

Review article

Introducing Statistical Methods to Identify the Sources of Microplastics in the Aquatic Environment: An Overview

Yalda Hashempour¹Atefeh Jabari^{2*}Kosar Kouhi²Afsaneh Fendereski³

- 1- Department of Environmental Health Engineering, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
- 2- Student Research Committee, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
- 3- Assistant Professor, Department of Biostatistics, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

*Corresponding author: Atefeh Jabari,
Student Research Committee, Mazandaran
University of Medical Sciences, Sari, Iran

Email: jabariatefeh66@gmail.com

Received: 28 July 2023

Accepted: 13 November 2023

ABSTRACT

Introduction and purpose: Despite recent efforts to identify microplastics in the aquatic environment worldwide, identifying the various sources of its release remains a challenging task. Understanding and identifying the different sources of aquatic pollution and the processes affecting them is essential for a comprehensive description of the quality of water resources. The aim of this study is therefore to introduce statistical methods to determine the sources of microplastics in aquatic environments.

Methods: This review article first identifies the pathways of microplastic entry into the aquatic environment, followed by an examination of four commonly used multivariate statistical methods: Principal Component Analysis (PCA), Cluster Analysis (CA), Hierarchical Cluster Analysis (HCA) and Positive Matrix Factorization (PMF).

Results: Multivariate statistical analysis can be used to determine different variables such as size, shape, color, and density of microplastics. It can also determine the sources of microplastics (domestic wastewater, industrial effluents, agricultural activities, surface runoff, air currents, etc.). It also identifies which variables have the greatest impact on pollution and suggests the best solutions to reduce pollution.

Conclusion: the study of pollution based on multivariate statistical analysis can provide important information on the main sources of microplastic pollution and the relative contribution of different sources in the aquatic environment, which can help to improve environmental management and reduce pollution.

Keywords: Microplastics, Multivariate statistical analysis, Source, Water resources

► **Citation:** Hashempour Y, Jabari A, kouhi K, Fendereski A. Introducing Statistical Methods to Identify the Sources of Microplastics in the Aquatic Environment: An Overview. Journal of Health Research in Community. Winter 2023;9(4): 111-120.

مقاله مروری

معرفی روش‌های آماری جهت تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی؛ مطالعه‌ی مروری

چکیده

یلدا هاشم پور^۱
عاطفه جباری^{۲*}
کوثر کوهی^۳
افسانه فندرسکی^۳

مقدمه و هدف: با وجود تلاش‌های اخیر برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی سراسر جهان، شناسایی منابع مختلف انتشار آن‌ها موضوعی چالش‌برانگیز است. درک و شناخت منابع مختلف آلودگی محیط‌های آبی و فرایندهای مؤثر بر آن‌ها برای دستیابی به توصیفی جامع از کیفیت منابع آبی، اساسی است. از این‌رو، هدف از این مطالعه‌ی مروری معرفی روش‌های آماری برای تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی است.

روش کار: در این مطالعه‌ی مروری، مقالات چاپ‌شده تا آگوست ۲۰۲۳ در زمینه‌ی تعیین منابع ورود میکروپلاستیک‌ها به سیستم‌های آبی بررسی شد. این مقالات از طریق جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی 'Web of knowledge'، 'Scopus'، 'PubMed' و 'SID' با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر 'Microplastics, water resources, multivariate statistical analysis, source' جمع‌آوری شدند.

یافته‌ها: نتایج با چهار روش آماری چندمتغیره‌ی پرکاربرد شامل آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)، آنالیز خوشه‌ای (CA)، آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) و آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) بررسی شدند. بر اساس آنالیز آماری چندمتغیره، می‌توان اندازه، شکل، رنگ و تراکم میکروپلاستیک‌ها را شناسایی کرد. همچنین، منابع میکروپلاستیک‌ها (فاضلاب خانگی، فعالیت‌های کشاورزی، رواناب‌های سطحی، جریان هوا و...) مشخص می‌شوند. علاوه بر این، مشخص می‌کند که کدام متغیرها بیشترین اثر را بر آلودگی محیطی دارند.

نتیجه‌گیری: بررسی آلودگی بر اساس آنالیزهای آماری چندمتغیره، می‌تواند اطلاعات چشمگیری از منابع اصلی آلودگی میکروپلاستیک‌ها و سهم نسبی منابع مختلف در محیط‌های آبی را فراهم کند که به بهبود مدیریت و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند.

کلمات کلیدی: آنالیز آماری چندمتغیره، میکروپلاستیک، منابع آبی

۱. استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۲. کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران
۳. استادیار گروه آمار زیستی، دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

* نویسنده مسئول: عاطفه جباری، دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

Email: jabariatefeh66@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

◀ **استناد:** هاشم‌پور، یلدا؛ جباری، عاطفه؛ کوهی، کوثر؛ فندرسکی، افسانه. معرفی روش‌های آماری جهت تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی؛ مطالعه‌ی مروری. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، زمستان ۱۴۰۲؛ ۹(۴): ۱۲۰-۱۱۱.

مقدمه

پلاستیک‌ها شکل‌های متنوعی از پلیمرهای مصنوعی با طیف گسترده‌ای از اندازه، شکل، ترکیب، ویژگی و نوع

کاربرد هستند [۱]. از زمان تولید انبوه پلاستیک در سال ۱۹۵۰، آلودگی اکوسیستم های آبی و خاکی به انواع پلاستیک ها، به ویژه میکروپلاستیک ها (MPs)، به مشکلی روبه رشد تبدیل شده است [۲،۳]. در طول این دهه ها، تولید پلاستیک از ۲ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ میلادی به حدود ۳۶۷ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ رسیده است، درحالی که تنها ۲۰ درصد از آن ها بازیافت می شود [۲،۴،۵]. با توجه به رشد مداوم تولید جهانی پلاستیک و ماندگاری در محیط، پیش بینی می شود که غلظت میکروپلاستیک ها در اکوسیستم های طبیعی در طول زمان، همچنان افزایش یابد و پیامدهای زیست محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی بالقوه ای ایجاد کند [۶،۷]. میکروپلاستیک آلاینده ای نوپدید است. این آلاینده ها ذرات پلاستیکی مصنوعی با قطر کمتر از ۵ میلی متر و بزرگ تر از ۱ میکرومتر هستند [۸]. میکروپلاستیک ها با توجه به منبعشان، به دو دسته ی اولیه و ثانویه تقسیم می شوند. میکروپلاستیک های اولیه قطعات کوچکی از پلاستیک هستند که با اهداف مشخص تولید می شوند و معمولاً در محصولات آرایشی و بهداشتی مانند ژل، شامپو، کرم ضد آفتاب، لاک ناخن، رنگ مو و... کاربرد دارند. درحالی که میکروپلاستیک های ثانویه در اثر تخریب و تکه تکه شدن در حین استفاده از موادی مانند منسوجات پلاستیکی، رنگ و لاستیک یا بعد از رها شدن پلاستیک ها در طبیعت، عمدتاً از طریق هوازدگی، فتولیز، سایش مکانیکی، اشعه ی UV خورشید، تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تشکیل می شوند [۱،۸]. تولید میکروپلاستیک های اولیه مانند ریزدانه ها با توجه به جدیت تأثیر آن بر آلودگی های محیطی ممنوع شده است [۹]. میکروپلاستیک ها از انواع مختلف پلیمرهای پلاستیکی و مواد افزودنی تشکیل شده اند. میکروپلاستیک های شایع شامل پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلن (PP)، پلی وینیل کلراید (PVC)، پلی اتیلن ترفتالات (PET)، پلی فرمالدئید (POM)، پلی استایرن (PS) و پلی آمید (PA) هستند [۱۰].

میکروپلاستیک ها به دلیل داشتن مواد شیمیایی مضر و

قابلیت جذب و انتشار آلاینده های آلی پایدار، تهدیدی جدی برای کیفیت آب و اکوسیستم های آب شیرین شناخته می شوند. این تهدید به دلیل خصوصیات فیزیکوشیمیایی تجزیه پذیری میکروپلاستیک ها در سیستم آبی بسیار مهم است و می تواند باعث شکل گیری و تجمع آن ها در سیستم آبی شود [۱۱، ۲]. به تازگی، تهدیدات احتمالی میکروپلاستیک برای سلامتی انسان توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است و به دلیل حضور گسترده ی میکروپلاستیک در مواد غذایی مورد استفاده ی انسان از قبیل شیر، غذاهای دریایی، عسل، نمک خوراکی، آب لوله کشی و آب بطری شده، بسیاری از محققان به آن توجه می کنند. مصرف برخی از محصولات غذایی مانند غذاهای دریایی، عسل و موارد دیگر می تواند به حداقل یا صفر برسد؛ اما قرار گرفتن آب آشامیدنی در معرض میکروپلاستیک اجتناب ناپذیر است [۱۲، ۱۳].

طبق مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته، مشاهده شده است که ذرات میکروپلاستیک ممکن است باعث فشار اکسیداتیو، سمیت سلولی، تغییر متابولیسم، اختلال در سیستم ایمنی، سمیت عصبی، جهش سلولی و سرطان شوند [۱۴]. حضور میکروپلاستیک ها در اکوسیستم های آبی و برخی از محیط های خشک در چند دهه ی گذشته، به خوبی مستند شده است [۱۵]. این ذرات در آب های اقیانوسی، رسوبات اعماق دریا، یخ دریا و موجودات زنده ی دریایی مشاهده شده اند. نحوه ی ورود آن ها به محیط های آبی شامل رسوب اتمسفر، تخلیه ی فاضلاب و رواناب بارندگی است [۱۶]. نشت ناشی از فعالیت های صنعتی، تخریب محیطی اقلام پلاستیکی دور ریخته شده، پساب های ماشین لباسشویی حامل الیاف مصنوعی و رواناب جاده ها، فعالیت های ماهیگیری، صنایع دریایی، فعالیت های گردشگری، پساب های حامل میکروپلاستیک موجود در لوازم آرایشی، سایش فیزیکی اقلام پلاستیکی در حال استفاده و رواناب های حاصل از فعالیت های انسانی و کشاورزی از دیگر منابع ورود میکروپلاستیک ها به محیط های آبی هستند [۱۶-۲۱]. میکروپلاستیک های موجود در

هوانیز نقش مهمی در ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌های آبی از طریق رسوب انبوه اتمسفر توسط باد یا بارش دارند. از جمله منابع ورود آن‌ها استخراج آب آشامیدنی از آب‌های سطحی و برداشت آب باران است [۲۲، ۱۶].

با وجود تلاش‌های اخیر برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی سراسر جهان، شناسایی منابع مختلف انتشار آن‌ها موضوعی چالش‌برانگیز است [۲۳]. درک و شناخت منابع مختلف آلودگی محیط‌های آبی و فرایندهای مؤثر بر آن‌ها برای دستیابی به توصیفی جامع از کیفیت منابع آبی، اساسی است. برای این منظور، بهره‌گیری از آنالیزهای آماری نقش مؤثری را برای شناخت دقیق منابع آلودگی ایجاد می‌کند. در بسیاری از موارد، برای داده‌های محیطی، از تکنیک‌های چندمتغیره استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها می‌توانند با در نظر گرفتن تعدادی از متغیرها به‌طور هم‌زمان، تنوع داده‌ها را کنترل کنند. همچنین، هنگامی که مجموعه داده‌ها بسیار بزرگ و تفسیر، شناسایی و تجسم روابط پیچیده‌ی بین متغیرها دشوار است، مدل‌های آماری چندمتغیره ابزارهای بسیار مفیدی هستند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که روش‌های تجزیه و تحلیل آماری چندمتغیره در تهیه و تفسیر داده‌های کیفیت محیط‌های آبی و تعیین اطلاعات موجود در آن‌ها مؤثر هستند [۲۴].

میکروپلاستیک‌ها طیف گسترده و ناهمگنی از مواد با ترکیب شیمیایی، شکل‌ها، رنگ‌ها، اندازه و تراکم‌های متفاوت را در بر می‌گیرند. این ویژگی‌ها از عوامل مهم جابه‌جایی و توزیع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی است و ممکن است سمیت، ردیابی و شناسایی این آلاینده‌ها را پیچیده‌تر کند [۲۵]. شایان ذکر است که منابع خاص و سهم نسبی آن‌ها در آلودگی میکروپلاستیک می‌تواند بسته به مکان و زمینه‌ی محیطی، متفاوت باشد؛ بنابراین، انجام مطالعات و تجزیه و تحلیل‌های محلی برای شناسایی دقیق و مدیریت منابع میکروپلاستیک در بدنه‌ی آبی خاص بسیار مهم است.

معمولاً شناسایی منابع اصلی آلاینده‌های محیطی مانند

میکروپلاستیک‌ها، به وسیله‌ی آنالیزهای آماری چندمتغیره انجام می‌شود. بررسی آلودگی بر اساس آنالیزهای آماری چندمتغیره، می‌تواند اطلاعات چشمگیری از منابع اصلی آلودگی میکروپلاستیک‌ها و سهم نسبی منابع مختلف در محیط‌های آبی فراهم کند و این امر به بهبود مدیریت و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند. مجموعه داده‌های چندمتغیره حالت‌ها یا متغیرهای زیادی را برای هر مشاهده در بر دارند. به‌طور کلی، اگر در هر مجموعه داده n متغیر وجود داشته باشد، هر متغیر می‌تواند دارای چند بعد باشد. با توجه به اینکه اغلب، درک و تجسم فضای چندبعدی دشوار است، روش‌های آنالیز آماری چندمتغیره مانند آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)، آنالیز خوشه‌ای (CA)، آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) و آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) ابزارهای قدرتمندی برای جداسازی منابع مؤثر در آلودگی میکروپلاستیک‌های شناسایی‌شده در محیط‌های آبی هستند [۲۶، ۲۷]. از این‌رو، این مطالعه‌ی مروری با هدف ارائه‌ی مبنایی علمی برای معرفی این روش‌های آماری به‌منظور شناسایی منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی موجود در جهان طراحی شده است.

روش کار

پژوهش حاضر مطالعه‌ای مروری و غیرنظام‌مند است که تمام مقالات چاپ‌شده از سال ۲۰۰۹ تا آگوست سال ۲۰۲۳ به زبان فارسی و انگلیسی در زمینه‌ی روش‌های آماری برای تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی را بررسی کرده است. این مقالات از طریق جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی PubMed، Scopus، Web of knowledge، Sciencedirect، Google scholar و SID با استفاده از کلیدواژه‌های انگلیسی نظیر Microplastics، water resources، multivariate statistical analysis، source و کلیدواژه‌های فارسی نظیر میکروپلاستیک،

منابع آبی، آنالیز آماری چندمتغیره و منبع، جمع آوری شدند.

بودند. خلاصه ای این مقالات در جدول ۱ آورده شده است.

یافته ها

بحث و نتیجه گیری

آنالیز مؤلفه ای اصلی (PCA)

در مورد میکروپلاستیک ها، با استفاده از آنالیز PCA، متغیرهای مختلفی مانند اندازه، شکل، رنگ و تراکم شناسایی می شوند. Ya-song Liu و همکاران در سال ۲۰۲۲، از این آنالیز برای بررسی منابع آلودگی میکروپلاستیک موجود در آب و رسوبات حوضه رودخانه جین جیانگ چین استفاده کردند. نمونه برداری از آب رودخانه و رسوبات در پایین دست تخلیه

پس از جست و جو با کلیدواژه های ذکر شده، تعداد ۱۲ مقاله یافت شد که در زمینه معرفت روش های آماری برای تعیین منابع میکروپلاستیک ها در محیط های آبی بودند. پس از حذف مقالات تکراری، تعداد ۶ مقاله با متن کامل در دسترس قرار گرفت که به بررسی آنالیز مؤلفه ای اصلی (PCA) (۱ مقاله)، آنالیز خوشه ای (CA) (۱ مقاله)، آنالیز خوشه بندی سلسله مراتبی (HCA) (۱ مقاله) و آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) (۳ مقاله) پرداخته

جدول ۱: مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از روش های آماری مختلف برای تعیین منابع میکروپلاستیک ها در محیط های آبی

ردیف	محل انجام مطالعه	سال انجام مطالعه	محل برداشت نمونه	نوع روش آماری استفاده شده	نتایج مهم مطالعه	رفرنس
۱	چین، رودخانه جین جیانگ	۲۰۲۲	آب سطحی، آب زیرزمینی و رسوبات	PCA	میکروپلاستیک ها با بار زیاد روی جزء اصلی ۱ (منبع غالب کشاورزی) از PE و PP تشکیل شده اند، آن هایی که بار زیادی روی جزء اصلی ۲ (منابع جنگل داری، ماهیگیری، فاضلاب خانگی) دارند. شامل PET، PVC، PA6 و PS هستند و آن هایی که بار زیادی روی جزء اصلی ۳ (تولیدات صنعتی) دارند، از POM تشکیل شده اند.	[۱۰]
۲	چین، خلیج لایزو	۲۰۲۰	۵۸ نقطه در خلیج لایزو و در بدن ماهی ها	CA	مناطق گودونگ، خور رودخانه ی زرد و لایزو-ویفانگ سه منبع میکروپلاستیک هستند که ممکن است از ورودی رودخانه، بازیافت پلاستیک و آبی پروری قایق های دریایی منشأ بگیرند.	[۲۸]
۳	ژاپن، رودخانه Tsurumi	۲۰۲۱	۵ نقطه از سرچشمه تا دهانه رودخانه و ورودی و خروجی تصفیه خانه ی فاضلاب	HCA	منابع MP در سایت اصلی، فاضلاب مسکونی و در سایت های پایین دست، منابع غیرنقطه ای شهری بودند. غلظت مواد شیمیایی و اندازه ذرات در پایین دست رودخانه بیشتر بود که نشان دهنده منابع غیرنقطه ای شهری است.	[۲۹]
۴	چین، رودخانه Yangtze	۲۰۲۳	۴ نقطه در طول رودخانه	PMF	منبع طبیعی ۱۸/۳۳ درصد، منابع آلاینده ی مخلوط ناشی از حمل و نقل و تولید آلیاژهای صنعتی ۲۶/۹۹ درصد، منابع آلودگی زباله های ساختمانی ۱۷/۱۷ درصد و منابع آلودگی ترکیبی از زغال سنگ و ترافیک ۳۲/۵۷ درصد در آلودگی نقش داشتند.	[۳۰]
۵	چین، دریاچه Baiyangdian Lake	۲۰۲۳	آب های سطحی، آب پوشانده ی سطح رسوبات، آب منفذی داخل رسوبات	PMF	دامداری (۲۶/۷۴ تا ۳۵/۵۷ درصد) و آبی پروری (۲۱/۶۲ تا ۳۷/۷۰ درصد) منابع اصلی آنتی بیوتیک در آب و رسوبات شناسایی شدند.	[۳۱]
۶	جنوب مرکزی چین، نمونه خاک	۲۰۲۲	زمین کشاورزی، جنگل و مرتع	PMF	ترکیب مدل PCA و PMF باعث افزایش دقت اطلاعات تحلیلی درباره ی منابع آلودگی می شود. نتایج این دو آنالیز نشان داد که انتشارات کارخانه ی ذوب فلزات و ماده ی اولیه ی خاک منابع اصلی فلزات سنگین بودند.	[۳۲]

پساب‌های خانگی و صنعتی انجام شد و نمونه‌های آب زیرزمینی از چاه‌های خانگی برداشت شدند. پس از انجام مراحل آزمایشگاهی، هفت جزء اصلی میکروپلاستیک‌ها، شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌فرمالدئید (POM)، نایلون ۶ (PA6) و پلی‌استایرن (PS)، شناسایی شدند. با تجزیه و تحلیل PCA، منابع آلودگی با توجه به داده‌های میکروپلاستیک در حوضه‌ی رودخانه تعیین شدند که عمدتاً شامل فعالیت‌های کشاورزی، جنگل‌داری، شیلات و ماهیگیری، فاضلاب خانگی و تولیدات صنعتی بودند. با توجه به اینکه مالچ‌پاشی پلاستیک، آبیاری فاضلاب و کوددهی لجن در زمین‌های کشاورزی، منبع اصلی میکروپلاستیک‌ها در خاک هستند، فعالیت‌های کشاورزی منبع اصلی میکروپلاستیک‌ها در حوضه‌ی رودخانه‌ی جین‌جیانگ معرفی شدند. با توجه به نتایج تحلیل PCA، در زمین‌های کشاورزی، اجزای آلودگی میکروپلاستیک شامل PP و PE هستند. همچنین، فعالیت‌های جنگل‌داری و شیلات و ماهیگیری نیز ممکن است منبع آلودگی میکروپلاستیک باشند. در این فعالیت‌ها، از پلاستیک‌هایی مانند PE و PP برای تولید تور ماهیگیری و قفس ماهی استفاده می‌شود که همگی می‌توانند باعث آلودگی میکروپلاستیک شوند؛ بنابراین، مؤلفه‌ی اصلی مرتبط با منبع جنگل‌داری و شیلات نیز PP و PE شناسایی شدند. فاضلاب خانگی نیز شامل PVC (اقلامی مانند کفش، چرم مصنوعی، اسباب‌بازی، بطری آب معدنی و کت بارانی)، PET (برای ساخت پلی‌استر، بطری و لوازم الکترونیکی)، PA6 (الیاف مصنوعی و لباس‌های نساجی)، PS (ساخت فوم) بود. نتایج آنالیز مؤلفه‌ی اصلی نشان داد که PET، PVC، PA6 و PS شناسایی شده در رودخانه‌ی جین‌جیانگ عمدتاً از فاضلاب خانگی نشئت می‌گیرند. منبع اصلی تولیدات صنعتی طبق آنالیز مؤلفه‌ی اصلی، POM است که توسط کارخانه‌ها به محیط‌های آبی تخلیه می‌شوند. در نتیجه، در تجزیه و تحلیل کلی آنالیز مؤلفه‌ی اصلی، نرخ مشارکت تجمعی میکروپلاستیک‌ها ۶۶/۵ درصد بود. PE

و PP به‌ترتیب، در آب‌های سطحی و رسوبات و در آب‌های زیرزمینی بیشترین فراوانی را دارند. میکروپلاستیک‌ها با بار زیاد بر جزء اصلی ۱ (منبع غالب کشاورزی) از PE و PP تشکیل شده‌اند، آن‌هایی که بار زیادی روی جزء اصلی ۲ (منابع جنگل‌داری، ماهیگیری، فاضلاب خانگی) دارند، شامل PET، PVC، PA6 و PS هستند و آن‌هایی که بار زیادی روی جزء اصلی ۳ (تولیدات صنعتی) دارند، از POM تشکیل شده‌اند [۱۰].

آنالیز خوشه‌ای (CA)

آنالیز خوشه‌ای نیز می‌تواند در شناسایی و دسته‌بندی منابع مختلف آلودگی میکروپلاستیک (فاضلاب خانگی، پساب‌های صنعتی، رواناب‌ها، شیوه‌های کشاورزی و رودخانه‌ها) مفید باشد [۳۳، ۳۴]. Teng و همکاران در سال ۲۰۲۰، آنالیز خوشه‌ای را برای تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در ۵۸ نقطه و همچنین، در بدن ماهی‌های زنده از ۳۱ سایت در خلیج لایژو واقع در چین به کار گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که میکروپلاستیک‌ها در خلیج لایژو به‌طور فراگیر، به‌شکل الیاف توزیع شده‌اند. فراوانی میکروپلاستیک تفاوت معنی‌داری بین مناطق در آب‌های سطحی و رسوبات نشان نداد که مشخص‌کننده‌ی منابع متعدد آلودگی میکروپلاستیک‌ها در خلیج است. آنالیز فضایی نشان داد که آلودگی میکروپلاستیک عمدتاً در ناحیه‌ی Laizhou Weifang متمرکز شده است که به‌نوبه‌ی خود، عمدتاً تحت تأثیر دینامیک جریان اقیانوسی قرار دارد. توزیع فضایی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات با آب‌های سطحی متفاوت بود؛ اما تحت تأثیر زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و فعالیت‌های انسانی نیز قرار گرفت. رایج‌ترین پلیمر در آب‌های سطحی، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بود، درحالی‌که سلفون (CP) بیشترین پلیمر مشاهده‌شده در رسوبات بود که نشان‌دهنده‌ی رفتارهای متفاوت این میکروپلاستیک‌ها است. فراوانی میکروپلاستیک‌ها با چگالی کم (PE و PP) در آب‌های سطحی تقریباً ۱۹/۹ درصد بود؛ اما این ریزپلاستیک‌ها تنها تقریباً ۱/۷ درصد در رسوب وجود

داشتند که نشان می دهد ذرات میکروپلاستیک با چگالی پایین ترجیحاً به دریای آزاد مهاجرت می کنند. در شکل، اندازه و نوع پلیمر میکروپلاستیک ها بین آب های سطحی، رسوبات و موجودات زنده تفاوت معنی داری وجود داشت ($P < 0.05$). تجزیه و تحلیل خوشه ای نشان داد که مناطق گودونگ، خور رودخانه ی زرد و لایژو-ویفانگ سه منبع میکروپلاستیک هستند که ممکن است از ورودی رودخانه، بازیافت پلاستیک و آبی پروری قایق های دریایی منشأ بگیرند. علاوه بر این، تنوع ذرات میکروپلاستیک در رسوبات در سایت های فراساحلی بیشتر بود که نشان می دهد این سایت ها میکروپلاستیک ها را از منابع متعدد دریافت می کنند [۲۸].

آنالیز خوشه بندی سلسله مراتبی (HCA)

از آنالیز خوشه بندی سلسله مراتبی (HCA) برای دسته بندی و گروه بندی منابع میکروپلاستیک ها استفاده می شود. یکی از روش های مورد استفاده در آنالیز خوشه بندی سلسله مراتبی روش Ward است که خوشه هایی با ویژگی های مشابه را شناسایی می کند [۲۸]. در مطالعه ی Yutaka Kameda و همکاران در سال ۲۰۲۱، از روش بیز سلسله مراتبی برای دسته بندی ترکیبات پلیمری بر اساس غلظت میکروپلاستیک ها استفاده شد. تجزیه و تحلیل خوشه ای دو گروه عمده را نشان داد: یکی مربوط به فاضلاب مسکونی و روستایی و دیگری سایت های پایین دست که تحت تأثیر منابع ناشناخته ی متفاوت با فاضلاب بودند. همچنین، در این مطالعه، میکروپلاستیک های اصلی و نحوه ی توزیع آن ها در سایت های بررسی شده، با استفاده از مدل دو پارامتری وایبل (Weibull) شناسایی شدند. مدل وایبل مدلی پارامتری است که بر اساس دو پارامتر شکل و مقیاس تعریف می شود. منابع MP در سایت اصلی، فاضلاب مسکونی و در سایت های پایین دست، منابع غیرنقطه ای شهری بودند. غلظت مواد شیمیایی و اندازه ی ذرات در پایین دست رودخانه بیشتر بود که نشان دهنده ی منابع غیرنقطه ای شهری بود. همچنین، نتایج نشان داد که توزیع نمونه های آب سطحی

دارای واریانس بیشتری نسبت به آب های درون ریز و پساب است. همچنین، بر اساس این نتایج، اندازه های بزرگ و ناهمگن میکروپلاستیک ها از منابع دیگری غیر از فاضلاب مسکونی و پساب تصفیه خانه ی فاضلاب شهری مشتق شده بود. بررسی ها بر اساس پارامتر شکل توزیع وایبل، نشان می دهد که توابع توزیع پلیمرها از توزیع نرمال برای ذرات کوچک در نمونه های پساب تصفیه خانه ی فاضلاب شهری و توزیع نمایی برای ذرات درشت تر در سایت های پایین دست پیروی می کنند؛ بنابراین، بر اساس این مطالعه، پارامترهای شکل و مقیاس از تابع توزیع وایبل شاخص های مفیدی برای ارزیابی چگونگی توزیع میکروپلاستیک ها در محیط های آبی هستند [۲۹].

آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF)

مدل تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) به عنوان یکی از روش های تحلیل چندمتغیره، برای تعیین سهم منابع مختلف در تولید میکروپلاستیک ها در منطقه ای معین به کار می رود. استفاده از این مدل در تعیین سهم منابع آلاینده ها در بخش های مختلف محیط زیست، از جمله فلزات سنگین و میکروپلاستیک ها، در طی دو دهه ی اخیر، بسیار افزایش یافته است. همچنین، نتایج مطالعات اخیر حاکی از این است که ترکیب مدل PMF با سایر روش های آماری چندمتغیره بهترین نتیجه را ارائه می دهد و در تجزیه و تحلیل جامع و سیستماتیک منابع آلاینده ها، از جمله میکروپلاستیک ها و فلزات سنگین، دقت بیشتری ارائه می کند [۲۴، ۳۵]. در مطالعه ای در سال ۲۰۲۳، Chunyan Li و همکاران به بررسی تقسیم بندی منبع فلزات سنگین و میکروپلاستیک ها پرداختند. در این مطالعه، برای بررسی سهم منابع مختلف، از آنالیز PMF استفاده شد. بر اساس PMF، چهار منبع اصلی برای این آلاینده ها تعیین شد؛ به طوری که منبع طبیعی ۱۸/۳۳ درصد، منابع آلاینده ی مخلوط ناشی از حمل و نقل و تولید آلیاژهای صنعتی ۲۶/۹۹ درصد، منابع آلودگی زباله های ساختمانی ۱۷/۱۷ درصد و منابع آلودگی ترکیبی از

میکروپلاستیک‌ها و سهم نسبی منابع مختلف در محیط‌های آبی فراهم کنند که به بهبود مدیریت و برنامه‌های کنترلی و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند.

قدردانی

مطالعه‌ی حاضر با کد مصوب دانشجویی ۱۷۹۶۳ و کد ملی اخلاق IR.MAZUMS.REC.1402.224 در کمیته‌ی اخلاق معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران تصویب شده است. بدین‌وسیله، نویسندگان مقاله از کمیته‌ی تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی مازندران به‌خاطر حمایت از این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌کنند.

تضاد در منافع

نویسندگان مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی را گزارش نکرده‌اند

References

1. Avazpour S, Noshadi M. Review of Advanced Techniques for Removal of Microplastics in Water and Wastewater. New Researches in Sustainable Water Engineering 2023; 1(2): 129-43 (Persian).
2. Ghorbaninejad Fard Shirazi MM, Shekoohiyan S, Moussavi G, Heidari M. Frequency and ecological risk of microplastics and mesoplastics in the soil of residential areas near Tehran landfill in 2021. Iranian Journal of Health and Environment 2022; 15(1): 49-72 (Persian).
3. Brittain H. Optimisation of a Method to Quantify Microplastics in Inter-tidal Sediments Around Jersey, Channel Islands: UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON 2018.
4. Andrade H, Glüge J, Herzke D, Ashta NM, Nayagar SM, Scheringer M. Oceanic long-range transport

زغال‌سنگ و ترافیک ۳۲/۵۷ درصد در آلودگی نقش داشتند [۹]. در مطالعه‌ی دیگر، Ling Zhang و همکاران (۲۰۲۳) از PMF برای شناسایی منبع و ارزیابی خطرهای ناشی از آلاینده‌ها در بزرگ‌ترین دریاچه‌ی آب شیرین شمال چین استفاده کردند [۳۱]. Chi Peng و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعات خود، برای شناسایی منابع بالقوه‌ی آلاینده‌ها به این نتیجه دست یافتند که ترکیب مدل PCA و PMF باعث افزایش دقت اطلاعات تحلیلی درباره‌ی منابع آلودگی می‌شود و می‌توان تخمین‌های دقیقی از درصد آلاینده‌هایی که از هر منبع آلودگی ایجاد می‌شود، ارائه داد و این روش خطاهای حاصل از آنالیز برای شناسایی منبع را به حداقل می‌رساند [۳۲]. به‌طور کلی، با استفاده از آنالیزهای آماری چندمتغیره می‌توان آلودگی محیط‌های آبی را بر اساس شناسایی منابع میکروپلاستیک‌ها بررسی کرد. این آنالیزها به واکنش‌های متغیرهای مختلف میکروپلاستیک‌ها (مانند اندازه، شکل، رنگ و تراکم) و منابع آلودگی (مانند فاضلاب خانگی، فعالیت‌های کشاورزی، رواناب‌های سطحی، جریان هوا و...) توجه می‌کنند و می‌توانند اطلاعات چشمگیری از منابع اصلی آلودگی

- of organic additives present in plastic products: an overview. Environmental Sciences Europe 2021; 33: 1-14.
5. Egea-Corbacho A, Martín-García AP, Franco AA, Quiroga JM, Andreasen RR, Jørgensen MK, Christensen ML. Occurrence, identification and removal of microplastics in a Wastewater Treatment Plant compared to an advanced MBR technology: Full-scale pilot plant. Journal of Environmental Chemical Engineering 2023; 11(3): 109644.
6. Hamidian AH, Ozumchelouei EJ, Feizi F, Wu C, Zhang Y, Yang M. A review on the characteristics of microplastics in wastewater treatment plants: A source for toxic chemicals. Journal of Cleaner Production 2021; 295: 126480.
7. Cole M, Artioli Y, Coppock R, Galli G, Saad R,

- Torres R, et al. Mussel power: Scoping a nature-based solution to microplastic debris. *Journal of Hazardous Materials* 2023; 453: 131392.
8. Sharifi H, Movahedian Attar H. A review of microplastics measuring methods in water and wastewater bodies. *Iranian Journal of Health and Environment* 2021; 14(1):173-90 (Persian).
 9. Kye H, Kim J, Ju S, Lee J, Lim C, Yoon Y. Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards. *Heliyon* 2023; 9(3): e14359.
 10. Liu YC, Wu L, Shi GW, Cao SW, Li YS. Characteristics and sources of microplastic pollution in the water and sediments of the Jinjiang River Basin, Fujian Province, China. *China Geology* 2022; 5(3): 429-38.
 11. Kunz A, Schneider F, Anthony N, Lin HT. Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways. *Environmental Pollution* 2023; 321: 121096.
 12. Zhang N, Li YB, He HR, Zhang JF, Ma GS. You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing. *Science of the total environment* 2021; 767: 144345.
 13. Salari M, Khorasani M. Investigation of microplastics as emerging contaminants in sources and health effects on humans, review study. *Journal of Environmental Research and Technology* 2022; 11(11): 13 (Persian).
 14. Tabatabaei F, Mafigholami R, Moghimi H, Khoramipour S. Evaluation of the performance of Tehran drinking water treatment plants in removing nanoplastics and microplastics. *Iranian Journal of Health and Environment* 2022; 15(1): 169-80 (Persian).
 15. Zazouli M, Nejati H, Hashempour Y, Dehbandi R, Fakhri Y. Occurrence of microplastics (MPs) in the gastrointestinal tract of fishes: A global systematic review and meta-analysis and meta-regression. *Sci Total Environ* 2022; 815: 152743.
 16. Lin L, Pan X, Zhang S, Li D, Zhai W, Wang Z, et al. Distribution and source of microplastics in China's second largest reservoir-Danjiangkou Reservoir. *J Environ Sci (China)* 2021; 102: 74-84.
 17. Lechner A, Ramler D. The discharge of certain amounts of industrial microplastic from a production plant into the River Danube is permitted by the Austrian legislation. *Environ Pollut* 2015; 200: 159-60.
 18. Lambert S, Sinclair C, Boxall A. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol* 2014; 227: 1-53.
 19. Yeganeh Far M, Shakeri A, Rastegari Mehr M, Lahijani O. 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* 2020; 13(1): 65-76 (Persian).
 20. Hartline NL, Bruce NJ, Karba SN, Ruff EO, Sonar SU, Holden PA. Microfiber masses recovered from conventional machine washing of new or aged garments. *Environ Sci Technol* 2016; 50(21): 11532-538.
 21. Chang M. Reducing microplastics from facial exfoliating cleansers in wastewater through treatment versus consumer product decisions. *Mar Pollut Bull* 2015; 101(1): 330-333.
 22. Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande C, Tassin B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine pollution bulletin* 2016; 104(1-2): 290-93.
 23. Alavian Petroody SS, Hashemi SH. Wastewater treatment plants as a pathway for the release of microplastics into the environment: investigation of sludge and treated effluent of Sari wastewater treatment plant. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 2021; 53(9): 3751-62 (Persian).
 24. Hedayatzadeh F, Eldermiry A, Hassanzadeh N, Bahramifar N. Application of positive matrix factorization (PMF) and multivariate statistical techniques in identifying and managing sources of heavy metal pollutants in sediments. In: *International Conference on Quantitative Models and Techniques in Management*. Qazvin: Imam Khomeini International University 2020 (Persian).
 25. Kishipour A, Mostafaloo R, Arast Y, Asadi Ghalhari M. Micro-plastics as a new Challenge in Water Resource Management; Various forms and Removal Methods,(A review study). *Environmental Health* 2020; 6(1): 34-44 (Persian).
 26. Shaviklo A. Analyses of sensory evaluation data using Principal Component Analysis (PCA). *Food Science and Technology* 2018; 15(80): 361-77 (Persian).
 27. Shamsadin H, Jalali V, Jafari A. Application of multivariate statistical methods and environmental pollution indices in evaluation of distribution of heavy metals. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 2015; 4(3): 65-76 (Persian).
 28. Teng J, Zhao J, Zhang C, Cheng B, Koelmans AA, Wu D, et al. A systems analysis of microplastic

- pollution in Laizhou Bay, China. *Sci Total Environ* 2020; 745: 140815.
29. Kameda Y, Yamada N, Fujita E. Source-and polymer-specific size distributions of fine microplastics in surface water in an urban river. *Environ Pollut* 2021; 284: 117516.
 30. Li C, Wang X, Xiao S, Wang H. The Source Apportionment of Heavy Metals in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City Based on the Positive Matrix Factorization Model and Geo-Statistics. *Atmosphere*. 2023;14(3):591.
 31. Zhang L, Bai J, Zhang K, Zhai Y, Wang Y, Liu H, et al. Spatial variability, source identification and risks assessment of antibiotics in multimedia of North China's largest freshwater lake using Positive matrix factorization and Monte Carlo simulation. *J Hazard Mater* 2023: 131751.
 32. Anaman R, Peng C, Jiang Z, Liu X, Zhou Z, Guo Z, Xiao X. Identifying sources and transport routes of heavy metals in soil with different land uses around a smelting site by GIS based PCA and PMF. *Sci Total Environ* 2022; 823: 153759.
 33. McCormick A, Hoellein TJ, Mason SA, Schluep J, Kelly JJ. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environ Sci Technol* 2014; 48(20): 11863-71.
 34. Ogata Y, Takada H, Mizukawa K, Hirai H, Iwasa S, Endo S, et al. International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Mar Pollut Bull* 2009; 58(10): 1437-46.
 35. Sun X, Wang H, Guo Z, Lu P, Song F, Liu L, et al. Positive matrix factorization on source apportionment for typical pollutants in different environmental media: a review. *Environmental Science: Processes & Impacts* 2020; 22(2): 239-55.