, D.V. Baxa, R. Lam, J.T. Miller, F.-C. Teh, S. Werorilangi, S.J. Teh, Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption, Scientific reports, 5 (2015) 14340.

[11] J. Hammer, M.H. Kraak, J.R. Parsons, Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift, in: Reviews of environmental contamination and toxicology, Springer, 2012, pp. 1-44.

[12] F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier, B. Quinn, Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment, Environmental science & technology, 50(11) (2016) 5800-5808.

[13] J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, O. Setälä, Solutions to microplastic pollution–Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies, Water Research, 123 (2017) 401-407.

[14] S. Magni, A. Binelli, L. Pittura, C.G. Avio, C. Della

Torre, C.C. Parenti, S. Gorbi, F. Regoli, The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant, Science of the Total Environment, 652 (2019) 602-610.

[15] J. Talvitie, M. Heinonen, J.-P. Pääkkönen, E. Vahtera, A. Mikola, O. Setälä, R. Vahala, Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea, Water Science and Technology, 72(9) (2015) 1495-1504.

[16] S. Ziajahromi, P.A. Neale, L. Rintoul, F.D. Leusch, Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics, Water research, 112 (2017) 93-99.

[17] K. Magnusson, F. Norén, Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant, in, 2014.

[18] S.A. Carr, J. Liu, A.G. Tesoro, Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants, Water research, 91 (2016) 174-182.

[19] S. Sujathan, A.-K. Kniggendorf, A. Kumar, B. Roth, K.-H. Rosenwinkel, R. Nogueira, Heat and bleach: a cost-efficient method for extracting microplastics from return activated sludge, Archives of environmental contamination and toxicology, 73(4) (2017) 641-648.

[20] R. Akhbarizadeh, F. Moore, B. Keshavarzi, A. Moeinpour, Microplastics and potentially toxic elements in coastal sediments of Iran's main oil terminal (Khark Island), Environmental Pollution, 220 (2017) 720-731.

[21] A. Naji, Z. Esmaili, S.A. Mason, A.D. Vethaak, The occurrence of microplastic contamination in littoral sediments of the Persian Gulf, Iran, Environmental Science and Pollution Research, 24(25) (2017) 20459-20468.

[22] A. Naji, Z. Esmaili, F.R. Khan, Plastic debris and microplastics along the beaches of the Strait of Hormuz, Persian Gulf, Marine pollution bulletin, 114(2) (2017) 1057-1062.

[23] Z. Esmaili, A. Naji, Comparison of the Frequency, Type and Shape of Microplastics in the Low and High Tidal of the Coastline of Bandar Abbas, Journal of Oceanography, 8(32) (2018) 53-61.

[24] S. Dobaradaran, T.C. Schmidt, I. Nabipour, N. Khajeahmadi, S. Tajbakhsh, R. Saeedi, M.J. Mohammadi, M. Keshtkar, M. Khorsand, F.F. Ghasemi, Characterization of plastic debris and association of metals with microplastics in coastline sediment along the Persian Gulf, Waste management, 78 (2018) 649-658.

[25] S. Abbasi, B. Keshavarzi, F. Moore, H. Delshab, N. Soltani, A. Sorooshian, Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in street dust: a study in Bushehr city, Iran, Environmental earth sciences, 76(23) (2017) 798.

[26] S. Dehghani, F. Moore, R. Akhbarizadeh, Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran, Environmental Science and Pollution Research, 24(25) (2017) 20360-20371.

[27] S. Abbasi, B. Keshavarzi, F. Moore, A. Turner, F.J. Kelly, A.O. Dominguez, N. Jaafarzadeh, Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran, Environmental pollution, 244 (2019) 153-164.

[28] M. Rezaei, M.J. Riksen, E. Sirjani, A. Sameni, V. Geissen, Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics, Science of the Total Environment, 669 (2019) 273-281.

[29] A. Naji, M. Nuri, A.D. Vethaak, Microplastics contamination in molluscs from the northern part of the Persian Gulf, Environmental pollution, 235 (2018) 113-120.

[30] S. Abbasi, N. Soltani, B. Keshavarzi, F. Moore, A. Turner, M. Hassanaghaei, Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf, Chemosphere, 205 (2018) 80-87.

[31] R. Akhbarizadeh, F. Moore, B. Keshavarzi, Investigating a probable relationship between microplastics and potentially toxic elements in fish muscles from northeast of Persian Gulf, Environmental pollution, 232 (2018)

[41] X. Liu, W. Yuan, M. Di, Z. Li, J. Wang, Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China, Chemical Engineering Journal, 362 (2019) 176-182.

[42] E.A. Gies, J.L. LeNoble, M. Noël, A. Etemadifar, F. Bishay, E.R. Hall, P.S. Ross, Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada, Marine pollution bulletin, 133 (2018) 553-561.

[43] C. Edo, M. González-Pleiter, F. Leganés, F. Fernández-Piñas, R. Rosal, Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge, Environmental Pollution, 259 (2020) 113837.

[44] S.S. Alavian Petroody, S.H. Hashemi, Occurrence and Characterization of Microplastics in Urban Wastewater, A Case Study: Sari Wastewater Treatment Plant, Modares Civil Engineering journal, 19(6) (2020) 145-154. (In Persian).

[45] S. Raju, M. Carbery, A. Kuttykattil, K. Senthirajah, A. Lundmark, Z. Rogers, S. Suresh, G. Evans, T. Palanisami, Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant, Water Research, 173 (2020) 115549.

[46] E. Huerta Lwanga, H. Gertsen, H. Gooren, P. Peters, T. Salánki, M. van der Ploeg, E. Besseling, A.A. Koelmans, V. Geissen, Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for Lumbricus terrestris (Oligochaeta, Lumbricidae), Environmental science & technology, 50(5) (2016) 2685-2691.

[47] R.R. Hurley, L. Nizzetto, Fate and occurrence of micro (nano) plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks, Current Opinion in Environmental Science & Health, 1 (2018) 6-11.

[48] L. Nizzetto, M. Futter, S. Langaas, Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin?, in, ACS Publications, 2016.

[49] M.A. Browne, P. Crump, S.J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway, R. Thompson, Accumulation of 154-163.

[32] R. Akhbarizadeh, F. Moore, B. Keshavarzi, Investigating microplastics bioaccumulation and biomagnification in seafood from the Persian Gulf: a threat to human health?, Food Additives & Contaminants: Part A, 36(11) (2019) 1696-1708.

[33] P. Hanachi, S. Karbalaei, T.R. Walker, M. Cole, S.V. Hosseini, Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (Cyprinus carpio), Environmental Science and Pollution Research, 26(23) (2019) 23777-23787.

[34] M. Zakeri, A. Akbarzadeh, A. Naji, Microplastic pollution in Caspian kutum (*Rutilus frisii kutum*) on southern shores of the Caspian Sea, Journal of animal environment, 11 (2019) 175-180. (In Persian).

[35] J. Talvitie, A. Mikola, O. Setälä, M. Heinonen, A. Koistinen, 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 (2017) 164-172.

[36] J. Sun, X. Dai, Q. Wang, M.C. van Loosdrecht, B.-J. Ni, Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal, Water research, 152 (2019) 21-37.

[37] J. Lee, S. Hong, Y.K. Song, S.H. Hong, Y.C. Jang, M. Jang, N.W. Heo, G.M. Han, M.J. Lee, D. Kang, Relationships among the abundances of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea, Marine pollution bulletin, 77(1-2) (2013) 349-354.

[38] G. Liebezeit, E. Liebezeit, Synthetic particles as contaminants in German beers, Food Additives & Contaminants: Part A, 31(9) (2014) 1574-1578.

[39] M.T. Nuelle, J.H. Dekiff, D. Remy, E. Fries, A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments, Environmental Pollution, 184 (2014) 161-169.

[40] J.C. Prata, Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions, Marine pollution bulletin, 129(1) (2018) 262-265.

microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks, Environmental science & technology, 45(21) (2011) 9175-9179.

[50] B.M.C. Almroth, L. Åström, S. Roslund, H. Petersson, M. Johansson, N.-K. Persson, Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment, Environmental Science and Pollution Research, 25(2) (2018) 1191-1199.

[51] F. De Falco, M.P. Gullo, G. Gentile, E. Di Pace, M. Cocca, L. Gelabert, M. Brouta-Agnésa, A. Rovira, R. Escudero, R. Villalba, Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics, Environmental Pollution, 236 (2018) 916-925.

[52] S. Aalipour, S.H. Hashemi, S.S. Alavian Petroody, Microplastic in carpet washing industry wastewater. Master thesis, Environmental Sciences. Shahid Beheshti University.2018 (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. S. Alavian Petroody, S. H. Hashemi, Wastewater treatment plants as a pathway for the release of microplastics into the environment: Investigation of sludge and treated effluent of Sari wastewater treatment plant, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 3751-3762.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18097.6766