



Spatial distribution of microplastics in surface sediments of the Zayandehroud Dam reservoir

Ali Homayoun¹ | Mohammad Nemati Varnosfaderany^{2✉} | Mahtab Haghighatnia³

1. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: homayounali78@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: nemati@iut.ac.ir

3. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: mahtab74.haghighat@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 21 February 2025

Received in revised form 21
November 2025

Accepted 30 November 2025

Keywords:

**Microplastic,
Polypropylene,
Surface sediment,
Zayandehroud Dam.**

ABSTRACT

The present study was conducted with the aim of investigating the spatial distribution of microplastics in surface sediments of the Zayandehroud Dam reservoir, as one of the most important sources of water in the Central Plateau of Iran. For this purpose, surface sediment sampling was carried out at 20 stations along the Zayandehroud Dam reservoir using Ekman grab. Microplastic particles were separated based on their physical properties, including shape, color, and size, and the type of polymers was determined by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The average concentration of microplastics in the surface sediments of the Zayandehroud Dam reservoir (223.3 ± 133.8 particles per kg of dry sediment) is medium compared to other regions of the world. The spatial distribution analysis of the microplastics density showed generally the pattern of increasing gradually from the dam wall towards the entrance of the lake. The detected particles had a great variety in terms of color, shape and size. The highest frequency was assigned to filamentous ($65.3 \pm 32.1\%$) and amorphous particles ($28.1 \pm 30.3\%$). The dominant colors included red ($40.4\% \pm 29.4$), yellow ($38.4\% \pm 26.8$), and blue ($13.7\% \pm 14.9$). The particle size was mainly in the range of 125 to 500 microns. The polypropylene (PP) was dominant among the identified polymers, followed by polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene (PE). In addition, aromatic polyesters such as polybutylene terephthalate (PBT) and polyethylene naphthalate (PEN) were also detected in some samples. In general, the dam has acted as an effective factor in the deposition of microplastics in the upstream parts of Zayandehroud River. However, it seems necessary to adopt and implement management strategies in order to reduce the release of plastics in the upstream areas of the basin.

Cite this article: Homayoun, A., Nemati Varnosfaderany, M., & Haghighatnia, M. (2025). Ecohydrological analysis of black carbon effects on accelerated snowmelt in the Alborz highlands using remote sensing and statistical modeling. *Journal of Natural Environment*, 78 (4), 551-568.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.390800.2774>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

پراکنش مکانی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی دریاچه مخزن سد زاینده‌رود

علی همایون^۱ | محمد نعمتی ورنوسفاد رانی^۲ | مهتاب حقیقت‌نیا^۳

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: homayounali78@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: nemati@iut.ac.ir

۳. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: mahtab74.haghighat@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ کلیدواژه‌ها: پلی پروپیلن، رسوب سطحی، سد زاینده‌رود، میکروپلاستیک	مطالعه حاضر با هدف بررسی پراکنش مکانی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی بستر مخزن سد زاینده‌رود به عنوان یکی از مهمترین منابع آب فلات مرکزی ایران انجام گرفت. بدین منظور نمونه‌برداری از رسوبات سطحی ۲۰ ایستگاه در طول دریاچه مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از غرب اکمن انجام شد. جداسازی ذرات میکروپلاستیک از نظر خصوصیات فیزیکی شامل شکل، رنگ و اندازه انجام شد و نوع پلیمرها با طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه (FT-IR) تعیین گردید. میانگین تراکم میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی مخزن سد زاینده‌رود ($1333/8 \pm 223/3$) ذره در کیلوگرم رسوب خشک) در مقایسه با سایر مناطق جهان، در حد متوسط قرار دارد. تحلیل الگوی توزیع مکانی تراکم میکروپلاستیک‌ها نشان داد که تراکم این ذرات از دیواره سد به سمت ورودی دریاچه به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. ذرات شناسایی شده تنوع زیادی از نظر رنگ، شکل و اندازه داشتند. بیشترین فراوانی به ذرات رشته‌ای ($32/1 \pm 65/3$٪) و بی‌شکل ($30/3 \pm 28/1$٪) اختصاص یافت. رنگ‌های غالب شامل قرمز ($4/4 \pm 40/4$٪)، زرد ($26/8 \pm 38/4$٪) و آبی ($14/9 \pm 13/7$٪) بودند و اندازه ذرات عمدتاً در محدوده ۱۲۵ تا ۵۰۰ میکرون قرار داشت. پلی پروپیلن (PP) بیشترین سهم را در میان پلیمرهای شناسایی شده داشت و پس از آن پلی وینیل کلراید (PVC) و پلی اتیلن (PE) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. علاوه بر این، پلی استرهای آروماتیک مانند پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) و پلی اتیلن نفتالات (PEN) نیز در برخی نمونه‌ها شناسایی شدند. به طور کلی مخزن سد به عنوان عاملی مؤثر در ترسیب میکروپلاستیک‌ها در بخش‌های بالادست رودخانه زاینده‌رود عمل کرده است. با این حال، اتخاذ و اجرای راهبردهای مدیریتی به منظور کاهش انتشار پلاستیک‌ها در مناطق بالادست حوضه ضروری به نظر می‌رسد.

استناد: همایون، علی؛ نعمتی ورنوسفاد رانی، محمد؛ و حقیقت‌نیا، مهتاب (۱۴۰۴). پراکنش مکانی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی دریاچه مخزن سد زاینده‌رود.

محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۴)، ۵۶۸-۵۵۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.390800.2774>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

عصر حاضر به دلیل وابستگی گسترده به پلاستیک، به عنوان "عصر پلاستیک" شناخته می‌شود (Cózar et al., 2014). پلاستیک به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای همچون دوام زیاد، وزن کم و مقاومت در برابر خوردگی، به ماده‌ای ایده‌آل برای طیف گسترده‌ای از کاربردها تبدیل شده است (Yang et al., 2021). با این حال، رشد بی‌سابقه تولید پلاستیک از دهه ۱۹۵۰ تاکنون، اثرات مخرب محیط‌زیستی و نگرانی‌های قابل توجهی را ایجاد کرده است. تا سال ۲۰۲۳، تولید پلاستیک جهانی به ۴۸۹ میلیون تن رسید و انتظار می‌رود که در صورت ادامه این روند، تا سال ۲۰۶۰ به ۱/۲ میلیارد تن برسد (Janssens, 2022; Wang et al., 2024). این افزایش، با پیامدهای بالقوه بر محیط‌زیست و سلامت انسان همراه است. یکی از مهم‌ترین معضلات محیط‌زیستی ناشی از پلاستیک، ایجاد میکروپلاستیک‌ها است؛ ذراتی کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر که طی فرآیندهای تولید، مصرف، و دفع پلاستیک‌ها ایجاد می‌شوند (Frias and Nash, 2019). این ذرات به دلیل سبکی و مقاومت زیاد، به آلاینده‌هایی گسترده و پایدار تبدیل شده‌اند و حتی در مناطق دورافتاده مانند قطب شمال و بخش‌های میانی اقیانوس‌ها یافت شده‌اند (Abbasi and Turner, 2022). میکروپلاستیک‌ها می‌توانند از طریق عوامل هوازدگی مانند تابش امواج ماوراء بنفش، هیدرولیز، سایش مکانیکی، و فعالیت‌های زیستی به مرور از تجزیه قطعات بزرگ‌تر پلاستیکی ایجاد شوند (Mushtak et al., 2023). این آلاینده‌ها از مسیرهای مختلف، از جمله رسوبات جوی، پساب فاضلاب و رواناب شهری وارد محیط آبی می‌شوند (Fang et al., 2021). میکروپلاستیک‌ها به دو دسته اصلی اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه، مستقیماً به شکل ذرات کوچک تولید می‌شوند و در محصولاتی نظیر مواد آرایشی و دارویی به کار می‌روند (da Costa et al., 2016). در حالی که میکروپلاستیک‌های ثانویه، از تجزیه تدریجی قطعات پلاستیکی بزرگ‌تر در اثر عوامل محیطی حاصل می‌شوند (Andrady, 2011). میکروپلاستیک‌ها تأثیرات منفی متعددی بر بوم‌سازگان‌ها به‌ویژه بوم‌سازگان‌های آبی دارند. همچنین، انتقال به سیستم‌های آبی از طریق رواناب و باران، منجر به تجمع در بدن موجودات آبی و ورود آنها به زنجیره غذایی انسان از طریق مصرف، استنشاق یا تماس پوستی می‌شود. در نهایت، پلاستیک‌ها که عمدتاً از پلیمرها و افزودنی‌های شیمیایی ساخته شده‌اند، اگرچه به بهبود ویژگی‌های کارکردی نظیر دوام و انعطاف‌پذیری کمک می‌کنند، اما حضور آنها در محیط‌زیست چالش‌های ایجاد کرده است که نیازمند اقدامات فوری برای کاهش تولید و مدیریت صحیح پسماند است (UNEP, 2023). میکروپلاستیک‌ها همچنین مخازن آلاینده‌های آلی پایدار مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) و بی‌فیل‌های پلی‌کلره (PCBs) هستند که بر سطح آنها تجمع می‌کنند (Elert et al., 2017). این ذرات بسته به چگالی، ممکن است در سطح آب شناور بمانند یا با رسوبات ته‌نشین شوند. عوامل محیطی مانند تشکیل پوشش زیستی و جذب آلاینده‌ها بر سطح میکروپلاستیک‌ها، چگالی آنها را افزایش داده و رسوب‌گذاری را تسهیل می‌کند (Van Cauwenbergh et al., 2015). مقادیر زیاد میکروپلاستیک‌ها در رسوبات ساحلی اقیانوس‌ها و دریاها در مناطق مختلف جهان از جمله اروپا، آمریکای شمالی، آمریکای جنوبی، آسیا و آفریقا گزارش شده است (Gideon and Faggio, 2019). اگرچه پژوهش‌ها در زمینه شناسایی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات بوم‌سازگان‌های آب شیرین در سال‌های اخیر افزایش یافته است، اما این حوزه همچنان با محدودیت‌هایی مواجه است. دانش کنونی ما درباره آلودگی میکروپلاستیک‌ها در این رسوبات هنوز ناقص است، چرا که ابعاد مختلفی نظیر میزان آلودگی، منابع تولید، الگوهای پراکنش و خطرات بالقوه این ذرات به‌طور کامل بررسی نشده است (Cózar et al., 2014). با این حال، برخی مطالعات اخیر تلاش کرده‌اند تا با تمرکز بر رسوبات آب شیرین در رودخانه‌ها و دریاچه‌های مناطق مختلف جهان، این شکاف‌های دانش را پر کنند (Eerkes-Medrano et al., 2015). ورود میکروپلاستیک‌ها به این بوم‌سازگان‌ها تحت تأثیر عواملی مانند تغییرات در کاربری اراضی، تخلیه فاضلاب شهری، و ویژگی‌های هیدرولوژیک رودخانه‌ها است (Mani et al., 2015). با وجود اهمیت منابع آب شیرین به عنوان منبع آب آشامیدنی، تحقیقات در مورد آلودگی میکروپلاستیک‌ها در این محیط‌ها نسبت به محیط‌های دریایی در مراحل اولیه قرار دارد و تنها ۴ درصد از تحقیقات میکروپلاستیک به آب‌های شیرین اختصاص دارد (Lambert and Wagner, 2018). در ایران، اطلاعات موجود در خصوص آلودگی میکروپلاستیک در بوم‌سازگان‌های آب شیرین، به‌ویژه در سدهای مخزنی که مهمترین منابع تأمین آب شرب هستند، بسیار محدود است. تنها یک مطالعه در سد طالقان صورت گرفته است (Yeganefar et al., 2020). خوشبختانه پراکنش میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی

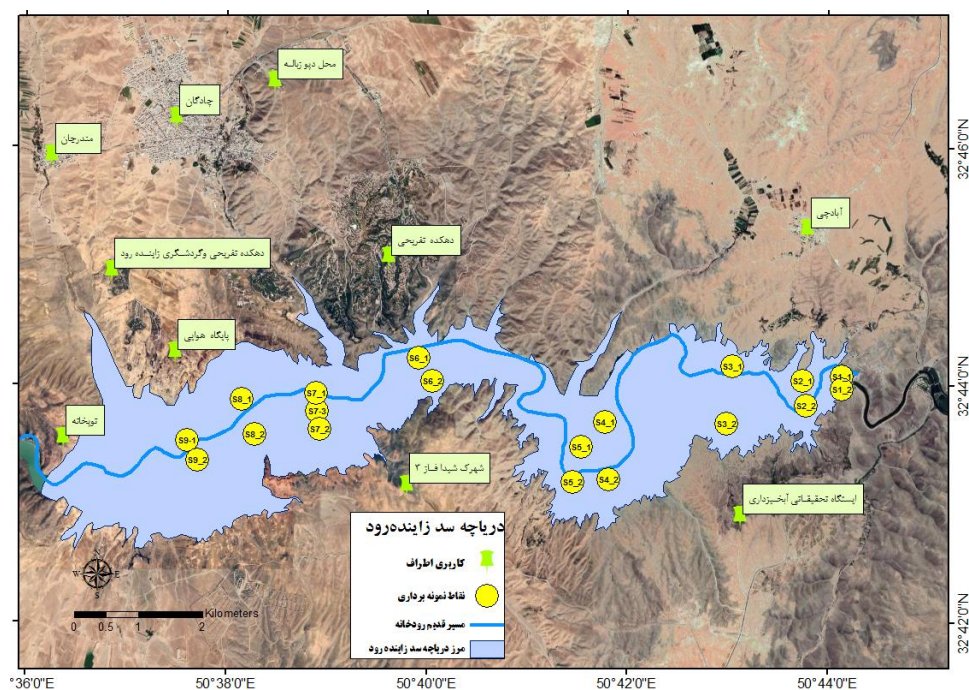
رودخانه زاینده رود مورد مطالعه قرار گرفته است (Behmanesh et al., 2022). اما تا به حال در رسوبات سطحی مخزن سد زاینده رود چنین مطالعه‌ای انجام نشده است.

سد زاینده رود به عنوان منبع اصلی تأمین آب اصفهان، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و آلودگی‌های مختلف، از جمله میکروپلاستیک‌ها، تهدیدی برای کیفیت آب و سلامت آن به شمار می‌رود. این تحقیق به عنوان اولین مطالعه در زمینه بررسی پراکنش میکروپلاستیک‌ها در رسوبات مخزن سد زاینده رود، زمینه‌ساز تحقیقات آینده در این حوزه است. پایش توزیع مکانی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی نه تنها به شناسایی میزان آلودگی و الگوی پراکنش آن در مناطق مختلف مخزن کمک می‌کند، بلکه امکان تحلیل عمیق‌تر عوامل تأثیرگذار بر توزیع را نیز فراهم می‌سازد. نقشه‌های حاصل، ابزار مهمی برای بررسی اثرات جریان‌های آبی، الگوهای رسوب‌گذاری و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تجمع و پراکندگی میکروپلاستیک‌ها هستند. با توجه به تنوع ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها، می‌توان به درک بهتری از فرآیندهای حاکم بر حضور و جابجایی این آلاینده‌ها در محیط آبی دست یافت که در برنامه‌های مدیریتی برای کاهش ورود میکروپلاستیک‌ها به مخزن سد و بوم‌سازگان‌های پیرامون ایفا می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه: سد زاینده رود، یکی از زیرساخت‌های حیاتی آبی ایران، در حوضه آبریز زاینده رود واقع شده و نقش کلیدی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت مرکز کشور دارد. این سد در مختصات جغرافیایی $36^{\circ}32'$ تا $37^{\circ}30'$ عرض شمالی و $25^{\circ}50'$ تا $27^{\circ}50'$ طول شرقی، در ارتفاع 2063 متری از سطح دریا قرار دارد. این سد با ظرفیت 1470 میلیون مترمکعب و مساحتی حدود 54 کیلومتر مربع، منبع اصلی آب برای بیش از 70 هزار هکتار اراضی کشاورزی و صنایع عمده استان اصفهان از جمله فولاد است. علاوه بر تأمین منابع آب، دریاچه سد به دلیل شرایط اقلیمی و طبیعی، یکی از مناطق مهم گردشگری و تفریحی استان محسوب می‌شود. حوضه آبریز سد شامل رودخانه‌های اصلی زاینده رود و پلاسجان و چندین رودخانه فرعی است که علاوه بر تأمین جریان‌های سطحی، نقش مهمی در تغذیه منابع آب زیرزمینی و حفظ تعادل بوم‌شناختی منطقه دارند. ساختار زمین‌شناسی غالباً رسوبی و آبرفتی با نفوذپذیری زیاد، ظرفیت ذخیره و جریان آب زیرزمینی را تقویت می‌کند و اهمیت مدیریت پایدار منابع آب را دوچندان می‌سازد. با وجود اهمیت اقتصادی و اجتماعی سد، این سازه با چالش‌های محیط‌زیستی جدی مواجه است. کاهش منابع آبی ناشی از برداشت بی‌رویه، ورود آلاینده‌های شهری و صنعتی از مناطق بالادست، و ظهور آلاینده‌های نوظهور مانند میکروپلاستیک‌ها، تهدیدی جدی برای کیفیت آب، تنوع زیستی و سلامت این بوم‌سازگان آبی محسوب می‌شوند.

نمونه‌برداری: تحلیل اطلاعات موجود به منظور تعیین ایستگاه‌های نمونه‌برداری مورد نیاز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی صورت گرفت. با توجه به منابع مختلف آلاینده و خصوصیات محیطی در بخش‌های مختلف مخزن سد زاینده رود، نمونه‌برداری از رسوبات به منظور بررسی و اندازه‌گیری ذرات میکروپلاستیک از نظر خصوصیات فیزیکی (شامل شکل، رنگ و اندازه) و تعیین ساختار پلیمر و جنس ذرات میکروپلاستیک انجام شد. در راستای انجام این مطالعه، 20 ایستگاه در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری از رسوبات سطحی در طول دریاچه پشت سد در دو نیم‌خط موازی با مسیر قدیم رودخانه زاینده رود در 9 ایستگاه با افزایش فاصله از تاج سد ($S1, S2, S3, \dots, S9$) صورت گرفت (شکل ۱). در هر ایستگاه از سمت چپ (کد ۱، مثل کد $S1-1$) و راست (کد ۲، مثل کد $S1-2$) مسیر قدیم رودخانه زاینده رود نمونه‌برداری شد. تنها در دو ایستگاه نزدیک تاج سد و بخش غربی دریاچه نمونه‌برداری از رسوبات سطحی در محل تقریبی مرکز مسیر قدیم رودخانه زاینده رود (به ترتیب کدهای $S1-3$ و $S7-3$) نیز انجام گرفت. موقعیت ایستگاه‌ها به نحوی بود که بیشترین گستره سطح دریاچه و به ویژه بخش‌های مرکزی، شرقی و غربی مخزن سد را در بر گیرد. نمونه‌ها در تاریخ ۲۹ و ۳۰ آذرماه ۱۴۰۱ از رسوبات هر ایستگاه با استفاده از گرب اکمن و با به کارگیری قایق موتوری از اعماق مختلف (ناشی از توپوگرافی مخزن دریاچه از حدود 40 متر در نزدیک تاج سد تا حدود 5 متر در نزدیکی ورودی رودخانه زاینده رود) انجام شد. در مجموع از 20 ایستگاه 9 کیلوگرم نمونه رسوب سطحی جمع‌آوری و در فویل‌های آلومینیومی کدگذاری شده (Prume et al., 2021) به صورت جداگانه نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری رسوبات سطحی در دریاچه سد زاینده‌رود

متغیرهای رسوب‌شناسی: برای تعیین تأثیر احتمالی شرایط محیط رسوب‌گذاری بر تجمع میکروپلاستیک‌ها از نتایج اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکی و شیمیایی رسوب شامل درصد رطوبت، چگالی خام، چگالی خشک، دانه‌بندی، pH، پتانسیل اکسیداسیون-احیا (Eh)، هدایت الکتریکی (EC)، درصد ماده آلی و درصد کربنات کلسیم (CaCO_3) که در مطالعه Haghghatnia (۲۰۲۳) با روش‌های استاندارد در ۲۰ نمونه رسوب سطحی مشترک با مطالعه حاضر اندازه‌گیری شده، استفاده گردید. به‌طور کلی برای اندازه‌گیری درصد رطوبت، چگالی خام و چگالی خشک از روش توزین، خشک نمودن نمونه‌های رسوب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سپس اندازه‌گیری اختلاف وزن استفاده شده است (Iaea, 2003). مقادیر pH، هدایت الکتریکی (EC) و پتانسیل اکسیداسیون-احیا (Eh) رسوبات با روش عصاره‌گیری با نسبت ۱:۵ و به روش الکتروود اندازه‌گیری شدند (Gregorich and Carter, 2007). اندازه‌گیری میزان ماده آلی (OM) و کربنات کلسیم (CaCO_3) نمونه‌ها با روش تیتراسیون به‌ترتیب با روش والکی-بلک (Walkley and Black, 1934) و روش Sparks و همکاران (۲۰۲۰) انجام شده است. اندازه‌گیری ذرات رسوبات سطحی در دو بخش با روش‌های الک تر و هیدرومتر انجام شد (Gee and Or, 2006). داده‌های حاصل براساس استاندارد Wentworth (۱۹۹۲) به گروه‌های اندازه ذرات شامل سنگریزه (بزرگتر از ۲ میلی‌متر)، ماسه بسیار درشت (۲-۱ میلی‌متر)، ماسه درشت (۱-۰/۵ میلی‌متر)، ماسه متوسط (۰/۵-۰/۲۵ میلی‌متر)، ماسه ریز (۰/۲۵-۰/۱۲۵ میلی‌متر)، ماسه بسیار ریز (۰/۱۲۵-۰/۰۶۳ میلی‌متر) و ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۶۳ میلی‌متر (سیلت و رس) دسته‌بندی شدند. برای دانه‌بندی ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۶۳ میلی‌متر، از روش هیدرومتر استفاده شد (Lewis and McConchie, 1994).

استخراج میکروپلاستیک‌ها: با وجود تمرکز عمده تحقیقات بر محیط‌های آبی به‌دلیل تجمع وسیع زباله‌های پلاستیکی و تأثیرات آنها بر موجودات آبی (Andrady, 2011)، نقش رسوبات در حرکت، ته‌نشینی و ذخیره‌سازی میکروپلاستیک‌ها کمتر بررسی شده است (Gao et al., 2020). در حالی که بستر بوم‌سازگان‌های آبی مخازن انباشت بلندمدت میکروپلاستیک‌ها محسوب می‌شوند و درک میزان تجمع و توزیع آنها برای ارزیابی اثرات بوم‌شناختی حیاتی است (Willis et al., 2017). متأسفانه، با توجه به ماهیت ناهمگن رسوبات و تنوع بوم‌سازگان‌های آبی، تاکنون روش مشخص و استاندارد جهانی برای استخراج و جداسازی میکروپلاستیک‌ها اتخاذ نشده است (Lee et al., 2023). تفاوت روش‌های استخراج و پردازش نمونه‌ها در مطالعات مختلف، مقایسه بین مناطق جغرافیایی را دشوار کرده و توسعه استاندارد جهانی برای شناسایی و طبقه‌بندی میکروپلاستیک‌ها هنوز در حال به‌روزرسانی است (Vural, 2025). در این مطالعه، برای رفع این خلأ و ایجاد رویکردی عملی و قابل بازتولید، از روش شمارش مستقیم در نمونه‌های الک شده استفاده گردید. در این روش همزمان با جداسازی رسوبات از نظر اندازه ذرات با استفاده از سری الک استاندارد (به‌ترتیب

از بالا به پایین الک‌ها با مش‌های ۴، ۱۰، ۱۸، ۳۵، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۳۰، میکروپلاستیک‌ها نیز براساس اندازه جدا می‌شود و ذرات بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر حذف می‌شود (Rani et al., 2023). نتایج حاصل از شمارش میکروپلاستیک‌ها نیز براساس جرم نمونه خشک گزارش شد تا مقایسه با مطالعات دیگر امکان‌پذیر گردد (Álvarez-Hernández et al., 2019).

شمارش و تعیین نوع میکروپلاستیک‌ها: میکروپلاستیک‌های موجود در ظروف مربوط به نمونه‌های دانه‌بندی‌شده، به صورت مجزا و از طریق مشاهده چشمی با استفاده از لوپ مدل Nikon با بزرگنمایی ۸۰ برابر شناسایی، جداسازی و شمارش شدند (Vianello et al., 2013). اطلاعات مربوط به فراوانی تمامی ذرات میکروپلاستیک جداسازی‌شده از نظر اندازه و ویژگی‌های ظاهری شامل رنگ و شکل ثبت گردید. به منظور مستندسازی انواع رنگ و شکل میکروپلاستیک، در زمان جداسازی نمونه‌ها با استفاده از دوربین چشمی نصب شده روی لوپ، از نمونه‌های مختلف عکس تهیه گردید. در گام نهایی، میکروپلاستیک‌های غالب که در این بررسی شناسایی شدند، به منظور انجام طیف‌سنجی مادون قرمز فوری (FT-IR) و تعیین نوع میکروپلاستیک جداسازی و در ظروف شیشه‌ای نگهداری شدند. سپس این نمونه‌ها به آزمایشگاه تخصصی ارسال گردید تا نوع میکروپلاستیک‌ها تعیین شود. این رویکرد ترکیبی، امکان ارزیابی جامع و قابل‌اعتماد ویژگی‌های میکروپلاستیک‌ها را فراهم می‌کند (Rocha-Santos and Duarte, 2017).

تضمین و کنترل کیفیت: به منظور جلوگیری از آلودگی متقاطع و کاهش خطا در فرآیند شناسایی و شمارش میکروپلاستیک‌ها، تمامی تجهیزات مورد استفاده سه بار با آب مقطر شستشو داده شده و پس از خشک‌سازی، به طور کامل با فویل آلومینیومی یا درپوش مناسب پوشانده شدند. در طول فرآیند آزمایش‌ها، از لباس‌های آزمایشگاهی نخی و ظروف شیشه‌ای استفاده گردید (Prata et al., 2019). همچنین، سطح کار به طور مداوم با آب و الکل شستشو شده و برای کاهش تداخلات ناشی از جریان هوا، پنجره‌ها در حین آزمایش‌ها بسته نگه داشته شدند. این تدابیر با هدف تضمین دقت و صحت نتایج آزمایشگاهی به کار گرفته شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها: در این پژوهش، به منظور بررسی روابط میان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات و میزان تجمع میکروپلاستیک‌ها، از تحلیل آماری همبستگی بهره گرفته شد. داده‌های جمع‌آوری شده ابتدا از نظر نرمال بودن با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شدند و به دلیل نرمال نبودن بسیاری از داده‌ها، برای ارزیابی ارتباط میان متغیرها، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید (Zar, 1999).

یافته‌های پژوهش و بحث

متغیرهای رسوب شناسی: مقدار کمینه و بیشینه چگالی خام (جدول ۱) به ترتیب برابر با ۱/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نقطه S1-1 و ۱/۸۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نقطه S9 بود. همچنین، درصد رطوبت در محدوده ۳۸/۹٪ در نقطه S2-5 تا ۶۴/۸۱٪ در نقطه S1-1 تغییر کرده است. مقدار pH رسوبات نشان‌دهنده وضعیت ملایم قلیایی مخزن است. کمترین مقدار pH برابر با ۷/۷۱ و بیشترین مقدار آن ۸/۲۳ بود و به طور کلی از تاج سد به سمت ورودی دریاچه روند افزایشی داشت. مقدار Eh (اکسایش-کاهش) در رسوبات سطحی به طور میانگین ۱۲۰/۴ میلی‌ولت اندازه‌گیری شد و از تاج سد به سمت ورودی کاهش یافت. این تغییرات با نوسانات ناگهانی در برخی نقاط همراه بود. مقدار EC رسوبات از تاج سد به سمت ورودی دریاچه روند کاهشی داشت و کمینه و بیشینه آن به ترتیب برابر با ۱۰۸/۲ و ۲۲۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. میانگین هدایت الکتریکی در رسوبات سطحی ۱۵۱/۶ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که در برخی نقاط، از جمله S5-1 و S1-2، نوسانات ناگهانی نشان داد (جدول ۱). درصد ماده آلی در رسوبات سطحی از ۰/۹۱٪ در نقطه S2-1 تا ۲/۶۱٪ در نقطه S6-1 متغیر بود و روند کلی آن افزایشی همراه با نوسانات نامنظم کاهشی در برخی نقاط بود. این الگو با گزارشات قبلی از مطالعات مشابه، از جمله مطالعه مهندسین مشاور دریاترسیم (۱۳۹۰)، همخوانی داشت. مقدار CaCO_3 نیز در بازه ۱۴/۵٪ در نقطه S2-1 تا ۶۴٪ در نقطه S3-2 قرار داشت و به طور کلی روند افزایشی از تاج سد به سمت ورودی دریاچه داشت. رسوبات سطحی مخزن به طور عمده شامل ذرات ریزتر (سیلت و رس) با سهم ۹۷/۱۵٪ بود. ذرات ماسه با سهم کلی ۲/۳۲٪ و سنگریزه با ۰/۵۳٪ درصد کم‌تری از رسوبات را تشکیل داد (جدول ۱). مطالعات انجام شده و نیز مطالعه حاضر نشان می‌دهد که رسوبات سطحی مخزن سد زاینده‌رود نه تنها از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متنوع هستند،

بلکه الگوهای فضایی آنها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد فرآیندهای ترسیب و توزیع آلودگی در طول مخزن ارائه دهد. در نهایت، تحلیل‌ها بر این نکته تأکید دارند که ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی رسوبات به‌تنهایی قادر به تبیین دقیق توزیع و میزان میکروپلاستیک‌ها نیستند و منبع اصلی آلودگی از ورود میکروپلاستیک‌ها از حوضه‌های آبریز ناشی می‌شود. این نتایج ضرورت توجه به منابع ورودی آلودگی به‌ویژه در مناطق نزدیک به رودخانه‌ها و حوضه‌های آبریز را برجسته می‌سازد و تأکید بر مدیریت دقیق منابع آب و کنترل آلودگی‌های ناشی از میکروپلاستیک‌ها دارد.

جدول ۱- خلاصه آماری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات سطحی مخزن سد زاینده‌رود (Haghighatnia, 2023)

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
رطوبت (درصد)	۴۶/۷	۵/۶۷	۳۸/۹۰	۶۴/۸۱
چگالی خام (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۵۳	۰/۱۳	۱/۱۴	۱/۸۰
چگالی خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۲۶	۰/۲۱	۰/۶۲	۱/۵۸
سنگریزه (درصد)	۰/۵۳	۲/۲۱	۰	۹/۶۶
ماسه (درصد)	۲/۳۲	۷/۲۶	۰	۲۹/۴۳
سیلت و رس (درصد)	۹۷/۱۵	۹/۳۳	۶۰/۹۰	۱۰۰
ماده آلی (درصد)	۱/۹۱	۰/۴۴	۰/۹۱	۲/۶۱
کربنات کلسیم (درصد)	۳۷/۵۵	۱۲/۸۹	۱۴/۵	۶۴
pH	۸/۰۵	۰/۱۳	۷/۷۱	۸/۲۳
EC (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	۱۵۱/۶	۲۶/۸۵	۱۰۸/۲	۲۲۱
Eh (میلی ولت)	۱۲۰/۴۰	۱۷/۹۰	۹۱	۱۵۳

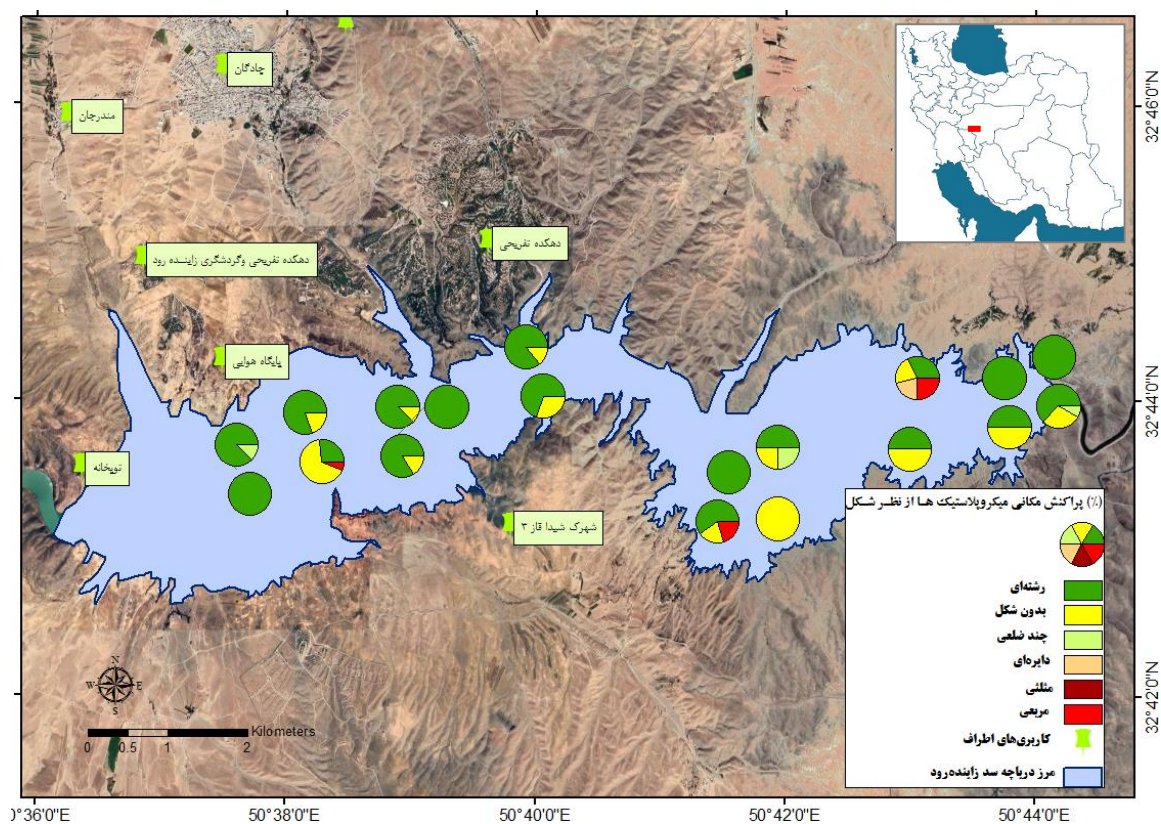
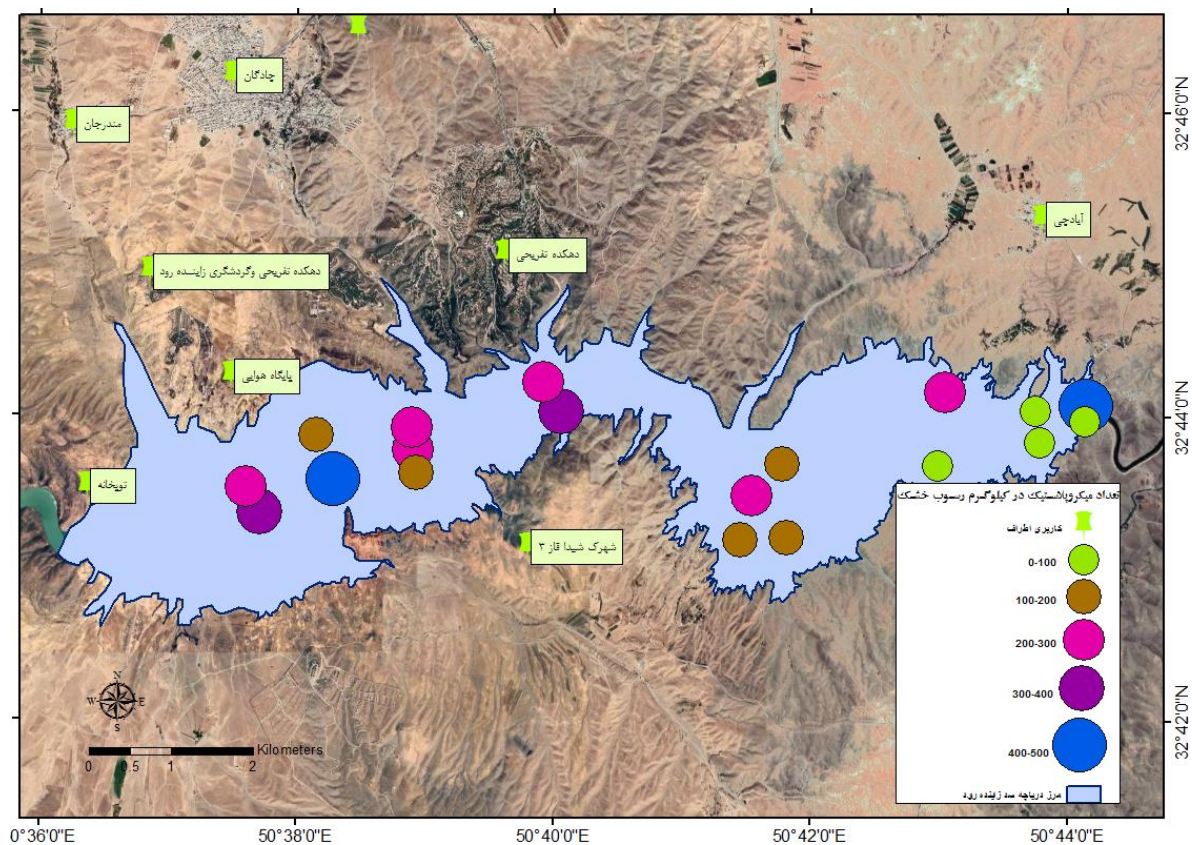
تغییرات مکانی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی و بررسی خصوصیات آنها: نتایج این پژوهش نشان داد که ذرات میکروپلاستیک در تمامی ۲۰ ایستگاه نمونه‌برداری مخزن سد وجود داشتند. در این مطالعه ۱۲۷۸ ذره میکروپلاستیک از نمونه‌های رسوب سطحی دریاچه سد زاینده‌رود جداسازی و شناسایی گردید. بررسی‌های ظاهری ذرات شناسایی‌شده که با استفاده از لوپ انجام شد، تنوع قابل‌توجهی را از نظر شکل، اندازه و رنگ نشان داد (شکل ۲). همچنین، توزیع فضایی و نقشه پراکندگی ذرات میکروپلاستیک با استفاده از مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در مخزن سد زاینده‌رود تهیه و ارائه شده است. این نقشه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که الگوهای مختلف پراکنش میکروپلاستیک‌ها را از نظر تراکم ذرات (شکل ۳)، شکل ذرات (شکل ۴)، رنگ (شکل ۵)، و اندازه (شکل ۶) آنها به تصویر بکشند.

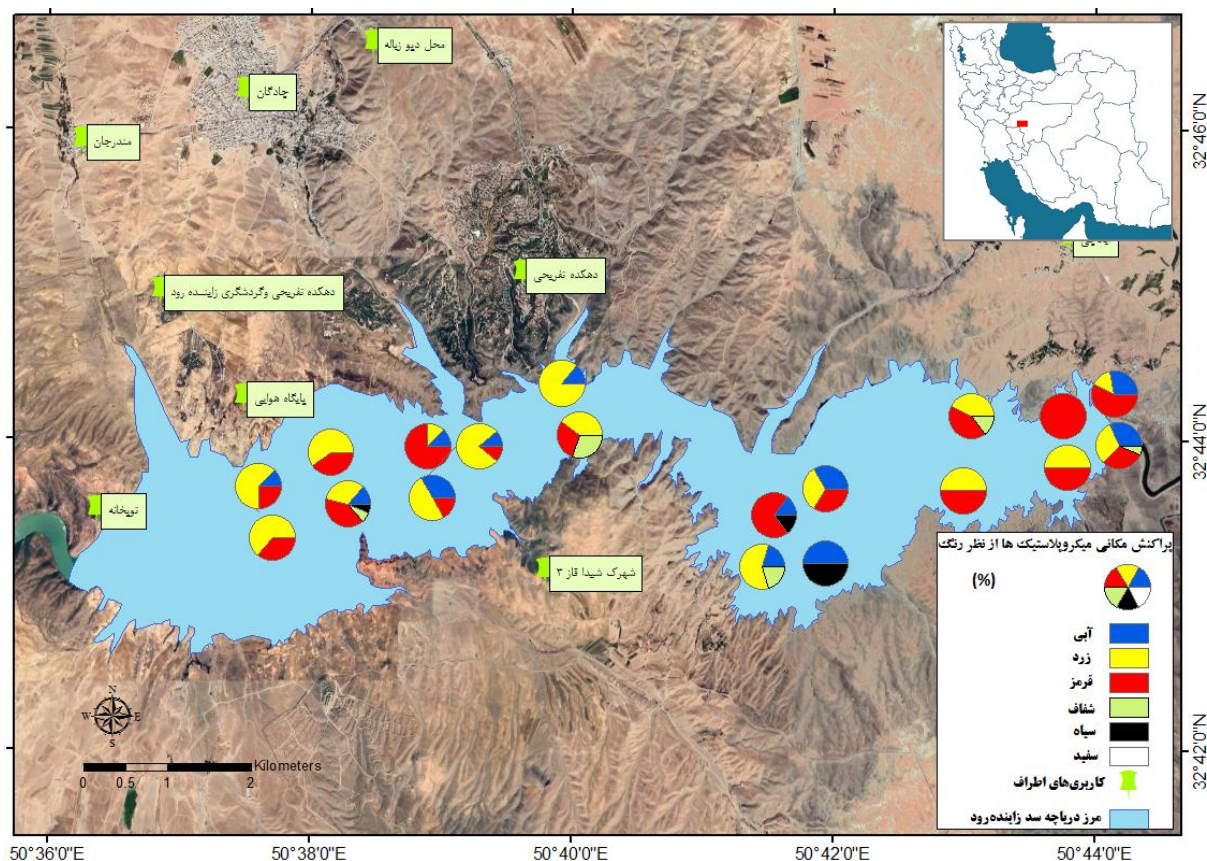
میکروپلاستیک‌ها، به‌عنوان یکی از انواع مهم آلودگی‌های حال حاضر در محیط‌زیست، از نظر ساختاری براساس معیارهای متنوعی همچون رنگ، شکل، اندازه و ترکیب شیمیایی در سطح جهان مورد طبقه‌بندی قرار گرفته‌اند. با این حال، استانداردهای جامع و کلی برای تعریف خصوصیات و مشخصات این ذرات همچنان در حال تدوین و توسعه است. براساس پژوهش‌های گذشته، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میکروپلاستیک‌ها به‌شدت تحت تأثیر منبع تولید، فرآیندهای تجزیه و نوع محیطی قرار دارند که در آنها یافت می‌شوند (Piperagkas et al., 2019). در مطالعه حاضر، میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده دارای تنوع زیادی در شکل و ساختار ظاهری بودند. اشکال شناسایی‌شده شامل رشته‌ای (الیاف)، مربعی (ورقه‌ای)، چندوجهی، بی‌شکل و مثلی است. از میان این اشکال، ذرات با ساختار رشته‌ای و ذرات بی‌شکل، بیشترین سهم را در میان سایر اشکال به‌خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). به‌طور خاص، میانگین سهم ذرات رشته‌ای ۶۵/۳ درصد بود، در حالی که ذرات بی‌شکل با میانگین ۲۸/۱ درصد، در جایگاه دوم قرار گرفته‌اند. این تنوع شکلی نشان‌دهنده نوع متفاوت آنها و تأثیرگذاری فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مختلف بر شکل‌گیری و تجزیه این ذرات است. از منظر رنگ، طیف گسترده‌ای از رنگ‌ها در بین ذرات شناسایی‌شده مشاهده شد. رنگ‌های غالب شامل قرمز، زرد و آبی بوده‌اند که به‌ترتیب با میانگین ۴۰/۴ درصد، ۳۸/۴ درصد و ۱۳/۷ درصد، بیشترین فراوانی را نشان دادند (شکل ۵). سایر ذرات شامل رنگ‌های بی‌رنگ (شفاف)، سفید و سیاه هستند که در مقادیر کمتری مشاهده شدند. بررسی رنگ میکروپلاستیک‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره منشأ و میزان مواجهه این ذرات با نور، حرارت و سایر عوامل محیطی ارائه دهد. از نظر اندازه، میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده در این مطالعه در بازه‌ای از ۶۳ میکرون تا ۲ میلی‌متر قرار داشتند. با این حال، ذراتی با اندازه ۵۰۰-۲۵۰ میکرون (۳۷/۸±۳۶/۱٪) و ۱۲۵-۲۵۰ میکرون (۳۴/۶±۲۸/۶٪) بیشترین فراوانی را در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان دادند (شکل ۶). اهمیت بررسی اندازه ذرات میکروپلاستیک به این دلیل است که اندازه، تأثیر مستقیمی بر رفتار انتقال، پراکنش و

توانایی ذرات برای نفوذ به زنجیره غذایی دارد. ذرات کوچک تر به دلیل سطح تماس بیشتر، می توانند خطرات بیشتری برای موجودات در محیط زیست ایجاد کنند. نتایج این پژوهش تأیید می کند که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکروپلاستیک ها به شدت به عوامل محیطی و منشأ آلودگی بستگی دارد. تحلیل اشکال، رنگ ها و اندازه های مختلف میکروپلاستیک ها می تواند به درک عمیق تر از مسیرهای انتقال، منابع آلودگی و پیامدهای محیط زیستی این ذرات کمک کند. در نتیجه، تدوین استانداردهای جهانی برای طبقه بندی و ارزیابی این ذرات ضروری به نظر می رسد.

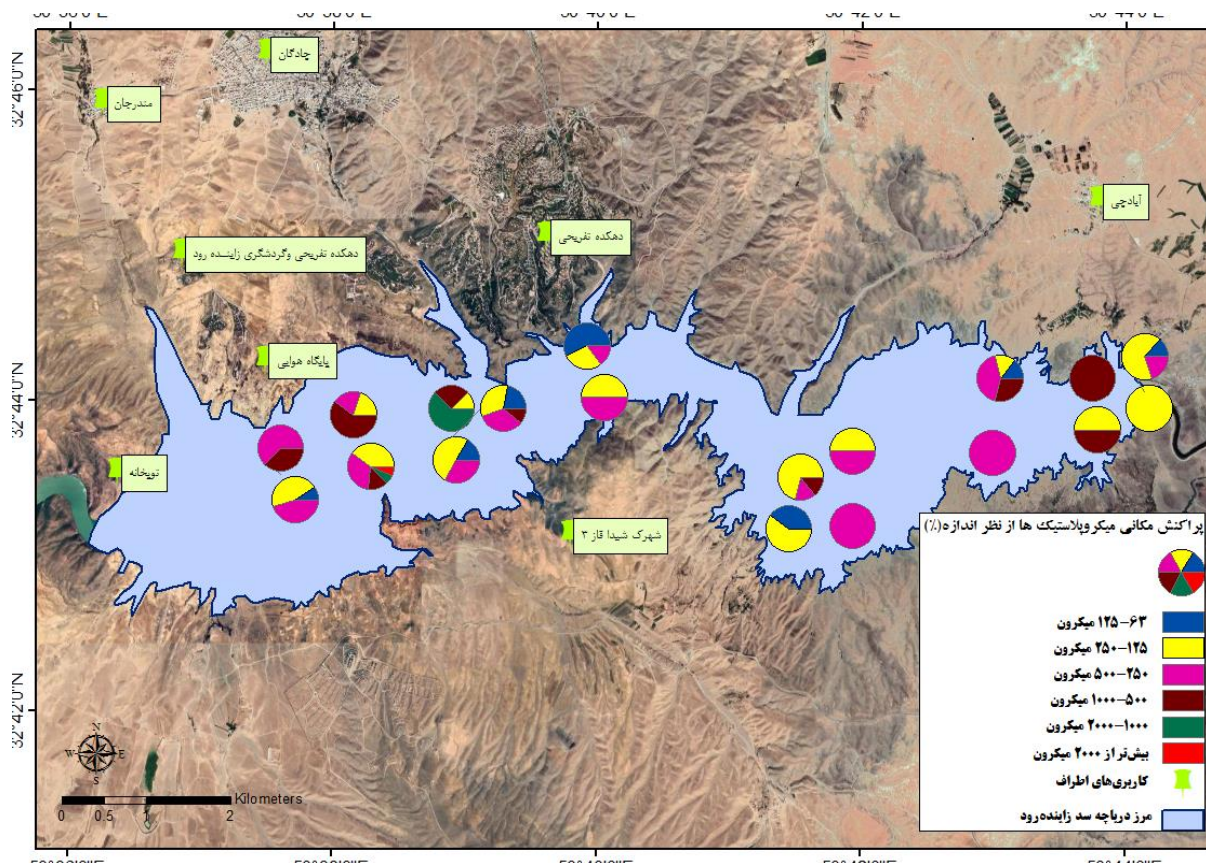


شکل ۲- تعدادی از انواع میکروپلاستیک های شناسایی شده در رسوبات سطحی مخزن سد زاینده رود به تفکیک اندازه منفذ الک





شکل ۵- نقشه توزیع فضایی درصد فراوانی انواع رنگ میکروپلاستیک ها در گستره دریاچه سد زاینده رود



شکل ۶- نقشه توزیع فضایی درصد فراوانی اندازه های مختلف میکروپلاستیک ها در گستره دریاچه سد زاینده رود

تحلیل این نقشه‌ها علاوه بر شناسایی مناطق با تراکم زیاد میکروپلاستیک‌ها، به تفکیک ویژگی‌های خاص هر ایستگاه از جمله اندازه، رنگ و شکل ذرات کمک کرده و اطلاعات ارزشمندی برای مطالعات محیط‌زیستی و مدیریت آلودگی ارائه می‌دهد. این داده‌ها می‌توانند در طراحی سیاست‌ها و اقدامات مدیریتی مؤثر برای کاهش آلودگی و حفاظت از بوم‌سازگان‌های آبی سد زاینده‌رود و دیگر منابع آبی مشابه در جهان، نقش کلیدی ایفا کنند. به‌منظور اطمینان از ماهیت میکروپلاستیکی و تعیین نوع، از میان ذرات غالب شناسایی‌شده، تعدادی که براساس شکل و رنگ بیشترین تکرار را داشتند، به‌صورت تصادفی انتخاب شدند و آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه (FT-IR) روی آنها انجام شد. طیف‌های به‌دست‌آمده با داده‌های مرجع استاندارد و نتایج مطالعات پیشین مقایسه شدند که این مقایسه تأییدکننده ماهیت پلیمری ذرات بود.

تحلیل تراکم میکروپلاستیک‌ها در سد زاینده‌رود و مقایسه با مناطق مختلف جهان: دامنه تغییرات تراکم میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی مخزن سد زاینده‌رود (۳۳/۳ تا ۵۰۰) با میانگین ۲۱۴ ذره در کیلوگرم رسوب خشک در مقایسه با سایر مناطق گزارش‌شده در بوم‌سازگان‌های آبی تفاوت‌های قابل توجهی را نشان می‌دهد (جدول ۲). این مقدار از نظر کمیت با مخزن سد سیریو در رومانی (۲۶۸ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) قابل مقایسه است، اما به‌طور چشمگیری کمتر از مقادیر گزارش‌شده در لاگون ونیز ایتالیا (۶۷۲۵-۲۱۷۵ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) است که از بیشترین تراکم‌ها در میان مناطق مطالعه‌شده در دنیا محسوب می‌شود. تراکم میکروپلاستیک‌ها در سد زاینده‌رود بیشتر از مقادیر مشاهده‌شده در سد نروود نیویورک (195 ± 67 ذره در کیلوگرم رسوب خشک) و رودخانه کلون انگلستان (۴۳۲-۱۶۱ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) است. این در حالی است که میانگین تراکم میکروپلاستیک‌ها در سد زاینده‌رود تقریباً نصف مقادیر گزارش‌شده در رسوبات سطحی سد طالقان (۴۷۸ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) می‌باشد. این تفاوت می‌تواند ناشی از میزان کمتر آلودگی پلاستیکی در حوضه آبخیز سد زاینده‌رود نسبت به حوضه سد طالقان باشد، زیرا سد طالقان در منطقه‌ای با تراکم بیشتر جمعیت و فعالیت‌های صنعتی قرار دارد. مقایسه متوسط تراکم میکروپلاستیک‌ها با متوسط گزارش‌شده در رسوبات سطحی رودخانه زاینده‌رود (۱۴۰۹ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) (Behmanesh et al., 2022) نشان می‌دهد که مقدار تراکم در سد زاینده‌رود به‌طور قابل توجهی کمتر است. این امر می‌تواند ناشی از موقعیت بالادستی سد باشد، جایی که تراکم جمعیت و فعالیت‌های انسانی کمتری وجود دارد، در حالی که در طول بیش از ۳۰۰ کیلومتر مسیر رودخانه زاینده‌رود در پایین دست سد زاینده‌رود، شهرهای متعددی توسعه یافته‌اند و به‌صورت مستقیم بار آلودگی پلاستیک‌ها را به رودخانه وارد می‌کنند. متوسط تراکم میکروپلاستیک‌ها در رسوبات سطحی مخزن سد زاینده‌رود قابل مقایسه با سد سیریو در رومانی و سد نروود در نیویورک آمریکا است. اما در مقایسه با مقادیر گزارش‌شده برای سایر مناطق آلوده‌تر آسیا و اروپا، مانند دریاچه تایهو در چین (۳۰۱۸ ذره در کیلوگرم رسوب خشک) و رودخانه راین در آلمان (۳۷۶۳-۲۲۷ ذره در کیلوگرم رسوب خشک)، نشان‌دهنده آن است که تراکم میکروپلاستیک‌ها در سد زاینده‌رود کمتر از بسیاری از این مناطق است. این مسئله می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند تفاوت‌های جغرافیایی، اقلیمی و شدت فعالیت‌های انسانی در هر منطقه باشد.

شناسایی و تحلیل ساختار میکروپلاستیک‌ها با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه (FT-IR): برای تعیین ماهیت شیمیایی این ذرات، آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه (FT-IR) بر روی آنها انجام شد (Käppler et al., 2016). نتایج حاصل از این تحلیل (جدول ۳) نشان داد که میکروپلاستیک‌های زرد بدون شکل، پیک‌هایی در بازه‌های ۴۳۳، ۵۰۰، ۷۲۰، ۸۷۱، ۱۰۱۵، ۱۰۴۲، ۱۰۹۰، ۱۳۳۹، ۱۴۰۶، ۱۵۰۳، ۱۵۵۲، ۱۷۱۶ و 2928 cm^{-1} داشتند (شکل ۷). براساس این پیک‌ها، احتمالاً این پلیمر یک پلی‌استر آروماتیک است که شامل گروه‌های کربونیل (C=O) و اتر (C-O-C) می‌باشد. یکی از پلیمرهای محتمل می‌تواند پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) باشد، با این حال پیک‌های 1503 cm^{-1} و 1552 cm^{-1} نشان‌دهنده وجود ساختار آروماتیک در پلیمر است که در PET مشاهده نمی‌شود. بنابراین، این پلیمر احتمالاً به گروه دیگری از پلی‌استرهای آروماتیک مانند پلی‌بوتیلن ترفتالات (PBT) یا پلی‌اتیلن نفتالات (PEN) تعلق دارد که هر دو دارای گروه‌های کربونیل و اتر هستند که با نتایج FT-IR مطابقت دارد (Wilson's, 2017). میکروپلاستیک‌های قرمز بدون ساختار مشخص (شکل ۸) با پیک‌های ۵۱۴، ۶۸۴، ۷۵۱، ۸۳۲، ۱۰۵۸، ۱۱۶۰، ۱۲۷۵، ۱۴۵۵، ۱۶۳۹ و 2923 cm^{-1} به طیف استاندارد PVC شباهت داشتند، که نشان‌دهنده استفاده گسترده از این پلیمر در تولید لوله‌ها، پوشش‌ها و سایر محصولات صنعتی است. با این حال، باید توجه داشت که وجود برخی از این پیک‌ها ممکن است ناشی از ناخالصی‌ها یا اختلاط با پلیمرهای دیگر باشد. میکروپلاستیک‌های آبی چندوجهی (شکل ۹) با پیک‌های ۴۰۶، ۴۶۱، ۸۰۸، ۸۴۰

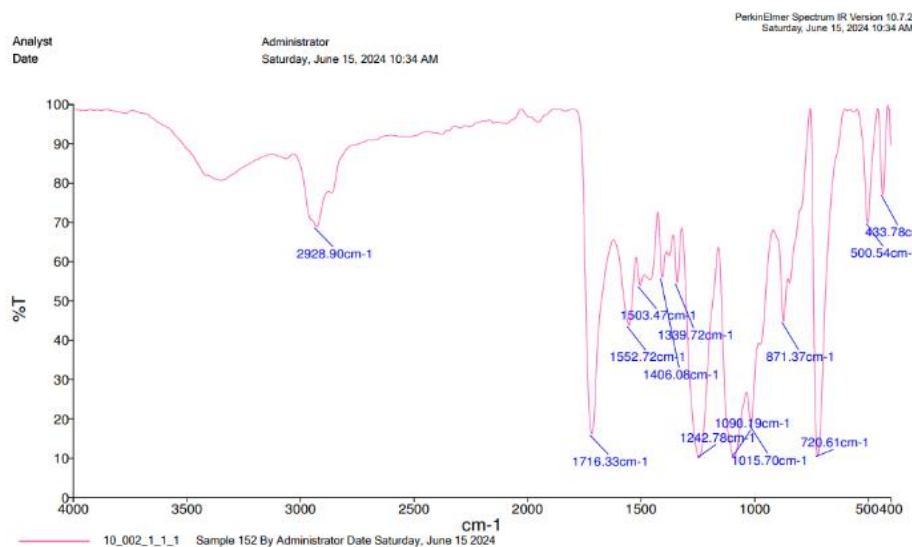
۹۹۸، ۱۰۴۱، ۱۱۶۵، ۱۳۷۵، ۱۴۵۴، ۱۵۸۵، ۲۸۴۰، ۲۹۱۹، ۲۹۵۳ و cm^{-1} ۳۲۹۱ و میکروپلاستیک‌های قرمز رشته‌ای (شکل ۱۰) با پیک‌های ۴۶۴، ۸۴۱، ۹۷۴، ۹۹۹، ۱۱۶۲، ۱۳۷۶، ۱۴۵۶، ۲۸۴۰، ۲۹۱۸ و cm^{-1} ۲۹۵۲، به طیف استاندارد پلی پروپیلن نزدیک بودند (Wilson's, 2017).

جدول ۲- مقایسه تراکم میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در رسوبات سطحی سد زاینده‌رود (تعداد در کیلوگرم رسوب خشک) با مطالعات دیگر				
قاره	کشور	موقعیت مکانی	تعداد میکروپلاستیک	منبع
آمریکا	کانادا	رودخانه سنت لارنس	۶۵-۷۵۶۲	Crew و همکاران (۲۰۲۰)
	برزیل	دلتا رودخانه آمازون	۱۳۸	Rico و همکاران (۲۰۲۴)
	نیویورک	رودخانه راگت، سد نروود	۶۷±۱۹۵	Haque و همکاران (۲۰۲۴)
اروپا	ایتالیا	لاگون ونیز	۲۱۷۵-۶۷۲۵	Vianello و همکاران (۲۰۱۳)
	انگلستان	رودخانه کلون	۱۶۱-۴۳۲	Blair و همکاران (۲۰۱۹)
	رومانی	رودخانه یوزائو، مخزن سد سیریو	۲۶۸	Pojar و همکاران (۲۰۲۴)
	آلمان	رودخانه راین	۲۲۷-۳۷۶۳	Schrank و همکاران (۲۰۲۲)
آسیا	چین	رودخانه یانگ تسه، مخزن Three Gorges	۱۰۳۱-۶۳۰۸۱	Zhang و همکاران (۲۰۱۵)
		دریاچه تایهو	۳۰۱۸	Li و همکاران (۲۰۲۲)
		رودخانه یولونگ	۲۴۷-۱۷۰۸	Shu و همکاران (۲۰۲۳)
ایران		تالاب انزلی	۱۴۰-۲۸۲۰	Rasta و همکاران (۲۰۲۰)
		سد طالقان	۴۷۸	Yeganefar و همکاران (۲۰۲۱)
		رودخانه زاینده رود	۱۴۰۹	Behmanesh و همکاران (۲۰۲۳)
		سد زاینده رود	۲۲۳ (۳۳-۵۰۰/۳)	مطالعه حاضر

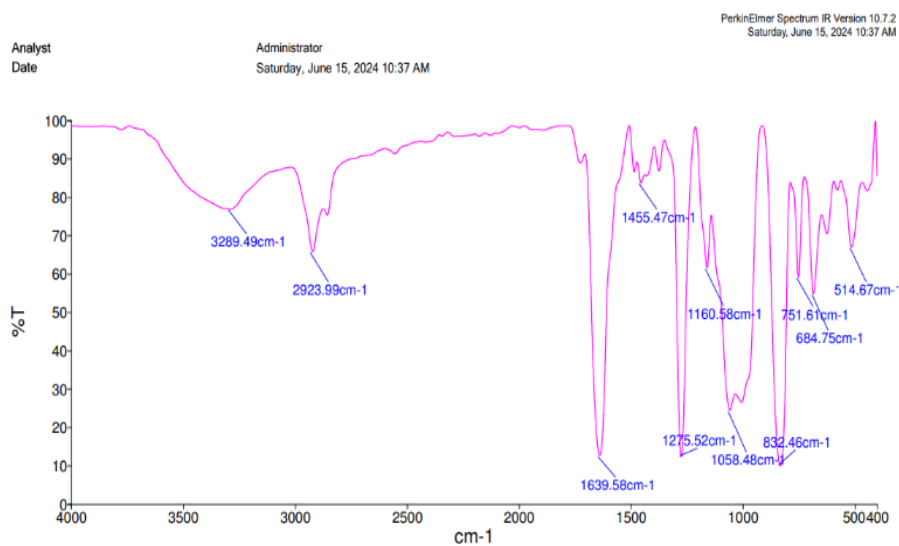
در میان نمونه‌های غالب که به‌وسیله آزمون FT-IR مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۱۱)، پلی پروپیلن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین پلیمرهای صنعتی، به‌ویژه در طراحی و تولید بسته‌بندی‌های تجاری و انواع محصولات مصرفی روزمره، در رسوبات سد زاینده‌رود با بیشترین فراوانی شناسایی شد. میکروپلاستیک‌ها از طریق فاضلاب‌های شهری و صنعتی، رواناب‌ها، فعالیت‌های گردشگری متمرکز و غیرمتمرکز، دفع نادرست پسماندهای پلاستیکی و همچنین انتقال از طریق جریان‌های جوی به دریاچه وارد شده و اثرات مخربی بر بوم‌سازگان و خدمات آن دارند (Yang et al., 2021). احتمالاً استفاده گسترده از پلیمرهای پلی پروپیلن، PVC و پلی اتیلن به‌ویژه در حوضه بالادست سد زاینده‌رود و فعالیت‌های گردشگری متمرکز در شهرک‌های مستقر در حاشیه دریاچه سد از منابع اصلی آلودگی است. اگرچه ممکن است انتقال اتمسفری میکروپلاستیک‌ها از طریق جریان‌های جوی و ترسیب خشک یا تر در حوضه بالادست سد زاینده‌رود نیز نقش ایفا کند که نیازمند مطالعات بیشتر در مورد بار آلودگی و شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌های هوا می‌باشد که کمتر در کشور صورت گرفته است.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش طیف‌سنجی مادون قرمز فوریه (FT-IR) بر روی میکروپلاستیک‌های غالب

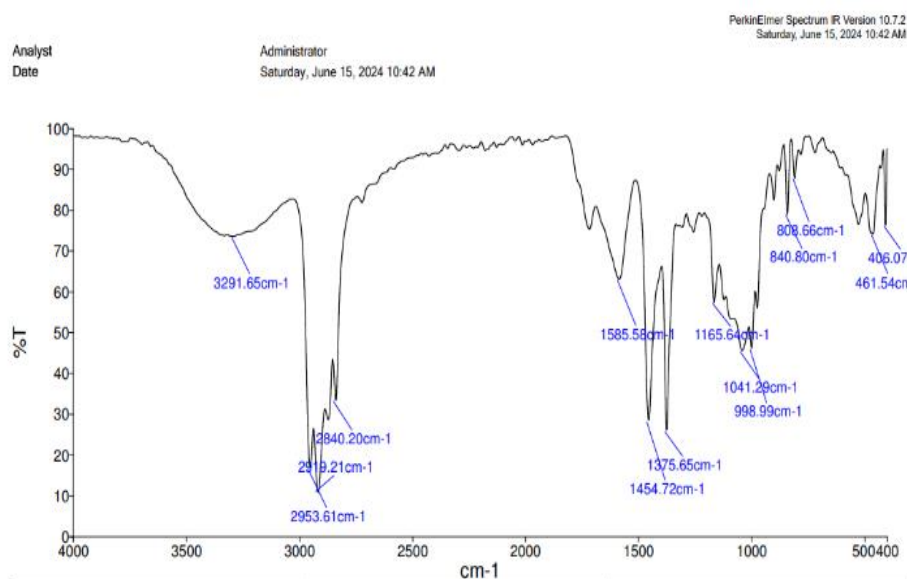
نوع میکروپلاستیک	رنگ	پیک‌های FTIR (cm^{-1})	توضیحات
بدون شکل	زرد	۴۳۳، ۵۰۰، ۷۲۰، ۸۷۱، ۱۰۱۵، ۱۰۴۲، ۱۰۹۰، ۱۳۳۹، ۱۴۰۶، ۱۵۰۳، ۱۵۵۲، ۱۷۱۶ و ۲۹۲۸	نوعی پلی استر آروماتیک شامل گروه‌های کربونیل (C=O) و اتر (C-O-C) است. ممکن است پلی اتیلن ترفتالات (PET) یا پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) باشد.
بدون شکل	قرمز	۵۱۴، ۶۸۴، ۷۵۱، ۸۳۲، ۱۰۵۸، ۱۱۶۰، ۱۲۷۵، ۱۴۵۵، ۱۶۳۹، ۲۹۲۳ و ۳۲۸۹	نزدیک به طیف استاندارد PVC است. برخی پیک‌ها ممکن است به دلیل ناخالصی‌ها یا اختلاط با سایر پلیمرها باشد.
چند وجهی	آبی	۴۰۶، ۴۶۱، ۸۰۸، ۸۴۰، ۹۹۸، ۱۰۴۱، ۱۱۶۵، ۱۳۷۵، ۱۴۵۴، ۱۵۸۵، ۲۸۴۰، ۲۹۱۹ و ۲۹۵۳	نزدیک به طیف استاندارد پلی پروپیلن است.
رشته‌ای	قرمز	۴۶۴، ۸۴۱، ۹۷۴، ۹۹۹، ۱۱۶۲، ۱۳۷۶، ۱۴۵۶، ۲۸۴۰، ۲۹۱۸ و ۲۹۵۲	نزدیک به طیف استاندارد پلی پروپیلن است.



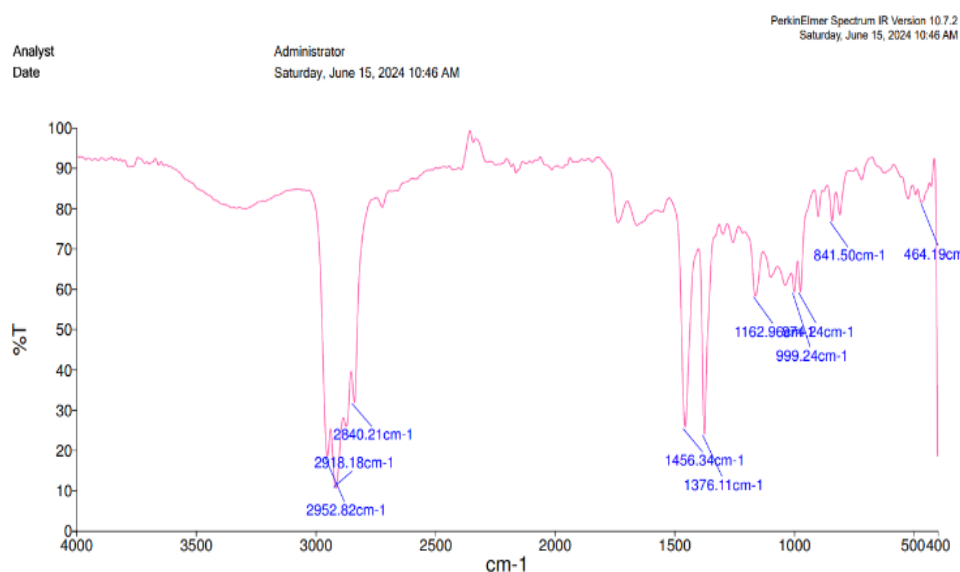
شکل ۷- طیف آزمون مادون قرمز فوریه (FT-IR) میکروپلاستیک زرد بدون شکل



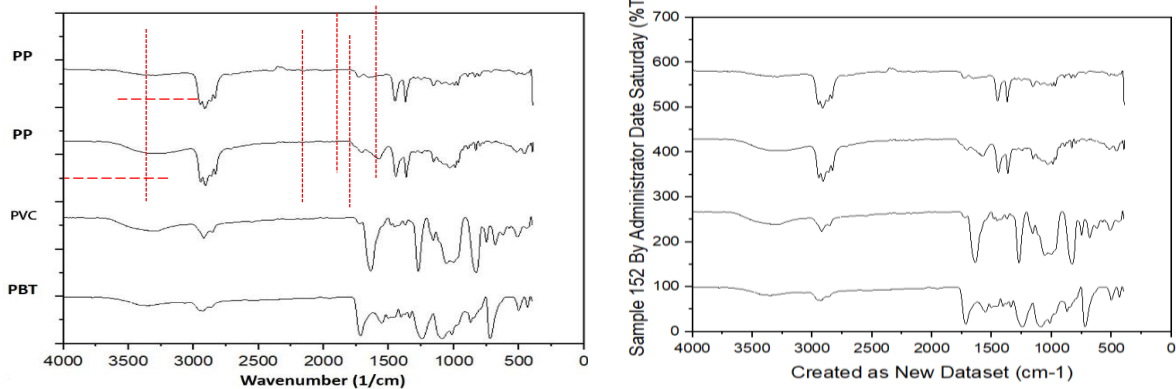
شکل ۸- طیف آزمون مادون قرمز فوریه (FT-IR) میکروپلاستیک قرمز بدون شکل



شکل ۹- طیف آزمون مادون قرمز فوریه (FT-IR) میکروپلاستیک آبی چند وجهی



شکل ۱۰- طیف آزمون مادون قرمز فوریه (FT-IR) میکروپلاستیک قرمز رشته‌ای



شکل ۱۱- طیف‌نگاری مادون قرمز فوریه در یک نگاه: ارزیابی و تطبیق پیک‌های شناسایی شده

نتایج آزمون همبستگی: نتایج همبستگی بین تعداد میکروپلاستیک‌ها و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی همبستگی قوی بین اکثر متغیرهای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات و تعداد میکروپلاستیک‌ها در گروه‌های مختلف مشاهده نشد. بیشترین مقدار ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار میان pH و تعداد کل میکروپلاستیک‌ها ($r=0.733$, $P<0.01$) به‌دست آمد که نشان می‌دهد در نمونه‌های مورد بررسی با افزایش pH، تجمع میکروپلاستیک‌ها افزایش یافته است. این یافته‌ها ممکن است به ارتباط میان شرایط قلیایی و افزایش تجزیه یا تثبیت میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی اشاره داشته باشد. همچنین، همبستگی منفی معنی‌دار میان پتانسیل اکسایشی و تعداد کل میکروپلاستیک‌ها ($r=-0.446$, $P<0.05$) احتمالاً بیانگر این است که افزایش پتانسیل اکسایشی در محیط، ممکن است به کاهش پایداری و تجزیه میکروپلاستیک‌ها منجر شده باشد. از بین گروه‌های مختلف اندازه ذرات رسوبی تنها همبستگی منفی معنی‌دار میان درصد سنگریز و تعداد کل میکروپلاستیک‌ها ($r=-0.521$, $P<0.05$) به‌دست آمد که احتمالاً بیانگر نقش محیط پر انرژی در برهم زدن ترسیب میکروپلاستیک‌ها در رسوبات بستر است. انتظار می‌رفت در چنین شرایطی همبستگی مثبت معنی‌دار بین ذرات ریز دانه‌تر (مثل رس یا سیلت) با تعداد کل میکروپلاستیک‌ها حاصل شود ولی نتایج محاسبه همبستگی خلاف آن است. از سوی دیگر، متغیرهایی مانند هدایت الکتریکی، ماده آلی، چگالی تر و چگالی خشک ارتباط معنی‌داری با تعداد کل میکروپلاستیک‌ها نشان ندادند، که این مسأله احتمالاً به کم‌تأثیری این خصوصیات در جذب یا انتشار میکروپلاستیک‌ها در رسوبات اشاره دارد. به احتمال قوی اختلاف فاحش میزان چگالی اکثر ذرات میکروپلاستیک با ذرات رسوبی باعث شده فرآیند ترسیب به‌صورت متفاوت بر تنه‌شینی ذرات میکروپلاستیک نسبت به ذرات رسوبی عمل کند. ضرایب همبستگی مثبت یا منفی معنی‌دار به‌دست آمده بین برخی گروه‌های میکروپلاستیک‌ها از نظر اندازه (مثل میکروپلاستیک‌های ۱۲۵-۲۵۰ و ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرون)، شکل (مثل میکروپلاستیک‌های رشته‌ای و مربعی) یا رنگ (مثل میکروپلاستیک‌های زرد رنگ) با برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات (مثل ماده آلی و درصد ماسه) به نوعی تأیید کننده این ادعا است. چنانچه جدایش انواع مختلف میکروپلاستیک‌ها در برخی مطالعات براساس اصل تفاوت چگالی آنها بنا نهاده شده است (Wilson's, 2017). در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که مسیرهای ورود میکروپلاستیک‌ها از حوضه آبریز به‌عنوان عامل اصلی آلودگی در این زمینه است. این یافته حاکی از آن است که منابع خروجی و ورودی‌های آبی نقش کلیدی در انتقال و تجمع میکروپلاستیک‌ها در داخل مخازن آبی ایفا می‌کنند. در مقابل، خصوصیات فیزیکی رسوبات، از جمله چگالی، دانه‌بندی ذرات و هدایت الکتریکی، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر میزان تجمع این ذرات در محیط آبی سد زاینده رود ندارند. به‌عبارت دیگر، به‌رغم تغییرات موجود در خصوصیات رسوبات، حضور و تجمع میکروپلاستیک‌ها بیشتر متأثر از میزان ورودی این آلودگی‌ها از منابع خارجی است تا شرایط داخلی مخزن. این امر بر اهمیت مدیریت منابع ورودی و کنترل آلاینده‌ها در مبادی ورودی برای کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها تأکید دارد.

جدول ۴- نتایج حاصل از محاسبه ضریب همبستگی اسپیرمن بین میکروپلاستیک‌ها و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوبات

رس	سیلت	ماسه	سنگریزه	ماده آلی	کلسیم	کربنات	درصد	رطوبت	چگالی خشک	چگالی تر	هدایت الکتریکی	Eh	pH
۰/۰۸۷	۰/۱۶۲	۰/۰۵۷	۰/۵۲۱*	۰/۳۹۴	۰/۱۲۶	۰/۱۴۱	۰/۱۱۸	۰/۰۶۷	۰/۴۴۶*	۰/۷۳۳**	تعداد کل میکروپلاستیک		
۰/۳۱۵	۰/۱۷۷	۰/۰۶۸	۰/۲۵۴	۰/۱۶۷	۰/۰۴۲	۰/۰۷۸	۰/۱۵۶	۰/۱۶۱	۰/۰۲۳	۰/۱۵۷	۰/۰۵۵	۱۲۵-۶۳ میکرون	
۰/۰۹۱	۰/۱۴۷	۰/۱۷۲	۰/۴۷۸*	۰/۱۰۸	۰/۱۷۹	۰/۰۸۰	۰/۱۴۱	۰/۱۰۳	۰/۰۹۷	۰/۳۶۰	۰/۲۲۵	۱۲۵-۲۵۰ میکرون	
۰/۱۸۴	۰/۳۸۵	۰/۰۰۲	۰/۲۵۱	۰/۱۸۸	۰/۲۸۶	۰/۱۲۸	۰/۰۱۴	۰/۰۱۸	۰/۱۶۶	۰/۳۵۲	۰/۵۸۸**	۲۵۰-۵۰۰ میکرون	
۰/۲۱۴	۰/۱۵	۰/۱۳۲	۰/۰۵۶	۰/۱۴۸	۰/۱۸۸	۰/۲۷۹	۰/۱۵۲	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۰۲	۰/۰۴۳	۵۰۰-۱۰۰۰ میکرون	
۰/۳۴۴	۰/۳۳۸	۰/۲۶۴	۰/۰۸۱	۰/۳۹۹	۰/۲۱۹	۰/۰۶۰	۰/۲۱۹	۰/۲۹۸	۰/۳۳۸	۰/۱۱۹	۰/۱۴۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰ میکرون	
۰/۳۰۱	۰/۳۳۸	۰/۲۸۶	۰/۰۸۱	۰/۰۴۰	۰/۰۲۰	۰/۲۵۹	۰/۰۶۰	۰/۱۳۹	۰/۱۳۹	۰/۱۰۰	۰/۱۸۰	۲۰۰۰ میکرون >	
۰/۲۲۸	۰/۱۵۴	۰/۰۳۰	۰/۱۴۸	۰/۰۶۴	۰/۲۸۵	۰/۰۵۶	۰/۳۲۷	۰/۴۲۳	۰/۱۰۸	۰/۰۹۱	۰/۰۰۷	چند ضلعی	
۰/۰۴۳	۰/۰۲۰	۰/۱۵۴	۰/۰۸۱	۰/۱۳۹	۰/۲۵۹	۰/۱۳۹	۰/۲۵۹	۰/۲۵۹	۰/۲۹۸	۰/۲۵۹	۰/۱۹۹	کروی	
۰/۳۸۱	۰/۱۵۹	۰/۰۸۳	۰/۳۸۳	۰/۵۳۱*	۰/۳۲۲	۰/۲۴۲	۰/۰۵۴	۰/۱۱۳	۰/۱۱۶	۰/۴۱۷	۰/۳۶۴	رشته‌ای	
۰/۰۶۹	۰/۱۳۴	۰/۱۹۷	۰/۴۳۰	۰/۳۳۶	۰/۲۸۵	۰/۰۴۰۳	۰/۲۱۳	۰/۰۶۸	۰/۲۵۰	۰/۲۷۶	۰/۰۱۶	نامنظم	
۰/۰۷۹	۰/۲۲۹	۰/۵۲۳*	۰/۱۴۸	۰/۱۴۸	۰/۱۵۸	۰/۳۰۱	۰/۲۱۷	۰/۰۰۲	۰/۱۲۸	۰/۲۶۵	۰/۱۱۳	مربعی	
۰/۲۳۹	۰/۳۴۲	۰/۳۲۷	۰/۱۹۳	۰/۰۳۲	۰/۲۴۵	۰/۱۰۳	۰/۱۰۹	۰/۰۹۸	۰/۰۸۶	۰/۰۷۲	۰/۲۸۵	قرمز رنگ	
۰/۱۱۵	۰/۱۲۳	۰/۲۸۳	۰/۰۴۰۱	۰/۳۸۴	۰/۲۹۵	۰/۲۵۱	۰/۱۶۳	۰/۱۰۷	۰/۰۲۷	۰/۳۰۰	۰/۵۸۲**	زرد رنگ	
۰/۳۳۵	۰/۰۹۳	۰/۳۱۳	۰/۰۳۹۶	۰/۳۵۸	۰/۲۲۶	۰/۰۶۶	۰/۰۲۵	۰/۱۸۸	۰/۴۲۶	۰/۳۵۱	۰/۰۰۶	آبی رنگ	
۰/۰۹۵	۰/۲۱۸	۰/۰۶۶	۰/۰۲۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۸۴	۰/۲۲۸	۰/۲۱۸	۰/۰۰۹	۰/۲۰۲	۰/۰۲۳	۰/۰۲۵	شفاف	
۰/۴۱۱	۰/۴۱۱	۰/۱۲۷	۰/۱۴۸	۰/۲۲۰	۰/۰۰۷	۰/۰۲۱	۰/۲۲۸	۰/۴۲۳	۰/۰۷۱	۰/۲۶۲	۰/۲۲۳	سیاه رنگ	

* معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح ۹۹ درصد

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش حضور و تجمع میکروپلاستیک‌ها را در تمامی ایستگاه‌های مخزن سد زاینده‌رود تأیید می‌کند. بررسی ۱۲۷۸ ذره نشان داد که میکروپلاستیک‌ها از نظر شکل، اندازه و رنگ تنوع زیادی دارند که بیانگر منشأهای مختلف و تأثیر فرآیندهای محیطی است. ذرات رشته‌ای و بی‌شکل بیشترین فراوانی را داشتند و رنگ‌های قرمز، زرد و آبی غالب بودند که می‌تواند در شناسایی منابع آلودگی نقش داشته باشد. همچنین، الگوهای مکانی پراکندگی نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه تراکم میکروپلاستیک‌ها در بخش‌های مختلف مخزن است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوهای جریان آب، رسوب‌گذاری و فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در تجمع و پراکندگی میکروپلاستیک‌ها در مخزن سد زاینده‌رود دارند. تحلیل تراکم نیز بیانگر آن است که میزان تجمع میکروپلاستیک‌ها در این مخزن نسبت به بسیاری از منابع آبی جهان کمتر است؛ که احتمالاً می‌تواند به ویژگی‌های خاص منطقه و محدود بودن فعالیت‌های انسانی در حوضه بالادست سد مرتبط باشد. همچنین، میکروپلاستیک‌های رشته‌ای در تمامی ایستگاه‌ها مشاهده شدند و با پراکندگی گسترده، در نواحی با تراکم مختلف حضور داشتند. ویژگی‌های فیزیکی خاص این ذرات، نظیر اندازه و شکل آنها، ممکن است موجب پراکندگی و انتقال آسان آنها در محیط آبی شود. این نتایج نیاز به بررسی بیشتر فرآیندهای انتقال میکروپلاستیک‌ها و راهکارهای مدیریتی برای کاهش این آلودگی‌ها در منابع آبی دارد. در خصوص توزیع تراکم میکروپلاستیک‌ها، نتایج نشان داد که به‌طور کلی تراکم این ذرات از سمت دیواره سد به سمت ورودی مخزن سد افزایش می‌یابد. این الگو ممکن است ناشی از تأثیرات جریان‌های آبی و الگوهای رسوب‌گذاری باشد. در نواحی نزدیک به ورودی، که فعالیت‌های انسانی و منابع آلودگی بیشتر هستند، تراکم میکروپلاستیک‌ها به‌طور قابل توجهی بیشتر مشاهده می‌شود. پلیمرهای غالب در رسوبات سد زاینده‌رود، که از طریق آزمون FT-IR شناسایی شدند، شامل پلی‌پروپیلن، پلی‌استر آروماتیک و PVC بودند. پلی‌پروپیلن به‌عنوان یکی از رایج‌ترین پلیمرها، به‌ویژه در صنایع بسته‌بندی و محصولات مصرفی روزمره، با بیشترین فراوانی در رسوبات سد شناسایی شد. همچنین، پلی‌وینیل‌کلراید نیز در بخش‌های مختلف سد با ویژگی‌های شیمیایی مشابه آنچه در این تحقیق مشاهده شد، حضور داشت و نشان‌دهنده استفاده گسترده این پلیمر در لوله‌ها، پوشش‌ها و محصولات صنعتی در بالادست سد است. تحلیل همبستگی‌ها نشان داد که خصوصیات شیمیایی رسوبات، به‌ویژه pH و پتانسیل اکسایشی، تأثیر زیادی بر تجمع میکروپلاستیک‌ها دارند. در مجموع، این تحقیق با ارائه اطلاعات جدید و دقیق از پراکنش و ویژگی‌های شیمیایی میکروپلاستیک‌ها در سد زاینده‌رود، به‌عنوان یک مرجع علمی برای مطالعات آینده در این زمینه و برای تدوین راهکارهای مؤثر در مدیریت آلودگی میکروپلاستیکی در بوم‌سازگان‌های آبی شناخته می‌شود. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی و حفاظت از منابع آبی در برابر آلودگی میکروپلاستیک‌ها استفاده شود و همچنین لزوم انجام مطالعات بیشتر را برای کاهش اثرات محیط‌زیستی این آلاینده‌ها تأکید می‌کند.

سپاسگزاری

در این مقاله از نمونه‌های رسوب سطحی مربوط به پایان‌نامه کارشناسی ارشد خانم مهتاب حقیقت‌نیا از دانشکده منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شده که در قالب پایان‌نامه تقاضامحور با حمایت مالی گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان تحت قرارداد شماره ۴۰۱/۱۱۷ به انجام رسیده است. بدینوسیله از همکاری مسئولان معاونت پژوهش و فناوری و دفتر ارتباط با صنعت دانشگاه صنعتی اصفهان و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان قدردانی می‌شود.

References

- Abbasi, S., Turner, A., 2022. Sources, concentrations, distributions, fluxes and fate of microplastics in a hypersaline lake: Maharloo, south-west Iran. *Science of the Total Environment* 823, 153721.
- Alimba, C.G., Faggio, C., 2019. Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68, 61-74.

- Álvarez-Hernández, C., Cairós, C., López-Darias, J., Mazzetti, E., Hernández-Sánchez, C., González-Sálamo, J., Hernández-Borges, J., 2019. Microplastic debris in beaches of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Marine Pollution Bulletin* 146, 26-32.
- Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62(8), 1596-1605.
- Behmanesh, M., Chamani, A., Chavoshi, E., 2022. Occurrence, abundance and characteristics of microplastics in the sediments of the Zayandeh- Rud River. *Environment and Interdisciplinary Development* 7(76), 74-89. (In Persian)
- Block, K., Benedik, L., Strumińska-Parulska, D., 2023. Advancing environmental monitoring: A comparative analysis of sequential radiochemical methods for precise alpha-particle spectrometry analysis of ²⁴¹Am in soil and marine sediment samples. *Marine Environmental Research* 192, 106243.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Duarte, C.M., 2014. Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(28), 10239-10244.
- Da Costa, J.P., Santos, P.S.M., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T., 2016. (Nano) plastics in the environment - Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment* 566-567, 15-26.
- DaryaTarsim Consulting Engineers. 2011. *Technical report on hydrographic operations and mapping of Zayandeh-Rud Dam (Vol. 1)*. National Cartographic Center of Iran. (In Persian)
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C., 2015. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritization of research needs. *Water Research*, 75, 63-82.
- Elert, A. M., Becker, R., Duemichen, E., Eisentraut, P., Falkenhagen, J., Sturm, H., Braun, U., 2017. Comparison of different methods for MP detection: what can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters?. *Environmental Pollution* 231, 1256-1264.
- Fang, Q., Niu, S., Yu, J., 2021. Characterizing microplastic pollution in sediments from urban water systems using the diversity index. *Journal of Cleaner Production* 318, 128537.
- Gao, D., Li, X.Y., Liu, H., 2020. Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. *Science of the Total Environment*, 742, 140355.
- Haghighatnia, M., 2023. Sedimentation rate and sediment zonation of the Zayandehrud Dam Lake based on geochemical indices of sediment cores. *Master thesis of environmental pollution*. Department of Natural Resources. Isfahan University of Technology. pp. 114. (In Persian)
- Haque, A., Holsen, T.M., Baki, A.B., 2024. Distribution and risk assessment of microplastic pollution in a rural river system near a wastewater treatment plant, hydro-dam, and river confluence. *Scientific Reports* 14(1), 6006.
- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K.J., Voit, B., 2016. Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 408(29), 8377-8391.
- Lambert, S. and Wagner, M., 2018. Microplastics are contaminants of emerging concern in freshwater environments: an overview. *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants*. Springer, pp.1-23.
- Lee, H., Kim, S., Sin, A., Kim, G., Khan, S., Nadagouda, M. N., Sahle-Demessie, E., Han, C. 2023. Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review. *Science of the Total Environment* 871, 161718.
- Mani, T., Hauk, A., Walter, U., Burkhardt-Holm, P., 2015. Microplastics profile along the Rhine River. *Scientific Reports* 5(1), 17988.
- Mushtak, F., Prakash, J., & Katoch, S.S., 2024. Microplastics in complex soil matrix: Recovery, identification and removal using micro nano techniques. *Micro and Nano Engineering* 100237.
- Piperagkas, O., Papageorgiou, N., Karakassis, I., 2019. Qualitative and quantitative assessment of microplastics in three sandy Mediterranean beaches, including different methodological approaches. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 219, 169-175.
- Pojar, I., Dobre, O., Lazăr, C., Baboș, T., Ristea, O., Constantin, A., Cristoiu, N., 2024. Microplastic Evaluation in Water and Sediments of a Dam Reservoir–Riverine System in the Eastern Carpathians, Romania. *Sustainability* 16(11), 4541.

- Prata, J.C., da Costa, J.P., Duarte, A.C., Rocha-Santos, T., 2019. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *Trends in Analytical Chemistry* 110, 150-159.
- Prume, J. A., Gorka, F., Löder, M.G.J., 2021. From sieve to microscope: An efficient technique for sample transfer in the process of microplastics' quantification. *Methods X* 8, 101341.
- Rasta, M., Sattari, M., Shokrollahzadeh Taleshi, M., Imanpour Namin, J., 2020. Microplastic pollutions in the Anzali Wetland sediments, Southwest Caspian Sea (Guilan Province, Iran). *Iranian Scientific Fisheries Journal* 29(4), 121-133. (In Persian)
- Rani, M., Ducoli, S., Depero, L.E., Prica, M., Tubi, A., 2023. Complex Environmental Matrices. *MDPI, Molecules* 28, 1-37.
- Rico, A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Schell, T., Sanders, C.J., Bernardino, A.F., 2024. Microplastic burial potential and ecological risks in mangrove forests of the Amazon River delta. *Science of The Total Environment* 957, 177666.
- Rocha-Santos, T.A.P., Duarte, A.C., 2017. *Comprehensive Analytical Chemistry: Characterization and Analysis of Microplastics*. Elsevier.
- Schrank, I., Löder, M.G., Imhof, H.K., Moses, S.R., Heß, M., Schwaiger, J., Laforsch, C., 2022. Riverine microplastic contamination in southwest Germany: A large-scale survey. *Frontiers in Earth Science* 10, 794250.
- Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbins, J., Janssen, C.R., 2015. Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects. *Marine Environmental Research* 111, 5-17.
- Vianello, A., Boldrin, A., Guerriero, P., Moschino, V., Rella, R., Sturaro, A., Da Ros, L., 2013. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 130, 54-61.
- Vural, T., Çetinkaya, S., Yeğen, V., Şapcıoğlu, S., Gündoğdu, S., 2025. Protocol for extraction and analysis of microplastics in freshwater, sediment, and fish samples. *STAR Protocols* 6(3), 104057.
- Willis, K.A., Eriksen, R., Wilcox, C., Hardesty, B.D., 2017. Microplastic distribution at different sediment depths in an urban estuary. *Frontiers in Marine Science* 4, 419.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., Wu, C., 2021. Microplastics in freshwater sediment: A review on methods , occurrence, and sources. *Science of the Total Environment*, 754, 141948.
- Yeganefar, M., Shakeri, A., Mehr, M.R., Lahijani, O., 2020. Investigating abundance and characteristics of microplastics as emerging pollutants in sediments of Taleqan dam and upstream river in Alborz province. *Iranian Journal of Health and Environment* 13(1), 65-76. (In Persian)
- Zar, J.H., 1999. *Biostatistical analysis*, 4nd edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall
- Zhang, K., Gong, W., Lv, J., Xiong, X., Wu, C., 2015. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam. *Environmental Pollution* 204, 117-123.