Review article

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

Yalda Hashempour[1]
Atefeh Jabari[2*]
Kosar Kouhi[2]
Afsaneh Fendereski[3]

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.

Copyright© 2023, Published by Mazandaran University of Medical Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY) License (http://creativecommons.org/) which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

مقاله مروری

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

یلدا هاشم پور[1]
عاطفه جباری[2*]
کوثر کوهی[2]
افسانه فندرسکی[3]

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

چکیده

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. ازاین‌رو، 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 PubMed، Scopus، Web of knowledge، Sciencedirect، Google scholar 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

◄ **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

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]
[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

کاربرد هستند [۱]. از زمان تولید انبوه پلاستیک در سال ۱۹۵۰، آلودگی اکوسیستم‌های آبی و خاکی به انواع پلاستیک‌ها، به‌ویژه میکروپلاستیک‌ها (MPs)، به مشکلی روبه‌رشد تبدیل شده است [۲,۳]. در طول این دهه‌ها، تولید پلاستیک از ۲ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ میلادی به حدود ۳۶۷میلیون تن در سال۲۰۲۰ رسیده است، درحالیکه تنها ۲۰ درصد از آن‌ها بازیافت می‌شود [۲،۴،۵]. با توجه به رشد مداوم تولید جهانی پلاستیک و ماندگاری در محیط، پیش‌بینی می‌شود که غلظت میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های طبیعی در طول زمان، همچنان افزایش یابد و پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی بالقوه‌ای ایجاد کند [۶,۷]. میکروپلاستیک آلاینده‌ای نوپدید است. این آلاینده‌ها ذرات پلاستیکی مصنوعی با قطر کمتر از ۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر هستند [۸]. میکروپلاستیک‌ها با توجه به منبعشان، به دو دسته‌ی اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. میکروپلاستیک‌های اولیه قطعات کوچکی از پلاستیک هستند که با اهداف مشخص تولید می‌شوند و معمولاً در محصولات آرایشی و بهداشتی مانند ژل، شامپو، کرم ضدآفتاب، لاک ناخن، رنگ مو و... کاربرد دارند. درحالی‌که میکروپلاستیک‌های ثانویه در اثر تخریب و تکه‌تکه شدن در حین استفاده از موادی مانند منسوجات پلاستیکی، رنگ و لاستیک یا بعد از رها شدن پلاستیک‌ها در طبیعت، عمدتاً از طریق هوازدگی، فتولیز، سایش مکانیکی، اشعه‌ی UV خورشید، تحت‌تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تشکیل می‌شوند [۱,۸]. تولید میکروپلاستیک‌های اولیه مانند ریزدانه‌ها با توجه به جدیت تأثیر آن بر آلودگی‌های محیطی ممنوع شده است [۹]. میکروپلاستیک‌ها از انواع مختلف پلیمرهای پلاستیکی و مواد افزودنی تشکیل شده‌اند. میکروپلاستیک‌های شایع شامل پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌وینیل‌کلراید (PVC)، پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET)، پلی‌فرمالدئید (POM)، پلی‌استایرن (PS) و پلی‌آمید (PA) هستند [۱۰].

میکروپلاستیک‌ها به‌دلیل داشتن مواد شیمیایی مضر و قابلیت جذب و انتشار آلاینده‌های آلی پایدار، تهدیدی جدی برای کیفیت آب و اکوسیستم‌های آب شیرین شناخته می‌شوند. این تهدید به‌دلیل خصوصیات فیزیکوشیمیایی تجزیه‌پذیری میکروپلاستیک‌ها در سیستم آبی بسیار مهم است و می‌تواند باعث شکل‌گیری و تجمع آن‌ها در سیستم آبی شود [۱۱, ۲]. به‌تازگی، تهدیدات احتمالی میکروپلاستیک برای سلامتی انسان توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است و به‌دلیل حضور گسترده‌ی میکروپلاستیک در مواد غذایی مورد استفاده‌ی انسان از قبیل شیر، غذاهای دریایی، عسل، نمک خوراکی، آب لوله‌کشی و آب بطری‌شده، بسیاری از محققان به آن توجه می‌کنند. مصرف برخی از محصولات غذایی مانند غذاهای دریایی، عسل و موارد دیگر می‌تواند به حداقل یا صفر برسد؛ اما قرار گرفتن آب آشامیدنی در معرض میکروپلاستیک اجتناب‌ناپذیر 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 میکروپلاستیک‌ها در اکوسیستم‌های آبی و برخی از محیط‌های خشک در چند دهه‌ی گذشته، به‌خوبی مستند شده است [۱۵]. این ذرات در آب‌های اقیانوسی، رسوبات اعماق دریا، یخ دریا و موجودات زنده‌ی دریایی مشاهده شده‌اند. نحوه‌ی ورود آن‌ها به محیط‌های آبی شامل رسوب اتمسفر، تخلیه‌ی فاضلاب و رواناب بارندگی است [۱۶]. نشت ناشی از فعالیت‌های صنعتی، تخریب محیطی اقلام پلاستیکی دور ریخته شده، پساب‌های ماشین لباس‌شویی حامل الیاف مصنوعی و رواناب جاده‌ها، فعالیت‌های ماهیگیری، صنایع دریایی، فعالیت‌های گردشگری، پساب‌های حامل میکروپلاستیک موجود در لوازم آرایشی، سایش فیزیکی اقلام پلاستیکی در حال استفاده و رواناب‌های حاصل از فعالیت‌های انسانی و کشاورزی از دیگر منابع ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط‌های آبی هستند [۲۱-۱۶]. میکروپلاستیک‌های موجود در

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

هوا نیز 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 مجموعه‌داده‌ها 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 تجزیه‌وتحلیل 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 تجزیه‌وتحلیل‌های محلی برای شناسایی دقیق و مدیریت منابع میکروپلاستیک در بدنه‌ی آبی خاص بسیار مهم است.

معمولاً شناسایی منابع اصلی آلاینده‌های محیطی مانند میکروپلاستیک‌ها، به‌وسیله‌ی 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. مجموعه‌داده‌های چندمتغیره حالت‌ها یا متغیرهای زیادی را برای هر مشاهده در بر دارند. به‌طورکلی، اگر در هر مجموعه‌داده 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 [۲۷, ۲۶]. ازاین‌رو، 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،

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

منابع آبی، آنالیز آماری چندمتغیره و منبع، جمع‌آوری شدند.

یافته‌ها

پس از جست‌وجو با کلیدواژه‌های ذکرشده، تعداد ۱۲ مقاله یافت شد که در زمینه‌ی معرفی روش‌های آماری برای تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی بودند. پس از حذف مقالات تکراری، تعداد ۶ مقاله با متن کامل در دسترس قرار گرفت که به بررسی آنالیز مؤلفه‌ی اصلی (PCA) (۱ مقاله)، آنالیز خوشه‌ای (CA) (۱ مقاله)، آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) (۱ مقاله) و آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) (۳ مقاله) پرداخته بودند. خلاصه‌ی این مقالات در جدول ۱ آورده شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

آنالیز مؤلفه‌ی اصلی (PCA)

در مورد میکروپلاستیک‌ها، با استفاده از آنالیز PCA، متغیرهای مختلفی مانند اندازه، شکل، رنگ و تراکم شناسایی می‌شوند. Ya-song Liu و همکاران در سال ۲۰۲۲، از این آنالیز برای بررسی منابع آلودگی میکروپلاستیک موجود در آب و رسوبات حوضه‌ی رودخانه‌ی جین‌جیانگ چین استفاده کردند. نمونه‌برداری از آب رودخانه و رسوبات در پایین‌دست تخلیه‌ی

جدول ۱: مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی استفاده از روش‌های آماری مختلف برای تعیین منابع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی

ردیف	محل انجام مطالعه	سال انجام مطالعه	محل برداشت نمونه	نوع روش آماری استفاده‌شده	نتایج مهم مطالعه	رفرنس
۱	چین، رودخانه‌ی جین‌جانگ	۲۰۲۲	آب سطحی، آب زیرزمینی و رسوبات	PCA	میکروپلاستیک‌ها با بار زیاد روی 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 PVC، PET، PA6 و PS هستند و آن‌هایی که بار زیادی روی جزء اصلی ۳ (تولیدات صنعتی) دارند، از POM تشکیل شده‌اند.	[۱۰]
۲	چین، خلیج لایژو	۲۰۲۰	۵۸ نقطه در خلیج لایژو و در بدن ماهی‌ها	CA	مناطق گودونگ، خور رودخانه‌ی زرد و لایژو-ویفانگ سه منبع میکروپلاستیک هستند که ممکن است از ورودی رودخانه، بازیافت پلاستیک و آبزی‌پروری قایق‌های دریایی منشأ بگیرند.	[۲۸]
۳	ژاپن، رودخانه‌ی Tsurumi	۲۰۲۱	۵ نقطه از سرچشمه تا دهانه‌ی رودخانه و ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب	HCA	منابع MP در سایت اصلی، فاضلاب مسکونی و در سایت‌های پایین دست، منابع غیرنقطه‌ای شهری بودند. غلظت مواد شیمیای و اندازه‌ی ذرات در پایین‌دست رودخانه بیشتر بود که نشان‌دهنده‌ی منابع غیرنقطه‌ای شهری است.	[۲۹]
۴	چین، رودخانه‌ی Yangtze	۲۰۲۳	۴ نقطه در طول رودخانه	PMF	منبع طبیعی ۱۸/۳۳ درصد، منابع آلاینده‌ی مخلوط ناشی از حمل‌ونقل و تولید آلیاژهای صنعتی ۲۶/۹۹ درصد، منابع آلودگی زباله‌های ساختمانی ۱۷/۱۷ درصد و منابع آلودگی ترکیبی از زغال‌سنگ و ترافیک ۳۲/۵۷ درصد در آلودگی نقش داشتند.	[۳۰]
۵	چین، دریاچه‌ی Baiyangdian Lake	۲۰۲۳	آب‌های سطحی،آب پوشاننده‌ی سطح رسوبات، آب منفذی داخل رسوبات	PMF	دامداری (۲۶/۷۴ تا ۳۵/۵۷ درصد) و آبزی‌پروری (۲۱/۶۲ تا ۳۷/۷۰ درصد) منابع اصلی آنتی‌بیوتیک در آب و رسوبات شناسایی شدند.	[۳۱]
۶	جنوب مرکزی چین، نمونه‌خاک	۲۰۲۲	زمین کشاورزی، جنگل و مرتع	PMF	ترکیب مدل PCA و PMF باعث افزایش دقت اطلاعات تحلیلی درباره‌ی منابع آلودگی می‌شود. نتایج این دو آنالیز نشان داد که انتشارات کارخانه‌ی ذوب فلزات و ماده‌ی اولیه‌ی خاک منابع اصلی فلزات سنگین بودند.	[۳۲]

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

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 تجزیه‌وتحلیل 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 آب‌معدنی 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 PVC، PET، PA6 و PS شناسایی‌شده 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 تجزیه‌وتحلیل 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 PVC، PET، 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 [۳۴, ۳۳]. 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 تحت‌تأثیر دینامیک جریان اقیانوسی قرار دارد. توزیع فضایی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات با آب‌های سطحی متفاوت بود؛ اما تحت‌تأثیر 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

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

داشتند که نشان می‌دهد ذرات میکروپلاستیک با چگالی پایین ترجیحاً به دریای آزاد مهاجرت می‌کنند. در شکل، اندازه و نوع پلیمر میکروپلاستیک‌ها بین آب‌های سطحی، رسوبات و موجودات زنده تفاوت معنی‌داری وجود داشت ($P < ۰/۰۵$). تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای نشان داد که مناطق گودونگ، خور رودخانه‌ی زرد و لایژو-ویفانگ سه منبع میکروپلاستیک هستند که ممکن است از ورودی رودخانه، بازیافت پلاستیک و آبزی‌پروری قایق‌های دریایی منشأ بگیرند. علاوه بر این، تنوع ذرات میکروپلاستیک در رسوبات در سایت‌های فراساحلی بیشتر بود که نشان می‌دهد این سایت‌ها میکروپلاستیک‌ها را از منابع متعدد دریافت می‌کنند [۲۸].

آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA)

از آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (HCA) برای دسته‌بندی و گروه‌بندی منابع میکروپلاستیک‌ها استفاده می‌شود. یکی از روش‌های مورد استفاده در آنالیز خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی روش Ward است که خوشه‌هایی با ویژگی‌های مشابه را شناسایی می‌کند [۲۸]. در مطالعه‌ی Yutaka Kameda و همکاران در سال ۲۰۲۱، از روش بیز سلسله‌مراتبی برای دسته‌بندی ترکیبات پلیمری بر اساس غلظت میکروپلاستیک‌ها استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای دو گروه عمده را نشان داد: یکی مربوط به فاضلاب مسکونی و روستایی و دیگری سایت‌های پایین‌دست که تحت‌تأثیر منابع ناشناخته‌ی متفاوت با فاضلاب بودند. همچنین، در این مطالعه، میکروپلاستیک‌های اصلی و نحوه‌ی توزیع آن‌ها در سایت‌های بررسی‌شده، با استفاده از مدل دوپارامتری وایبل (Weibull) شناسایی شدند. مدل وایبل مدلی پارامتری است که بر اساس دو پارامتر شکل و مقیاس تعریف می‌شود. منابع MP در سایت اصلی، فاضلاب مسکونی و در سایت‌های پایین‌دست، منابع غیرنقطه‌ای شهری بودند. غلظت مواد شیمیای و اندازه‌ی ذرات در پایین‌دست رودخانه بیشتر بود که نشان‌دهنده‌ی منابع غیرنقطه‌ای شهری بود. همچنین، نتایج نشان داد که توزیع نمونه‌های آب سطحی دارای واریانس بیشتری نسبت به آب‌های درون‌ریز و پساب است. همچنین، بر اساس این نتایج، اندازه‌های بزرگ و ناهمگن میکروپلاستیک‌ها از منابع دیگری غیر از فاضلاب مسکونی و پساب تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهری مشتق شده بود. بررسی‌ها بر اساس پارامتر شکل توزیع وایبل، نشان می‌دهد که توابع توزیع پلیمرها از توزیع نرمال برای ذرات کوچک در نمونه‌های پساب تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب شهری و توزیع نمایی برای ذرات درشت‌تر در سایت‌های پایین‌دست پیروی می‌کنند؛ بنابراین، بر اساس این مطالعه، پارامترهای شکل و مقیاس از تابع توزیع وایبل شاخص‌های مفیدی برای ارزیابی چگونگی توزیع میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی هستند [۲۹].

آنالیز تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF)

مدل تحلیل عاملی ماتریس مثبت (PMF) به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل چندمتغیره، برای تعیین سهم منابع مختلف در تولید میکروپلاستیک‌ها در منطقه‌ای معین به کار می‌رود. استفاده از این مدل در تعیین سهم منابع آلاینده‌ها در بخش‌های مختلف محیط‌زیست، از جمله فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها، در طی دو دهه‌ی اخیر، بسیار افزایش یافته است. همچنین، نتایج مطالعات اخیر حاکی از این است که ترکیب مدل PMF با سایر روش‌های آماری چندمتغیره بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد و در تجزیه‌وتحلیل جامع و سیستماتیک منابع آلاینده‌ها، از جمله میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین، دقت بیشتری ارائه می‌کند [۲۴،۳۵]. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳، Chunyan Li و همکاران به بررسی تقسیم‌بندی منبع فلزات سنگین و میکروپلاستیک‌ها پرداختند. در این مطالعه، برای بررسی سهم منابع مختلف، از آنالیز PMF استفاده شد. بر اساس PMF، چهار منبع اصلی برای این آلاینده‌ها تعیین شد؛ به‌طوری که منبع طبیعی ۱۸/۳۳ درصد، منابع آلاینده‌ی مخلوط ناشی از حمل‌ونقل و تولید آلیاژهای صنعتی ۲۶/۹۹ درصد، منابع آلودگی زباله‌های ساختمانی ۱۷/۱۷ درصد و منابع آلودگی ترکیبی از

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

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 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 منافعی 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 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,

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

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

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]

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.

[Downloaded from jhc.mazums.ac.ir on 2026-02-24]

[DOR: 20.1001.1.24236772.1402.9.4.10.6]