

فراوانی میکروپلاستیک در آب پرورشی ماهی قزل‌آلای در سیستم آبی‌پروری مدار بسته (RAS)

سینا وحدتی راد^۱، علی طاهری میرقاند^{۲*}، حسینعلی ابراهیم زاده موسوی^۲، سید سعید میرزگر^۲، محمد قلی زاده^۳

۱- پردیس بین الملل کیش، دانشگاه تهران

۲- گروه بهداشت و بیماری های آبزیان، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران

۳- گروه شیلات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

چکیده

مشاهدات جذب میکروپلاستیک‌ها توسط موجودات آبی در طیف وسیعی از زیستگاه‌ها، از جمله سطح دریا، ستون آب، کف‌زبان، مصب‌ها، سواحل و تأسیسات آبی‌پروری گزارش شده است. با این حال، حضور و ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های آبی‌پروری آب شیرین ایران تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این مطالعه باهدف پر کردن این خلأ، به شناسایی میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های آبی‌پروری آب شیرین در دو منطقه از ایران، استان‌های مازندران و گلستان، می‌پردازد. در پاییز سال ۱۴۰۳، ۳ لیتر از هر ایستگاه (آب ورودی، قبل از فیلتر مخزن، بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی) از هر استخر استان‌های مازندران و گلستان نمونه‌برداری شد. میکروپلاستیک‌ها از آب استخراج و از نظر فراوانی، شکل، اندازه و ترکیب پلیمری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. ترکیب‌های پلیمری با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) تعیین شدند. در مجموع ۱۲۵ ذره پلاستیکی شناسایی شد که بیشترین میانگین در استان مازندران ($24 \pm 2/02$ ذره در لیتر) و ایستگاه آب خروجی با ۲۹ ذره در لیتر بود. بیشترین فراوانی مربوط به فیبر (بیش از ۹۰ درصد) و کمترین فراوانی مربوط به قطعات بود. نتایج نشان داد که گروه اندازه ۳۰۰-۱۰۰۰ میکرومتر دارای بالاترین فراوانی و گروه اندازه ۵۰۰-۳۰۰ میکرومتر دارای کمترین فراوانی بود. رنگ سیاه بیشترین فراوانی (۵۵/۵۶ درصد) و رنگ شفاف (۶/۹۴ درصد) و قرمز (۲/۸۷ درصد) کمترین فراوانی را داشتند. پلیمرهای غالب میکروپلاستیک‌ها شامل پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات بودند. بررسی ورود میکروپلاستیک‌ها به سامانه‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS) از طریق فرسایش اجزای پلاستیکی آن و ارزیابی جایگزین‌های غیرپلاستیکی برای این اجزا (مانند بیوفیلترهای طبیعی) بود، همچنین تکنیک‌های حذف میکروپلاستیک‌ها از سامانه، از اهمیت بالایی برخوردار است تا حضور این آلاینده‌ها در سامانه‌های RAS و تأثیر آن‌ها بر امنیت غذایی جهانی به حداقل برسد.

نوع مقاله

مقاله پژوهشی اصیل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۴/۰۳/۲۵

*نویسنده مسئول:

mirghaed@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: میکروپلاستیک، آب، سامانه‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS)، پلیمر

مقدمه

میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های نوظهور، به دلیل سطح آلودگی پلاستیک در محیط‌های آبی و حضور آن‌ها در مراحل مختلف تولید غذاهای دریایی، نگرانی‌هایی را در بخش آبی‌پروری ایجاد کرده‌اند [۱]. درواقع، بخش آبی‌پروری سریع‌ترین صنعت غذایی در حال رشد است که با تولید بیش از ۵۰ درصد ماهی در بازارها، به یک عامل حیاتی در تغذیه انسان تبدیل شده است [۱].

میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به عنوان حامل‌هایی برای آلاینده‌های دیگر عمل کنند که یا در فرآیند تولید پلاستیک وارد آن‌ها شده‌اند یا از طریق تعامل با محیط زیست جذب گردیده‌اند. این ویژگی می‌تواند خطرات قابل توجهی برای سلامت انسان به همراه داشته باشد و تهدیدات زیست‌محیطی و بهداشتی مرتبط با این ذرات را تشدید کند [۲]. به همین دلیل، وجود میکروپلاستیک‌ها در کالاهای غذایی، از جمله غذاهای دریایی، به یک نگرانی جهانی در مورد ایمنی مواد غذایی تبدیل شده است. میکروپلاستیک‌ها ذرات پلاستیکی کوچک‌تر از ۵۰۰۰ میکرومتر هستند و می‌توانند از چندین

منبع برون‌زا و درون‌زا به سیستم‌های آبی‌پروری برسند. میکروپلاستیک‌های برون‌زا می‌توانند از فعالیت‌های انسانی و محیط‌های اطراف مخزن، نظیر اتمسفر و بدنه‌های آبی، نشأت گیرند [۳]. حضور گسترده میکروپلاستیک‌ها در بسیاری از اکوسیستم‌های آبی گزارش شده است، از جمله در مناطقی که تولید آبی‌پروری در آن‌ها از رونق بالایی برخوردار است [۴].

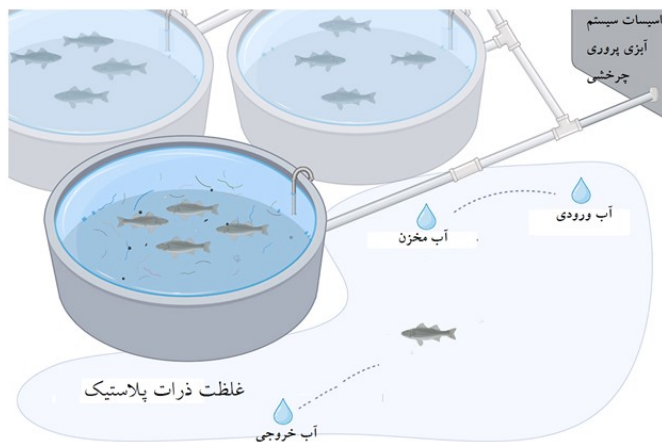
سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS) فرصتی منحصربه‌فرد برای تولید غذاهای دریایی با رویکرد پایداری زیست‌محیطی فراهم می‌آورند، زیرا این سامانه‌ها بر پایه اصول بازیافت مواد مغذی، کاهش مصرف آب و مدیریت پهنه پسماند طراحی شده‌اند [۵]. فناوری‌های کنونی مورد استفاده در RAS، کیفیت مطلوب آب و شرایط کنترل‌شده پرورش را در طول سال تضمین می‌کنند [۶]. با این حال، این سامانه‌ها ممکن است با چالش‌هایی نظیر تجمع آلاینده‌هایی از قبیل فلزات سنگین، باقیمانده‌های دارویی و متابولیت‌ها مواجه شوند. حضور میکروپلاستیک‌ها در ماهی‌های پرورش‌یافته در این سامانه‌ها هنوز به‌طور جامع مستند نشده است [۷]. با توجه به وابستگی بالای RAS به اجزای پلاستیکی، نگرانی‌هایی در مورد تأثیرات میکروپلاستیک‌ها بر سلامت و کیفیت غذاهای دریایی در بخش آبی‌پروری مطرح شده است. این نگرانی‌ها انگیزه‌ای برای توسعه اجزای غیرپلاستیکی جایگزین، مانند محیط‌های بیوفیلتراسیون طبیعی، ایجاد کرده است [۸].

حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی‌پروری نگرانی‌های عمیقی را به دنبال داشته است، به‌ویژه در ارتباط با جذب این ذرات توسط موجودات آبی و انتقال آن‌ها در زنجیره غذایی. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ماهی‌ها قادرند میکروپلاستیک‌ها را به‌صورت مستقیم از ستون آب یا به‌طور غیرمستقیم از طریق مصرف شکار یا خوراک آلوده دریافت کنند. پس از بلع، میکروپلاستیک‌ها ممکن است در اندام‌های مختلف از جمله دستگاه گوارش، آبشش‌ها، کبد و بافت‌های عضلانی انباشته شوند و سبب آسیب‌های فیزیکی، التهاب و اثرات سمی گردند. افزون بر این، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به‌عنوان حامل‌هایی برای مواد شیمیایی زیان‌آور و عوامل بیماری‌زا عمل کنند، که این امر مخاطرات بهداشتی را برای موجودات آبی و مصرف‌کنندگان انسانی ماهی‌های پرورشی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

هدف این مطالعه، اندازه‌گیری فراوانی میکروپلاستیک‌ها در بخش‌های مختلف سیستم‌های RAS پرورش قزل‌آلای رنگین‌کمان (آب ورودی، قبل از فیلتر مخزن، بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی) در استان‌های مازندران و گلستان، شناسایی انواع پلیمر و منابع احتمالی با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی μ -FTIR و تقسیم‌بندی میکروپلاستیک‌های یافت شده از لحاظ شکل، رنگ و اندازه است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، پراکنش میکروپلاستیک‌ها در آب در ۴ نقطه (آب ورودی، قبل از فیلتر مخزن، بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی) استخر پرورش ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بررسی شد (شکل ۱). نمونه‌برداری در تابستان ۱۴۰۳ از یک استخر پرورش ماهی از استان مازندران و یک استخر از استان گلستان انجام شد.



شکل ۱- شماتیک از پارامترهای نمونه‌برداری از استخر ماهی قزل‌آلا

استخراج میکروپلاستیک‌ها از آب

استخراج میکروپلاستیک‌ها از نمونه‌های آب بر اساس پروتکل ارائه شده توسط Llorca و همکاران (۲۰۲۱)^[۸] انجام پذیرفت. نمونه‌های آب به حجم ۲ لیتر با استفاده از فیلترهای الیاف شیشه‌ای GF/F با منافذ ۰٫۷ میکرومتر (Whatman، انگلستان) فیلتر شدند. نمونه‌های فیلترشده به مدت یک شب در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس با ۱۰ میلی‌لیتر تولوئن از طریق استخراج با کمک اولتراسونیک (USAE) به مدت ۳۰ دقیقه استخراج گردیدند. مایع رویی حاصل جمع‌آوری شد، به یک ویال شیشه‌ای منتقل گردید و تحت جریان نیتروژن تا حد نزدیک به خشک شدن تبخیر شد. این فرآیند دو بار تکرار گردید و حجم نهایی تبخیرشده به یک ویال کروماتوگرافی مایع (LC) منتقل شد تا برای تحلیل بیشتر تا حجم ۱ میلی‌لیتر تبخیر شود. به منظور حذف هرگونه احتمال آلودگی متقابل، یک نمونه شاهد (بلانک) شامل آب با خلوص بالا (گرید HPLC) به صورت موازی با نمونه‌ها استخراج و تجزیه و تحلیل شد.

ذرات باقی‌مانده روی فیلتر که مشکوک به منشأ پلاستیکی یا انسان‌ساخت بودند، با استفاده از استریومیکروسکوپ مجهز به دوربین (Nikon SMZ1000 with DS-Fi1 زاین) بررسی و اندازه‌گیری شدند. دسته‌بندی ذرات بر اساس دستورالعمل‌های نظارت بر آلودگی پلاستیکی^[۹] صورت گرفت: شکل: فیبر، قطعه- رنگ: سیاه، آبی، قهوه‌ای، خاکستری، شفاف و قرمز- اندازه: کلیه ذرات در محدوده کمتر از ۳۰۰۰ میکرومتر بودند. اندازه ذره بر اساس بزرگ‌ترین قطر عرضی تعریف و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل تصویری (Olympus Cell[^]B، آلمان) اندازه‌گیری شد. سپس ذرات در پنج کلاس اندازه‌ای طبقه‌بندی شدند: ۱۰۰-۳۰۰ میکرومتر، ۳۰۰-۶۰۰ میکرومتر، ۶۰۰-۱۰۰۰ میکرومتر، ۱۰۰۰-۲۰۰۰ میکرومتر و ۲۰۰۰-۳۰۰۰ میکرومتر.

تعیین کمیت پلیمر با استفاده از کروماتوگرافی حذف اندازه

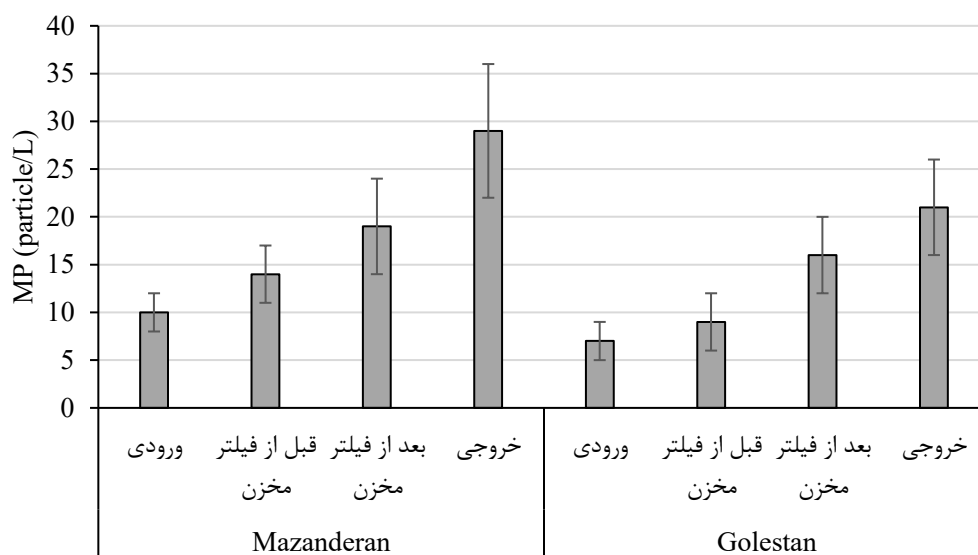
تجزیه و تحلیل نمونه‌ها بر اساس Llorca و همکاران (۲۰۲۱)^[۸] انجام شد. ترکیبات با استفاده از کروماتوگرافی حذف اندازه بر روی سیستم Acquity LC (Waters, Milford, MA, USA) مجهز به ستون کروماتوگرافی پلیمری پیشرفته (APC) (Acquity APC[™]) XT45 1.7 میکرومتر (۱۵۰ میلی‌متر) جدا شد. کروماتوگرافی به یک طیف‌سنج جرمی چهار قطبی-اوربیتراپ هیبریدی Q-Exactive (Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA) جفت شد. شناسایی پلیمری میکروپلاستیک‌ها به وسیله دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) مجهز به ATR، مدل نیکولت نکسوز ۴۷۰ ساخت شرکت ترمو نیکولت آمریکا، متصل به نرم‌افزار OMNIC، با سطح آنالیزور کریستال ZnSe، انجام شد. محدوده‌ی موردبررسی $4000-650\text{ cm}^{-1}$ است. قبل از هر آزمون دستگاه کالیبره شده و سپس طیف‌ها به منظور تفکیک و شناسایی پلیمرهای میکروپلاستیک با توجه به شکل و موقعیت پیک‌ها ارزیابی شد.

کنترل آلودگی

برای جلوگیری از آلودگی خارجی توسط میکروپلاستیک‌ها طی فرآیند نمونه‌برداری و آماده‌سازی، مطابق با توصیه‌های Barboza و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۰] اقدامات پیشگیرانه زیر اتخاذ شد. تمامی نمونه‌ها در اتاق عاری از آلودگی پلاستیکی معلق در هوا جمع‌آوری و پردازش شدند. در تمام مراحل، از روپوش‌های سفید آزمایشگاهی ۱۰۰٪ نخی و دستکش‌های نیتریل بدون پودر استفاده شد. تمامی تجهیزات پلاستیکی با ظروف شیشه‌ای جایگزین شدند. سطوح کالبدشکافی و ظروف نمونه‌برداری با اتانول ۷۰ درصد و آب فوق‌خالص شستشو داده شدند تا از آلودگی متقاطع بین نمونه‌ها جلوگیری شود.

نتایج

شناسایی میکروپلاستیک‌ها در آب استخرهای مورد مطالعه از استان مازندران و گلستان نشان داد که آلودگی در تمامی ایستگاه‌ها (آب ورودی، قبل از فیلتر مخزن، بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی) مشاهده شده است (شکل ۲). در مجموع ۱۲۵ ذره پلاستیکی شناسایی شد که بیشترین میانگین در استان مازندران ($24 \pm 2/0$) و کمترین در استان گلستان ($17/67 \pm 1/84$) ذره در لیتر بود. بیشترین میزان میکروپلاستیک در آب خروجی در استخر استان مازندران (۲۹ ذره در لیتر) و کمترین آن در آب ورودی استخر استان گلستان (۷ ذره در لیتر) مشاهده شد. نتایج اختلاف معنی‌داری بین ایستگاه‌ها از لحاظ فراوانی میکروپلاستیک نشان می‌دهد.



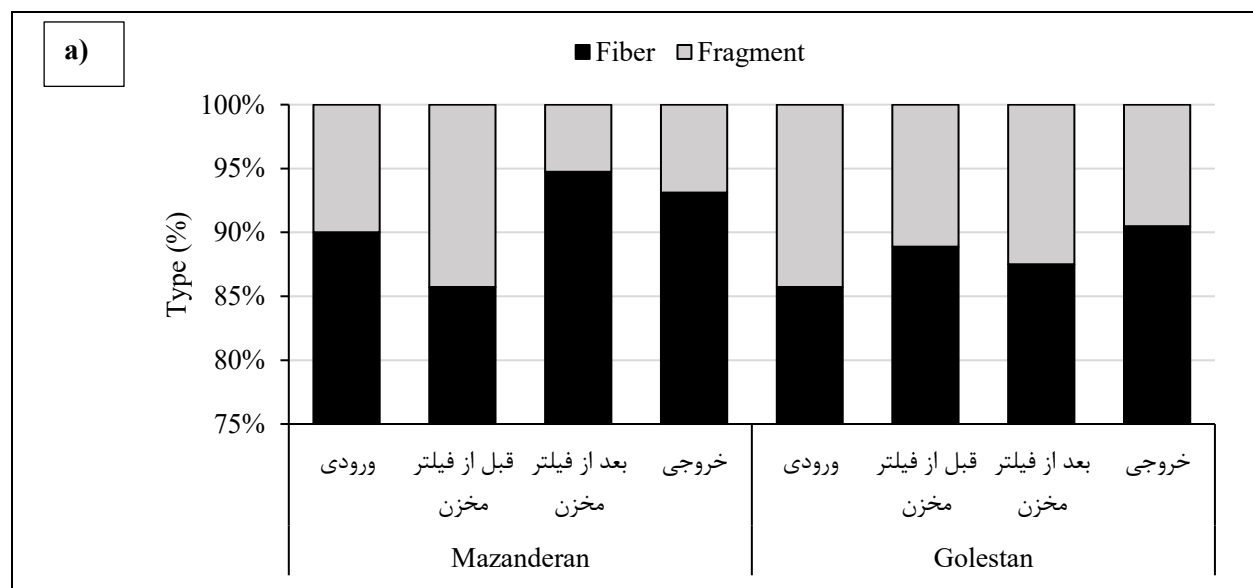
شکل ۲. میانگین فراوانی میکروپلاستیک‌ها در آب در نقاط نمونه‌برداری

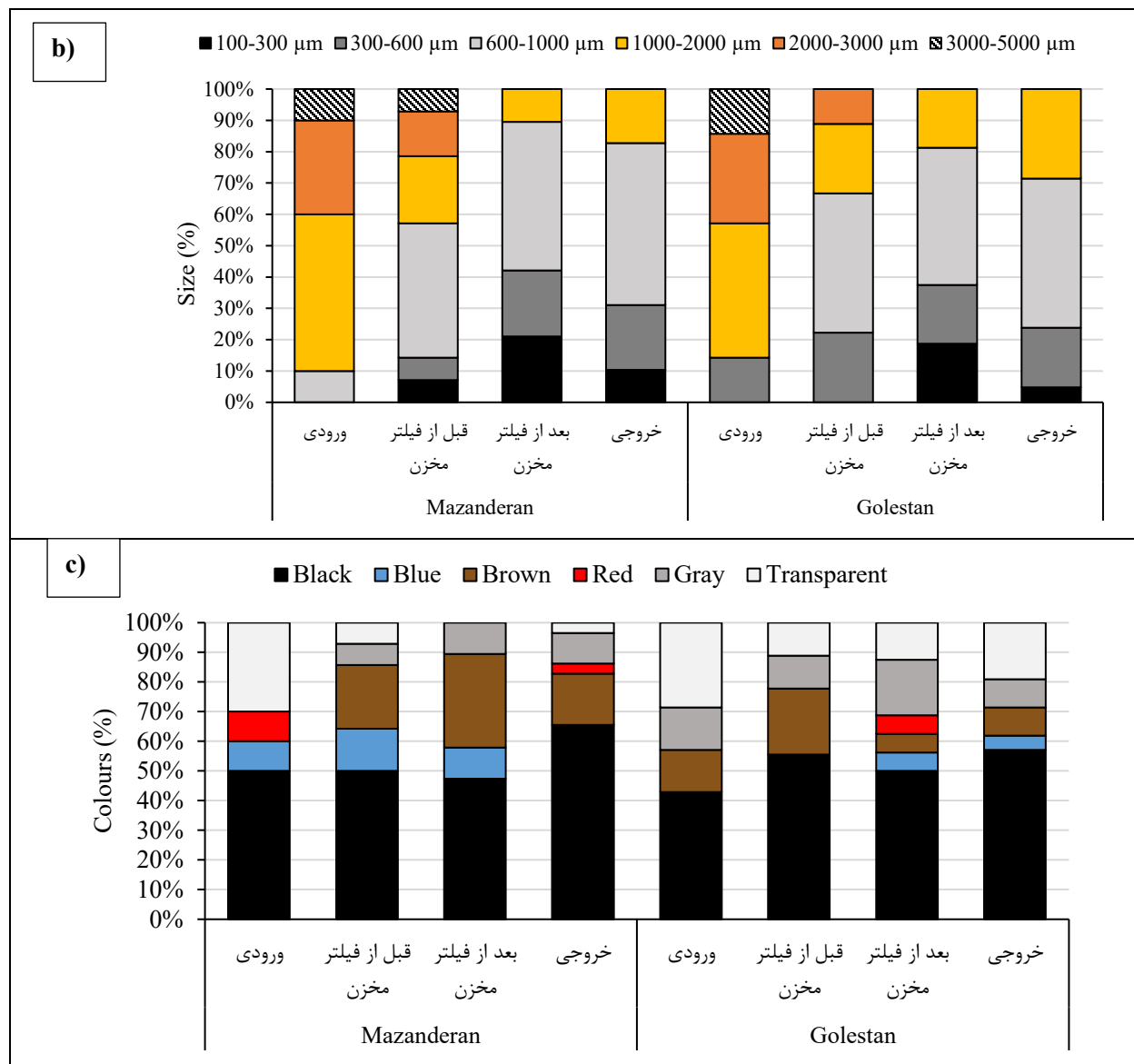
تمام ذراتی که از نظر ظاهری یا طیفی با ذرات مشاهده شده در نمونه‌های کنترل آزمایشگاهی شباهت داشتند (به‌ویژه الیاف سلولزی و همچنین ذرات آلی و معدنی طبیعی)، از تجزیه و تحلیل نهایی حذف شدند. باین‌حال، برخی از الیاف سلولزی که علائم واضحی از تخریب و تغییر رنگ نشان می‌دادند، و/یا حداقل در یکی از طیف‌های طیف‌سنجی‌شان با مواد افزودنی پلاستیکی (plasticizers) همخوانی معناداری داشتند - که در نمونه‌های کنترل این تطابق مشاهده نشد - به‌عنوان ذرات مصنوعی پذیرفته شدند. تنوع ظاهری نمونه‌ها از ذرات پلاستیکی بازیابی شده از آب در ایستگاه‌ها در شکل ۳ به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۳. میکرو گراف‌هایی از میکروپلاستیک‌های شایع الیاف (Fibers) در رنگ‌های مختلف

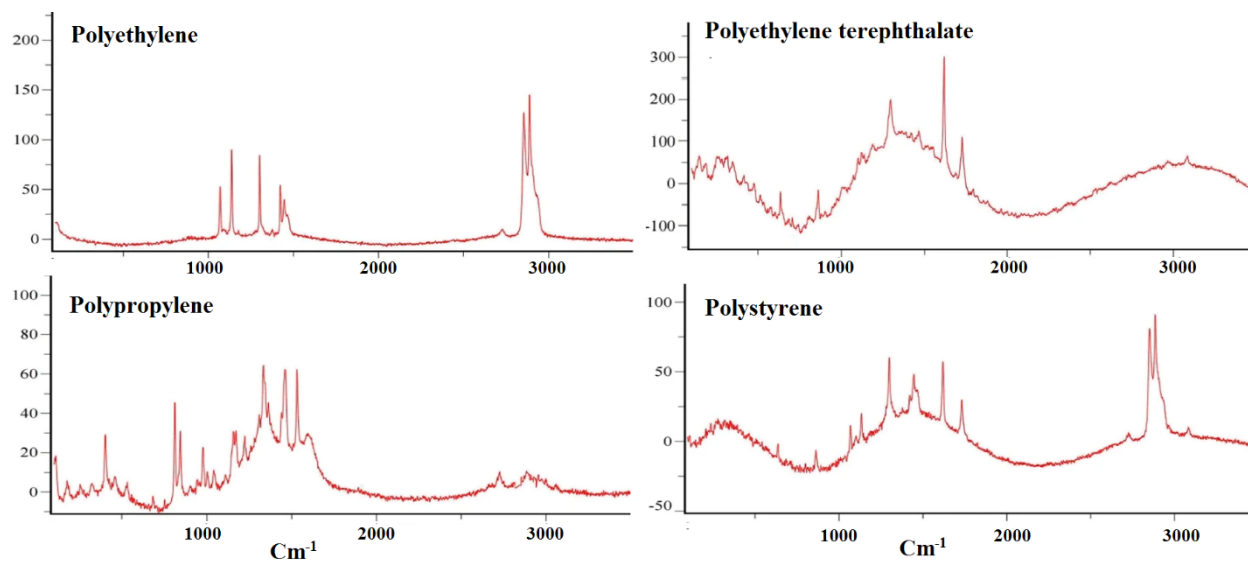
میکروپلاستیک‌ها به ۲ شکل (فیبر و قطعه)، شش طبقه‌بندی رنگی (سیاه، خاکستری، قهوه‌ای، روشن، قرمز و آبی) و شش دسته اندازه (۱۰۰-۳۰۰ میکرومتر، ۳۰۰-۶۰۰ میکرومتر، ۶۰۰-۱۰۰۰ میکرومتر، ۱۰۰۰-۲۰۰۰ میکرومتر، ۲۰۰۰-۳۰۰۰ میکرومتر، ۳۰۰۰-۵۰۰۰ میکرومتر) طبقه‌بندی شدند تا درک جامعی از میکروپلاستیک‌ها در این منطقه مورد مطالعه ارائه شود. ترکیب نماینده میکروپلاستیک‌ها از نظر شکل، رنگ و اندازه به ترتیب در شکل‌های ۴-a، b و c نشان داده شده است. الیاف و قطعات انواع میکروپلاستیک شناسایی شده در تمامی ایستگاه‌ها بودند. که شکل غالب آن، الیاف (۹۰/۴۱٪) در استان مازندران و ۸۸/۶۸٪ در استان گلستان بود. فراوانی قطعات در استان‌های مازندران و گلستان به ترتیب ۹/۵۹٪ و ۱۱/۳۳٪ مشاهده شد (شکل ۴-a). میکروپلاستیک‌های کوچک‌تری در آب‌های سطحی، به‌ویژه کمتر از ۱ میلی‌متر، یافت شدند که ۴۱/۶٪ از کل میکروپلاستیک‌ها را در نمونه‌های آب تشکیل می‌دهند (شکل ۴-b). سایز ۲ الی ۵ میلی‌متر کمترین فراوانی میکروپلاستیک بودند. رنگ میکروپلاستیک‌های مشاهده شده در نمونه‌های آب سطحی عمدتاً سیاه، خاکستری و قهوه‌ای بودند. بیشترین فراوانی مربوط به رنگ سیاه ۵۵/۵۶٪ در استان مازندران و ۵۲/۸۳٪ در استان گلستان بود (شکل ۴-c).



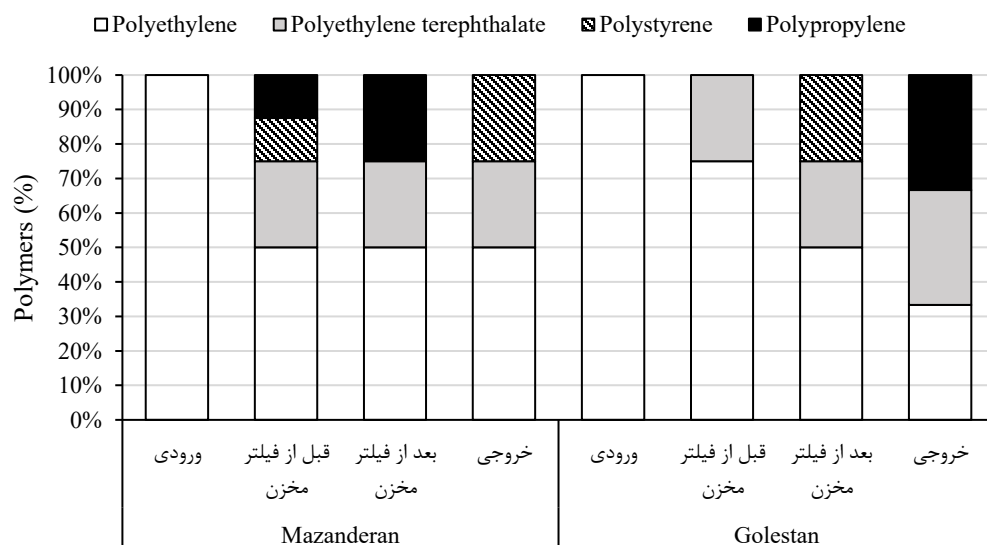


شکل ۴. درصد میکروپلاستیک‌های استخراج‌شده دسته‌بندی‌شده بر اساس: (a) نوع، (b) اندازه، (c) رنگ (برحسب میکرومتر)

از طیف‌سنجی FTIR برای شناسایی انواع میکروپلاستیک‌ها استفاده شد. در این مطالعه، در مجموع ۳۰ ذره که به‌طور تصادفی از نمونه‌های آب انتخاب‌شده بودند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پنج نوع پلیمر میکروپلاستیک شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) شناسایی شدند (شکل ۵). طیف‌های FTIR در شکل ۵ نشان داده شده است. درصد ۴ پلیمر شناسایی شده (PP، PE، PS، و PET) در نمونه‌های آب به ترتیب ۵۳/۳۳٪، ۲۳/۳۳٪، ۱۳/۳۳٪، و ۱۰٪ بود (شکل ۶).



شکل ۵. پلیمرهای شناسایی شده توسط FTIR از نمونه‌های MP استخراج شده



شکل ۶. درصد فراوانی پلیمرهای شناسایی شده از نمونه‌های مورد مطالعه

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از حضور میکروپلاستیک‌ها در تمامی نمونه‌های آب استخراج شده از سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS)، شامل آب ورودی، آب قبل از فیلتر مخزن، آب بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی است. در نمونه‌های شاهد حاوی آب مقطر، به‌طور میانگین ۲ ذره میکروپلاستیک در هر لیتر شناسایی شد. این مقدار، هرچند نشان‌دهنده سطح ناچیز آلودگی زمینه‌ای است، اما بر وجود چالش فراگیر آلودگی میکروپلاستیک‌ها در آزمایش‌های مرتبط تأکید دارد. منابع اصلی این آلودگی زمینه‌ای می‌توانند شامل ورود ذرات از طریق هوا، آب مقطر مورد استفاده و تجهیزات آزمایشگاهی باشند. این یافته‌ها با گزارش‌های پیشین Su و همکاران (۲۰۱۶) [۱۸] همخوانی دارد که آلودگی زمینه‌ای را به‌طور میانگین ۶٫۸ درصد از کل غلظت میکروپلاستیک‌ها (در محدوده ۳٫۴ تا ۲۸٫۸ ذره در لیتر) در فرآیند فیلتراسیون آب سامانه‌های RAS مستند

کرده‌اند. این نتایج بر ضرورت اتخاذ اقدامات دقیق برای کنترل آلودگی‌های محیطی در مطالعات میکروپلاستیک‌ها و اهمیت پایش مستمر منابع احتمالی آلودگی در آزمایشگاه‌ها تأکید می‌کنند.

تعدادی از ذرات پلاستیکی که عمدتاً میکروپلاستیک‌ها بودند، در آب مخازن پرورش شناسایی شدند. به‌طوری که میانگین فراوانی آن‌ها برابر با $6 \pm 2/37$ و $4/42 \pm 1/86$ ذره در لیتر به ترتیب در استان‌های مازندران و گلستان مشاهده شد. این میزان از میکروپلاستیک‌ها می‌تواند به‌راحتی توسط ماهی‌ها جذب شود.

نتایج ما نشان‌دهنده فراوانی بالاتر میکروپلاستیک‌ها نسبت به گزارش‌های پیشین، ازجمله مطالعه Lu و همکاران (۲۰۱۹) ^[۱۲] بود که میزان حضور پلاستیک‌ها در آب سامانه‌های RAS را $0/58 - 0/72$ ذره در لیتر و فراوانی کمتر میکروپلاستیک‌ها نسبت به گزارش Matias و همکاران (۲۰۲۳) ^[۱۳] بود که میزان حضور میکروپلاستیک‌ها در آب سامانه‌های RAS را $37/2 \pm 1/9$ ذره در لیتر اعلام کرده بودند. با این حال، مقایسه مستقیم این داده‌ها با نتایج حاضر دشوار است، زیرا روش‌های متفاوتی برای جمع‌آوری ذرات پلاستیکی به‌کاررفته است؛ ازجمله استفاده از توری با اندازه منافذ ۳۰۰ میکرومتر در مقابل بطری‌های شیشه‌ای که ما استفاده کردیم، که ممکن است در جمع‌آوری ذرات نانو و میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر از ۳۰۰ میکرومتر ناکارآمد باشد.

بررسی‌های انجام‌شده توسط Lu و همکاران (۲۰۱۹) ^[۱۲] صرفاً به شناسایی الیاف پلاستیکی با محدوده اندازه ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر محدود بوده است، در حالی که در مطالعه حاضر، ذرات میکروپلاستیک با دامنه اندازه‌ای گسترده‌تر، از ۱۴۰ تا ۳۸۲۲ میکرومتر، شناسایی شدند. در صورتی که در این پژوهش از روش مشابه Lu و همکاران، یعنی استفاده از توری با منافذ ۳۰۰ میکرومتری، استفاده می‌شد، تقریباً ۵۰ درصد از میکروپلاستیک‌های موجود (ذرات کوچک‌تر از ۳۰۰ میکرومتر) شناسایی نمی‌گردیدند. با وجود این، غلظت میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده در آب مخزن‌های مورد بررسی در این مطالعه همچنان به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقادیر گزارش‌شده توسط Lu و همکاران (۲۰۱۹) ^[۱۲] است.

در مقایسه با تحقیقات پیشین در حوزه میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های بازچرخانی آبی‌پروری، غلظت میکروپلاستیک‌ها در این مطالعه به‌صورت نسبی بالاتر گزارش شده است. مطالعات پیشین تنوع بالایی را در غلظت‌های میکروپلاستیک‌ها نشان داده‌اند. برای مثال، در پژوهشی انجام‌شده در استان فوجیان چین، غلظت میکروپلاستیک‌های بزرگ‌تر از ۳۰۰ میکرومتر تنها $0/065$ ذره در لیتر گزارش شد ^[۱۲]. همچنین، در سامانه آبی‌پروری دریایی (mariculture) مجهز به واحد بازچرخانی در شهر یانتای، غلظت میکروپلاستیک‌ها $0/048$ ذره در لیتر برای الیاف گزارش گردید که این الیاف تنها ۷۵ درصد از کل میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده را تشکیل می‌دادند ^[۱۴]. این مقایسه‌ها بر تفاوت‌های قابل‌توجه در غلظت و ترکیب میکروپلاستیک‌ها در سامانه‌های مختلف آبی‌پروری تأکید دارند و لزوم بررسی‌های دقیق‌تر برای شناسایی عوامل تأثیرگذار بر این تنوع را برجسته می‌کنند.

Huang و همکاران (۲۰۲۳) ^[۱۵] نیز غلظتی معادل $1/67$ ذره در لیتر برای میکروپلاستیک‌ها بزرگ‌تر از ۲۰ میکرومتر یافتند، اما فرض بر این بود که بیشتر ذرات منشأیی از آب جبرانی (make-up water) داشتند. مطالعه‌ای دیگر توسط Matias و همکاران (۲۰۲۳) ^[۱۳] بر روی سامانه RAS حاوی سی‌س اروپایی (*Dicentrarchus labrax*)، غلظتی معادل $39/1$ MP/L (با اندازه تعریف‌نشده) گزارش کرد که نسبت به مطالعه حاضر بالاتر است. با این حال، در این مطالعه، بر اساس آنالیز ترکیب پلیمرها، پیشنهاد شد که اجزای داخلی RAS نقش محدودی در ایجاد این غلظت داشته‌اند.

سطوح بالای ذرات پلاستیکی، در محدوده $10/3$ الی $87/5$ ذره در لیتر، همچنین در استخرهای پرورش ماهی در مصب رودخانه پرل در چین نیز گزارش شده است، که در آن از ظروف شیشه‌ای برای نمونه‌برداری آب استفاده شد ^[۱۶]. چنین غلظت‌هایی از ذرات پلاستیکی به‌مراتب بالاتر از مقادیر گزارش‌شده در آب‌های سطحی دریاها هستند که با استفاده از تورهایی با منافذ تقریباً ۳۰۰ میکرومتر نمونه‌برداری شده‌اند؛ به‌عنوان مثال: $0/004 - 0/001$ ذره در لیتر در آب‌های شمال شرق اقیانوس اطلس ^[۱۷] و $0/005 - 0/020$ ذره در لیتر در مناطق آلوده‌تری مانند دریای شرقی چین

تفاوت معناداری در غلظت میکروپلاستیک‌ها بین محل‌های نمونه‌برداری مختلف مشاهده نشد؛ این یافته با نتایج Lu و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۲] نیز همخوانی دارد، که آن‌ها نیز تفاوت معناداری بین مخازن ماهی، بیوفیلتر و آب بازچرخانی شده گزارش نکردند.

بالین‌حال، در مطالعه حاضر، روندی مشاهده شد که در آن، بیشترین غلظت میکروپلاستیک‌ها در استخرهای مازندران و گلستان مربوط به محل نمونه‌برداری بلافاصله پس از بیوفیلتر (بعد از فیلتر مخزن و آب خروجی) بود؛ موضوعی که منطقی به نظر می‌رسد، زیرا فرض بر این است که منشأ اصلی میکروپلاستیک‌ها خود بیوفیلتر باشد.

غلظت پایین‌تر میکروپلاستیک‌ها در مخازن پرورش ماهی احتمالاً ناشی از رقیق‌سازی در این بخش‌ها است، زیرا بخش عمده آب سامانه (برای مثال، ۶۰ درصد از کل آب در سامانه‌های چرخشی آبی‌پروری یا RAS) در مخازن ذخیره می‌شود. کمترین غلظت میکروپلاستیک‌ها در آب پس از فیلتر درامی مشاهده شد که به احتمال زیاد به کارایی بالای فرآیند فیلتراسیون در حذف ذرات بزرگ‌تر نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که توزیع غلظت میکروپلاستیک‌ها در آب سراسر سامانه RAS یکنواخت‌تر از حد انتظار است. این یکنواختی می‌تواند با پویایی جریان آب و الگوهای توزیع ذرات در سامانه‌های بسته مرتبط باشد، که به تعادل نسبی غلظت ذرات در بخش‌های مختلف منجر می‌شود. علاوه بر فقدان روش‌های استاندارد برای نمونه‌برداری از آب، عوامل متعدد دیگری نیز مقایسه مستقیم نتایج این مطالعه با سایر پژوهش‌ها را چالش‌برانگیز می‌کنند. این عوامل شامل نزدیکی ایستگاه‌های نمونه‌برداری به مناطق شهری یا صنعتی، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه هستند^[۱۶]. از نظر شکل‌شناسی، الیاف به‌عنوان غالب‌ترین شکل میکروپلاستیک‌ها در آب مخازن شناسایی شدند، که این یافته با مشاهدات گزارش‌شده در مطالعات پیشین^[۱۲-۱۳] همخوانی دارد. میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده از تنوع رنگی قابل توجهی برخوردار بودند و سه رنگ غالب شامل سیاه، خاکستری و شفاف عمدتاً با ذرات فیبری مرتبط بودند. این ویژگی‌های رنگی و مورفولوژیکی بر منشأ احتمالی میکروپلاستیک‌ها، نظیر منسوجات و رواناب‌های محیطی، دلالت دارند و بر اهمیت بررسی دقیق‌تر عوامل محیطی و منابع آلودگی در سامانه‌های آبی‌پروری تأکید می‌کنند. اگرچه غلظت میکروپلاستیک‌ها در مخزن ورودی آب که سامانه RAS را تغذیه می‌کند، بسیار کمتر از میزان آن در مخازن پرورش ماهی بود، اما وجود این ذرات در منبع ورودی نشان‌دهنده احتمال نقش داشتن آن در آلودگی سامانه است. درواقع، ماهی‌های پرورش‌یافته در RAS به نظر می‌رسد عمدتاً در معرض میکروپلاستیک‌هایی با شکل و رنگ مشابه با ذرات شناسایی‌شده در محیط‌های طبیعی آبی قرار دارند^[۱۸]، که نشان‌دهنده ارتباط بالقوه با آلودگی ناشی از الیاف نساجی است^[۲۰].

پنج نوع پلیمر میکروپلاستیک شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) شناسایی شدند (شکل ۵). طیف‌های FTIR در شکل ۵ نشان داده شده است. درصد ۴ میکروپلاستیک (PET، PS، PE، PP) در نمونه‌های آب به ترتیب ۵۳/۳۳٪، ۲۳/۳۳٪، ۱۳/۳۳٪ و ۱۰٪ بود (شکل ۶). پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن رایج‌ترین انواع پلیمر شناسایی‌شده بودند و اغلب با ذرات فیبری شکل همراه بودند. فراوانی بالای این نوع الیاف نشان می‌دهد که سیستم‌های بازچرخانی آبی‌پروری در برابر آلودگی با میکروپلاستیک‌ها، مشابه با محیط‌های طبیعی آبی، آسیب‌پذیر هستند^[۱۹].

در مقایسه با دیگر منابع، فراوانی پایین پلیمرهای مرتبط با اجزای داخلی سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS)، نظیر پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP)، نشان‌دهنده مشارکت محدود این سامانه‌ها در سطوح کلی میکروپلاستیک‌های موجود در آب است. با توجه به چگالی کمتر این پلیمرها (کمتر از ۱٫۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، چگالی آب مخزن) و نرخ پایین تعویض آب در سامانه‌های RAS (تقریباً ۵ درصد در روز)، می‌توان استنباط کرد که آلودگی‌های هواگرد و ورودی‌های آب‌زاد از منابع خارجی احتمالاً نقش تعیین‌کننده‌ای در فراوانی بالای الیاف میکروپلاستیک مشاهده‌شده در این سامانه‌ها ایفا می‌کنند. این یافته‌ها بر ضرورت پایش دقیق و مستمر حضور ذرات پلاستیکی در هوا و آب، به‌ویژه در تأسیسات سرپوشیده RAS، تأکید دارند. چنین پایشی امکان شناسایی منابع آلودگی و اجرای اقدامات کنترلی و اصلاحی مؤثر را فراهم می‌آورد تا از تجمع میکروپلاستیک‌ها در این سامانه‌ها جلوگیری شود.

نتیجه گیری نهایی

حضور میکروپلاستیک‌ها در تمامی ایستگاه‌های سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS) واقع در دو منطقه جغرافیایی، شامل استان‌های مازندران و گلستان، شناسایی شد. در سامانه‌های RAS استان گلستان، غلظت میکروپلاستیک‌ها در پایین‌ترین سطح خود، در محدوده ۲,۳۳ تا ۷ ذره در لیتر، مشاهده شد. در مقابل، سامانه‌های RAS استان مازندران غلظت‌های بالاتری را نشان دادند که بین ۳,۳۳ تا ۹,۶۷ ذره در لیتر متغیر بود. بالاترین غلظت میکروپلاستیک‌ها به‌طور معمول در آب خروجی و پایین‌ترین غلظت در آب ورودی گزارش شد. تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FTIR) نشان داد که بخش قابل‌توجهی از میکروپلاستیک‌ها منشأ گرفته از بیومدیا، یعنی اجزای پلاستیکی بیوفیلترها، هستند. این یافته‌ها از فرضیه‌ای حمایت می‌کنند که بیانگر خروج مقدار بیشتری از میکروپلاستیک‌ها از سامانه نسبت به ورودی آن است، به‌ویژه در استخرهای هر دو استان. توزیع اندازه ذرات میکروپلاستیک‌ها در تمامی سامانه‌های RAS مشابه بود، به‌طوری که حدود ۶۸ درصد از ذرات دارای ابعادی کمتر یا برابر با ۱۰۰۰ میکرومتر بودند. در فرآیند نمونه‌برداری از استخرهای RAS، از ظروف پلاستیکی استفاده شد که با اعمال کنترل‌های تطبیقی تصحیح گردید. با این حال، استفاده از ظروف پلاستیکی برای نمونه‌برداری توصیه نمی‌شود و این انتخاب صرفاً به دلیل محدودیت‌های لجستیکی و نبود برآورد دقیق از حجم آب موردنیاز پیش از مطالعه انجام گرفت. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در زمینه رفتار و پراکنش میکروپلاستیک‌ها در آب سامانه‌های RAS مورد استفاده قرار گیرد و بر ضرورت تداوم بررسی‌های مرتبط با تأثیرات میکروپلاستیک‌ها بر سلامت ماهی، تجمع در فیله، و مخاطرات احتمالی برای سلامت مصرف‌کنندگان تأکید دارد. با توجه به غلظت بالای میکروپلاستیک‌ها در خروجی فیلترهای مکانیکی RAS، مدیریت دقیق پسماند در این سامانه‌ها امری حیاتی است. هرچند بازیافت مواد مغذی در RAS اهمیت بسزایی دارد، این فرآیند نباید به قیمت انتشار گسترده‌تر میکروپلاستیک‌ها به محیط زیست تمام شود.

تشکر و قدردانی

در این بخش از همه کسانی که به نحوی در انجام کار همکاری داشته‌اند از جمله دکتر محمد هرسیج و خانم دنیا حاتمی، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع مالی: این مقاله مستخرج از رساله دکتری می‌باشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- [1] Halwart M. Aquaculture in SOFIA 2022. FAO Aquaculture Newsletter. 2022 Dec 1(66):7-8.
- [2] Masoudi E, Hedayati A, Bagheri T, Salati A, Safari R, Gholizadeh M, Zakeri M. Different land uses influenced on characteristics and distribution of microplastics in Qarasu Basin Rivers, Gorgan Bay, Caspian Sea. Environmental Science and Pollution Research. 2022 Sep;29(42):64031-9.
- [3] Gholizadeh M, Alinejad M. Assessment of spatial variability of some affecting parameters on water quality of Zarin Gol River in Golestan province. Environmental Sciences. 2018 Mar 21;16(1):111-26.
- [4] Gholizade M, Rezvani SA, Zibaei M. Effects of land use change on macroinvertebrate community composition in upper reaches of the Chehel-Chai chatchment, Iran. Caspian Journal of Environmental Sciences. 2021 Jul 1;19(3):523-33.

- [5] Naylor RL, Hardy RW, Buschmann AH, Bush SR, Cao L, Klinger DH, Little DC, Lubchenco J, Shumway SE, Troell M. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*. 2021 Mar 25;591(7851):551-63.
- [6] Martins CI, Pistrin MG, Ende SS, Eding EH, Verreth JA. The accumulation of substances in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) affects embryonic and larval development in common carp *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*. 2009 Jun 3;291(1-2):65-73.
- [7] Lv W, Yuan Q, He D, Lv W, Zhou W. Microplastic contamination caused by different rearing modes of Asian swamp eel (*Monopterus albus*). *Aquaculture Research*. 2020 Dec;51(12):5084-95.
- [8] Llorca M, Vega-Herrera A, Schirinzi G, Savva K, Abad E, Farré M. Screening of suspected micro (nano) plastics in the Ebro Delta (Mediterranean Sea). *Journal of hazardous materials*. 2021 Feb 15;404:124022.
- [9] Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP). Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. Reports and studies GESAMP. 2019.
- [10] Barboza LG, Cunha SC, Monteiro C, Fernandes JO, Guilhermino L. Bisphenol A and its analogs in muscle and liver of fish from the North East Atlantic Ocean in relation to microplastic contamination. Exposure and risk to human consumers. *Journal of hazardous materials*. 2020 Jul 5;393:122419.
- [11] Su L, Xue Y, Li L, Yang D, Kolandhasamy P, Li D, Shi H. Microplastics in taihu lake, China. *Environmental Pollution*. 2016 Sep 1;216:711-9.
- [12] Lu J, Zhang Y, Wu J, Luo Y. Effects of microplastics on distribution of antibiotic resistance genes in recirculating aquaculture system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019 Nov 30;184:109631.
- [13] Matias RS, Gomes S, Barboza LG, Salazar-Gutierrez D, Guilhermino L, Valente LM. Microplastics in water, feed and tissues of European seabass reared in a recirculation aquaculture system (RAS). *Chemosphere*. 2023 Sep 1;335:139055.
- [14] Zhang D, Liu X, Huang W, Li J, Wang C, Zhang D, Zhang C. Microplastic pollution in deep-sea sediments and organisms of the Western Pacific Ocean. *Environmental Pollution*. 2020 Apr 1;259:113948.
- [15] Huang F, Hu J, Chen L, Wang Z, Sun S, Zhang W, Jiang H, Luo Y, Wang L, Zeng Y, Fang L. Microplastics may increase the environmental risks of Cd via promoting Cd uptake by plants: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2023 Apr 15;448:130887.
- [16] Ma C, Chen Q, Li J, Li B, Liang W, Su L, Shi H. Distribution and translocation of micro-and nanoplastics in fish. *Critical Reviews in Toxicology*. 2021 Oct 21;51(9):740-53.
- [17] La Daana KK, Officer R, Lyashevskaya O, Thompson RC, O'Connor I. Microplastic abundance, distribution and composition along a latitudinal gradient in the Atlantic Ocean. *Marine pollution bulletin*. 2017 Feb 15;115(1-2):307-14.
- [18] Zhu J, Zhang Q, Li Y, Tan S, Kang Z, Yu X, Lan W, Cai L, Wang J, Shi H. Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China. *Science of the Total Environment*. 2019 Mar 25;658:62-8.
- [19] Hedayati A, Gholizadeh M, Bagheri T, Abarghouei S, Zamani W. Microplastics in marine ecosystems. *Sustainable Aquatic Research*. 2022;1(2):63-73.
- [20] Cesa FS, Turra A, Barúque-Ramos J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: a review from textile perspective with a focus on domestic washings. *Science of the total environment*. 2017 Nov 15;598:1116-29.

Microplastic Abundance in the Rearing Water of Rainbow Trout within a Recirculating Aquaculture System (RAS)

Sina Vahdatirad ¹, Ali Taheri Mirghaed^{2*}, Hosseinali Ebrahimzadeh Mousavi², Seyed Saeed Mirzargar², Mohammad Gholizadeh³

1- Kish International Campus, University of Tehran

2- Department of Aquatic Animal Health, Faculty of Veterinary Medicine, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavos University, Gonbad Kavos, Iran

ABSTRACT

Microplastics are pervasive in aquatic ecosystems, and aquaculture products are susceptible to contamination from both external and internal sources. However, the presence and characteristics of microplastics in Iran's freshwater aquaculture systems have not yet been investigated. This study aims to fill this knowledge gap by quantifying and characterizing microplastics in freshwater RAS facilities across two Iranian regions—Mazandaran and Golestan provinces. In autumn 2024 (Fall 1403 in the Iranian calendar), three liters of water were sampled from each station (inlet water, pre-tank filter, post-tank filter, and outlet water) in the RAS units located in both provinces. Microplastics were extracted from these samples and analyzed for abundance, shape, size, and polymer composition. Polymer types were identified using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). A total of 125 plastic particles were identified, with the highest mean concentration observed in Mazandaran Province (24 ± 2.02 particles per liter) and in the outlet water (29 particles per liter). Fiber-shaped microplastics dominated all samples (over 90%), while fragment types were the least common. Size class analysis showed that the 300–1000 μm group had the highest abundance, whereas the 3000–5000 μm group had the lowest. Black particles were most prevalent, and transparent and red particles were the rarest. The dominant polymer types were polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET). Evaluating how microplastics ingress into RAS facilities—whether through plastic component degradation—and exploring non-plastic alternatives for these components (such as natural biofilters), as well as removal techniques, is critical. These measures are essential to minimize contaminant presence in RAS and to safeguard global food safety.

KEYWORDS: microplastics, water, recirculating aquaculture systems, polymer

ARTICLE TYPE

Original Research

ARTICLE HISTORY

Received: 05 May 2025

Accepted: 10 June 2025

ePublished: 15 June 2025

* Corresponding Author:

Email address: mirghaed@ut.ac.ir

Tel:

© Published by Tarbiat Modares University

ISSN: 2322-5513