

(OPEN ACCESS)

The Impact of Morphological Structures on the Presence of Microplastics in the Hyporheic Zone of the Ziarat River

Nasim Shabani¹, Mehdi Meftah Halaghi^{*2}, Amirahmad Dehghani³,
Hassan Rezaei⁴, Mohammad Abdolhoseini⁵

1. Ph.D. Graduate of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: nasim_shabani_70@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: meftah@gau.ac.ir
3. Professor, Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: a.dehghani@gau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hassanrezaei@gau.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: abdolhosseini@gau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The hyporheic zone is an interstitial saturated area located beneath the riverbed and its banks. This zone includes a part of the river flow that has infiltrated the bed and plays a very important function in the ecology of various organisms. In this region, surface water flow delivers oxygen and nutrients to the organisms, eventually returning to the surface water after a certain period. In rivers, small and lightweight microplastics are transported downstream; however, they are also frequently found in riverbed sediment, indicating long-term retention.
Article history: Received: 10.19.2024 Revised: 12.11.2024 Accepted: 01.14.2025	
Keywords: Hyporheic Zone, Island, Logjams, Microplastic, Step-pool	
	Materials and Methods: This study investigated the presence of microplastics in the sediment of the hyporheic zone of the Ziarat River. For this purpose, samples were collected from three distinct morphological structures (island, logjam, and step-pool) within the hyporheic area during the summer season. The sediments were then transported to the laboratory for analysis of microplastic presence. Sampling was conducted at three points in each location. Microplastic particles were categorized into four size ranges: less than 500 micrometers, 500 to 1000 micrometers, 1000 to 3000 micrometers, and 3000 to 5000 micrometers. The shapes of the microplastics were classified as fibers, pellets, lines, and fragments. The color of the microplastic particles was recorded based on the appearance of their surfaces. Polymer type identification was conducted using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The relationship between microplastics and their structural characteristics was examined through one-way multivariate analysis of variance (MANOVA).
	Results: The results of this study indicate that microplastics exist in three morphological structures: Island, Logjam, and Step-Pool. The highest abundance of microplastics is found in particles measuring less than 1,000 micrometers. Among these three morphological structures, microplastics in

the form of lines and fibers are the most prevalent. The predominant color observed for microplastics in sediments was black, and the polymer type of the particles was polyethylene. A statistical analysis of the relationship between microplastics and various morphological structures revealed no significant differences in size and shape between the microplastics and the morphological structures found in the Ziarat River.

Conclusion: The results indicate that microplastics smaller than 1,000 micrometers are likely the most abundant size fraction found in the sediments of the Ziarat River. Given that this phenomenon is unlikely to be exclusive to the Ziarat River, it can be inferred that the significance of microplastics of various smaller sizes is also considerable in other river systems. Considering the impact of classification methods on the analysis of results, a more detailed examination of smaller size categories is anticipated to reveal a significantly higher presence of microplastics in the riverbed sediments. One notable characteristic of the Ziarat River in the sampling area of the present study is its close proximity to the treatment facility. Consequently, the treatment plant is likely to play a significant role in the accumulation of microplastics in this region, which serves both as a tourist attraction and a wastewater treatment facility. Furthermore, the high abundance of fibers in the area, primarily originating from domestic wastewater, supports this assertion.

Cite this article: Shabani, Nasim, Meftah Halaghi, Mehdi, Dehghani, Amirahmad, Rezaie, Hassan, Abdolhoseini, Mohammad. 2025. The Impact of Morphological Structures on the Presence of Microplastics in the Hyporheic Zone of the Ziarat River. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (2), 183-199.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22889.3767

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر ساختار مورفولوژیک بر حضور میکروپلاستیک در منطقه هایپرک رودخانه زیارت

نسیم شعبانی^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، امیراحمد دهقانی^۳، حسن رضایی^۴، محمد عبدالحسینی^۵

۱. دانش‌آموخته دکتری مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: nasim_shabani_70@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: meftah@gau.ac.ir
۳. استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: a.dehghani@gau.ac.ir
۴. دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hassanrezaei@gau.ac.ir
۵. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: abdolhosseini@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: ناحیه هایپرک یک ناحیه اشباع بینابینی زیر بستر رودخانه و جداره‌های آن است که شامل بخشی از جریان رودخانه می‌شود که به داخل بستر نفوذ کرده است و کارکرد بسیار مهمی در اکولوژی جانداران دارد. در این ناحیه، قسمتی از جریان آب سطحی اکسیژن و مواد مغذی را به جانداران می‌رساند و پس از طی زمان معینی دوباره به آب سطحی بازمی‌گردد. در رودخانه‌ها، میکروپلاستیک‌های کوچک و سبک‌وزن به پایین‌دست منتقل می‌شوند، اما اغلب در رسوبات بستر رودخانه نیز یافت می‌شوند که ماندگاری طولانی‌مدت را نشان می‌دهد. این مطالعه به بررسی توزیع و خصوصیات میکروپلاستیک در رسوب منطقه هایپرک رودخانه زیارت پرداخته است.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵	
واژه‌های کلیدی: پله - حوضچه، جزیره، کنده، منطقه هایپرک، میکروپلاستیک	مواد و روش‌ها: این مطالعه به بررسی حضور میکروپلاستیک در رسوب منطقه هایپرک رودخانه زیارت پرداخته است. برای این منظور، نمونه‌برداری از منطقه هایپرک در سه ساختار مختلف مورفولوژیک (جزیره، کنده و پله - حوضچه) در فصل تابستان انجام و رسوبات این منطقه جهت بررسی وجود میکروپلاستیک به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌برداری از سه نقطه در هر محل انجام گرفت. ذرات میکروپلاستیک از نظر اندازه در چهار دسته کم‌تر از ۵۰۰ میکرومتر، بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر، ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میکرومتر و ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر قرار گرفتند. اشکال میکروپلاستیک به فیبر، گلوله، رشته و قطعه تقسیم شدند. رنگ ذرات میکروپلاستیک نیز با توجه به رنگ سطح آن‌ها ثبت شد. شناسایی نوع پلیمر با دستگاه FTIR انجام شد. با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس چندمتغیره یک‌طرفه (MANOVA)، ارتباط بین میکروپلاستیک و ساختار بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که میکروپلاستیک در سه ساختار مورفولوژیکی شامل جزیره، کنده و پله- حوضچه وجود دارد. بیش‌ترین فراوانی میکروپلاستیک برای ذرات با مقیاس (> ۱۰۰۰ میکرومتر) است. میکروپلاستیک‌هایی به شکل رشته و فیبر بیش‌ترین فراوانی را در این سه ساختار مورفولوژیکی دارند. رنگ غالب مشاهده‌شده میکروپلاستیک‌ها در رسوبات شامل مشکی بود. نوع پلیمر ذرات نیز پلی‌اتیلن بوده است. بررسی آماری ارتباط بین میکروپلاستیک و ساختارهای مختلف مورفولوژیک نشان داد که تفاوت معناداری بین اندازه و شکل میکروپلاستیک و ساختارهای مورفولوژیک در رودخانه زیارت وجود ندارد.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر در مقیاس منافذ به‌طور بالقوه فراوان‌ترین کسر اندازه را در رسوبات رودخانه زیارت نشان می‌دهد. از آن‌جایی‌که بسیار بعید است که این مورد فقط برای رودخانه زیارت باشد، می‌توان نتیجه گرفت که اهمیت میکروپلاستیک‌ها با اندازه در مقیاس مختلف و پایین‌تر برای سایر سیستم‌های رودخانه نیز قابل‌توجه است. با توجه به تأثیر نوع طبقه‌بندی بر تحلیل نتایج، می‌توان انتظار داشت که با تحلیل نتایج در اندازه تفکیک کوچک‌تر طبقات، حضور میکروپلاستیک‌ها در اندازه‌های با تفکیک کوچک‌تر در رسوبات بستر رودخانه به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. یکی از ویژگی‌های رودخانه زیارت در محل نمونه‌برداری پژوهش حاضر، نزدیکی محل نمونه‌برداری به تصفیه‌خانه است. بنابراین در تجمع میکروپلاستیک‌های این محدوده که هم محل بازدید گردشگران و هم محل حضور تصفیه‌خانه است می‌توان نقش بیش‌تر را به تصفیه‌خانه نسبت داد. ضمن آن‌که حضور فیبر با فراوانی بالا در منطقه که منشأ اصلی آن فاضلاب‌های خانگی است تأییدی بر این مدعا است.

استناد: شعبانی، نسیم، مفتاح هلقی، مهدی، دهقانی، امیراحمد، رضایی، حسن، عبدالحسینی، محمد (۱۴۰۴). تأثیر ساختار مورفولوژیک بر حضور میکروپلاستیک در منطقه هایپرک رودخانه زیارت. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۲)، ۱۹۹-۱۸۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22889.3767



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آلودگی موجود در پهنه‌ها و مناطق آبی نقش مهمی بر سلامت اکوسیستم‌ها ایفا می‌کند. شناسایی و کنترل آلاینده‌ها در این مناطق در مدیریت صحیح آن مهم و مؤثر است. مولفه‌های مختلف پهنه‌های آبی و رودخانه‌ها در زنجیره آلاینده‌ها نقش‌های متفاوتی دارند. یک مولفه بسیار مهم در اکوسیستم‌های آبی، منطقه هایپریک است که به دلیل ارتباط مستقیم با آب‌های زیرزمینی و سطحی در تبادل و انتقال آلاینده‌ها نقش مهمی دارد. هنگامی که جریان آب از بستر و کناره‌های خود عبور می‌کند، به عنوان جریان اشباع شده در مواد زمین به پایین دست حرکت می‌کند و دوباره وارد کانال جریان می‌شود، این جریان اشباع در صورت وقوع، منطقه هایپریک تعریف می‌شود (۱). جریان هایپریک معمولاً با توجه به ماهیت دوطرفه بودن آن‌ها از جریان‌های آب زیرزمینی متمایز می‌شوند. هایپریک، جریان رفت و برگشتی در امتداد عمود بر بستر است که در مقیاس نسبتاً کوچکی، معمولاً از چند سانتی‌متر تا ده‌ها متر، ردوبدل می‌گردد، درحالی‌که تخلیه یا تغذیه آب زیرزمینی به صورت تبادل یک طرفه در مسافت‌های نسبتاً طولانی در نظر گرفته می‌شود (۲). بولتون و همکاران (۱۹۹۸) منطقه هایپریک را به عنوان یک بوم‌مرز (Ecotone) فعال بین آب جریان سطحی و آب‌های زیرزمینی، که در آن آب، مواد مغذی و مواد آلی مبادله می‌شود، تعریف می‌کنند (۳). منطقه هایپریک، یک منطقه حساس و از لحاظ اکولوژیک بسیار مهم در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای است و به منطقه‌ای در زیر بستر رودخانه اطلاق می‌شود که به شکل پویایی تحت تأثیر جریان سطحی و زیرزمینی قرار دارد (۴). در این ناحیه، قسمتی از جریان آب سطحی اکسیژن و مواد مغذی را به جانداران می‌رساند و پس از طی زمان معینی دوباره به آب سطحی بازمی‌گردد.

نمونه‌ای از آلاینده‌ها که تأثیرات آن در بخش‌های مختلف منطقه هایپریک قابل بررسی است، میکروپلاستیک‌ها هستند. به دلیل خصوصیات فیزیکی پلاستیک‌ها و نسبت بالای سطح به جرم در آن‌ها، معمولاً دارای جرم وزنی پایینی بوده که باعث شناور شدن آن‌ها می‌گردد و باعث انتقال به منابع آب از جمله رودخانه‌ها، آب‌بندها، سدها، دریاچه‌های طبیعی و دریاها و حتی احتمال ورود آن‌ها به منابع آب شیرین و اقیانوس‌ها شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که حجم و تنوع میکروپلاستیک‌ها در این منابع و بستر آن‌ها و به تبع آن سلامتی انسان‌ها دچار دگرگونی می‌نماید (۵). میکروپلاستیک‌ها شامل ذرات کوچک، جامد، نامحلول در آب و پایدار با اندازه کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر و هم‌چنین در محدوده ذرات نانو (≥ 999 نانومتر) می‌باشند (۶ و ۷). به منظور تمییز قائل شدن بین منابع تجزیه‌شونده و منابع صنعتی میکروپلاستیک، آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم کرده‌اند: میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه (۸). میکروپلاستیک‌های اولیه به طور نمونه میکروبیدهای کروی شکل هستند که به صورت هدف‌دار توسط صنعت پلاستیک‌سازی برای استفاده در لوازم آرایشی، محصولات مراقبت شخصی، لایه‌برداری پوست و مواد پاک‌کننده تولید می‌شوند. میکروپلاستیک‌های ثانویه قطعات پلاستیکی بی‌شکل و قاعده‌ای بوده که به طور ناخواسته به عنوان نتیجه تخریب قطعات بزرگ‌تر پلاستیک، مانند کیسه‌های پلاستیکی، جعبه‌ها، بطری‌ها و به خصوص طناب و تورهای ماهیگیری تولید می‌شوند (۸). میکروپلاستیک‌های جمع‌آوری‌شده از محیط‌های آبی در انواع شکل، رنگ و اندازه مختلف یافت شده‌اند که برخی از آن‌ها ظاهری کروی داشته و برخی دیگر فیبر مانند یا دارای شکلی تصادفی هستند. میکروپلاستیک‌های اولیه بیش‌تر تمایل دارند تا ظاهری کروی شکل یا فیبرمانند به خود گرفته و معمولاً آن را در هر سطحی

شهری بررسی کردند (۱۵). در نتیجه این مطالعات، بر نقش رودخانه‌ها در انتقال زباله‌های پلاستیکی از منابع داخلی مانند مناطق شهری به محیط‌های دریایی تأکید شده است.

مطالعه مربوط به بررسی حضور میکروپلاستیک در منطقه هایپریک سابقه چندانی ندارد. فری و همکاران (۲۰۱۹) در آلمان وجود میکروپلاستیک‌ها را در منطقه هایپریک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که این منطقه می‌تواند محل تجمع ذرات میکروپلاستیک ۲۰ تا ۵۰ میکرومتری باشد (۴). دیچگانس و همکاران (۲۰۲۳) بر روی مدل‌سازی یکپارچه میکروپلاستیک‌ها در ناحیه هایپریک کار کرده‌اند (۱۶). پژوهش‌های در مورد انتقال میکروپلاستیک در رودخانه‌ها بیش‌تر بر عملکرد آن‌ها به عنوان بردارهای انتقال بین مناطق داخلی و دریا متمرکز است. با این وجود، مطالعات میدانی نشان می‌دهد که ذرات میکروپلاستیک را می‌توان در رسوبات بستر رودخانه، یعنی منطقه هایپریک، حفظ کرد. باثو و همکاران (۲۰۲۳)، فراوانی و ویژگی‌های آلودگی میکروپلاستیک در زون‌های هایپریک رودخانه‌های شهری را بررسی کردند نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه بینش‌هایی را در مورد مدیریت آلودگی میکروپلاستیک در رودخانه شهری ارائه کرد (۱۷).

بوم‌شناسان رودخانه بر این باورند که خصوصیات مکانی و زمانی منطقه هایپریک و میزان تبادل آن به عوامل متعددی مانند ساختار زمین‌شناسی حوزه، نوع و جریان رودخانه، شرایط کانال و سیستم آب‌های زیرزمینی محلی و منطقه‌ای بستگی دارد (۱۸ و ۱۹). از جمله ساختارهای مورفولوژیک رودخانه‌ای که می‌تواند به عنوان عامل مؤثر بر حضور و توزیع میکروپلاستیک در منطقه هایپریک مورد بررسی قرار گیرد، ساختارهای کنده (Logjams)، جزیره

پایدار نگه می‌دارند. برعکس، میکروپلاستیک‌های ثانویه بیش‌تر ظاهری تصادفی و ناموزون داشته که در نتیجه، طبقه‌بندی آن‌ها بسیار سخت است. یک مشکل دیگر در این زمینه، تغییر چشمگیر در ظاهر هر دو نوع میکروپلاستیک توسط هوازدگی است. میکروپلاستیک‌ها در رنگ‌های مختلف مشاهده می‌شوند. بنابراین، این تفاوت رنگ به عنوان بخشی از سیستم استاندارد طبقه‌بندی میکروپلاستیک‌های جمع‌آوری شده از محیط‌زیست استفاده می‌گردد.

میکروپلاستیک‌های موجود در منطقه هایپریک می‌تواند یک خطر بالقوه برای منابع آب آشامیدنی، به‌ویژه در هنگام تأمین آب آشامیدنی از طریق تصفیه آب رودخانه باشد. اگرچه هنوز شواهد قوی برای این مسأله وجود ندارد اما ممکن است که میکروپلاستیک‌ها از طریق موجودات کف‌زی موجود در بستر رودخانه‌ها به سطوح بالای زنجیره غذایی انتقال یابند (۴). هم‌چنین منطقه هایپریک به عنوان یک منطقه بالقوه ورود و ذخیره میکروپلاستیک به زنجیره غذایی رودخانه‌ای عمل می‌کند. اگرچه مطالعه حضور میکروپلاستیک محدود به منطقه هایپریک نبوده و در بخش‌های مختلف اکوسیستم‌های رودخانه‌ای (۹، ۱۰ و ۱۱) و سایر اکوسیستم‌های آبی (۱۲ و ۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات در زمینه حضور میکروپلاستیک در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای منابع غنی برای مطالعات آینده فراهم ساخته است. چنان‌که دوییز و کورس (۲۰۱۶)، روش قابل‌اعتماد تحلیلی برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آب شیرین ارائه نمودند (۱۴). آن‌ها ذرات میکروپلاستیک را بررسی نمودند و یک استراتژی نمونه‌برداری را ارائه نمودند. واگنر و همکاران (۲۰۱۹) رابطه بین دبی و غلظت پلاستیک رودخانه را در حوضه آبریز روستایی و

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: مطالعه حاضر به بررسی تأثیر ساختار مورفولوژیک بر حضور میکروپلاستیک منطقه هایپریک رودخانه زیارت تمرکز دارد. این رودخانه از ارتفاعات بالاچال، زرشک‌کوه، سفیداب و ناهارخوران در جنوب گرگان سرچشمه گرفته و پس از عبور از شهر گرگان در حدود روستای حاجی‌قره به رودخانه قره‌سو ملحق می‌شود.

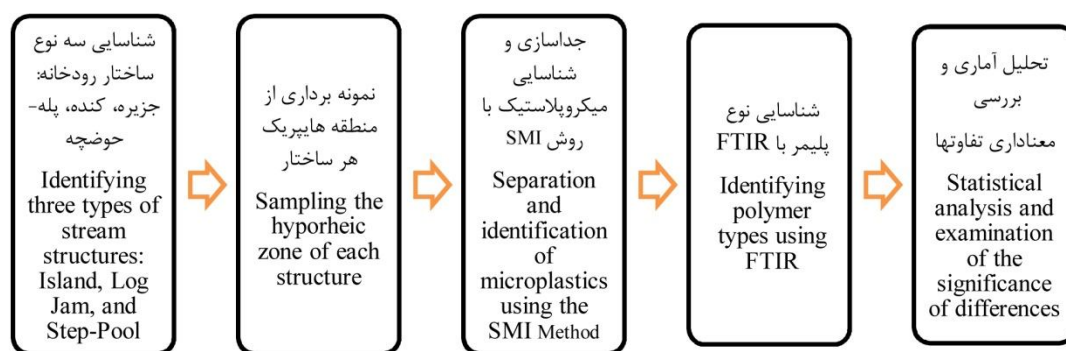
نمونه‌برداری از طول رودخانه زیارت و براساس ساختارهای مختلف مورفولوژیک در فصل تابستان ۱۴۰۲ انجام شده است. تغییرات ارتفاعی در محدوده مورد مطالعه در بازه ۴۷۶ تا ۴۷۹ متر بوده است. مطالعه حاضر در سه گام نمونه‌برداری، شناسایی و تحلیل آماری انجام شده است (شکل ۱).

نمونه‌برداری از طول رودخانه زیارت و در بازه ۵۰۰ متری و براساس سه ساختار مختلف مورفولوژیک (ساختار مورفولوژی پله- حوضچه‌ای، کنده‌ها و جزایر میان رودخانه‌ای) انجام شده است. در بازه ۵۰۰ متری طول رودخانه و در چند نقطه مربوط به هر ساختار، نمونه‌برداری در فصل تابستان سال ۱۴۰۲ انجام شده است. برای هر محل نمونه‌برداری، تعداد سه نمونه از بخش‌های مختلف آن ساختار برداشت شد (شکل ۲). نمونه از منطقه هایپریک رودخانه و در عمق ۳۰ سانتی‌متری با استفاده از دستگاه اوگر اصلاح شده انجام گرفت. به دلیل وجود بستر سنگی در مسیر رودخانه، اوگر با ضربه به عمق ۳۰ سانتی‌متری منتقل و سپس از رسوب خارج گردید. به دلیل وجود سوپاپ در انتهای اوگر، رسوبات تا عمق موردنظر استخراج گردید.

(Island) و پله- حوضچه (Step-pool) هستند. ساختار پله- حوضچه عمدتاً در رودخانه‌های کوهستانی با شیب طبیعی رودخانه وجود دارد که به دلیل سرعت بالای جریان در این مناطق، رسوبات بستر بیش‌تر از نوع درشت‌دانه خواهد بود. این ساختار، به دلیل ماهیت خود که به دلیل تجمع سنگ‌دانه‌ها کنار هم تجمع یافته و تشکیل فرم‌های مختلف تکراری در رودخانه‌ها را می‌دهند احتمالاً بستری برای حضور و تجمع میکروپلاستیک می‌باشند (۱ و ۲۰).

نوع دیگر از ساختار مؤثر بر تبادل هایپریک وجود کنده‌ها و جزایر در مسیر رودخانه‌ها است. کنده‌ها و جزایر بخش‌های مهمی در مسیر رودخانه‌ها هستند که مورفولوژی، هیدرولوژی و بوم‌شناسی رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۱). تأثیر وجود کنده‌ها و جزایر بر تبادل هایپریک نیز در مطالعات متعدد مانند داغتی و همکاران (۲۰۲۰)، سینگها و همکاران (۲۰۲۰) و رن و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شده است (۲۲، ۲۳ و ۲۴).

بنابراین با توجه به اهمیت میکروپلاستیک در منطقه هایپریک و تأثیر ساختار مورفولوژیک رودخانه بر میکروپلاستیک، در این مطالعه سعی شده است تا با نمونه‌برداری از این سه ساختار، وجود میکروپلاستیک موردبررسی قرار گیرد. تاکنون هیچ مطالعه‌ای در داخل کشور به بررسی میزان و تنوع میکروپلاستیک در منطقه هایپریک پرداخته است. بنابراین، در این مطالعه برای اولین بار به بررسی حضور میکروپلاستیک در این منطقه حساس بوم‌شناختی پرداخته شده است.

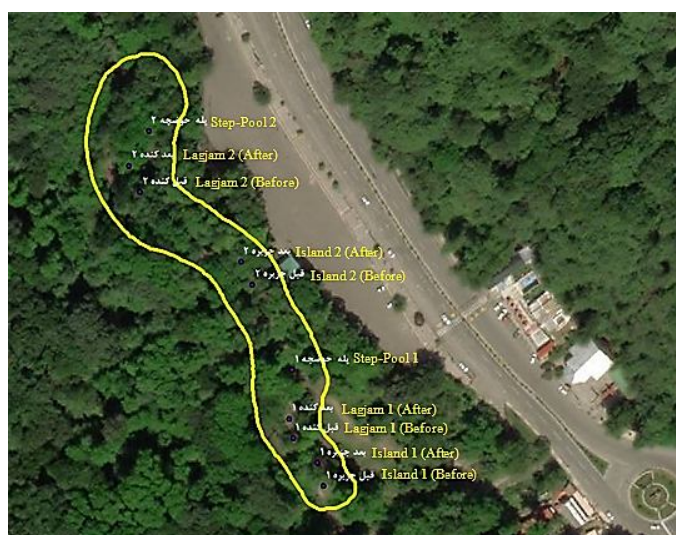


شکل ۱- نمودار جریان‌ی مراحل انجام کار.

Figure 1. Flowchart of research steps.

شناسایی میکروپلاستیک‌ها با استفاده از روش SMI، کوپوک و همکاران (۲۰۱۷)، صورت گرفت (۲۵).

نمونه‌ها بعد از جمع‌آوری، در یک ظرف غیرپلاستیکی، نگهداری و به آزمایشگاه منتقل



شکل ۲- مناطق نمونه‌برداری سه ساختار مورفولوژیک پله- حوضچه، جزیره و کنده.

Figure 2. Sampling areas of three morphological structures: Step-Pool, Island and Logjam.

از نمونه‌های جمع‌آوری شده، شناورسازی است؛ محلول‌های CaCl_2 ، KHCO_2 ، ZnCl_2 ، NaCl و NaI اغلب برای این کار به کار می‌روند (۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹). محلول اشباع کلریدسدیم (NaCl) به دلیل داشتن قیمت کمتر و همچنین نداشتن اثرات سمی نسبت به سایر ترکیبات ارجحیت دارد. در مطالعه حاضر برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها، از محلول کلریدسدیم $1/2 \text{ g.cm}^{-3}$ استفاده شد (۳۰). به اندازه

میکروپلاستیک‌ها توسط دستگاه SMI از طریق شناورسازی از نمونه‌های آب جدا شدند. برای این کار، ابتدا نمونه‌های رسوبی منطقه هایپرریک به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفت (۲۶). برای جداسازی ساده ذرات، نمونه‌ها پس از خشک شدن با استفاده از الک با چشمه بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر غربال شدند. در این مرحله یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها

۵۰ گرم نمونه خشک تفکیک و جداسازی و به دستگاه SMI منتقل شد. تمام اجزای SMI و وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز قبل از کار با آب ۲ بار تقطیر شستشو داده شدند. سپس، ۳۳۶ میلی‌لیتر NaCl ($1/2 \text{ g cm}^{-3}$) درون ارلن ریخته و به آن آب مقطر اضافه شد تا حجم مجموع به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر برسد. در مرحله بعد، از همزن مغناطیسی برای اشباع کردن آب و نمک به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شد تا کاملاً حل شده و محلولی شفاف حاصل شود. در ادامه، این محلول به دستگاه SMI حاوی ۵۰ گرم نمونه خشک شده اضافه و از همزن مغناطیسی برای مخلوط کردن رسوب به مدت ۵ دقیقه استفاده شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت اجازه ته‌نشینی به محلول داده شد، سپس شیر دورانی بسته شد و محتویات بالایی دستگاه بر روی کاغذ صافی واتمن توسط پمپ خلا فیلتر شدند و هر فیلتر به یک پتری‌دیش شیشه‌ای تمیز منتقل شد (۲۵). پس از استخراج به روش ذکر شده، نمونه‌ها با استفاده از استریومیکروسکوپ مجهز به دوربین دیجیتال تصویربرداری شرکت NOVEL مشاهده گردیدند. سپس، همه میکروپلاستیک‌های مشاهده شده براساس شکل، رنگ و اندازه طبقه‌بندی و شمارش شدند (۳۱).

برای شناسایی نوع پلیمر میکروپلاستیک نیز از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل- فوریه (FTIR) استفاده شد. این دستگاه، یکی از محبوب‌ترین و گسترده‌ترین ابزارها برای تشخیص قطعی نوع پلاستیک موجود در ساختار تشکیل‌دهنده میکروپلاستیک در نمونه‌های محیط‌زیستی است. در حالی‌که علت محبوب بودن این تکنیک ساده بودن و اطمینان پذیری آن است، اما دلیل اصلی استفاده از FTIR شناسایی بسیار دقیق نوع پلاستیک موجود با

تولید طیف‌های مادون قرمز بسیار خاص بوده که با داشتن الگوهای نواری متمایز، در نهایت منجر به تشخیص مواد پلاستیکی از مواد طبیعی می‌شوند. این تکنیک بر این واقعیت استوار است که بیش‌تر مولکول‌ها نور ناحیه مادون قرمز در یک طیف الکترومغناطیس را جذب می‌کنند.

تحلیل آماری: برای بررسی تفاوت بین اندازه و شکل میکروپلاستیک‌ها در ساختارهای سه‌گانه مورفولوژیک این مطالعه از روش تحلیل واریانس چندمتغیره یک‌طرفه (one-way multivariate analysis of variance) استفاده شد. آزمون تحلیل واریانس چندمتغیره (MANOVA) یک روش آماری است که برای بررسی تفاوت‌های گروهی در یک مجموعه از متغیرهای وابسته (متغیرهای پیامد) استفاده می‌شود. این آزمون در واقع یک گسترش از تحلیل واریانس (ANOVA) تک‌متغیره به چندمتغیره است. هدف اصلی MANOVA، بررسی این است که آیا میانگین متغیرهای وابسته در گروه‌های مختلفی که توسط یک متغیر مستقل (یا چندین متغیر مستقل) تعریف می‌شوند، متفاوت هستند یا خیر. فرضیه صفر در MANOVA این است که میانگین متغیرهای وابسته در گروه‌های مختلف برابر است، در حالی‌که فرضیه جایگزین این است که حداقل یکی از متغیرهای وابسته تفاوت‌های گروهی معنادار دارد. تحلیل‌های آماری مربوط در نرم‌افزار MINITAB انجام شده است.

نتایج

حضور میکروپلاستیک‌ها از نظر اندازه برای سه ساختار متفاوت مورفولوژی رودخانه زیارت، در چهار طبقه بررسی شد (جدول ۱).

جدول ۱- تفکیک میکروپلاستیک‌ها از لحاظ اندازه.

Table 1. Separation of microplastics by size.

3000-5000 μm	1000-3000 μm	500-1000 μm	> 500 μm	موقعیت Location	مورفولوژی Morphology
10%	10%	40%	40%	ابتدا Before	جزیره Island
0	40%	50%	10%	انتها After	
0	0	15.38%	84.62%	قبل Before	کنده Logjam
0	10%	20%	70%	بعد Aefore	
11.12%	33.33%	33.33%	22.22%	داخل Inside	پله - حوضچه Step-Pool

میکرومتر، در بعد از موقعیت کنده کاهش یافته است. این نکته در ساختار جزیره‌ای نیز صادق است. در این ساختار نیز مانند کنده، کاهش ۱۰ درصدی میزان ذرات با اندازه کم‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر مشاهده می‌شود، ۲۰ درصد از این ذرات در موقعیت بعد از جزیره کاهش داشته است. به عبارت دیگر در موقعیت بعد از جزیره و کنده در تابستان ۱۴۰۲ افزایش ذرات با اندازه بیش از ۱۰۰۰ میکرومتر مشاهده می‌شود. حضور میکروپلاستیک‌ها از لحاظ شکل نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، ذرات میکروپلاستیک به چهار گروه فیبر^۱، قطعه^۲، رشته^۳ و گلوله^۴ تقسیم شده‌اند (شکل ۳).

نتایج بررسی میکروپلاستیک در تابستان ۱۴۰۲ نشان داد که بیشترین میزان میکروپلاستیک موجود در منطقه هایپریک در هر سه ساختار مورفولوژیک پله-حوضچه‌ای، کنده‌ها و جزایر میان رودخانه‌ای، ذرات با اندازه کم‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر بوده است. به گونه‌ای که در کنده‌ها از ۹۰ تا ۱۰۰ درصد، در جزایر از ۶۰ تا ۸۰ درصد و در ساختار پله-حوضچه‌ای نیز بیش از ۵۵ درصد ذرات موجود در منطقه هایپریک در اندازه کم‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر بوده‌اند. مقایسه نتایج در دو ساختار کنده و جزایر در قبل و بعد از این ساختارها نیز نشان می‌دهد که در کنده‌ها، ۱۰ درصد میکروپلاستیک‌های اب اندازه کم‌تر از ۱۰۰۰



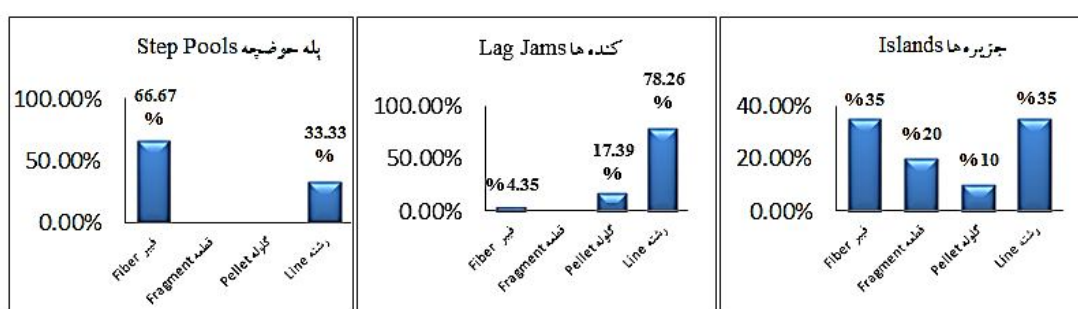
شکل ۳- ذرات میکروپلاستیک موجود در رسوبات منطقه هایپریک رودخانه زیارت با استفاده از استریومیکروسکوپ، به ترتیب از راست: فیبر، قطعه، رشته، گلوله.

Figure 3. Microplastic particles in the sediments of the hyporheic area of the Ziarat River, observed using a stereomicroscope. From right to left: Fiber, Fragment, Line, Pellet.

- 1- Fiber
- 2- Fragment
- 3- Line
- 4- Pellet

بزرگ‌تر و شکل تخم‌مرغی، راحت‌تر در رسوب فرو می‌روند و به‌صورت عمودی حمل می‌شوند، که احتمالاً این امر منجر به ذخیره‌سازی کم‌تر این اشکال در رسوبات با عمق کم‌تر شود. بیش‌ترین میزان و درصد فراوانی به رشته و فیبر در این سه ساختار اختصاص یافته است که می‌توان احتمالاً دلیل آن را در حجم پایین جریان آب در تابستان و به دام‌اندازی راحت‌تر این ذرات نسبت داد.

درصد شکل‌های موجود در تابستان رودخانه زیارت برای هر کدام از ساختارهای مورفولوژیک متفاوت است (شکل ۴). در ساختار جزیره، فیبر و رشته به یک میزان (۳۵ درصد) وجود داشته است. در ساختار پله-حوضچه، فیبر و رشته بیش‌ترین فراوانی را دارند. در ساختار کنده‌ها، رشته بیش‌ترین فراوانی را دارد (حدود ۷۸ درصد). با توجه به این‌که میکروپلاستیک‌های گلوله به دلیل چگالی نسبتاً

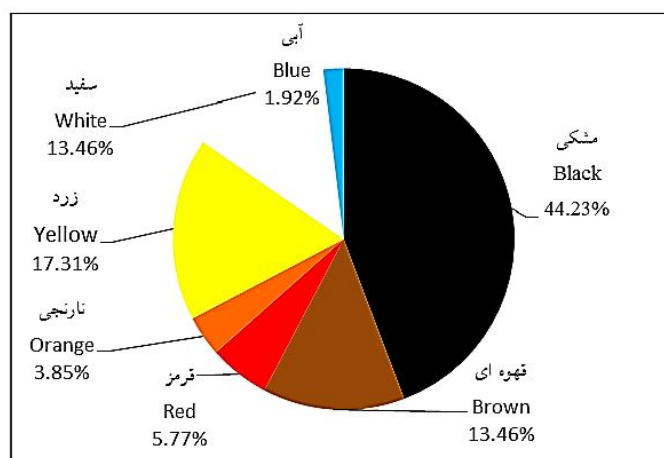


شکل ۴- درصد توزیع اشکال میکروپلاستیک در ساختارهای مختلف مورفولوژیک.

Figure 4. Percentage distribution of microplastic forms in various morphological structures.

با ۱۳/۴۶٪، رنگ قرمز با ۵/۷۷٪، رنگ نارنجی با ۳/۸۵٪ و در انتها، رنگ آبی با ۱/۹۲٪ کم‌ترین فراوانی را به خود اختصاص داده است (شکل ۵).

در این منطقه، میکروپلاستیک‌های شناسایی شده در رنگ‌های مشکی، قرمز، زرد، نارنجی و قهوه‌ای بوده‌اند. رنگ مشکی با ۴۴/۲۳٪ بیش‌ترین فراوانی و بعد از آن رنگ زرد با ۱۷/۳۱٪، رنگ قهوه‌ای و سفید

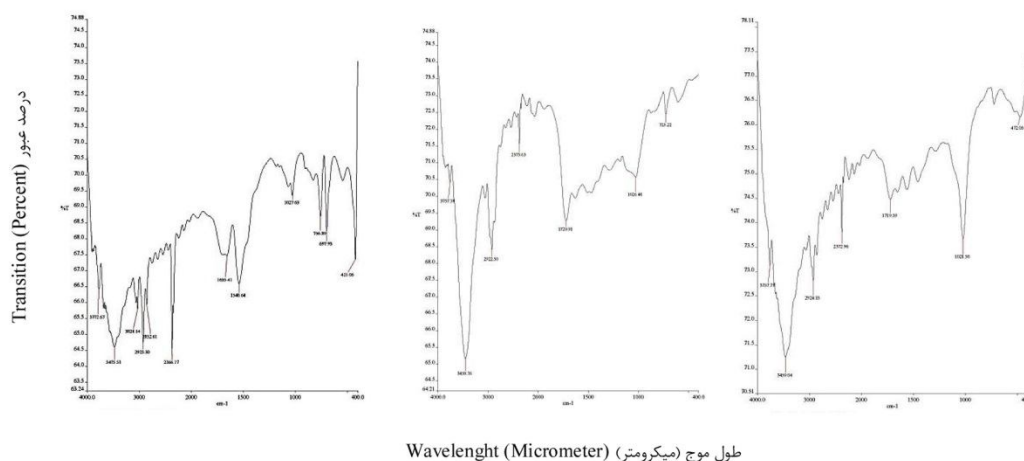


شکل ۵- تنوع رنگی موجود در ذرات میکروپلاستیک رودخانه زیارت.

Figure 5. The variety of colors found in the microplastic particles of the Ziarat River.

طیف‌سنجی FTIR انتخاب شد. نتایج طیف‌سنجی در شکل ۶ آمده است.

برای شناسایی جنس پلیمر، میکروپلاستیک نمونه‌های ضخیم‌تر یا بزرگ‌تر به‌طور تصادفی با استفاده از پنس برداشته و برای استفاده مستقیم در



شکل ۶- نمونه‌ای از آنالیز ذرات میکرو پلاستیکی استخراج شده از میکروپلاستیک‌های منطقه هایپریک با استفاده از FTIR.
Figure 6. An example of the analysis of microplastic particles extracted from the hyporheic zone using FTIR.

میکروپلاستیک و ساختارهای مورفولوژیک ۰/۸ بوده است که مشابه نتایج اندازه میکروپلاستیک تفسیر می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در رودخانه‌ها میکروپلاستیک‌ها همگن انتقال پیدا نمی‌کنند. مکانیسم انتقال به خواص ذرات میکروپلاستیک مانند اندازه ذرات، شکل، چگالی، زبری سطح و شرایط انتقال هیدرودینامیکی در جریان کانال باز بستگی دارد. ته‌نشین شدن میکروپلاستیک‌های معلق بدیهی‌ترین دلیل است که منجر به انتقال میکروپلاستیک‌ها از جریان رودخانه به منطقه هایپریک می‌شود (۴).

مکانیسم‌ها و مقیاس‌های زمانی شناسایی شده برای تجمع میکروپلاستیک‌های کوچک و سبک در رسوبات بستر رودخانه نشان می‌دهد که این اجزای اغلب نامشخص احتمالاً میراث آلودگی هستند که

جنس پلیمرهای میکروپلاستیک غالب در رسوب منطقه هایپریک در این سه ساختار مورفولوژی با استفاده از تفسیر طیف‌سنجی، پلی اتیلن شناسایی شد. برای تعیین تفاوت بین دو یا چند گروه از یک متغیر مستقل در بیش از یک متغیر وابسته پیوسته استفاده می‌شود. برای بررسی تفاوت بین اندازه و شکل میکروپلاستیک‌ها در ساختارهای پله-حوضچه، جزیره و کنده از تحلیل واریانس چندمتغیره یک‌طرفه استفاده شد. در این رویه، ساختارهای مورفولوژیک به‌عنوان متغیر مستقل و اندازه و شکل میکروپلاستیک‌ها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. تحلیل MANOVA در نرم‌افزار MiniTab اجرا شد. سطح معناداری آماری (P Value) برای لامبدا ویلک (Wilk's Lambda) ۰/۲ برآورد شده است که نشان می‌دهد بین اندازه میکروپلاستیک و ساختارهای مورفولوژیک در رودخانه زیارت تفاوت معناداری وجود ندارد. میزان این آماره برای شکل

گنجاندن آن در ارزیابی‌های جهانی بسیار مهم است (۳۲).

در مطالعه دراموند و همکاران (۲۰۲۰)، طیف گسترده‌ای از شرایط هیدرودینامیکی در رودخانه‌ها در نظر گرفته شد که تأثیر ساختار مورفولوژیک بر میزان میکروپلاستیک قابل مشاهده است (۳۱). آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تبادل هایپرک برای ماند و منتقل شدن ذرات با قطر کم‌تر از ۱۰۰ میکرومتر، صرف‌نظر از نوع پلیمر، مهم است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که میکروپلاستیک در ناحیه هایپرک در سه ساختار مورفولوژی متفاوت وجود دارد و از میان ۵۲ قطعه میکروپلاستیک شناسایی‌شده در این مناطق در فصل تابستان، ۲۰ قطعه متعلق به جزیره، ۲۳ قطعه مربوط به کنده و ۹ قطعه میکروپلاستیک برای ساختار پله - حوضچه بوده است.

تبادل هایپرک برای نگه‌داری میکروپلاستیک‌هایی با قطر کم‌تر از ۱۰۰ میکرومتر و ذرات با چگالی کم در همه اندازه‌ها مهم است (۳۱). در مطالعه حاضر اکثر میکروپلاستیک‌ها ذراتی با قطر کم‌تر از ۵۰۰ میکرومتر بوده است و کم‌ترین فروانی هم مربوط به ذرات ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ میکرومتر است. در مطالعه رستا و همکاران (۲۰۲۰) بر نقش اندازه کوچک میکروپلاستیک‌ها بر موجودات زنده تأکید ویژه شده است (۳۳).

در این مطالعه، میکروپلاستیک‌ها در چهار دسته (فیبر، قطعه، رشته و گلوله) طبقه‌بندی شدند که فیبر و رشته بیش‌ترین فروانی را دارند. مشابه این نتایج در مطالعه قنبری‌تپه و همکاران (۲۰۲۲) نیز یافت شد که فیبر و قطعه بیش‌ترین اشکال میکروپلاستیک در فراوانی، توزیع و ترکیب میکروپلاستیک در رودخانه قره‌سو اردبیل بوده است (۳۴). در مطالعه هرناوندز و همکاران (۲۰۱۷) به این نتیجه اشاره شده است که فاضلاب ماشین لباسشویی حاوی مقدار زیادی

میکروپلاستیک فیبر مانند است (۳۵). بنابراین ورود فاضلاب‌های خانگی به رودخانه زیارت می‌تواند علل فراوانی میکروپلاستیک‌های فیبری در این رودخانه باشد. ریختن زباله‌هایی مانند بطری‌های نوشابه و آب، کیسه‌های پلاستیکی و غیره توسط گردشگران به آب و حاشیه رودخانه زیارت می‌تواند منشأ میکروپلاستیک‌های ثانویه‌ای مانند قطعه باشد. یگانه‌فر و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که تردد وسایل نقلیه در جاده‌های نزدیک به رودخانه، احتمال انتقال ذرات پلاستیک ناشی از ساییدگی لاستیک خودروها توسط رواناب به رودخانه را ممکن می‌سازد. وجود خط تردد وسایل نقلیه در کنار رودخانه زیارت می‌تواند تأییدی بر این ادعا باشد (۳۶).

در مطالعات گوناگون، با توجه به عوامل محیطی و نوع کاربری اراضی، ویژگی میکروپلاستیک‌ها یعنی اندازه، شکل و رنگ آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد (۳۷ و ۳۸). برای نمونه، در تمام رسوبات مطالعه حاضر میکروپلاستیک‌هایی به شکل فیلم و فوم یافت نشد. در مطالعه ژو و همکاران (۲۰۱۸) بیش‌ترین مقدار میکروپلاستیک در رسوبات مصب به شکل قطعه است و بعدازآن میکروپلاستیک‌هایی به شکل فیبر وجود دارد (۳۹) و در مطالعه‌ای که بائو و همکاران (۲۰۲۳) انجام دادند، بیش‌ترین مقدار میکروپلاستیک به شکل فوم و گلوله بود (۴۰). بنابراین، با توجه به این تفاسیر، تفاوت بین مطالعات مختلف با منطقه مورد مطالعه رودخانه زیارت می‌تواند در اثر شرایط متفاوت منطقه نمونه‌برداری باشد.

کول و گالوی (۲۰۱۵)، آویو و همکاران (۲۰۱۵) و آریاس و همکاران (۲۰۱۸) به این نتیجه رسیدند که ذرات میکروپلاستیک رنگی می‌تواند توسط موجودات آبری به‌عنوان غذا اشتباه گرفته شوند (۴۱، ۴۲ و ۴۳). از طرف دیگر وجود تنوع رنگی بالا در بین میکروپلاستیک‌های این مطالعه نشان داد که خطر

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دارند تا از همه زحمات سردبیر محترم و داوران گرامی مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک برای بررسی دقیق و ارسال نقطه‌نظرات سازنده تشکر و قدردانی نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش به‌صورت نمونه‌برداری مستقیم از منطقه انجام گرفته است.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، انجام مراحل آزمایشگاهی، انجام تحلیل.
نویسنده دوم، سوم و چهارم: کمک در نمونه‌برداری، انجام تحلیل، نگارش و بازبینی مقاله و راهنمایی مسیر تحقیق.

اصول اخلاقی

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت شده است و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی و تجهیزاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام گرفته است.

حضور میکروپلاستیک می‌تواند در برخی اغلب موارد فارغ از رنگ باشد. نکته‌ای که در مطالعه بائو و همکاران (۲۰۲۳) نیز تأکید شد (۴۰). در مطالعه ایشان، هیچ تغییر قابل‌توجهی در رنگ میکروپلاستیک‌ها بین لایه‌های عمقی مختلف یافت نشد.

جنس پلیمرهای میکروپلاستیک غالب در رسوب منطقه هاپیریک در سه ساختار مورفولوژی کننده، جزیره و پله- حوضچه، با استفاده از تفسیر طیف‌سنجی، پلی‌اتیلن شناسایی شد. این نتیجه، با نتیجه مطالعه بائو و همکاران (۲۰۲۳) که به بررسی انتقال عمودی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات ناحیه هاپیریک و به‌صورت موردی در رودخانه یانگ تسه پرداختند مطابقت داشت (۱۷). در مطالعه ایشان، پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن انواع پلیمرهای غالب در تمام نمونه‌های رسوبی بودند.

با توجه به این مطالعه، منطقه هاپیریک یک منطقه مهم برای تجمع میکروپلاستیک‌ها با اندازه متفاوت در رودخانه‌ها است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌های کوچک‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر در مقیاس منافذ به‌طور بالقوه فراوان‌ترین کسر اندازه را در رسوبات رودخانه زیارت نشان می‌دهد. از آنجایی‌که بسیار بعید است که این مورد فقط برای رودخانه زیارت باشد، می‌توان نتیجه گرفت که اهمیت میکروپلاستیک‌ها با اندازه در مقیاس مختلف و پایین‌تر برای سایر سیستم‌های رودخانه نیز قابل‌توجه است. با توجه به تأثیر نوع طبقه‌بندی بر تحلیل نتایج، می‌توان انتظار داشت که با تحلیل نتایج در اندازه تفکیک کوچک‌تر طبقات، حضور میکروپلاستیک‌ها در اندازه‌های با تفکیک کوچک‌تر در رسوبات بستر رودخانه به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. بنابراین پرداختن به مطالعات جامع‌تر با دقت و طبقه‌بندی دقیق‌تر میکروپلاستیک‌ها در بوم‌سازگان‌های رودخانه‌ای به دلیل نقشی که در امنیت آب آشامیدنی ایجاد می‌کنند، ضروری است.

منابع

1. Woessner, W. W. (2017). Hyporheic zones. In *Methods in Stream Ecology* 1 (pp. 129-157). Academic Press.
2. Movahedi, N., Dehghani, A., Schmidt, N., Trauth, N., & Meftah Halaghi, M. (2020). Comparison of Hyporheic Exchanges in 2D and 3D Riffle-Pool, *Journal of Civil Engineering*, 52(8), 13.
3. Boulton, A. J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E. H., & Valett, H. M. (1998). The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29, 59-81.
4. Frei, S., Piehl, S., Gilfedder, B. S., Löder, M. G. J., Krutzke, J., Wilhelm, L., & Laforsch, C. (2019). Occurrence of microplastics in the hyporheic zone of rivers. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
5. Alimohammadi, M., Nabizadeh Nodehi, R., Yunesian, M., Hashemi, S. Y., & Karimyan, K. (2017). A Review of Microplastics, Threat to the Environment and Human Health. 2nd International and 20th National Conference on Environmental Health and Sustainable Development. Yazd, Iran.
6. Arthur, C., Baker, J. E., & Bamford, H. A. (2009). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris, September 9-11, 2008, University of Washington Tacoma, Tacoma, WA, USA.
7. Kershaw, P. J., & Rochman, C. M. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment. Reports and Studies-IMO/FAO/ Unesco-IOC/ WMO/ IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP) Eng No. 93.
8. Crawford, C. B., & Quinn, B. (2016). *Microplastic pollutants*. Elsevier Limited.
9. Capozzi, F., Carotenuto, R., Giordano, S., & Spagnuolo, V. (2018). Evidence on the effectiveness of mosses for biomonitoring of microplastics in fresh water environment. *Chemosphere*, 205, 1-7.
10. Nam, S. H., Kim, S. A., Lee, T. Y., & An, Y. J. (2023). Understanding hazardous concentrations of microplastics in fresh water using non-traditional toxicity data. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130532.
11. Yang, L., Kang, S., Luo, X., & Wang, Z. (2024). Microplastics in drinking water: A review on methods, occurrence, sources, and potential risks assessment. *Environmental Pollution*, 123857.
12. Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, 2(6), 315-320.
13. Ganie, Z. A., Mandal, A., Arya, L., Sangeetha, T., Talib, M., & Darbha, G. K. (2024). Assessment and accumulation of microplastics in the Indian riverine systems: Risk assessment and implications of translocation across the water-to-fish continuum. *Aquatic Toxicology*, 272, 106944.
14. Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2.
15. Wagner, S., Klöckner, P., Stier, B., Römer, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., & Schmidt, C. (2019). Relationship between discharge and river plastic concentrations in a rural and an urban catchment. *Environmental Science & Technology*, 53(17), 10082-10091.
16. Dichgans, F., Boos, J. P., Ahmadi, P., Frei, S., & Fleckenstein, J. H. (2023). Integrated numerical modeling to quantify transport and fate of microplastics in the hyporheic zone. *Water Research*, 243, 120349.
17. Bao, K., Jiang, H., Su, P., Lu, P., & Yan, Z. (2023). Vertical Profiles of Microplastics in the Hyporheic Zone

- Sediment: A Case Study in the Yangtze River, Nanjing Section. *Sustainability*, 15(10), 7895.
18. Poole, G. C., O'Daniel, S. J., Jones, K. L., Woessner, W. W., Bernhardt, E. S., Helton, A. M., Stanford, J. A., Boer, B. R., & Beechie, T. J. (2008). Hydrologic spiralling: the role of multiple interactive flow paths in stream ecosystems. *River Research and Applications* 24, 1018-1031.
 19. Buss, S., Cal, Z., Cardenas, B., Fieckenstein, J., Hannah, D., Heppell, K., Hulme, P., Ibrahim, T., Kaeser, D., Krause, S., Lawier, D., Lerner, D., Mant, J., Malcolm, I., Old, G., Parkin, G., Pickup, R., Pinay, G., Porter, J., Rhodes, G., Richie, A., Riley, J., Robertson, A., Sear, D., Shields, B., Smith, J., Tellam, J., & Wood, P., (2009). The Hyporheic Handbook. A Handbook on the Groundwater-Surfacewater Interface and Hyporheic Zone for Environment Managers. Integrated Catchment Science Programme. Science report: SC050070. *Environment Agency*, Bristol.
 20. Wondzell, S. M., & Gooseff, M. N. (2013). 9.13 Geomorphic controls on hyporheic exchange across scales: Watersheds to particles. *Treatise on geomorphology*, 203-218.
 21. Millington, C. E., & Sear, D. A. (2007). Impacts of river restoration on small-wood dynamics in a low-gradient headwater stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1204-1218.
 22. Doughty, M., Sawyer, A. H., Wohl, E., & Singha, K. (2020). Mapping increases in hyporheic exchange from channel-spanning logjams. *Journal of Hydrology*, 124931.
 23. Singha, K., Doughty, M., McFadden, S., Hucks Sawyer, A., & Wohl, E. (2020). Mapping increases in hyporheic exchange from channel-spanning logjams. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 1342).
 24. Ren, J., Zhuang, T., Wang, D., & Dai, J. (2023). Water Flow and Heat Transport in the Hyporheic Zone of Island Riparian: A Field Experiment and Numerical Simulation. *Journal of Coastal Research*, 39(5), 848-861.
 25. Coppock, R. L., Cole, M., Lindeque, P. K., Queirós, A. M., & Galloway, T. S. (2017). A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *Environmental Pollution*, 230, 829-837.
 26. Nuelle, M. T., Dekiff, J. H., Remy, D., & Fries, E. (2014). A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution*, 184, 161-169.
 27. Liebezeit, G., & Dubaish, F. (2012). Microplastics in beaches of the East Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 89, 213-217.
 28. Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., & Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15, 1949-1956.
 29. Stolte, A., Forster, S., Gerdt, G., & Schubert, H. (2015). Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast. *Marine Pollution Bulletin*, 99, 216-229.
 30. Graca, B., Szewc, K., Zakrzewska, D., Dołęga, A., & Szczerbowska-Boruchowska, M. (2017). Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea-a preliminary study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 7650-7661.
 31. Drummond, J. D., Nel, H. A., Packman, A. I., & Krause, S. (2020). Significance of hyporheic exchange for predicting microplastic fate in rivers. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(10), 727-732.
 32. Drummond, J. D., Schneidewind, U., Li, A., Hoellein, T. J., Krause, S., &

- Packman, A. I. (2022). Microplastic accumulation in riverbed sediment via hyporheic exchange from headwaters to mainstems. *Science Advances*, 8(2), eabi9305.
33. Rasta, M., Sattari, M., Taleshi, M. S., & Namin, J. I. (2020). Identification and distribution of microplastics in the sediments and surface waters of Anzali Wetland in the Southwest Caspian Sea, Northern Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111541.
34. Ghanbari Tapeh, N., Fataei, E., Naji, N., Imani, A., & Nasehi, N. (2022). Determination of Frequency, Distribution and Composition of Microplastics in the Waters of Qarasu Ardabil River, *Journal of Health*, 13(2), 199-212.
35. Hernandez, E., Nowack, B., & Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. *Environmental science & technology*, 51(12), 7036-7046.
36. Yeganeh, F. M., Shakeri, A., Rastegari, M. M., & 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.
37. 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 prioritisation of research needs. *Water research*, 75, 63-82.
38. Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., & Lahive, E. (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK—Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine pollution bulletin*, 114(1), 218-226.
39. Zhou, Q., Zhang, H., Fu, C., Zhou, Y., Dai, Z., Li, Y., & Luo, Y. (2018). The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 322, 201-208.
40. Bao, M., Xiang, X., Huang, J., Kong, L., Wu, J., & Cheng, S. (2023). Microplastics in the atmosphere and water bodies of coastal agglomerations: A mini-review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2466.
41. Cole, M., & Galloway, T. S. (2015). Ingestion of nano plastics and microplastics by Pacific oyster larvae. *Environmental science & technology*, 49(24), 14625-14632.
42. Avio, C. G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2015). Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: first observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine environmental research*, 111, 18-26.
43. Arias-Andres, M., Kettner, M. T., Miki, T., & Grossart, H. P. (2018). Microplastics: New substrates for heterotrophic activity contribute to altering organic matter cycles in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 635, 1152-1159.

