



FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 11, Number 2, Summer (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

A Review of Sampling, Identification, and Quantification Methods for Microplastics

Soghra Ramezani^{1*}; Zahra Mahmoudzadeh²; Sima Rezvantlab^{2*}

^{*1.} Faculty of Textile Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

^{*2.} Chemical Engineering Department, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

^{*}Email Address: s.ramezani@uut.ac.ir, s.rezvantlab@uut.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:

2026/08/09

Revised Date:

2026/09/01

Accepted Date:

2026/10/15

Published Date:

2026/10/15

Keywords:

Microplastics,
Nanoplastics,
Food,
Environment,
Water resources.

ABSTRACT

Microplastics, as emerging contaminants with high persistence and the ability to adsorb other pollutants, have raised serious concerns for human health and the environment. The fundamental challenge in managing this risk is the lack of standardized and integrated methods for sampling, preparation, identification, and quantification across various matrices (water, biosolids, and air), which makes the comparability of global data difficult. This review article examines the critical preparation steps, including sieving, drying, and digestion of organic matter, and critically reveals the limitations of the Fenton method, particularly regarding scalability and the formation of iron precipitates. Physical separation methods (density, oil, electrostatic, and magnetic) are also critically assessed individually. In the field of identification, FTIR spectroscopy in ATR, micro-, and imaging modes, Raman, LC-MS, Py-GC-MS, TGA-MS, and advanced microscopies such as SEM-EDS and TEM AFM-IR are compared in terms of their advantages and practical limitations (cost, time, and level of expertise). A step-by-step algorithm and a guide table are provided for selecting the appropriate method based on matrix and particle size. Standardization efforts such as ISO 16094-2:2020 and ISO 24187:2023, as well as EPA and ASTM D8401, are reviewed; however, knowledge gaps remain regarding nanoplastics, severe matrix interference, high costs, and the development of rapid in-situ methods. Future perspectives emphasize the use of deep learning for automated spectral identification, the design of portable sensors, and the integration of multiple separation-identification methods. Finally, the rigorous implementation of quality control and quality assurance measures such as the use of blank samples, recovery tests, and prevention of cross-contamination at all stages of analysis is introduced as an undeniable necessity for achieving reliable results.

Cite this article: Soghra Ramezani , Zahra Mahmoudzadeh , Sima Rezvantlab (2026) A Review of Sampling, Identification, and Quantification Methods for Microplastics, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(2), Pages 11261-11288.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Microplastics (MPs) have emerged as one of the most critical emerging environmental contaminants due to their persistence, ability to adsorb other pollutants, and adverse effects on human and ecosystem health. Defined as solid, water-insoluble polymer particles smaller than or equal to 5 mm, MPs encompass a wide range of compositions, densities, shapes, and sizes. They are classified as primary (manufactured at micrometer dimensions, such as cosmetic microbeads and synthetic fibers) and secondary (resulting from the degradation of macroplastics). These particles have been identified in all ecosystems, including marine waters, freshwater, soil, air, and even in deep oceans and polar regions. Annually, between 19 and 23 million tons of plastic waste enter aquatic systems, with projections reaching 53 million tons by 2030. Despite the widespread contamination, our knowledge regarding the toxicity of these particles, particularly nanoplastics and their effects on human health remains very limited. Accurate identification and quantification face significant challenges, including the lack of global standardized methods, particle diversity, and technical limitations. A quantitative assessment of 50 studies revealed an average quality score of only 8.41 out of 18, indicating generally poor study quality. The lack of standardized and harmonized protocols for sampling, preparation, identification, and quantification across diverse environmental matrices remains the primary obstacle to accurate risk assessment and global data comparability. This review critically examines the entire analytical workflow, from field sampling to chemical characterization, across aqueous, solid, biological, and atmospheric matrices, providing a comprehensive decision-making framework for method selection based on matrix type, particle size range, and study objectives.

Sampling Methodologies

Sampling is the most sensitive and impactful step in the microplastic analysis chain, as any error at this stage compromises the quality of final results. Method selection depends entirely on matrix type. Aqueous matrices utilize grab sampling (simple and low-cost), plankton nets (suitable for large volumes but losing particles smaller than mesh size), or automated pumping with in-line filters (capable of collecting very fine particles). Solid samples like soil and sediment employ surface sampling with simple tools and coring to examine vertical particle distribution. Wastewater requires 24-hour composite sampling using automatic samplers (gold standard method). Activated sludge presents the most challenging matrix due to exceptionally high viscosity and organic matter content. Biota sampling involves dissection of soft tissues or digestive tracts of aquatic organisms. Air and dust sampling use high-flow pumps with appropriate filters. Contamination control is critical across all methods, including using non-plastic containers, cotton clothing, HEPA-filtered hoods, and preparing blank samples. Conventional sampling methods (plankton nets, filtration with 1-5 μm meshes) are ineffective for nanoplastics, as these particles pass through filter pores and are dispersed in very large water volumes (tens to hundreds of liters) at extremely low concentrations (nanograms per liter). Advanced techniques like ultrafiltration with membranes of pore sizes $<0.1 \mu\text{m}$ or ultracentrifugation at $>100,000\times g$ are required for nanoplastic collection. Surface adsorption onto container walls can lead to $>50\%$ particle loss during transfer and storage, necessitating silanized glassware or non-ionic surfactant addition.

Sample Preparation

Sample preparation critically impacts final result quality, accuracy, and reliability. Physical pre-treatment includes sieving, drying, and mass determination. Chemical pre-treatment involves organic matter digestion, physical separation, staining, and filtration. Fenton oxidation ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$, 1:10 molar ratio, H_2O_2 dose equivalent to $5\times$ initial COD, pH 2.5–3.0, 30 minutes) achieves up to 97% COD removal in activated sludge without degrading PE, PA, or PET. However, practical implementation faces three fundamental limitations: scalability issues (peroxide costs escalate significantly for volumes above several liters, and neutralization of Fe(II)/Fe(III) salts is time-consuming and expensive); formation of iron hydroxide precipitates that trap fine particles ($<100 \mu\text{m}$), requiring ultrasonication or mild acid washing for release; and strong dependency on initial COD-to- H_2O_2 ratio, making control difficult in samples with variable

composition. Physical separation methods include density separation (NaCl for low-density polymers like PE and PP; ZnCl₂ or sodium polytungstate for high-density polymers like PVC and PET), oil extraction (up to 99% recovery), electrostatic separation, and magnetic separation (up to 92% efficiency). Density separation is ineffective for nanoplastics (<30% recovery), as Brownian motion dominates over Stokes' law at submicron dimensions. Alternative methods like asymmetric flow field-flow fractionation (AF4) and size-exclusion chromatography (SEC) are more efficient for nanoplastic separation but require specialized equipment and long analysis times. Nile Red staining (10 mg/L in acetone, 37°C, 15–30 min) enables rapid screening, with polycarbonate track-etched (PCTE) filters (1 µm pore size) commonly used due to smooth surface and high contrast.

Identification and Polymer Characterization

Polymer identification techniques are classified into non-destructive spectroscopy, destructive mass spectrometry, and advanced microscopy. FTIR spectroscopy in ATR, micro-, and imaging modes provides non-destructive chemical fingerprinting but suffers from spectral interference and diffraction limits (particles <10 µm). Raman spectroscopy offers superior spatial resolution for sub-10 µm particles, with CARS and stand-off variants enabling intracellular and remote imaging. LC-MS detects additives at ng/L levels, providing sensitivity for plasticizers, stabilizers, antioxidants, and flame retardants. Py-GC-MS and TGA-MS enable sensitive mass quantification of all polymers (including sub-20 µm particles) but are destructive and matrix-sensitive. Advanced microscopy (SEM-EDS, TEM, Cryo-SEM) provides morphology information but requires combination with spectroscopy for chemical identification. The selection of appropriate methods depends on particle size, sample type, required accuracy, destructive/non-destructive nature, cost, and equipment availability.

Challenges and Future Perspectives

Key challenges include the lack of global protocols and method inconsistencies; cross-contamination and QA/QC deficiencies; economic barriers to advanced instrumentation; and unique nanoplastic issues including diffraction limits, density separation inefficiency, digestion risks, and lack of reference standards. International standardization efforts such as ISO 16094-2:2020, ISO 24187:2023, ISO/TR 21960:2020, EPA initiatives, and ASTM D8401 represent important progress, but knowledge gaps remain regarding nanoplastics, severe matrix interference, high costs, and development of rapid in-situ methods. Future perspectives emphasize deep learning for automated spectral identification (95-96% accuracy), portable sensor design, hyphenated techniques (SEM-EDS + µ-FTIR/µ-Raman + Py-GC-MS/LC-MS), global protocol development for nanoplastics (ISO, OECD, UNEP, EPA), and green chemistry approaches. Key recommendations include rigorous blanks and contamination controls throughout all stages; spike recovery tests with multiple polymers (PE, PA, PET) across size ranges in real matrices targeting ≥80% recovery; method selection aligned with matrix, size range, and objective using the decision framework; stringent QA/QC with transparent reporting; special attention to nanoplastics using advanced hyphenated methods; and continuous updating with latest international standards and inter-laboratory proficiency tests.

Conclusion

Interdisciplinary synergy among analytical chemistry, environmental science, polymer engineering, toxicology, data science, and economics is essential to address the complex questions of fate, transport, environmental impacts, and human health effects of micro- and nanoplastics, and to develop effective management strategies. This review provides a comprehensive roadmap for researchers and regulatory bodies to navigate the complex landscape of microplastic analysis, emphasizing the critical importance of quality control, method harmonization, and international collaboration to achieve accurate, reliable, and comparable global data for effective environmental monitoring and policy development.



مروری بر روش‌های نمونه‌برداری، شناسایی و کمی‌سازی میکروپلاستیک‌ها

صغری رمضانی^{۱*}، زهرا محمودزاده^۲، سیما رضوان طلب^{۳*}^{۱*} - گروه مهندسی نساجی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد پیشرفته، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران^{۲*} - گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد پیشرفته، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: s.ramezani@uut.ac.ir, s.rezvantalab@uut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۵/۱۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۲۳

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۰۷/۲۳

کلید واژه‌ها:

میکروپلاستیک،

نانوپلاستیک،

مواد غذایی،

محیط زیست،

آب.

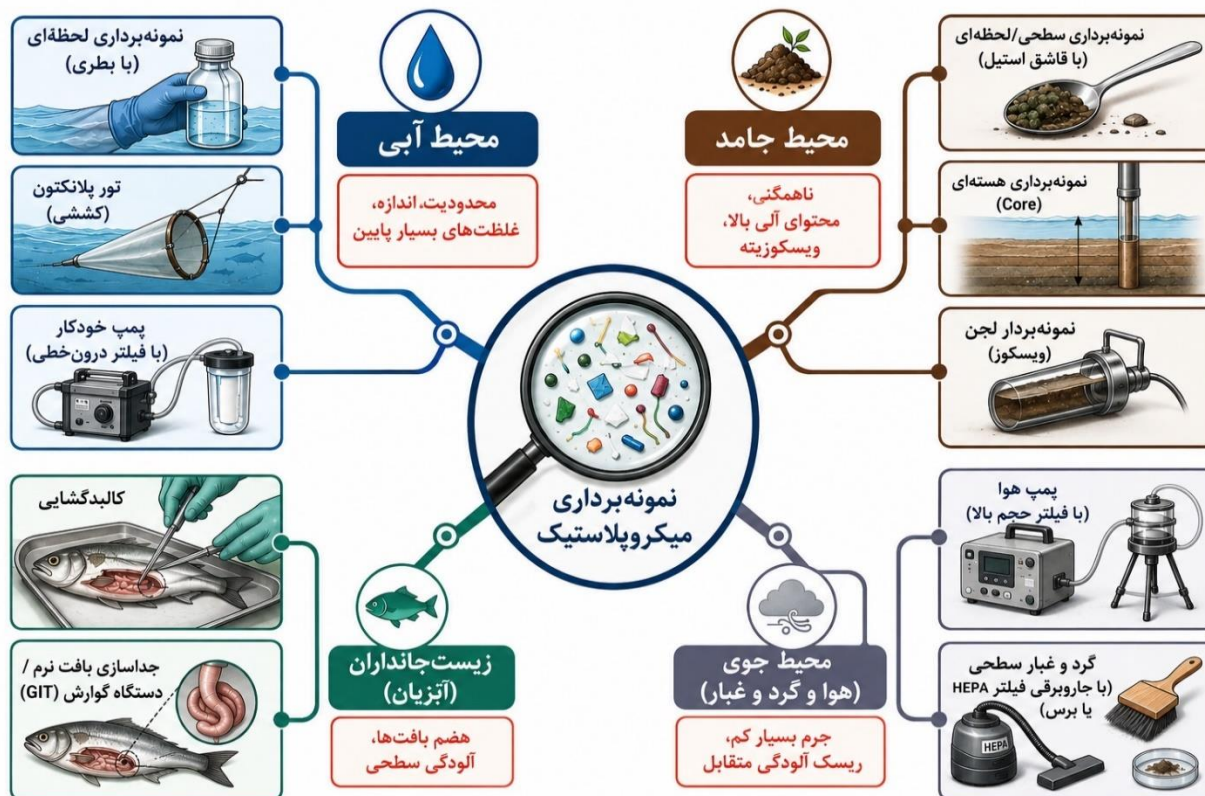
میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های نوظهور با پایداری بالا و قابلیت جذب سایر آلاینده‌ها، نگرانی‌های جدی برای سلامت انسان و محیط زیست کرده‌اند. چالش بنیادین در مدیریت این ریسک، نبود روش‌های استاندارد و یکپارچه برای نمونه‌برداری، آماده‌سازی، شناسایی و کمی‌سازی در ماتریس‌های گوناگون (آب، جامد زیستی و هوا) است که مقایسه‌پذیری داده‌های جهانی را دشوار می‌سازد. این مقاله مروری، مراحل حیاتی آماده‌سازی شامل الک‌کردن، خشک کردن و هضم مواد آلی را بررسی کرده و با نقد ویژه بر روش فنتون از منظر مقیاس‌پذیری و تشکیل رسوبات آهن محدودیت‌های آن را آشکار می‌سازد. روش‌های جداسازی فیزیکی (چگالی، روغن، الکترواستاتیک و مغناطیسی) نیز به صورت مجزا نقد شده‌اند. در حوزه شناسایی، طیف‌سنجی FTIR در حالت‌های ATR، میکرو و تصویربرداری، رامان، LC-MS، Py-GC-MS، TGA-MS و میکروسکوپ‌های پیشرفته مانند SEM-EDS و AFM-IR TEM، از نظر مزایا و محدودیت‌های عملی (هزینه، زمان و سطح تخصص) مقایسه شده‌اند. الگوریتم گام‌به‌گام و جدول راهنما برای انتخاب روش مناسب با ماتریس و اندازه ذرات ارائه شده است. تلاش‌های استانداردسازی مانند ISO 24187:2023، EPA، ASTM D8401 و 16094-2:2020 بررسی شده، اما شکاف‌های دانشی در حوزه نانوپلاستیک‌ها، تداخل شدید ماتریس، هزینه‌های بالا، توسعه روش‌های سریع درجا همچنان باقی است. چشم‌اندازهای آینده بر بهره‌گیری از یادگیری عمیق برای شناسایی خودکار طیف‌ها، طراحی حسگرهای قابل حمل و تلفیق روش‌های جداسازی شناسایی چندگانه تأکید دارد. در نهایت، اجرای دقیق اقدامات کنترل کیفیت و تضمین کیفیت نظیر استفاده از نمونه‌های شاهد، آزمایش‌های بازیابی و جلوگیری از آلودگی متقاطع در تمام مراحل تحلیل، به عنوان ضرورتی انکارناپذیر برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان معرفی شده است.

۱- مقدمه

میکروپلاستیک‌ها به عنوان ذرات پلیمری جامد، نامحلول در آب و با اندازه کوچک‌تر یا مساوی ۵ میلی‌متر تعریف شده و شامل طیف وسیعی از ترکیبات، چگالی‌ها، اشکال و اندازه‌ها هستند (Koelmans et al., 2019) (Ling Yang et al., 2024) (Ziani et al., 2023). میکروپلاستیک‌ها به دو دسته اولیه (تولید شده در ابعاد میکرومتر، مانند ریزدانه‌های آرایشی و الیاف مصنوعی) و ثانویه (حاصل از تخریب ماکروپلاستیک‌ها) تقسیم می‌شوند (Ziani et al., 2023) (Kershaw., 2016) و در تمامی اکوسیستم‌ها از جمله آب دریا، آب شیرین، خاک، هوا و حتی در اعماق اقیانوس‌ها و مناطق قطبی شناسایی شده‌اند (Ling Yang et al., 2024) (Koelmans et al., 2019) (Ziani et al., 2023). سالانه بین ۱۹ تا ۲۳ میلیون تن زباله پلاستیکی وارد سیستم‌های آبی می‌شود و این مقدار تا سال ۲۰۳۰ به ۵۳ میلیون تن خواهد رسید (Borrelle et al., 2020). با وجود گستردگی آلودگی، دانش ما در مورد سمیت ذرات (به‌ویژه نانوذرات) و اثرات آن بر سلامت انسان بسیار محدود است و شناسایی و کمی‌سازی دقیق با چالش‌هایی نظیر نبود روش‌های استاندارد جهانی، تنوع ذرات و محدودیت‌های فنی روبرو است (Koelmans et al., 2019) (Ling Yang et al., 2024). ارزیابی کمی از کیفیت ۵۰ مطالعه نشان داد که میانگین امتیاز کل از حداکثر ۱۸، تنها ۸/۴۱ بوده که نشان‌دهنده کیفیت پایین کلی مطالعات است (Koelmans et al., 2019). هدف از این مقاله مروری، ارائه یک ارزیابی جامع و انتقادی از روش‌های موجود برای نمونه‌برداری، شناسایی و کمی‌سازی میکروپلاستیک‌ها در ماتریس‌های مختلف محیطی و ارائه توصیه‌هایی برای بهبود کیفیت داده‌ها و استانداردسازی روش‌ها است.

۲- روش‌های نمونه‌برداری

نمونه‌برداری را می‌توان حساس‌ترین و تأثیرگذارترین گام در زنجیره تحلیل میکروپلاستیک‌ها دانست، زیرا هرگونه خطا در این مرحله، کیفیت نتایج نهایی را با مخاطره مواجه می‌سازد (Koelmans et al., 2019). پیچیدگی این فرآیند ناشی از تنوع ذاتی میکروپلاستیک‌ها از حیث اندازه، شکل، جنس پلیمری و چگالی از یک سو، و ماهیت بسیار ناهمگن ماتریس‌های محیطی (شکل ۱) از سوی دیگر است. (Ziani et al., 2023) (Ling Yang et al., 2024)



شکل ۱. روش‌های نمونه‌برداری میکروپلاستیک‌ها بر اساس ماتریس‌های محیطی

انتخاب روش نمونه‌برداری کاملاً به نوع ماتریس بستگی دارد. در ماتریس‌های آبی سه رویکرد اصلی شامل نمونه‌برداری لحظه‌ای (ساده و کم‌هزینه)، استفاده از تورهای پلانکتون (مناسب برای حجم‌های عظیم اما با از دست‌دادن ذرات کوچک‌تر از مش) و نمونه‌برداری خودکار با پمپ‌های گردشی و فیلترهای درون‌خطی (قابل جمع‌آوری ذرات بسیار ریز) است (Elisa et al., 2025). برای نمونه‌های جامد مانند خاک و رسوب، روش‌های نمونه‌برداری سطحی با ابزارهای ساده و مغزه‌گیری^۱ برای بررسی توزیع عمودی ذرات به کار می‌روند (Shi et al., 2026). فاضلاب نیازمند نمونه‌برداری مرکب ۲۴ ساعته با استفاده از نمونه‌بردار خودکار (روش استاندارد طلایی) است (Dilara Hatiniglu et al., 2024). در حالیکه لجن فعال هدررو به دلیل ویسکوزیته بسیار بالا و محتوای استثنایی مواد آلی، چالش‌برانگیزترین ماتریس محسوب می‌شود (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Sakali et al., 2021). در بیوتا، نمونه‌برداری با تشریح بافت‌های نرم یا دستگاه گواش آبیان انجام می‌شود (Ziani et al., 2023) و برای هوا و گردوغبار نیز از پمپ‌های با دی‌بالا و فیلترهای مناسب استفاده می‌گردد (Brander et al., 2020) (et al., 2020) (Bogdanowicz et al., 2021). کنترل آلودگی در تمامی روش‌ها، از جمله استفاده از ظروف غیرپلاستیکی، لباس‌های پنبه‌ای، هودهای مجهز به فیلتر HEPA و تهیه نمونه‌های شاهد، الزامی است (Koelmans et al., 2019) (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Brander et al., 2020) (Bogdanowicz et al., 2021). روش‌های رایج نمونه‌برداری از میکروپلاستیک‌ها (تور پلانکتون، فیلتراسیون با مش‌های ۵-۱۰ میکرومتر) برای نانوپلاستیک‌ها کارایی ندارند، زیرا این ذرات از منافذ فیلتر عبور کرده و در حجم‌های بسیار زیاد آب (ده‌ها تا صدها لیتر) با غلظت‌های بسیار پایین (نانوگرم بر لیتر) پراکنده‌اند (Manpreet kaur et al., 2025). برای جمع‌آوری نانوپلاستیک‌ها، روش‌های پیشرفته‌تری مانند اولترافیلتراسیون با غشاهایی با منافذ کوچک‌تر از ۰.۱ میکرومتر (مانند غشاهای پلی‌اترئولون با $MWCO < 100 \text{ kDa}$) یا اولتراسانتریفیوژ با سرعت بالا بیش از $100,000 \times g$ بکار می‌روند که روش اول امکان پردازش حجم‌های زیاد (چند لیتر) را فراهم می‌کند اما مستعد گرفتگی است و روش دوم برای حجم‌های کوچک (چند صد میلی‌لیتر) کاربرد دارد و نیازمند تجهیزات گران‌قیمت است (Manpreet kaur et al., 2025) (Gigault et al., 2018). علاوه بر این، جذب سطحی نانوذرات بر روی دیواره ظروف شیشه‌ای یا پلیمری، یکی از چالش‌های جدی است که می‌تواند منجر به از دست‌رفتنی بیش از ۵۰٪ ذرات در حین انتقال و ذخیره‌سازی شود (Schwaferts et al., 2019)؛ برای جلوگیری از این مشکل، استفاده از ظروف شیشه‌ای سیلانیزه‌شده^۲ یا افزودن سورفکتانت‌های غیر یونی (مانند Tween-20) به نمونه، توصیه شده است. همچنین، آلودگی هوای آزمایشگاه برای نانوپلاستیک‌ها بحرانی‌تر از میکروپلاستیک‌ها است، زیرا نانوذرات زیرمیکرونی به راحتی در هوا معلق‌اند و فیلترهای معمولی HEPA به‌سختی آنها را حذف می‌کنند. از این‌رو انجام تمام مراحل در اتاق‌های تمیز یا هودهای مجهز به فیلترهای پیشرفته‌تر مانند ULPA (که راندمان بالاتری در جذب ذرات زیرمیکرونی دارند) ضروری است (Manpreet kaur et al., 2025) (Lvleva., 2021). خلاصه‌ای از روش‌ها، حجم نمونه، تجهیزات و چالش‌های اصلی در جدول ۱ ارائه شده است.

¹ Core sampling

² Silanized

جدول ۱. روش‌های نمونه‌برداری و آماده‌سازی اولیه برای ماتریس‌های مختلف محیطی

ماتریس	روش نمونه‌برداری	حجم/جرم نمونه	تجهیزات معمول	فرایند الک‌کردن	شرایط خشک کردن	چالش‌های اصلی	مرجع
آب سطحی / دریایی	لحظه‌ای، تور پلانکتون، خودکار	۱-۱۰۰۰ لیتر	ظرف شیشه‌ای، تور با مش μm ۵۰۰-۳۰۰، پمپ گردشی	تور پلانکتون یا فیلتراسیون با مش μm ۵-۱	خشک کردن فیلترها در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۵۰-۴۰	حجم بالا برای غلظت‌های پایین، تخریب الیاف	(Koelmans et al) (Ling Yang et al) (Elisa et al)
آب آشامیدنی	لحظه‌ای (با رعایت بهداشت)	≤ ۱۰۰۰ لیتر	ظرف شیشه‌ای تیره، فیلتراسیون درجا	فیلتراسیون با مش μm ۵-۱	خشک کردن فیلترها در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۴۰	آلودگی متقاطع، حساسیت به ذرات ریز	(Koelmans et al) (Ling Yang et al)
رسوب (سطحی/عمقی)	قاشق، گرب، مغزه‌گیر	۵-۱ کیلوگرم	قاشق فولادی، گرب و ون‌وین، مغزه‌گیر	الک‌های ۱، ۲، ۵ میلی‌متر و μm ۴۲۵	$^{\circ}\text{C}$ ۵۰-۴۰ تا رسیدن به وزن ثابت	ناهمگنی، مواد آلی و معدنی زیاد	(Brander et al) (Lee et al) (Hurley et al)
خاک	قاشق، مته دستی	۵ گرم تا ۵۰۰ کیلوگرم	قاشق فولادی، مته خاک	الک‌های ۱، ۲، ۵ میلی‌متر و μm ۴۲۵	$^{\circ}\text{C}$ ۵۰-۴۰ تا رسیدن به وزن ثابت	رطوبت، چسبندگی، حضور موجودات زنده	(Brander et al) (Hurley et al)
فاضلاب خام	مركب ۲۴ ساعته خودکار	۲۰-۵ لیتر	نمونه‌بردار خودکار، ظرف پلی‌اتیلن	فیلتراسیون مستقیم با تور یا الک با مش μm ۵۰۰-۳۰۰	خشک کردن فیلترها در $^{\circ}\text{C}$ ۵۰-۴۰	نوسانات زمانی، غلظت بالای مواد آلی	(Elisa et al) (Dilara Hatini glu et al)
فاضلاب تصفیه‌شده	مركب یا لحظه‌ای با حجم بالا	۱۰۰۰-۵۰ لیتر	پمپ گردشی، فیلتر درون‌خطی تا μm ۱	فیلتراسیون مستقیم با مش μm ۵-۱	خشک کردن فیلترها در $^{\circ}\text{C}$ ۴۰	غلظت بسیار پایین، نیاز به فیلتراسیون طولانی	(Koelmans et al) (Ling Yang et al) (Lee et al)
لجن فعال هدررو	نقطه‌ای (با نمونه‌بردار مخصوص)	۵۰۰-۱۰۰ گرم	نمونه‌بردار لجن، ظرف شیشه‌ای	الک‌های ۱، ۵ میلی‌متر، μm ۳۸ و ۴۲۵	$^{\circ}\text{C}$ ۵۰-۴۰ به مدت ۷۲-۴۸ ساعت	ویسکوزیته بالا، محتوای آلی استثنایی	(Dilara Hatini glu et al) (Sakali et al)
بیوتا (ماهی، صدف)	تشریح و جداسازی بافت	۵۰-۵ گرم بافت	ست جراحی فولادی، ظرف شیشه‌ای	الک کردن بافت هضم‌شده با مش μm ۵۰۰-۳۸	خشک کردن انجمادی یا آون در $^{\circ}\text{C}$ ۴۰	آلودگی سطحی، نیاز به هضم بافت	(Ziani et al) (Brander et al)
هوا (داخلی/خارجی)	پمپ با دبی بالا (فیلتراسیون)	۱۰۰۰-۱۰۰ مترمکعب	پمپ نمونه‌برداری، فیلتر فایبرگلاس/کوارتز	فیلتراسیون با فیلترهای μm ۴۵-۲	خشک کردن فیلترها در $^{\circ}\text{C}$ ۴۰	حجم بالا، خطر آلودگی از لباس و تجهیزات	(Brander et al) (Bogdanowicz et al)
گردوغبار سطحی	برس، جاروبرقی مخصوص	۵-۰/۱ گرم	برس پنبه‌ای، جاروبرقی با فیلتر HEPA	الک خشک با مش μm ۵-۱ میلی‌متر	خشک کردن در $^{\circ}\text{C}$ ۴۰ (در صورت رطوبت)	آلودگی متقاطع از محیط، مقدار کم	(Bogdanowicz et al)
نانوپلاستیک‌ها در آب/زیست‌نمونه	اولترافیلتراسیون (Cross-flow) اولتراسانتریفیوژ ($\text{g} \times ۱۰۰,۰۰۰$)	۰.۵-۱۰ لیتر (آب) یا ۱-۵ گرم (بافت)	غشاهای MWCO $< 100 \text{ kDa}$ ، اولتراسانتریفیوژ، هود کلاس ۱۰۰	فیلتراسیون با غشاهای نانومتری (μm ۰.۰۲-۰.۱)	خشک کردن انجمادی در دمای پایین (۲۵- درجه)	جذب سطحی بر روی ظروف، گرفتگی غشا، آلودگی شدید از هوا، فقدان استاندارد مرجع	(Manpreet kaur et al) (Gigault et al) (Schwaferts et al)

۳- آماده‌سازی نمونه (پردازش و پیش تیمار)

آماده‌سازی نمونه، یکی از مراحل حیاتی در آنالیز میکروپلاستیک‌ها محسوب می‌شود که تأثیر مستقیمی بر کیفیت، دقت و قابلیت اطمینان نتایج نهایی دارد (Lee et al., 2023). هدف اصلی از این مرحله، حذف تداخل‌دهنده‌های ماتریس نمونه مانند مواد آلی، املاح و ذرات غیرپلاستیکی و در عین حال، حفظ یکپارچگی فیزیکی و شیمیایی ذرات میکروپلاستیک برای آنالیزهای بعدی است (Juviya et al., 2024). ماهیت ماتریس تأثیر قابل توجهی بر روش انتخابی دارد. خاک و رسوب به دلیل ماهیت ناهمگن و محتوای بالای مواد آلی، چالش‌برانگیزترین ماتریس‌ها هستند (Hurley et al., 2018). لجن فعال هدررو نیز به دلیل ویسکوزیته بالا و محتوای استثنایی مواد آلی، چالش‌های منحصربه‌فردی ایجاد می‌کند (Dilara Hatniglu et al., 2024) (Sakali et al., 2021) (Li et al., 2020). در این بخش، مراحل کلیدی آماده‌سازی نمونه شامل پردازش اولیه (الک کردن، خشک کردن و تعیین مقدار نمونه) و پیش تیمار شیمیایی (هضم مواد آلی، جداسازی، رنگ آمیزی و فیلتراسیون) مورد بررسی قرار می‌گیرند (شکل ۲).

۳-۱- پردازش اولیه فیزیکی

پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت الک کردن، خشک کردن و تعیین مقدار نمونه قرار می‌گیرند (Hurley et al., 2018). جزئیات مربوط به اندازه‌های الک، شرایط خشک کردن (دما و روش) و مقدار نمونه مناسب برای هر ماتریس در جدول ۱ به تفکیک ارائه شده است. یکی از چالش‌های اصلی در الک کردن، از دست دادن ذرات بسیار ریز (به ویژه الیاف و قطعات کوچکتر از ۳۸ میکرومتر) است که با شستشوی مکرر با آب مقطر و محلول‌های فعال سطحی قابل کاهش است (Lee et al., 2023). برای نمونه‌های با رطوبت بالا یا ویسکوزیته زیاد، الک کردن مرطوب نسبت به الک خشک کارایی بیشتری دارد (Hurley et al., 2018). همچنین، خشک کردن انجمادی به دلیل حفظ بهتر ساختار ذرات و کاهش خطر تخریب حرارتی، به ویژه برای نمونه‌های حساس و مطالعات با دقت بالا، گزینه‌ای برتر محسوب می‌شود (Brander et al., 2020) (Hurley et al., 2018).



شکل ۲. نمای کلی فرآیند آماده‌سازی نمونه (پردازش و پیش تیمار) برای تحلیل میکروپلاستیک‌ها در ماتریس‌های محیطی مختلف. این فرآیند به دو مرحله اصلی تقسیم می‌شود: (۱) پیش تیمار فیزیکی، شامل الک کردن برای تفکیک بر اساس اندازه، خشک کردن در دمای کنترل‌شده (کمتر از 60°C) به منظور حفظ یکپارچگی پلیمرها، و تعیین جرم نمونه‌ای با قابلیت نمایندگی بر اساس نوع ماتریس و غلظت‌های مورد انتظار؛ و (۲) پیش تیمار شیمیایی، شامل هضم مواد آلی (با تأکید بر اکسیداسیون فنتون به عنوان روشی پیشرفته و سازگار با پلیمرها)، جداسازی فیزیکی از طریق روش چگالی. اصل کلی حاکم بر تمامی مراحل، حفظ یکپارچگی شیمیایی و فیزیکی پلیمرها در طول تمامی مراحل است که از طریق کنترل دقیق دما، انتخاب دقیق معرف‌های شیمیایی و محافظت مکانیکی حاصل می‌شود.

۳-۲- پیش تیمار شیمیایی

هدف اصلی پیش تیمار شیمیایی، حذف حداکثری مواد آلی و معدنی مزاحم با حفظ یکپارچگی پلیمرها است (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Hurley et al., 2018). روش های هضم شامل اکسیداسیون اسیدی (سریع اما تخریب کننده PA و PET)، هضم آنزیمی (حافظ پلیمر اما زمان بر و پرهزینه)، و اکسیداسیون پیشرفته (فنتون) هستند (San Sebastián et al., 2003) (Zeng et al., 2025) (Chang et al., 2025) (He et al., 2021). روش فنتون ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \bullet\text{OH}$) با نسبت مولی ۱:۱۰، دوز H_2O_2 معادل ۵ برابر COD اولیه، زمان ۳۰ دقیقه و $2.5 \leq \text{pH} \leq 3$ ، کارایی حذف COD تا ۹۷٪ را در لجن فعال هدررو نشان داده و مطالعات هیچگونه تخریب ساختاری در PE، PA و PET را تأیید نکرده اند (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Li et al., 2020) (Bellamy et al., 2025). با وجود کارایی بالای روش فنتون در حذف مواد آلی و حفظ پلیمرها، اجرای عملی آن در آزمایشگاه های معمولی و کاربردهای صنعتی با سه چالش اساسی روبرو است. چالش نخست، محدودیت مقیاس پذیری است. هزینه پراکسید برای حجم های بالاتر از چند لیتر به شدت افزایش یافته و فرآیند خنثی سازی هیدروژن (II) و نمک های آهن (III) پس از واکنش، زمان بر و پرهزینه است (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Li et al., 2020). چالش دوم، تشکیل رسوبات هیدروکسید آهن است. این رسوبات ذرات ریز (به ویژه الیاف کوچک تر از ۱۰۰ میکرومتر) را به دام می اندازند. برای آزادسازی این ذرات، نیاز به اولتراسونیک دهی (۵-۱۰ دقیقه) یا اسیدشویی ملایم (با اسید سیتریک رقیق) است؛ این مراحل اضافی ممکن است به پلیمرهای حساس (مانند PA و PET) آسیب برسانند (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Bellamy et al., 2025). چالش سوم، وابستگی شدید به نسبت اولیه COD به H_2O_2 است. این نسبت در نمونه های با ترکیب متغیر (مانند لجن های صنعتی یا فاضلاب های فصلی) به سختی قابل کنترل است. بنابراین، اندازه گیری COD پیش از واکنش برای هر سری نمونه الزامی بوده و خود مستلزم صرف زمان و هزینه قابل توجهی است (Dilara Hatiniglu et al., 2024). بعلاوه، در ماتریس های حاوی کربنات های معدنی (مانند رسوبات آهکی)، مصرف H_2O_2 به دلیل واکنش های جانبی با ترکیبات بافر کننده افزایش یافته و کارایی فرآیند را کاهش می دهد (Hurley et al., 2018). پس از هضم، جداسازی فیزیکی با فراوانی ۸۵-۸۶٪، به روش چگالی انجام می شود (Prata et al., 2019)؛ NaCl اشباع (چگالی $1/2 \text{ g/cm}^3$)، برای پلیمرهای کم چگال مانند PE و PP و ZnCl_2 یا سدیم پلی تنگستات برای پلیمرهای با چگالی بالا مانند پلی وینیل کلراید (PVC) و PET استفاده می شود (Nath et al., 2025). همچنین استخراج با روغن (بازیابی تا ۹۹٪)، جداسازی الکترواستاتیک (بر اساس بار سطحی)، و جداسازی مغناطیسی با نانوذرات اکسید آهن (سرعت تا ۹۲٪) از روش های نوین و کارآمد هستند (Prata et al., 2019) (Erni-Cassola et al., 2017) (Ho et al., 2025). خلاصه ای از روش های جداسازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. روش‌های جداسازی میکروپلاستیک‌ها از ماتریس‌های محیطی

دسته روش	روش جداسازی	مکانیسم اصلی	مزایا	معایب	ماتریس‌های مناسب	مراجع
پایه‌ای (چگالی)	جداسازی چگالی با NaCl	شناورسازی در محلول اشباع $1/2 \text{ g/cm}^3$	هزینه کم، در دسترس، غیرسمی، سازگار با محیط زیست	عدم بازیابی پلیمرهای سنگین (PVC, PET, PA)	رسوب، خاک، آب‌های سطحی	(Zeng et al) (Chang et al) (He et al)
	جداسازی چگالی با ZnCl_2	شناورسازی با چگالی $1/5 - 1/57 \text{ g/cm}^3$	بازیابی پلیمرهای سنگین (تا ۹۵٪)	سمی، خورنده، هزینه بالا، نیاز به دفع ویژه	لجن، رسوبات پیچیده	(Zeng et al) (Chang et al) (He et al)
	جداسازی چگالی با CaCl_2	شناورسازی با چگالی $1/3 - 1/35 \text{ g/cm}^3$	سمیت کمتر، هزینه متوسط	ویسکوزیته بالا، سرعت فیلتراسیون پایین‌تر	رسوبات دریایی، خاک، فاضلاب	(Zeng et al) (He et al)
	جداسازی چگالی با سدیم پلی‌تنگستات	شناورسازی با چگالی $1/4 \text{ g/cm}^3$	غیرسمی، بازیابی خوب پلیمرهای با چگالی متوسط	هزینه بالا، در دسترس نبودن در همه آزمایشگاه‌ها	نمونه‌های حاوی PA, PET و PVC	(He et al)
پایه‌ای (روغن)	استخراج با روغن (کرچک)	استخراج بر اساس آب‌گریزی و چربی‌دوستی	بازیابی بالا (تا ۹۹٪)، مستقل از چگالی پلیمر، دوستدار محیط زیست	نیاز به شست‌شوی اضافی برای حذف روغن، هزینه متوسط	لجن فاضلاب، خاک، رسوب، نمونه‌های با ذرات ریز	(Zeng et al) (He et al) (Buntayet al)
	جداسازی الکترواستاتیک	استفاده از میدان الکتریکی و تخلیه کرونا برای جداسازی بر اساس بار سطحی	انتخاب‌پذیری بالا، بدون نیاز به مواد شیمیایی	نیاز به تجهیزات خاص، کارایی محدود در ماتریس‌های مرطوب	خاک، نمونه‌های خشک، رسوبات	(He et al) (Nath et al) (Buntayet al)
پایه‌ای (مغناطیسی)	جداسازی مغناطیسی	اتصال به نانوذرات مغناطیسی و جداسازی با میدان مغناطیسی	سرعت بالا (تا ۹۲٪)، قابلیت خودکارسازی، دوستدار محیط زیست	نیاز به اصلاح سطح ذرات، نگرانی در مورد باقیمانده نانوذرات	فاضلاب، آب، نمونه‌های با غلظت پایین	(Nath et al) (Buntayet al) (Xiong et al)
	سیکلون/هیدروسیکلون	نیروی گریز از مرکز برای جداسازی بر اساس چگالی و اندازه	راندمان بالا (تا ۹۳٪)، مصرف انرژی پایین	نیاز به طراحی دقیق، کارایی کمتر برای ذرات بسیار ریز	فاضلاب، پساب صنعتی	(Zeng et al)
	استخراج با حلال تحت فشار	استفاده از حلال آلی در فشار و دمای کنترل‌شده	جداسازی کامل پلیمرهای خاص	تخریب پلیمرها، هزینه حلال، آلودگی ثانویه	نمونه‌های با پلیمرهای مشخص (تحقیقاتی)	(He et al) (Nath et al) (Buntayet al)
پایه‌ای	روش دو مرحله‌ای چگالی ($\text{NaCl} + \text{ZnCl}_2$)	ترکیب دو نمک برای استخراج همزمان پلیمرهای سبک و سنگین	بازیابی جامع (۹۴-۸۰٪)، آزادسازی ذرات به‌دام‌افتاده در لخته‌ها	زمان‌بر، هزینه بیشتر	لجن فعال، فاضلاب خام، ماتریس‌های دارای لخته‌های آهن	(He et al)

پس از تکمیل مراحل هضم مواد آلی و جداسازی چگالی، شناسایی و شمارش میکروپلاستیک‌ها با استفاده از میکروسکوپ فلورسانس و رنگ‌آمیزی فیلترها با قرمز نیل انجام می‌شود. این رنگ یک ماده فلورسنت آب‌گریز و محلول در چربی است که میل ترکیبی بالایی به پلیمرهای سنتتیک دارد و با جذب بر روی سطح ذرات پلاستیکی، تحت تابش نور آبی، فلورسانس قرمز یا نارنجی از خود ساطع می‌کند (Koelmans et al., 2019). این ویژگی، تشخیص سریع و کارآمد ذرات پلاستیکی را در میان انبوهی از مواد غیرفلورسنت ممکن می‌سازد (Prata et al., 2019) (Maes et al) و به عنوان روشی حساس برای غربالگری پیش از تحلیل‌های طیف‌سنجی تکمیلی کاربرد دارد (Erni-Cassola et al., 2017). پارامترهای کلیدی در این رنگ‌آمیزی شامل انتخاب حلال مناسب، غلظت رنگ، دما، زمان تماس و نوع فیلتر است (Ho et al., 2025) (Maes et al). رنگ‌آمیزی با قرمز نیل در استون با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، دمای ۳۷

درجه و زمان ۱۵-۳۰ دقیقه، تشخیص سریع را فراهم می‌کند (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Shim et al., 2016). فیلترهای پلی‌کربنات ردیابی شده (PCTE) با اندازه منافذ ۱ میکرومتر، به دلیل سطح صاف، توزیع یکنواخت و کنتراست بالا، یکی از رایج‌ترین گزینه‌ها هستند (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Cole et al., 2014)؛ اما، برای تحلیل‌های طیف‌سنجی FTIR یا رامان، فیلترهای آنودیسی (آلومینایی) یا طلایی با منافذ ریز، به دلیل خودفلورسانس بسیار پایین و مقاومت شیمیایی بالا، مناسب‌ترند (Ho et al., 2025). روش‌های جداسازی چگالی برای میکروپلاستیک‌ها کارایی بالا دارند (بازیابی > ۹۰٪)؛ اما برای نانوپلاستیک‌ها عملاً ناکارآمدند. دلیل آن، غلبه حرکت براونی بر قانون استوکس در ابعاد زیر میکرومتر است؛ به بیان دیگر، سرعت شناورسازی که با مجذور قطر ذره نسبت مستقیم دارد، در ابعاد نانومتری عملاً قابل چشم‌پوشی می‌شود (Manpreet kaur et al., 2025) (Gigault et al., 2018). از این رو، نانوذرات حتی در محلول‌های چگال بالا (مانند $ZnCl_2$ یا سدیم پلی‌تنگستات) به سختی شناور شده و این فرآیند به زمان‌های بسیار طولانی (چندین ساعت تا چند روز) نیاز دارد. در نتیجه، بازیابی با این روش معمولاً کمتر از ۳۰٪ گزارش شده است (Schwaferts et al., 2019). روش‌های جایگزین مانند میدان‌های جریان-سیال ($^1AF4$) که بر اساس ضریب انتشار و اندازه هیدرودینامیکی جداسازی می‌کنند، و کروماتوگرافی حذف اندازه (SEC) که بر اساس حجم هیدرودینامیکی عمل می‌کند، برای جداسازی نانوپلاستیک‌ها از ماتریس‌های محلول (آب یا عصاره‌های زیستی) بسیار کارآمدترند. با این حال، این روش‌ها به تجهیزات تخصصی و زمان آنالیز طولانی (۲-۱ ساعت به ازای هر نمونه) نیاز دارند (Manpreet kaur et al., 2025) (Gigault et al., 2018). همچنین، هضم شیمیایی قوی (مانند قلیایی با KOH یا فتون در دمای بالا) می‌تواند نانوپلاستیک‌ها را تخریب یا تغییر شیمیایی دهد؛ به جای آن، هضم آنزیمی ملایم (در دمای ۳۷ درجه و pH خنثی) یا اولترافیلتراسیون با شست‌شوی متوالی برای حذف مواد آلی محلول (بدون تخریب ذرات) توصیه می‌شود (Manpreet kaur et al., 2025) (Schwaferts et al., 2019).

۳-۳- راهنمای انتخاب روش (الگوریتم تصمیم‌گیری)

با توجه به تنوع روش‌های نمونه‌برداری، آماده‌سازی، جداسازی و شناسایی، انتخاب بهترین ترکیب بهینه برای هر مطالعه، نیازمند در نظر گرفتن سه پارامتر کلیدی شامل نوع ماتریس محیطی (آب، رسوب، خاک، لجن، بیوتا یا هوا)، محدوده اندازه ذرات هدف (ماکروپلاستیک < ۵ میلی‌متر، میکروپلاستیک ۵۰۰-۱ میکرومتر، یا نانوپلاستیک > ۱ میکرومتر)، و هدف اصلی مطالعه (شناسایی کیفی، کمی‌سازی تعداد ذرات، تعیین غلظت جرمی، یا شناسایی افزودنی‌ها و محصولات تخریب) است. شکل ۳ الگوریتمی گام‌به‌گام برای انتخاب روش‌های مناسب بر پایه این معیارها ارائه می‌دهد. همچنین جدول ۳ به عنوان یک راهنمای خلاصه‌شده، بهترین روش‌ها را برای رایج‌ترین حالت‌های ترکیبی پیشنهاد می‌کند.



شکل ۳. چارچوب تصمیم‌گیری گام‌به‌گام برای تحلیل میکرو/نانوپلاستیک‌ها

¹ Asymmetrical flow field- flow fractionation

جدول ۳. راهنمای خلاصه شده انتخاب روش بر اساس شرایط مطالعه

شرایط مطالعه	روش نمونه برداری پیشنهادی	روش آماده سازی (هضم و جداسازی) پیشنهادی	روش شناسایی پیشنهادی	توضیحات تکمیلی
آب سطحی، ذرات $\mu\text{m} < 300$ ، شناسایی کیفی	تور پلانکتون با مش μm ۳۰۰	فیلتراسیون مستقیم (مش μm ۵-۱)، خشک کردن در 40°C	ATR-FTIR	سریع، کم هزینه، مناسب برای پایش اولیه
آب سطحی/دریایی، ذرات μm ۱-۳۰۰، کمی سازی تعداد	نمونه بردار خودکار با فیلتر درون خطی ($\mu\text{m} \leq 1$)	فیلتراسیون، رنگ آمیزی با قرمز نیل	μ -FTIR (تصویربرداری) یا μ -Raman خودکار	دقت بالا، مناسب برای مطالعات آماری
آب آشامیدنی، ذرات μm ۱۰، کمی سازی جرمی	نمونه برداری لحظه ای با حجم ≤ 1000 لیتر	فیلتراسیون با مش $\mu\text{m} \geq 1$ ، خشک کردن انجمادی	Py-GC-MS یا TGA-MS	حساسیت بالا، شناسایی نانوذرات
رسوب/خاک، محتوای آلی بالا، شناسایی کیفی	قاشق فولادی یا مغزه گیر (۵-۱ کیلوگرم)	الک کردن (۵ mm، ۲، ۱، μm ۴۲۵)، هضم فنتون، جداسازی چگالی با ZnCl_2	ATR-FTIR یا μ -FTIR	حذف مؤثر مواد آلی با فنتون
رسوب/خاک، ذرات $< 10 \mu\text{m}$ ، کمی سازی جرمی	مغزه گیر (۵-۱ کیلوگرم)	الک کردن مرطوب، هضم فنتون، جداسازی چگالی با سدیم پلی تونگستات	Py-GC-MS یا TGA-MS	شناسایی ذرات بسیار ریز، نیاز به استاندارد داخلی
لجن فعال هدررو، محتوای آلی استثنایی	نمونه بردار لجن (۵۰۰-۱۰۰ گرم وزن تر)	الک کردن (۵ mm، ۱، μm ۴۲۵، ۳۸)، هضم فنتون (COD-guided)، استخراج با روغن	μ -FTIR + SEM-EDS	روش فنتون با دوز اکسیدان بر اساس COD
بیوتا (ماهی، صدف)، بافت نرم	تشریح و جداسازی بافت (۵۰-۵ گرم)	هضم آنزیمی (پروتاز)، جداسازی چگالی با NaCl، رنگ آمیزی قرمز نیل	μ -FTIR یا μ -Raman	هضم آنزیمی یکپارچگی پلیمرها را حفظ می کند
هوا (داخلی/خارجی)، ذرات μm ۴۵-۲۵	پمپ با دیب بالا، فیلتر فایبرگلاس/کوارتز m^3 ۱۰۰۰-۱۰۰	فیلتراسیون مستقیم، خشک کردن در 40°C درجه، آنالیز مستقیم روی فیلتر	μ -FTIR انتقال + SEM-EDS	کنترل آلودگی بسیار حیاتی است
شناسایی افزودنی ها (نرم کننده ها، آنتی اکسیدان ها)	هر ماتریس (بسته به هدف)	استخراج با حلال آلی، فیلتراسیون، تغلیظ	LC-MS یا TED-GC-MS	شناسایی ترکیبات آلی با غلظت پایین (نانوگرم بر لیتر)
نانوپلاستیک ها (μm ۱ $<$)	نمونه بردار خودکار با فیلترهای خاص (نانوفیلتراسیون)	اولترافیلتراسیون، خشک کردن انجمادی، بدون هضم شیمیایی تهاجمی	CARS, TEM-Py-GC- یا EELS, MS	نیاز به روش های پیشرفته، هنوز در مرحله تحقیقاتی

۳-۴- ملاحظات عملی و اقتصادی (هزینه، زمان و سطح تخصص)

علاوه بر معیارهای فنی (دقت، حساسیت، گزینش پذیری و مخرب/غیرمخرب بودن)، انتخاب روش مناسب در هر آزمایشگاه به عوامل عملی و اقتصادی نیز وابسته است (Koelmans et al., 2019) (Brander et al., 2020) (Zeng et al., 2025). روش‌های پیشرفته‌ای چون μ -FTIR، μ -Raman، Py-GC-MS و SEM-EDS دقت و حساسیت بالایی دارند، اما سرمایه‌گذاری اولیه سنگین، هزینه نگهداری قابل توجه و نیاز به اپراتور ماهر، آنها را برای آزمایشگاه‌های با بودجه محدود یا کاربردهای نیازمند پاسخ گویی سریع، دست‌نیافتنی می‌سازد (Erik Dümichen et al., 2015) (Umurhan et al., 2025) (Joseph et al., 2018). در مقابل، روش‌های ساده‌تری مانند ATR-FTIR، جداسازی چگالی با NaCl و رنگ‌آمیزی با قرمز نیل با هزینه و زمان کمتر، برای غربالگری اولیه و مطالعات پایش گسترده بسیار مناسب‌اند (Koelmans et al., 2019) (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Maes et al.). جدول ۴ این سه معیار را برای روش‌های گوناگون مقایسه کرده است. بر پایه این پارامترها، سه حالت برای کاربران پیشنهاد می‌شود:

- آزمایشگاه‌های با بودجه محدود (غربالگری اولیه و پایش گسترده): نمونه‌برداری با تور پلانکتون + هضم با H_2O_2 + جداسازی چگالی با NaCl + رنگ‌آمیزی قرمز نیل + ATR-FTIR. این ترکیب کم‌هزینه، سریع و با تخصص پایه قابل اجرا است.
- آزمایشگاه‌های با امکانات متوسط (مطالعات کمی دقیق): نمونه‌برداری خودکار + هضم فنتون + جداسازی با $ZnCl_2$ یا روغن + μ -FTIR یا μ -Raman خودکار. این ترکیب تعادل خوبی بین هزینه، زمان و دقت ارائه می‌دهد.
- آزمایشگاه‌های پیشرفته و صنعتی (تحلیل عمیق، نانوپلاستیک‌ها و افزودنی‌ها): نمونه‌برداری خودکار با فیلتراسیون پیشرفته + هضم فنتون + جداسازی مغناطیسی یا سیکلون + SEM-EDS + Py-GC-MS/TGA-MS. این ترکیب گران‌قیمت و زمان‌بر است اما کامل‌ترین اطلاعات را ارائه می‌دهد و نیازمند اپراتورهای بسیار ماهر است.

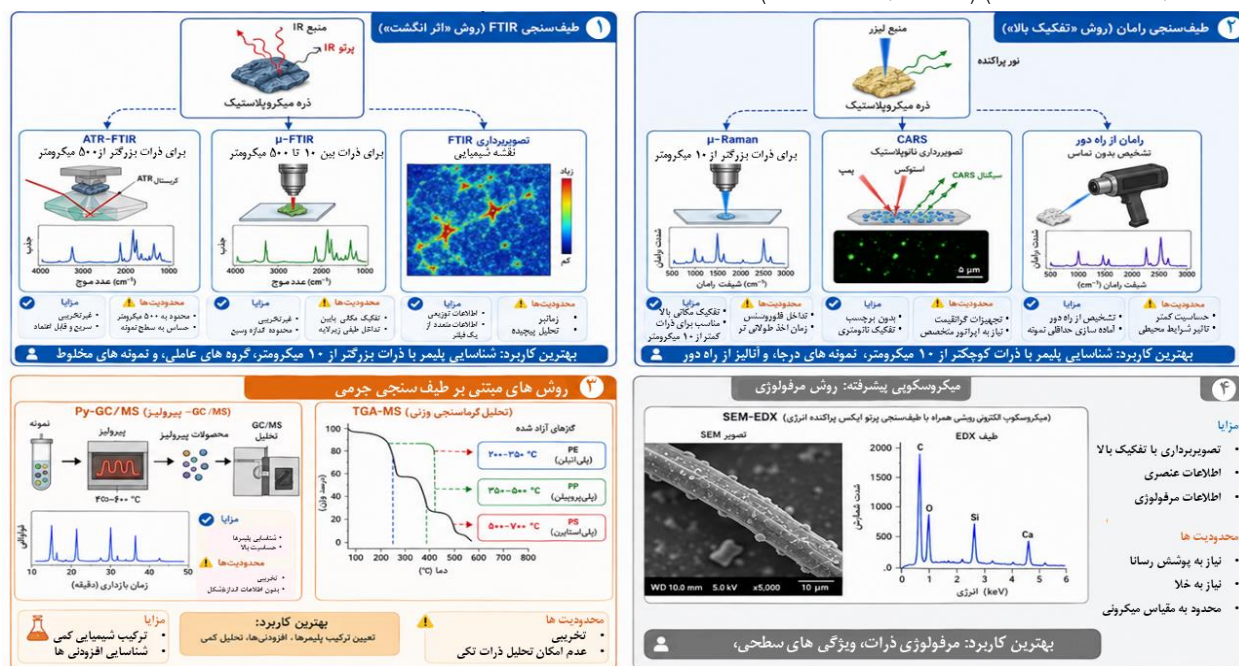
جدول ۴. مقایسه روش‌ها از نظر هزینه، زمان اجرا و سطح تخصص موردنیاز

مرحله	روش	هزینه (تجهیزات/مصرفی)	زمان اجرا (به‌ازای هر نمونه)	سطح تخصص موردنیاز
نمونه‌برداری	تور پلانکتون	کم	۱۵-۳۰ دقیقه	پایه
	نمونه‌برداری خودکار (پمپ + فیلتر درون خطی)	متوسط-بالا	۱-۴ ساعت (نمونه‌برداری مرکب)	متوسط
	مغزه‌گیر (برای رسوب و خاک)	کم	۲۰-۴۰ دقیقه	پایه
هضم مواد آلی	H_2O_2 (۳۰٪)	کم	۱-۲ ساعت (با حرارت)	پایه
	اکسیداسیون فنتون	متوسط	۳۰-۶۰ دقیقه	متوسط
	هضم آنزیمی (پروتاز/لیپاز)	بالا	۱۲-۲۴ ساعت (انکوباسیون)	متوسط
جداسازی فیزیکی	NaCl (چگالی 1.2 g/cm^3)	کم	۳۰-۶۰ دقیقه	پایه
	$ZnCl_2$ (چگالی $1.57-1.5 \text{ g/cm}^3$)	متوسط	۳۰-۶۰ دقیقه	متوسط
	سدیم پلی‌تنگستات	بالا	۳۰-۶۰ دقیقه	متوسط
	استخراج با روغن (روغن کرچک)	متوسط	۲۰-۴۰ دقیقه	متوسط
	جداسازی مغناطیسی	بالا	۱۰-۲۰ دقیقه	پیشرفته
شناسایی طیف‌سنجی	ATR-FTIR	کم-متوسط	۵-۱۰ دقیقه (به‌ازای هر ذره)	پایه-متوسط
	μ -FTIR تصویربرداری با FPA	بالا	۱-۴ ساعت (برای کل فیلتر)	متوسط-پیشرفته
	μ -Raman (نقشه‌برداری خودکار)	بالا	۲-۸ ساعت (برای کل فیلتر)	پیشرفته
طیف‌سنجی جرمی	Py-GC-MS	بسیار بالا	۱-۲ ساعت (به‌ازای هر نمونه)	پیشرفته
	TGA-MS	بالا-بسیار بالا	۳۰-۶۰ دقیقه	پیشرفته
	SEM-EDS	بسیار بالا	۳۰-۶۰ دقیقه (به‌ازای هر نمونه) + آماده‌سازی	پیشرفته
میکروسکوپی	Cryo-TEM و TEM	بسیار بالا	۱-۳ ساعت + آماده‌سازی بسیار زمان‌بر	پیشرفته

رنگ آمیزی و غربالگری	قرمز نیل + میکروسکوپ فلورسانس	کم-متوسط	۱۵-۳۰ دقیقه	پایه-متوسط
جداسازی نانو	میدان جریان-سیال نامتقارن (AF4)	بسیار بالا (< ۲۰۰ هزار دلار)	۶۰-۳۰ دقیقه	پیشرفته
شناسایی نانو	AFM-IR / nano-FTIR	بسیار بالا (< ۳۵۰ هزار دلار)	۲-۴ ساعت (برای یک ناحیه کوچک)	پیشرفته
شناسایی نانو	SP-ICP-MS	بسیار بالا (< ۲۵۰ هزار دلار)	۲۰-۱۰ دقیقه	پیشرفته

۴- کنترل کیفیت و تضمین کیفیت

کنترل کیفیت در تمام مراحل، از نمونه برداری تا شناسایی، برای صحت و قابلیت اطمینان داده‌ها ضروری است (Koelmans et al., 2019). بزرگترین چالش، آلودگی متقاطع است که بدون رعایت پروتکل‌های سخت‌گیرانه، به برآورد بیش از حد غلظت‌ها یا نتایج مثبت کاذب می‌انجامد (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Prata et al., 2020). ارزیابی کولمنز و همکاران (Koelmans et al., 2019) نشان داد میانگین امتیاز کیفیت ۵۰ مطالعه، ۸.۴۱ از ۱۸ بوده که بیانگر کیفیت پایین عمومی و نیاز به بهبود در کنترل‌های مثبت، شرایط هوای تمیز، آماده‌سازی آزمایشگاه، شناسایی پلیمر و تصفیه نمونه است (Koelmans et al., 2019). اقدامات پیشگیرانه شامل ظروف غیرپلاستیکی (شیشه‌ای یا فلزی)، پوشیدن لباس‌های پنبه‌ای، هودهای مجهز به فیلتر HEPA، ضد عفونی سطوح با اتانول و ثبت دقیق شرایط محیطی (دما، pH، شوری) است (Koelmans et al., 2019) (Brander et al., 2020) (Keenan Munno et al., 2023). تهیه حداقل سه نوع نمونه شاهد (خشک، مرطوب، و معرف) در هر سری آزمایش الزامی است و داده‌های آنها به عنوان ضریب تصحیح به کار می‌روند (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Keenan Munno et al., 2023). آزمایش‌های بازیابی (اسپایک) با استفاده از ذرات PE با چگالی پایین، PA، و PET در سه محدوده اندازه مختلف (۱۰۶-۲۵۰، ۲۵۰-۵۰۰ و ۵۰۰-۱۰۰۰ میکرومتر) نشان داد که مجموع بازیابی‌ها به ترتیب ۹۴٪، ۸۰٪ و ۹۲٪ بوده و با معیار توصیه‌شده توسط مؤسسه استاندارد آمریکا (حداقل ۸۰٪) مطابقت دارد (Dilara Hatiniglu et al., 2024) (Ana et al., 2018) (Brander et al., 2020).



شکل ۴. شناسایی و مشخصه‌یابی پلیمرهای موجود در میکروپلاستیک‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی مکمل. (۱) طیف‌سنجی FTIR، شامل ATR-FTIR، μ-FTIR و تصویربرداری FTIR، امکان شناسایی اثر انگشت شیمیایی بصورت غیرتخریبی و تعیین توزیع مکانی پلیمرها را در محدوده‌های مختلف اندازه ذرات فراهم می‌کند. (۲) طیف‌سنجی رامان، شامل μ-Raman، پراکندگی رامان ضد استوکس همدوس (CARS) و رامان از راه دور، امکان مشخصه‌یابی با قدرت تفکیک بالا برای ذرات کوچک و نانوپلاستیک‌ها و همچنین شناسایی درجا و از راه دور را فراهم می‌سازد. (۳) روش‌های تخریبی مبتنی بر طیف‌سنجی جرمی، شامل پیرولیز-کروماتوگرافی گازی/طیف‌سنجی جرمی و آنالیز گرمای-طیف‌سنجی جرمی، اطلاعات حساس و کمی درباره ترکیب پلیمرها و محصولات حاصل از تخریب حرارتی ارائه می‌دهند. (۴) میکروسکوپی پیشرفته با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با طیف‌سنجی پرتو ایکس با تفکیک انرژی، تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا از مرفولوژی ذرات را در کنار تعیین ترکیب عنصری آن‌ها فراهم می‌کند. این شکل، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای شاخص هر یک از این روش‌های تحلیلی را به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد.

۴-۱- تلاش‌های اخیر در استانداردسازی بین‌المللی روش‌های تحلیل میکروپلاستیک

در پاسخ به فقدان روش‌های یکپارچه، سازمان‌های بین‌المللی و نهادهای نظارتی در سال‌های اخیر گام‌های مهمی برای تدوین پروتکل‌های هماهنگ برداشته‌اند. این تلاش‌ها نقطه عطفی در افزایش قابلیت مقایسه‌پذیری داده‌های جهانی محسوب شود (Macarena Munoz et al., 2020). سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ISO) استاندارد ISO 24187:2023 را با عنوان «اصول تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی و مرتبط» منتشر کرده است که چارچوبی کلی برای نمونه‌برداری، آماده‌سازی و شناسایی ارائه می‌دهد و بر کنترل و تضمین کیفیت تأکید دارد (Principles., 2023). همچنین، استاندارد ISO 16094-2:2020 به‌طور ویژه به تحلیل میکروپلاستیک‌ها در آب‌های با چگالی کم (مانند آب آشامیدنی و آب‌های سطحی) با استفاده از طیف‌سنجی ارتعاشی FTIR و رامان می‌پردازد (ISO 16094., 2025). در ایالات متحده، آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA) گام‌های اولیه‌ای برای استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها در آب آشامیدنی برداشته و با بروزرسانی مداوم صفحه تحقیقاتی خود، آخرین دستاوردها و راهکارها را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (U.S. Environmental). در اروپا، کمیته اروپایی استانداردسازی (CEN) گزارش فنی ISO/TR 21960:2020 که به‌طور مشترک توسط ISO و CEN پذیرفته شده را به‌عنوان مرجعی جامع برای تحلیل میکروپلاستیک‌ها در ماتریس‌های مختلف منتشر کرده است (ISO/TR 21960). همچنین، سازمان ASTM International استاندارد ASTM D8401 را برای تعیین میکروپلاستیک‌ها در آب با طیف‌سنجی FTIR و رامان تدوین کرده که در بسیاری از آزمایشگاه‌های آمریکای شمالی کاربرد دارد (ASTM D8401., 2024). با وجود این پیشرفت‌ها، اکثر استانداردها همچنان بر میکروپلاستیک‌ها (با اندازه بزرگ‌تر از ۱ میکرومتر یا در برخی موارد بزرگ‌تر از ۱۰ میکرومتر) متمرکزند و چالش نانوپلاستیک‌ها (ذرات کوچک‌تر از ۱ میکرومتر) و نیز یکپارچه‌سازی روش‌های طیف‌سنجی جرمی مانند Py-GC-MS و TGA-MS با این پروتکل‌ها، همچنان شکافی جدی و نیازمند پژوهش بیشتر است (Manpreet kaur et al., 2025) (Primpke et al., 2020). با این حال، این حرکت جهانی به‌سمت استانداردسازی، نویدبخش افزایش مقایسه‌پذیری داده‌هاست و انتظار می‌رود در سال‌های آینده، استانداردهای بیشتری برای نانوپلاستیک‌ها و روش‌های ترکیبی تدوین شود.

۵- شناسایی و تعیین هویت پلیمری

پس از آماده‌سازی نمونه و جداسازی ذرات، مرحله شناسایی و تعیین هویت پلیمری آغاز می‌شود. این مرحله افزون بر مشخص کردن ماهیت شیمیایی ذرات، برای تایید پلیمری بودن آنها (به ویژه در روش‌های میکروسکوپی) و ارائه داده‌های معتبر از غلظت و نوع پلیمرها ضروری است (Koelmans et al., 2019). تکنیک‌های گوناگونی بر پایه اصول فیزیکی یا شیمیایی متفاوتی توسعه یافته‌اند که هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی برای کاربرد در ماتریس‌های محیطی پیچیده دارند (Ling Yang et al., 2024). انتخاب روش مناسب به عواملی مانند اندازه ذرات هدف، نوع نمونه، دقت مورد نیاز، ماهیت مخرب یا غیرمخرب بودن روش، هزینه و در دسترس بودن تجهیزات بستگی دارد (Ana et al., 2018). شکل ۴ انواع روش‌های شناسایی و تعیین هویت پلیمرهای میکروپلاستیک را نشان می‌دهد.

۵-۱- طیف‌سنجی FTIR

یکی از متداول‌ترین و قدرتمندترین تکنیک‌های غیرمخرب برای شناسایی شیمیایی میکروپلاستیک‌ها طیف‌سنجی FTIR است که بر اساس جذب انتخابی تابش مادون قرمز توسط پیوندهای شیمیایی درون مولکول‌ها عمل می‌کند (Koelmans et al., 2019) (Ling Yang et al., 2024). طیف حاصل، اثر انگشتی منحصر بفرد از هر پلیمر است و با مقایسه با پایگاه‌های داده طیفی، شناسایی ممکن می‌شود (Holler et al., 2007). سه رویکرد اصلی این روش شامل بازتاب کلی تضعیف شده^۱ (برای ذرات بزرگتر از ۵۰۰ میکرومتر)، میکرو^۲ (برای ذرات ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر)، و تصویربرداری^۳ (برای نقشه‌برداری شیمیایی سریع از سطح فیلترها) است (Li et al., 2025) (Conteroso et al., 2025) (Rathikannu et al., 2025) (Khoiriyah et al., 2026) (Samsu et al., 2024). از چالش‌های اصلی آن می‌توان به تداخل طیفی با مواد آلی باقیمانده، محدودیت در شناسایی ذرات تیره یا بسیار ریز (زیر ۱۰ میکرومتر) و نیاز به آماده‌سازی مناسب نمونه اشاره کرد (Koelmans et al., 2019) (Ling Yang et al., 2024). جدول ۵ مروری بر روش‌های مختلف FTIR شامل ATR-FTIR، FTIR، μ -FTIR در حالت‌های انتقال، بازتاب و بازتاب -انتشار و کاربرد آن‌ها در ماتریس‌های آب، رسوب، خاک، زیست‌توده، هوا و محصولات مصرفی مانند نمک و آب بطری شده را ارائه می‌دهد.

¹ ATR-FTIR

² μ -FTIR

³ FTIR-imaging

جدول ۵. شناسایی میکروپلاستیک‌ها با طیف سنجی FTIR

روش شناسایی	روش آماده‌سازی نمونه	پلیمرهای شناسایی شده	نمونه مورد مطالعه	مزایا / کاربردها	محدودیت‌ها / چالش‌ها	مرجع
p-FTIR + ارتابی + PCA ⁴	قرار دادن مستقیم روی بستر آلومینیومی	PBAT ^۱ , PE, PLA ^۲ , PS ^۳	میکروپلاستیک‌ها ی قدیمی (تحت UV و رطوبت)	شناسایی و کمی‌سازی تخریب نوری، غیرمخرب، سرعت بالا	نیاز به کتابخانه طیفی، محدودیت در ذرات زیر ۱۰ میکرومتر	(Conterosito et al)
FTIR (ATR)	الک، آسیاب، خشک کردن (خاک)، فیلتراسیون (آب)، شستشو (حشرات)، جداسازی دستی، کتابخانه طیفی	PE (۹۱.۳٪)، PP/PS PA (۱۵.۱٪)، PET (۹.۲٪)، PE, PP, PS (۶.۲٪) یا شاخص‌های CI ⁵ , HI ⁶ , (COI ⁷)	خاک، آب آبیاری، حشرات/ آب شیرین	شناسایی هم‌زمان در ماتریس‌های متنوع، ارزیابی CI/HI/COI	عدم شناسایی PE در برخی نمونه‌ها، تداخل با مواد آلی	(Rathikannu et al) (Campanale et al)
FTIR (ATR)	فیلتراسیون مستقیم	PET (غالب)، PE, PP, PS, PA, PU ^۸ , PLA	آب آشامیدنی بطری (۱۰ برند)	شناسایی سریع، عدم نیاز به استخراج پیچیده	عدم کمی‌سازی تعداد ذرات، محدودیت در ذرات زیر ۲۰ میکرومتر	(Khoiriyah et al)
FTIR (ATR) + میکروسکوپ استریو	اکسیداسیون با ۳۰٪ H ₂ O ₂ ، فیلتراسیون ۰/۴۵ میکرومتر	PE (۳۴/۶۲٪)، PP (۳۰/۷۷٪)، PET (۱۵/۳۸٪)، PES ^۹ (۳/۸۵٪)	نمک طعام (۲۱ برند، اندونزی)	شناسایی و شمارش هم‌زمان، برآورد مواجهه انسانی	عدم شناسایی ذرات زیر ۰.۴۵ میکرومتر، تخریب احتمالی توسط H ₂ O ₂	(Samsu et al)
p-FTIR + (انتقال) SEM-EDX ¹²	جمع‌آوری بر روی فیلتر سیلیکونی، آنالیز مستقیم بدون آماده‌سازی	PA (۲۲/۵٪)، PARA ^{۱۰} (۶۱/۶٪)، PET, PVC, PO ^{۱۱}	هوای داخلی (خانه‌ها و دفاتر)	حذف آماده‌سازی، کاهش تلفات ذرات، سرعت بالا، عدم آلودگی متقاطع	عدم چسبندگی ذرات روی سیلیکون، عدم کاربرد در محیط‌های دارای جریان هوا	(Li et al)
ATR-FTIR + NIR	الک مرطوب (> ۲ میلی‌متر)، کتابخانه طیفی داخلی (۵۲ پلاستیک تجاری منتخب)	LDPE, HDPE, PET, PP, PA, PS, NBR ^{۱۳} , CELL ^{۱۴} , PLA	لجن فاضلاب تصفیه‌شده (نیویورک)	مقایسه دو روش، شناسایی منابع آلودگی (بسته‌بندی و لیاف)	NIR قادر به شناسایی PS نیست، ATR-FTIR را با همبستگی بالا شناسایی نمی‌کند	(Circelli et al)
p-FTIR (ارتابی مستقیم)، میکرو ATR (انتقال)	جداسازی (۳۰٪) H ₂ O ₂ ، سدیم کلرید ۵/۳ مولار، چگالی با فیلتراسیون روی فیلتر نیتروسلولز (۵ میکرومتر)	PE, PP, PS, PA, PVC (استاندارد)، PE و PET (نمونه محیطی)	ماسه اسپایک‌شده EURO- (QCHARM)	استانداردسازی-μ FTIR، تایید بین‌آزمایشگاهی	PS در نمونه محیطی شناسایی نشد، نیاز به توسعه کتابخانه برای ذرات هوازده	(Rathore et al)

¹ Poly(butylene adipate-co-terephthalate)² Polylactic acid³ Polystyrene⁴ Principal Component Analysis⁵ Carbonyl Index⁶ Carbon-Oxygen Index⁷ Hydroxyl Index⁸ Polyurethane⁹ Polyethersulfone¹⁰ Polyarylamide¹¹ Polyolefin¹² Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDS)¹³ Nitrile butadiene rubber¹⁴ Cellulose

۵-۲- طیف‌سنجی رامان

طیف‌سنجی رامان روشی غیرمخرب، مکمل FTIR و مبتنی بر پراکندگی غیرکشسان نور (تغییر قطبش‌پذیری الکترونی) است که برای پلیمرهایی با باند ضعیف در مادون‌قرمز (مانند PE یا PP) بسیار کارآمد می‌باشد (Umurhan et al., 2025) (Anshari et al., 2025). قدرت تفکیک مکانی بالاتر آن، شناسایی ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرومتر و حتی نانوپلاستیک‌ها را ممکن می‌سازد. کاربردهای اصلی شامل μ -Raman با نقشه‌برداری نقطه‌به‌نقطه، پیش‌انتخاب بصری یا خودکار ذرات، ترکیب با رنگ‌آمیزی قرمز نیل برای غربالگری سریع، و روش‌های پیشرفته مانند CARS برای تصویربرداری درون‌سلولی و رامان از دور است (Erni-Cassola et al., 2017) (Cole et al., 2013) (Kappler et al., 2026) (Östmark et al., 2011) (Bremer et al., 2011) (Schymanski et al., 2018) (Elert et al., 2017) (al., 2026). محدودیت‌های اصلی شامل زمان بردن اسکن، حساسیت به فلورسانس زمینه و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت است (Umurhan et al., 2011). جدول ۶ مروری بر روش‌های مختلف طیف‌سنجی رامان برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۶. شناسایی میکروپلاستیک‌ها به روش طیف‌سنجی رامان

روش شناسایی	پلیمرهای شناسایی شده	نمونه مورد مطالعه	مزایا	محدودیت‌ها	مرجع
μ -Raman با نقشه‌برداری نقطه‌به‌نقطه	PE, PP, PS, PET, Nylon	نمونه‌های آب دریا	دقت بالا؛ عدم سوگیری در انتخاب ذرات؛ شناسایی دقیق طیفی	زمان بسیار طولانی (mm ² /ساعت ۳۸)؛ اسکن نقاط فاقد ذره؛ نیاز به تجهیزات پیشرفته	(Kappler et al)
μ -Raman با پیش‌انتخاب ذرات (بصری یا خودکار)	PE, PP, PS, PVC, PET	خاک اسپایک‌شده/آب معدنی بطری	شناسایی ترکیبات سطحی با گام ۱ میکرومتر، کیفیت بالا، زمان مناسب (mm ² /دقیقه ۵۶)	زمان بر (mm ² /ساعت ۱۵)، نیاز به اپراتور ماهر، وابستگی به نرم‌افزار	(Elert et al) (Schymanski et al)
μ -Raman با رنگ‌آمیزی قرمز نیل	PE, PP, PS, Nylon	آب سطحی Plymouth Bay	انتخاب خودکار ذرات فلورسنت، کاهش ذرات غیرپلاستیکی (> ۱۰٪ انتخاب)، زمان ~ (mm ² /دقیقه ۲)	تداخل فلورسانس رنگ، نیاز به مرحله سفیدگری نوری ^۱ ، رنگ‌شدن مواد آلی	(Erni-Cassola et al) (al)
روش‌های پیشرفته CARS و رامان از دور	اکریلیک کوپلیمر، PMMA ^۲ ، PS (ماده منفجره DNT)	ژئوپلانکتون / ذرات گوگرد، مواد منفجره	تشخیص نانوپلاستیک (تا ۸۰ نانومتر)، بدون از فلورسانس، تصویربرداری درون‌سلولی و دوربرد	تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت، سیگنال پس‌زمینه، نیاز به متخصص	(Cole et al) (Bremer et al) (Östmark et al)

¹ Photobleaching² Polymethyl methacrylate

۵-۳- کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنجی جرمی^۱ برای افزودنی‌ها

برای شناسایی و اندازه‌گیری افزودنی‌های آلی رها شده از میکروپلاستیک‌ها (نرم‌کننده‌ها، پایدارکننده‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات آتش‌نشان) کاربرد دارد. این روش با جداسازی مؤثر ترکیبات قبل از تحلیل جرمی، امکان تشخیص گونه‌های با غلظت بسیار پایین (نانوگرم بر لیتر) و حتی محصولات تخریب‌یافته شیمیایی را فراهم می‌کند. همچنین، ترکیب این روش با کروماتوگرافی ژل‌تراوایی (GPC) یا طیف‌سنجی جرمی با یونش و زمان پرواز با کمک ماتریس (MALDI-TOF)، امکان تعیین توزیع وزن مولکولی پلیمرهای محلول در آب را فراهم می‌کند (Tarring et al., 2024). محدودیت‌های اصلی شامل ماهیت مخرب، نیاز به دپلمیریزاسیون پیش‌از آنالیز، عدم ارائه اطلاعات درباره تعداد، اندازه و شکل ذرات، و هزینه‌بر بودن تجهیزات است (Wang et al., 2017) (Zhang et al., 2021). جدول ۷ خلاصه‌ای از کاربرد این روش در مطالعات مختلف، به همراه مزایا و محدودیت‌های آن، ارائه می‌دهد.

جدول ۷. استفاده از روش کروماتوگرافی مایع-طیف‌سنجی جرمی برای هویت‌شناسی میکروپلاستیک‌ها

پلیمرهای شناسایی شده	نمونه مورد مطالعه	محدودیت‌ها	مزایا	مرجع
PC, PET	لجن لندفیل ^۲ ، رسوبات دریایی، گردوغبار، نمک	مخرب، نیاز به دپلمیریزاسیون، عدم ارائه اطلاعات تعداد/اندازه/شکل/رنگ، گرانی	حساسیت بالا برای کمی‌سازی جرمی در ماتریس‌های پیچیده، تشخیص ذرات زیرمیکرونی	(Wang et al) (Zhang et al)
PA6 و PA66	گردوغبار، لجن، رسوبات، روده و آبشش ماهی	مخرب، محدود به پلیمر هدف، نیاز به حذف زمینه، خطر آلودگی از فیلترهای نایلونی	روش اختصاصی برای پلی‌آمیدها (تجزیه به ۶-آمینوکاپروئیک اسید و آدیپیک اسید)	(Peng et al)
PET	ذرات معلق هوا (PM _{2.5})	اندازه‌گیری جرمی (فقط PET)، عدم تعیین تعداد/مرفولوژی، احتمال هم‌پوشانی با منابع غیرپلاستیکی اسید ترفتالیک	تعیین غلظت جرمی PET در هوا، پایش مواجهه جوی	Patnana et al)

۵-۴- پیرولیز-کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی^۳

در روش Py-GC-MS (Juviya et al., 2024)، نمونه در دمای °C ۴۰۰-۶۰۰ پیرولیز شده و محصولات تجزیه توسط GC-MS شناسایی و کمی می‌شوند (Erik Dümichen et al., 2015). از مزایای آن می‌توان به عدم نیاز به آماده‌سازی پیچیده، شناسایی همه پلیمرها (حتی ذرات زیر ۲۰ میکرومتر)، کمی‌سازی دقیق جرمی و آنالیز همزمان چندین پلیمر اشاره کرد (Lykkemark et al., 2024). در مقابل، تخریب نمونه، عدم تشخیص شکل/اندازه ذرات، حساسیت به اثر ماتریس، هزینه بالا و نیاز به کنترل کیفیت دقیق از محدودیت‌های آن هستند (Lemée et al., 2026). کاربردهای موفق این روش در نمونه‌های آب، خاک، رسوب، فاضلاب، بیوتا و حتی خون انسان گزارش شده است (Brits et al., 2024). اگرچه Py-GC-MS به‌عنوان روشی دقیق و حساس برای کمی‌سازی جرمی میکروپلاستیک‌ها شناخته می‌شود (Erik Dümichen et al., 2015)، اما تحلیل انتقادی آن در نمونه‌های محیطی واقعی، چالش‌های عملی متعددی را آشکار می‌سازد. مهم‌ترین چالش این روش تداخل شدید ماتریس است. این تداخل در نمونه‌های غنی از مواد آلی (خاک، رسوبات آلی، بیوتا و لجن) بیشتر دیده می‌شود. مواد آلی طبیعی مانند لیگنین، سلولز، پروتئین‌ها و اسیدهای هیومیک در دمای پیرولیز تجزیه شده و محصولات فراری تولید می‌کنند که با نشانگرهای اختصاصی پلیمرها (منومر استایرن برای PS و کاپرولاکتام برای PA) در طیف جرمی همپوشانی دارند و به نتایج مثبت کاذب یا بیش برآورد غلظت می‌انجامد (Lykkemark et al., 2024). این مشکل تا حدی با کروماتوگرافی با رزولوشن بالا، استانداردهای داخلی نشان‌دار (مانند PS-d₈) و آنالیز موازی نمونه‌های شاهد اصلاح شده با ماتریس قابل رفع است، اما این اقدامات زمان و هزینه را به شدت افزایش می‌دهند (Lemée et al., 2026). دومین چالش مهم، وابستگی شدید به نوع پلیمر است. برای مثال، PET به دلیل داشتن مسیر پیرولیز چندمرحله‌ای (تشکیل حلقه‌های میانی و سپس شکست به وینیل بنزوئئات و اسید بنزوئیک)، تکرارپذیری پایین‌تری نسبت به پلیمرهای اولفینی (

¹ Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (LC-MS)

² Sludge Landfill

³ Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry

PE و PP دارد و انتخاب محصول نشانگر مناسب ($m/z=149$ یا 105) تأثیر مستقیمی بر دقت کمی‌سازی دارد (Erik Dümichen et al., 2015). سومین محدودیت عملی، جرم بسیار کم نمونه در هر تزریق (معمولاً ۰.۵-۲ میلی گرم) است که در نمونه‌های ناهمگن (مانند رسوبات دارای توزیع لکه‌ای میکروپلاستیک) به نمایندگی ناپذیری و خطای فاحش در برآورد غلظت می‌انجامد (Lykkemark et al., 2024). راهکارهایی مانند پیش‌تغلیظ نمونه یا آنالیز چندین زیرنمونه و محاسبه میانگین توصیه شده‌اند، اما خود زمان و هزینه را چند برابر می‌کنند. در نهایت، هزینه‌های بالای نگهداری و نیاز به کالیبراسیون مکرر با استانداردهای گران‌قیمت، این روش را برای پایش‌های گسترده و روزمره، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، غیرعملی ساخته است (Macarena Munoz et al.). جدول ۸ خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده با این روش را ارائه می‌دهد.

جدول ۸. استفاده از روش پیرولیز-کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی برای هویت‌شناسی میکروپلاستیک‌ها

پلیمرهای شناسایی شده	ماتریس نمونه	محدودیت‌ها	مزایا	مرجع
PE, PP, PS, PET, PVC, PA, PMMA, PU, PC, ...	آب، خاک، رسوب، فاضلاب و نمونه‌های ساحلی	تخریبی، عدم تعیین تعداد/اندازه/شکل، تداخل شدید در نمونه‌های آلی (همپوشانی محصولات پیرولیز لیگنین/پروتئین با نشانگرهای PS و PA)، چالش در کمی‌سازی PET (مسیر پیچیده)، جرم کم تزریق (نمایندگی ناپذیری)؛ گرانی و نیاز به QA/QC دقیق	حساسیت بالا، کمی‌سازی جرمی، مناسب برای ذرات ریز، آنالیز همزمان چند پلیمر	(Santos et al) Lykkemark et al)
PP, PS	فاضلاب	کاهش چشمگیر بازایی در نمونه‌های واقعی (تا ۴۰٪ کاهش)، تداخل ناشی از ترکیبات گوگردی و نیتروژنه در پساب صنعتی	امکان کمی‌سازی در ماتریس پیچیده، بررسی بازایی	Lykkemark et al (Liu et al)
PE, PP, PS, PET, PVC, ABS, SBR, PC, PU, N-6, N-66, PMMA	آب رودخانه و خاک	وابستگی شدید به انتخاب محصول نشانگر (مثلاً ۱۴۹ $m/z=$ در مقابل ۱۰۵) برای PET، نیاز به روش‌های آماری (PCA) برای تفکیک تداخلات	روش اعتبارسنجی شده، قابلیت پایش محیطی	(Lemée et al)

۵-۵- گرماسنجی-طیف‌سنجی جرمی^۱

در روش TGA-MS تغییرات جرم نمونه در دمای کنترل شده، هم‌زمان با شناسایی ترکیبات فرار آزاد شده توسط MS پایش می‌شود (Dang et al., 2024). این روش برای مطالعه تخریب حرارتی پلیمرها و شناسایی اجزای سازنده در نمونه‌های مرکب کاربرد دارد. از مزایای آن می‌توان به عدم نیاز به جداسازی دستی ذرات، مناسب بودن برای نمونه‌های حجیم، و قابلیت کمی‌سازی جرمی با حد تشخیص پایین (حدود ۷/۷ نانوگرم بر مترمکعب برای PS) اشاره کرد (Rosa Peñalver et al., 2021). در مقابل، همپوشانی طیفی ترکیبات فرار، عدم نمایندگی برای نمونه‌های ناهمگن (به دلیل جرم کم نمونه) و نیاز به روش‌های مکمل برای اطلاعات مرفولوژیک از محدودیت‌های روش می‌باشد.

۵-۶- روش‌های میکروسکوپی پیشرفته

SEM و TEM به‌عنوان روش‌های مکمل برای بررسی ریخت‌شناسی، اندازه و سطح ذرات، به‌ویژه در ابعاد نانومتری، استفاده می‌شوند (Joseph et al., 2018). SEM تصاویر با وضوح بالا از سطح و اطلاعات توپوگرافی ارائه می‌دهد و ترکیب آن با EDS امکان تحلیل عنصری (تشخیص فلزات سنگین جذب شده یا افزودنی‌های ساختاری مانند کربن، برم، تیتانیوم) را فراهم می‌کند (Wang et al., 2017). TEM نیز برای مشاهده ساختار داخلی و ضخامت ذرات بسیار ریز کاربرد دارد (Neumeister et al., 2014) (Chan et al., 2022). با این حال، این روش‌ها به‌تنهایی قادر به شناسایی شیمیایی پلیمرها نیستند و معمولاً با FTIR، رامان یا EDS ترکیب می‌شوند (Li et al., 2022). از محدودیت‌های آنها می‌توان به نیاز به آماده‌سازی تخصصی (خشک کردن، پوشش‌دهی، برش‌های بسیار نازک)، هزینه بالا و میدان دید محدود اشاره کرد. همچنین Cryo-SEM/TEM با حفظ نمونه در حالت مرطوب، برای بررسی ساختارهای زیستی و پوشش‌های آبی

¹ Thermal Gravimetric Analysis and Mass Spectrometry (TGA-MS)

ارزشمند است (Huber et al., 2023). جدول ۹ خلاصه‌ای از مطالعاتی را ارائه می‌دهد که از روش‌های میکروسکوپی پیشرفته برای ارزیابی میکروپلاستیک‌ها استفاده کرده‌اند.

جدول ۹. استفاده از روش‌های میکروسکوپی پیشرفته برای ارزیابی میکرو و نانو پلاستیک‌ها

روش شناسایی	نمونه مورد مطالعه	پلیمرهای قابل بررسی	محدودیت‌ها	مزایا	اطلاعات قابل استخراج	مرجع
SEM و SEM-EDS	آب، رسوبات، خاک، نمونه‌های دریایی، موجودات آبی و مواد غذایی	PS, PP, PE, PA, PVC, PET و پلیمرهای دارای رنگدانه/افزودنی	نیاز به خشک کردن و پوشش‌دهی (Au/Pt)، شمارش زمان‌بر، محدودیت در تشخیص عناصر سبک (H و C)، عدم شناسایی قطعی پلیمر به تنهایی	وضوح بالا، عمق میدان زیاد، ترکیب تصویربرداری با آنالیز عنصری، تفکیک از ذرات معدنی و زیستی	اندازه و توزیع اندازه، شکل، مورفولوژی سطح، زبری، ترک‌ها، حفره‌ها، شکستگی و آثار هوازدگی	(Huang et al) (Tirkey et al) (Wang et al)
SEM-Raman / SEM-SERS ¹	نمونه‌های استاندارد و ماتریس‌های مختلف محیطی	PS, PMMA و سایر پلیمرهای میکرو/نانوپلاستیکی	تجهیزات گران و پیچیده، تداخل فلورسانس، نیاز به بستر تقویت‌کننده (SERS) و تفسیر پیچیده	ترکیب وضوح مکانی SEM با گزینش - پذیری شیمیایی رامن، شناسایی ذرات منفرد زیرمیکرونی، کاهش شناسایی اشتباه	اندازه و مورفولوژی با SEM + اثرانگشت مولکولی با Raman/SERS	(Li et al)
TEM و Cryo-TEM	آب، مواد غذایی، نمونه‌های زیستی و سوسپانسیون‌های حاوی نانوپلاستیک	عمدتاً ذرات پلاستیکی زیرمیکرونی و نانوپلاستیک‌ها؛ مانند PS و PE	آماده‌سازی بسیار دشوار و زمان‌بر (نمونه نازک/شفاف)، میدان دید محدود، خروجی پایین، تجهیزات بسیار تخصصی و گران	وضوح بسیار بالاتر از SEM، مشاهده ساختار داخلی، اندازه‌گیری مستقیم، کاهش تغییرات در Cryo-TEM	اندازه، شکل، توزیع، اندازه، ساختار داخلی، ضخامت و مورفولوژی ذرات (حتی در حالت مرطوب با Cryo-TEM)	(Neumeister et al) (Chan et al) (Huber et al)
TEM همراه با EELS ²	نمونه‌های استاندارد و ماتریس‌های پیچیده پس از جداسازی	نانوپلاستیک‌ها و ذرات پلاستیکی زیرمیکرونی	نیازمند تجهیزات پیشرفته، تفسیر پیچیده طیف‌ها، امکان آسیب پرتویی، کاربرد محدود در پایش محیطی	وضوح فضایی بسیار بالا، اطلاعات شیمیایی دقیق (EELS)، مناسب برای ذرات بسیار کوچک و ساختارهای پیچیده	اندازه، مورفولوژی، ساختار داخلی و اطلاعات شیمیایی/الکترونیکی	(Biswas) (2025)
AFM-IR / nano-FTIR	نمونه‌های استاندارد نانوپلیمری، آب، سوسپانسیون‌های زیستی	PE, PP, PS, PET, PA, PVC (در ابعاد نانو)	تجهیزات بسیار گران (< ۳۵۰ هزار دلار)، زمان‌بر (چندین ساعت برای هر اسکن)، آماده‌سازی بسیار دشوار، نیاز به اپراتور فوق‌ماهر	قدرت تفکیک مکانی تا ۱۰ نانومتر، شناسایی شیمیایی و مورفولوژی هم‌زمان، مناسب برای نانوپلاستیک‌های منفرد	مورفولوژی (AFM) + FTIR (نانومقیاس) از سطح ذره (بدون برچسب‌گذاری)	(Manpreet et al) (Dazzi et al)

¹ Surface-Enhanced Raman Spectroscopy

² Electron Energy Loss Spectroscopy

۶- چالش‌های شناسایی و اندازه‌گیری میکروپلاستیک‌ها

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه روش‌های تحلیلی، همچنان موانع علمی، فنی، اقتصادی و روش‌شناختی متعددی پیش روی محققان قرار دارد که در چهار سطح کلی دسته‌بندی می‌گردند: الف) فقدان پروتکل استاندارد جهانی و ناهماهنگی روش‌ها: مهم‌ترین مانع، نبود پروتکل یکپارچه برای تمام مراحل (از نمونه‌برداری تا شناسایی) است که به تولید داده‌هایی با کیفیت‌های بسیار متفاوت و عدم مقایسه‌پذیری نتایج می‌انجامد (Lviva., 2021). ارزیابی کولمنز و همکاران از کیفیت ۵۰ مطالعه نشان داد میانگین امتیاز کیفیت از حداکثر ۱۸، تنها ۸.۴۱ بوده و تنها چهار مطالعه در همه معیارها امتیاز مثبت کسب کرده‌اند (Koelmans et al., 2019). اگرچه سازمان‌های بین‌المللی (مانند ISO با استانداردهای ISO 24187:2023 و ISO 16094-2:2020، EPA آمریکا و ASTM با استاندارد ASTM D8401) گام‌های موثری برداشته‌اند (ISO 16094., 2025)، اما این استانداردها هنوز جامع نیستند و حوزه‌هایی مانند نانوپلاستیک‌ها، روش‌های طیف‌سنجی Pr-GC-MS و TGA-MS و ماتریس‌های پیچیده بیولوژیکی و صنعتی را پوشش نمی‌دهند (Primpke et al., 2020). همچنین ناهماهنگی در روش‌های گزارش‌دهی کشورهای مختلف و تفاوت در واحدهای اندازه‌گیری (تعداد ذرات در واحد حجم یا جرم در مقابل غلظت جرمی) که در برخی از این استانداردها نیز به‌طور کامل رفع نشده است، همچنان یکی از موانع اصلی در ترسیم تصویر دقیق از آلودگی جهانی محسوب می‌شود (Macarena Munoz et al). ب) آلودگی متقاطع و چالش‌های کنترل کیفیت: حضور گسترده میکروپلاستیک‌ها در هوا، گردوغبار آزمایشگاه، آب مصرفی، تجهیزات و حتی لباس محققان، یکی از جدی‌ترین چالش‌هاست که بدون پروتکل‌های سخت‌گیرانه، به برآورد بیش از حد یا نتایج مثبت کاذب می‌انجامد (Prata et al., 2020). اقدامات پیشگیرانه‌ای مانند استفاده از ظروف غیرپلاستیکی، پوشیدن لباس‌های پنبه‌ای، انجام مراحل در هودهای مجهز به فیلتر HEPA و تهیه نمونه‌های شاهد (خشک، مرطوب و معرف) اگرچه موثرند، اما خطر آلودگی متقاطع به‌ویژه در نمونه‌برداری میدانی و آماده‌سازی اولیه همچنان وجود دارد و کنترل دقیق آن برای گزارش‌های قابل دفاع الزامی است (Koelmans et al., 2019). ج) چالش‌های عملی و اقتصادی روش‌های پیشرفته: همان‌طور که در بخش ۳-۴ و جدول ۴ اشاره شد، روش‌های پیشرفته مانند Py-GC-MS، μ -Raman، SEM-EDS نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه چندصد هزار دلاری، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بالا، و اپراتورهای بسیار ماهر دارند که آنها را برای بسیاری از آزمایشگاه‌های دانشگاهی و نظارتی در کشورهای در حال توسعه، غیرقابل دسترس می‌سازد (Macarena Munoz et al). در مقابل، روش‌های کم‌هزینه‌تر مانند ATR-FTIR یا رنگ‌آمیزی با قرمز نیل، اگرچه برای غربالگری اولیه مناسب‌اند، اما در شناسایی ذرات کوچک (زیر ۲۰ میکرومتر) و ارائه اطلاعات کمی دقیق (غلظت جرمی) ناتوانند (Koelmans et al., 2019). این شکاف میان دقت و هزینه، مانعی اساسی در تدوین پروتکل‌های نظارتی قابل اجرا در سطح جهانی است (Macarena Munoz et al). از سوی دیگر، تحلیل انتقادی روش‌های رایج نیز چالش‌های عملی را آشکار می‌سازد. روش فنتون با وجود کارایی بالا در حذف مواد آلی (تا ۹۷٪)، با محدودیت مقیاس‌پذیری (هزینه بالای معرف‌ها در حجم‌های زیاد)، تشکیل رسوبات هیدروکسید آهن (III) که ذرات ریز را به دام می‌اندازند، و وابستگی شدید به نسبت H_2O_2 به COD در نمونه‌های با ترکیب متغیر، برای کاربردهای صنعتی و پایش‌های گسترده دشوار است. همچنین، Py-GC-MS با وجود حساسیت بالا در تشخیص نانوذرات، در ماتریس‌های غنی از مواد آلی (خاک، رسوبات آلی، بیوتا و لجن) با تداخل شدید محصولات پیرولیز لیگنین و پروتئین با نشانگرهای پلیمرها (به‌ویژه PS و PA) مواجه است که نیازمند کروماتوگرافی با رزولوشن بالا و استانداردهای داخلی نشان‌دار است (Lykkemark et al., 2024). کمی‌سازی PET نیز به دلیل مسیر پیرولیز چندمرحله‌ای، تکرارپذیری پایین‌تری دارد و جرم ناچیز نمونه در هر تزریق (۲-۵ میلی گرم) در نمونه‌های ناهمگن، به خطای فاحش می‌انجامد (Lykkemark et al., 2024). د) چالش‌های ویژه نانوپلاستیک‌ها: نانوپلاستیک‌ها (ذرات کوچک‌تر از ۱ میکرومتر معمولاً ۱ تا ۱۰۰۰ نانومتر) به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا، توانایی جذب آلاینده‌ها، عبور مؤثر از غشای سلولی و ایجاد پاسخ‌های التهابی و اکسیداتیو از نظر سم‌شناختی بسیار خطرناک‌تر از میکروپلاستیک‌ها هستند (Manpreet kaur et al., 2025). با این حال، روش‌های استاندارد FTIR و رامان در ابعاد زیرمیکرونی با محدودیت پراش مواجه‌اند و نسبت سیگنال به نویز به شدت کاهش می‌یابد (Manpreet kaur et al., 2025). جداسازی چگالی نیز ناکارآمد است، زیرا حرکت براونی بر قانون استوکس غلبه کرده و بازیابی معمولاً به کمتر از ۳۰٪ می‌رسد (Gigault et al., 2018). روش‌های پیشرفته‌ای مانند AFM-IR و nano-FTIR (با قدرت تفکیک تا ۱۰ نانومتر)، CARS، SP-ICP-MS (محدود به پلیمرهای حاوی عناصر فلزی) و Py-GC-MS با تله‌های کرایوژنیک، نویدبخش هستند، اما هزینه فوق‌العاده بالا (بیش از ۳۵۰-۲۵۰ هزار دلار)، زمان‌بری طولانی، نیاز به اپراتورهای بسیار ماهر و فقدان استانداردهای مرجع نانومتری برای اکثر پلیمرها (به‌جز PS)، کاربرد گسترده آنها را در پایش‌های روزمره با مانع جدی مواجه کرده است (Gigault et al., 2018). همچنین، هضم شیمیایی قوی

(مانند KOH یا فنتون در دمای بالا) می‌تواند نانوپلاستیک‌ها را تخریب کند و به جای آن، هضم آنزیمی ملایم یا اولترافیلتراسیون توصیه می‌شود (Manpreet kaur et al., 2025).

۷- چشم‌اندازهای آینده و راهکارهای نوین

با وجود چالش‌های متعدد فنی، عملی و اقتصادی، افق‌های روشنی برای بهبود تحلیل میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها ترسیم شده است. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و رویکردهای میان‌رشته‌ای، کلید عبور از محدودیت‌های فعلی و دستیابی به داده‌های قابل اطمینان‌تر، سریع‌تر و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. در حوزه پردازش داده‌ها، الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری عمیق (مانند شبکه‌های عصبی کانولوشن و ماشین‌های بردار پشتیبان) برای شناسایی خودکار ذرات در تصاویر میکروسکوپی، طبقه‌بندی طیف‌های FTIR و رامان، و پردازش داده‌های طیف‌سنجی جرمی، می‌توانند دقت، سرعت و تکرارپذیری آنالیز را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. به‌تازگی، روش‌های یادگیری عمیق با ادغام طیف‌سنجی فروسرخ میانی و الگوریتم‌های پیشرفته، دقت ۹۵.۰۶٪ را برای شناسایی نوع پلیمر و ۹۵.۸۶٪ را برای تشخیص میکروپلاستیک به‌دست آورده‌اند که نه تنها خطای انسانی و وابستگی به اپراتور را کاهش می‌دهد بلکه تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها را در زمان کوتاه ممکن می‌سازد (Xinkang et al., 2005). با این حال، چالش‌های عملی این رویکرد شامل نیاز به مجموعه داده‌های آموزشی بزرگ و متنوع (که برای پلیمرهای نادر یا ذرات هوازده به‌سختی قابل تهیه هستند)، هزینه بالای محاسباتی برای آموزش مدل‌های عمیق، و عدم تفسیرپذیری برخی مدل‌ها همچنان پابرجاست و به تحقیقات بیشتری در زمینه یادگیری نیمه‌نظارتی و تولید داده‌های مصنوعی نیاز دارد. از سوی دیگر، طراحی و ساخت حسگرهای جدید مبتنی بر فناوری‌های نوری مانند طیف‌سنج‌های دستی FTIR و رامان، الکتروشیمیایی و ریزسیالاتی، امکان تشخیص سریع، حساس و کم‌هزینه میکروپلاستیک‌ها را به‌طور مستقیم در محیط‌های آبی، خاکی و هوایی فراهم می‌آورد. همچنین فناوری‌های نوین فیلتراسیون (مانند غشاهای نانولیفی و جاذب‌های مغناطیسی) و فرایندهای تصفیه پیشرفته، پتانسیل قابل توجهی برای حذف آن‌ها از محیط نشان داده‌اند. در حوزه روش‌های ترکیبی، ترکیب روش‌های تصویربرداری SEM/EDS، μ -FTIR یا μ -Raman با تحلیل‌های طیف‌سنجی جرمی Py-GC-MS یا LC-MS، امکان ارائه توصیفی جامع از آلودگی شامل اطلاعات مورفولوژی، شمارش ذرات، غلظت جرمی و شناسایی افزودنی‌ها را همزمان فراهم می‌آورد. هرچند این رویکرد با چالش‌های هماهنگ‌سازی مراحل آماده‌سازی و هزینه بسیار بالا همراه است. با توجه به اهمیت روزافزون نانوپلاستیک‌ها و محدودیت اساسی روش‌های استاندارد در ابعاد زیر ۱ میکرومتر، توسعه پروتکل‌های استاندارد برای نمونه‌برداری، استخراج و شناسایی این ذرات با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند AFM-IR، nano-FTIR، CARS، SP-ICP-MS و AF4 همراه با Py-GC-MS، یکی از اولویت‌های حیاتی تحقیقاتی آینده است. در نهایت، تدوین و اجرای پروتکل‌های استاندارد جهانی با همکاری سازمان‌های بین‌المللی (مانند ISO، OECD، UNEP و EPA)، نهادهای استاندارد ملی و شبکه‌های تحقیقاتی، گامی اساسی در جهت یکپارچه‌سازی روش‌ها، افزایش مقایسه‌پذیری داده‌ها و ایجاد پایگاه‌های داده معتبر جهانی است (Yang et al., 2021) (Issac et al.). در این راستا، گسترش استانداردهای موجود به حوزه نانوپلاستیک‌ها و روش‌های طیف‌سنجی جرمی، هماهنگ‌سازی روش‌های آماده‌سازی و کنترل کیفیت در سطح بین‌آزمایشگاهی، و تعریف معیارهای پذیرش روشن برای هر مرحله از تحلیل، از ارکان اصلی گزارش‌دهی هماهنگ و قابل اطمینان در آینده خواهد بود. همچنین، توسعه روش‌های آماده‌سازی با مواد شیمیایی کم‌خطرتر، انرژی مصرفی پایین‌تر و تولید پسماند کاهش‌یافته (مانند جداسازی الکترواستاتیک، استخراج با روغن‌های گیاهی و حلال‌های سبز) در راستای اصول شیمی سبز، گامی مؤثر در کاهش اثرات زیست‌محیطی فرایندهای تحلیلی است (Li et al., 2023). هم‌افزایی بین رشته‌های شیمی تحلیلی، علوم محیطی، مهندسی پلیمر، سم‌شناسی، پزشکی، علوم داده، اقتصاد و مهندسی مواد، برای پاسخ‌گویی به سوالات پیچیده در مورد سرنوشت، انتقال، اثرات زیست‌محیطی و سلامتی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها و نیز ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر، امری اجتناب‌ناپذیر است (Yang et al.). برای بهره‌مندی از راهنمای گام‌به‌گام انتخاب روش‌ها بر اساس نوع ماتریس، اندازه ذرات، هدف مطالعه و ملاحظات اقتصادی، کاربران می‌توانند به بخش ۳-۳ (شکل ۳ و جدول ۳) و جدول ۴ در این مقاله مراجعه کنند.

۸- نتیجه گیری

میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های فراگیر و پایداری، چالش‌های بی‌سابقه‌ای برای محیط‌های آبی، خاکی و هوایی و نیز سلامت انسان ایجاد کرده‌اند. تحلیل دقیق این ذرات، مستلزم به‌کارگیری زنجیره‌ای از روش‌های مکمل و دقیق در چهار گام اصلی نمونه‌برداری، آماده‌سازی، شناسایی و کمی‌سازی است. بررسی جامع مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه تنوع قابل‌توجهی از روش‌های تحلیلی در دسترس است، اما فقدان پروتکل استاندارد جهانی، چالش‌های آلودگی متقاطع، محدودیت روش‌های موجود در شناسایی نانوپلاستیک‌ها و نبود داده‌های کافی در مورد سرنوشت و سمیت این ذرات، همچنان موانع اصلی در مسیر ارزیابی دقیق ریسک هستند. با وجود این چالش‌ها، تلاش‌های اخیر سازمان‌های بین‌المللی مانند ISO، EPA و CEN در تدوین استانداردهای اولیه مانند ISO 24187:2023، ISO 16094-2:2020، ISO 21960:2020 و ASTM D8401 نویدبخش حرکت به سمت یکپارچه‌سازی روش‌ها و افزایش مقایسه‌پذیری داده‌های جهانی است. بر اساس یافته‌های این مقاله مروری، ۶ توصیه کلیدی و اولویت‌دار برای بهبود کیفیت مطالعات آینده، به‌ویژه برای محققان تازه‌کار، ارائه می‌شود:

(۱) استفاده از نمونه‌های شاهد و کنترل سخت‌گیرانه آلودگی در تمام مراحل: از ابتدایی‌ترین و حیاتی‌ترین اقدامات، تهیه همزمان نمونه‌های شاهد (خشک، مرطوب و معرف) در هر سری آزمایش است. تمام مراحل نمونه‌برداری و آماده‌سازی باید در هودهای مجهز به فیلتر HEPA، با استفاده از ظروف شیشه‌ای یا فلزی (به‌جای ظروف پلاستیکی) و پوشیدن لباس‌های پنبه‌ای انجام شود تا از آلودگی متقاطع جلوگیری گردد. داده‌های حاصل از نمونه‌های شاهد باید به‌عنوان ضریب تصحیح در محاسبات نهایی به‌کار روند. (۲) انجام آزمایش‌های بازیابی (اسپایک) با استفاده از پلیمرهای مختلف در چندین محدوده اندازه و در ماتریس‌های واقعی: آزمایش‌های بازیابی نباید صرفاً در نمونه‌های ساده یا خالص (مانند آب مقطر یا ماسه شسته‌شده) انجام شوند، زیرا این آزمایش‌ها نتایج خوش‌بینانه‌ای (بیش از ۹۰٪) ارائه می‌دهند که با عملکرد واقعی در نمونه‌های پیچیده محیطی (لجن فعال، خاک‌های رسی یا بیوتا) فاصله قابل‌توجهی دارد. پیشنهاد می‌شود از پلیمرهای مختلف (حداقل یک پلیمر کم‌چگال مانند PE، یک پلیمر با چگالی متوسط مانند PA و یک پلیمر سنگین مانند PET در سه محدوده اندازه (۲۵۰-۱۰۶، ۵۰۰-۲۵۰، ۱۰۰۰-۵۰۰ میکرومتر) استفاده شود و بازیابی حداقل ۸۰٪ به‌عنوان معیار پذیرش در نظر گرفته شود. (۳) انتخاب روش‌های نمونه‌برداری، آماده‌سازی و شناسایی بر اساس سه معیار اصلی شامل نوع ماتریس، محدوده اندازه ذرات هدف و هدف مطالعه: پژوهشگران تازه‌کار باید قبل از شروع کار، به‌کمک الگوریتم تصمیم‌گیری ارائه‌شده در بخش ۳-۳ (شکل ۳ و جدول ۳) و با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی (جدول ۴)، مناسب‌ترین ترکیب روش‌ها را برای نمونه خود انتخاب کنند. به‌عنوان مثال، برای مطالعات غربالگری اولیه در آب‌های سطحی با ذرات درشت‌تر از ۳۰۰ میکرومتر، استفاده از تور پلانکتون و ATR-FTIR کافی و مقرون‌به‌صرفه است، در حالی که برای آنالیز نانوپلاستیک‌ها در نمونه‌های بیولوژیکی، به روش‌های پیشرفته‌تری مانند AF4، AFM-IR یا Py-GC-MS با تله‌های کرایوژنیک نیاز است. (۴) رعایت اصول کنترل کیفیت و تضمین کیفیت در تمام مراحل و گزارش‌دهی شفاف آن‌ها: کنترل کیفیت نباید به یک مرحله خاص محدود شود، بلکه باید در تمام مراحل از نمونه‌برداری تا شناسایی نهایی جاری باشد. ثبت دقیق شرایط محیطی (دما، pH، شوری، عمق و زمان نمونه‌برداری)، استفاده از استانداردهای داخلی (به‌ویژه در روش‌های طیف‌سنجی جرمی)، کالیبراسیون منظم دستگاه‌ها، و گزارش‌دهی شفاف تمام اقدامات کنترل کیفیت در مقاله، الزامات اساسی برای افزایش قابلیت اعتماد و مقایسه‌پذیری داده‌ها است. (۵) توجه ویژه به چالش‌های نانوپلاستیک‌ها و استفاده از روش‌های ترکیبی مناسب: با توجه به اهمیت روزافزون نانوپلاستیک‌ها و محدودیت اساسی روش‌های استاندارد FTIR و RAMAN در ابعاد زیر ۱ میکرومتر، محققانی که قصد ورود به این حوزه را دارند باید از روش‌های پیشرفته‌تری مانند AFM-IR، CARS، SP-ICP-MS یا Py-GC-MS با تله‌های کرایوژنیک استفاده کنند. همچنین، ترکیب روش‌های تصویربرداری SEM/EDS یا μ -FTIR با روش‌های طیف‌سنجی جرمی Py-GC-MS یا LC-MS می‌تواند اطلاعات جامعی از مرفولوژی، تعداد، غلظت جرمی و افزودنی‌های ذرات ارائه دهد. (۶) به‌روز نگه‌داشتن روش‌ها و پروتکل‌ها با آخرین استانداردهای بین‌المللی: با توجه به سرعت بالای تدوین استانداردهای جدید توسط سازمان‌هایی مانند ISO، EPA و CEN، محققان باید به‌طور مستمر آخرین نسخه‌های استانداردها مانند ISO 24187:2023، ISO 16094-2:2020، ISO/TR 21960:2020 و ASTM D8401 را مطالعه و روش‌های خود را با آن‌ها هماهنگ کنند. همچنین، شرکت در برنامه‌های آزمون مهارت بین‌آزمایشگاهی و مقایسه نتایج با سایر آزمایشگاه‌ها، یکی از مؤثرترین راه‌ها برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها است. در نهایت، هم‌افزایی بین رشته‌های شیمی تحلیلی، علوم محیطی، مهندسی پلیمر، سم‌شناسی، علوم داده و اقتصاد، برای پاسخ‌گویی به سوالات پیچیده در مورد سرنوشت، انتقال، اثرات زیست‌محیطی و سلامتی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر، کلید اصلی موفقیت خواهد بود.

مراجع

- Ana B. Silva, A.S.B., Celine I.L. Justino, João P. da Costa, Armando C. Duarte, Teresa A.P. Rocha-Santos, Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review. *Analytica Chimica Acta*, 2018. 1017: p. 1-19.
- Anshari, R., et al., Raman and ATR-FTIR unmask crystallinity changes and carboxylate group and vinyl group accumulation in natural weathering polypropylene microplastics. *Sci Rep*, 2025. 15(1): p. 2518.
- ASTM D8401 Standard Test Method for Determination of Microplastics in Water Using Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy and Raman Spectroscopy, in ASTM International. 2024 :West Conshohocken, PA, USA.
- Bellamy, A., Y. Comeau, and D. Claveau-Mallet, Effects of Chemical Pretreatment on Natural Fibers Removal and Microplastics Integrity for Wastewater Characterization. *ACS ES T Water*, 2025. 5(6): p. 3025-3033.
- Biswas, R., State of the art detection methods of microplastics as marine litter: a mini review. *Discover Oceans*, 2025. 2.(١)
- Bogdanowicz, A .,et al., Cross-Contamination as a Problem in Collection and Analysis of Environmental Samples Containing Microplastics—A Review. *Sustainability*, 2021. 13.(٢١)
- Borrelle, S.B., Ringma, J., Law, K. L., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G. H., Hilleary, M. A .,Eriksen, M., Possingham, H. P., De Frond, H., Gerber, L. R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., & Rochman, C. M., Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science (New York, N.Y.)*, 2020 :(٦٥١٠)٣٦٩ .p. 1515–1518.
- Brander, S.M., et al., Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics Across Matrices. *Appl Spectrosc*, 2020. 74(9): p. 1099-1125.
- Bremer, M.T., et al .,Highly selective standoff detection and imaging of trace chemicals in a complex background using single-beam coherent anti-Stokes Raman scattering. *Applied Physics Letters*, 2011. 99.(١٠)
- Brits, M., et al., Quantitation of micro and nanoplastics in human blood by pyrolysis-gas chromatography–mass spectrometry. *Microplastics and Nanoplastics*, 2024. 4.(١)
- Bunt Sharma, S.M., Shikha Aery, Chahat Sharma, Ajeet Kaushik, Sandeep Kumar, Ganga Ram Chaudhary, Advanced tools and methodologies for identification, characterization, and quantification of micro/nano plastics in environmental matrices. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2026. 347.
- Campanale, C., et al., Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Assess the Degree of Alteration of Artificially Aged and Environmentally Weathered Microplastics. *Polymers (Basel)*, 2023. 15.(٤)
- Catarino, A.I., Thompson, R., Sanderson ,W., & Henry, T. B. , Development and optimization of a standard method for extraction of microplastics in mussels by enzyme digestion of soft tissues. *Environmental toxicology and chemistry*, 2017. 36(4): p. 947-951.
- Chan, K. and A. Zinchenko, Conversion of waste bottle PET to magnetic microparticles adsorbent for dye-simulated wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022. 10.(٣)
- Chang, K., Y. Ma, and Y. Han, Research Progress on Source Analysis, Ecological Effects, and Separation Technology of Soil Microplastics. *Microplastics*, 2025. 4.(٣)
- Circelli, L., et al., Comparison of ATR-FTIR and NIR spectroscopy for identification of microplastics in biosolids. *Sci Total Environ*, 2024. 916: p. 170215.
- Cole, M., et al., Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms. *Sci Rep*, 2014. 4: p. 4528.
- Cole, M., et al., Microplastic ingestion by zooplankton. *Environ Sci Technol*, 2013. 47(12): p. 6646-55.
- Conterosito, E., et al., mu-FTIR Reflectance Spectroscopy Coupled with Multivariate Analysis: A Rapid and Robust Method for Identifying the Extent of Photodegradation on Microplastics. *Anal Chem*, 2025. 97(6): p. 3263-3273.
- Dang, T.T., et al., Quantification of polystyrene microplastics in water, milk, and coffee using thermogravimetry coupled with Fourier transform infrared spectroscopy (TGA-FTIR). *Chemosphere*, 2024. 368: p. 143777.

- Dazzi, A. and C.B. Prater, AFM-IR: Technology and Applications in Nanoscale Infrared Spectroscopy and Chemical Imaging .Chem Rev, 2017. 117(7): p. 5146-5173.
- Dilara Hatinoglu, I.S., Oguzhan Altuntas, Ozan Karakurt, F. Dilek Sanin, Enhancing Microplastics Recovery from Complex Sludge Samples Using COD-Guided Pretreatment. Water Air Soil Pollut 2024. 235.(3-4)
- Elert, A.M., et al., Comparison of different methods for MP detection: What can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters? Environ Pollut 2021. 270, (Pt 2): p. 1256-1264.
- Elisa Blumenthal, P.O., Jerzy Mikosz, Pretreatment methods for the isolation of microplastics from wastewater and sludge samples: Part 1. GAZ WODA I TECHNIKA SANITARNA, 2025. 1(4): p. 23-29.
- Erik Dümichen, A.-K.B., Ulrike Braun, Claus G. Bannick, Kathrin Brand, Martin Jekel, Rainer Senz, Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method. Water Research : (10) 2020. 180, p. 451-457.
- Erni-Cassola, G., et al., Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 µm) in Environmental Samples. Environ Sci Technol, 2017. 51(23): p. 13641-13648.
- Fleurine Akoueson, C.C., Sébastien Monchy, Ika Paul-Pont, Périne Doyen, Alexandre Dehaut, Guillaume Duflos, Identification and quantification of plastic additives using pyrolysis-GC/MS: A review, 2021. 773(15): p. 145073.
- Gigault, J., et al., Current opinion: What is a nanoplastic? Environ Pollut, 2018. 235: p. 1030-1034.
- He, D., X. Zhang, and J. Hu, Methods for separating microplastics from complex solid matrices: Comparative analysis. Journal of Hazardous Materials, 2021. 409.
- Ho, D. and J. Masura, Dyeing to Know: Harmonizing Nile Red Staining Protocols for Microplastic Identification. Colorants, 2025. 4.(Y)
- Holler, J.S., D.A. & Crouch, Stanley, Principles of instrumental analysis. Cengage Learning, 2007. 6.
- Huang, Z., B. Hu, and H. Wang, Analytical methods for microplastics in the environment :a review. Environ Chem Lett, 2023. 21(1): p. 383-401.
- Huber, M.J., et al., Physicochemical characterization and quantification of nanoplastics :applicability, limitations and complementarity of batch and fractionation methods. Anal Bioanal Chem, 2023. 415(15): p. 3007-3031.
- Hurley, R.R., et al., Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. Environ Sci Technol, 2018. 52(13): p. 7409-7417.
- ISO 16094-2:2020 Water quality — Analysis of microplastics in water — Part 2: Vibrational spectroscopy methods for waters with low content of suspended solids including drinking water, in International Organization for Standardization (ISO). 2025: Geneva, Switzerland.
- ISO 24187:2023 Principles for the analysis of microplastics present in the environment, in International Organization for Standardization (ISO). 2023: Geneva, Switzerland.
- ISO/TR 21960:2020 Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies, in International Organization for Standardization (ISO). 2020: Geneva, Switzerland.
- Issac, M.N. and B. Kandasubramanian, Effect of microplastics in water and aquatic systems. Environ Sci Pollut Res Int, 2021. 28(16): p. 19544-19562.
- Ivleva, N.P., Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. Chemical reviews, 2021. 121(19): p. 11886-11936.
- Jan David, Z.S., Jiří Kučerík, Gabriele E Schaumann, Quantitative Analysis of Poly(ethylene terephthalate) Microplastics in Soil via Thermogravimetry-Mass Spectrometry. Analytical Chemistry, 2018. 90(15): p. 8793-8799.
- Joseph I. Goldstein , D.E.N., Joseph R. Michael , Nicholas W.M. Ritchie , John Henry J. Scott , David C. Joy, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 2018: springer.
- Juviya Mathew, R.P., Pouya Rezai, Satinder Kaur Brar, Microplastics in wastewaters: Pretreatment to detection trail. Journal of Water Process Engineering, 2024. 64.

- Kappler, A., et al., Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Anal Bioanal Chem*, 2016. 408(29): p. 8377-8391.
- Kauts, S., et al., Toxicological Profile of Polyethylene Terephthalate (PET) Microplastic in Ingested *Drosophila melanogaster* (Oregon R(+)) and Its Adverse Effect on Behavior and Development. *Toxics*, 2023. 1.(4)
- Keenan Munno, A.L.L., Elizabeth C. Minor, Andrew Gray, Kay Ho, Jeanne Hankett, Chih-Fen T Lee, Sebastian Primpke, Rachel E. McNeish, Charles S. Wong, Chelsea Rochman, Patterns of microparticles in blank samples: A study to inform best practices for microplastic analysis. *Chemosphere*, 2023. 333.
- Kershaw, P., Marine plastic debris and microplastics - global lessons and research to inspire action and guide policy change. 2016.
- Khoiriyah, S., et al., FTIR-Based Identification of Microplastics in Commercial Bottled Drinking Water. *BIO Web of Conferences*, 2026. 227.
- Koelmans, A.A., et al., Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Res*, 2019. 155: p. 410-422.
- Lee, H., et al., Pretreatment methods for monitoring microplastics in soil and freshwater sediment samples: A comprehensive review. *Sci Total Environ*, 2023. 871: p. 161718.
- Lemée, L., et al., Advancing microplastic analysis: Pyrolysis-GC–MS method development and validation for small polymer particles in complex environmental matrices. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2026. 22.
- Li, G., et al., Single-particle analysis of micro/nanoplastics by SEM-Raman technique. *Talanta*, 2022. 249: p. 123701.
- Li, R., et al., Direct μ -FTIR analysis of microplastics deposited on silicon in indoor air environments. *npj Emerging Contaminants*, 2025. 1.(1)
- Li, X., et al., Effects of chemical pretreatments on microplastic extraction in sewage sludge and their physicochemical characteristics. *Water Res*, 2020. 171: p. 115379.
- Li, Y., et al., Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ Health (Wash)*, 2023. 1(4): p. 249-257.
- Ling Yang, S.K., Xi Luo, Zhaoqing Wang, Microplastics in drinking water: A review on methods , occurrence, sources, and potential risks assessment. *Environmental Pollution*, 2024. 348.
- Liu, S., et al., Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *J Hazard Mater*, 2024. 469: p. 133855.
- Lykkemark, J., et al., Py-GC-MS analysis for microplastics: Unlocking matrix challenges and sample recovery when analyzing wastewater for polypropylene and polystyrene. *Water Res* : 261 . 264 , p. 122055.
- Macarena Munoz, J.G., David Ortiz, Diego Rodríguez-Llorente, , B.C. Zahara M. de Pedro, Gonzalo Vega, , and R.P.a.J.A.C. Patricia Domínguez, Microplastics in water: challenges in measurement and regulation, and a path towards mass-based metrics. *Environmental Science Water Research & Technology*, 2026. 12: p. 1648-1661.
- Maes, T., et al., A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Sci Rep*, 20 : 261 . 264 p. 44501.
- Manpreet Kaur, C.T.G., Sara J. Fraser-Miller, Sophie C Leterme, Melanie Macgregor, A physical chemistry lens on environmental nanoplastics analysis challenges. Part II: detection techniques–principles, limitations and future directions. *Environmental Science: Nano*, 2025. 13(6): p. 2585-2603.
- Nath, S.D., Subhasish, Technological System to Increase the Rate of Plastic Collections from Soil. 2025, *Handbook of Microplastic Pollution in the Environment*: Taylor & Francis.
- Neumeister, A., et al., Monophasic ligand-free alloy nanoparticle synthesis determinants during pulsed laser ablation of bulk alloy and consolidated microparticles in water. *Phys Chem Chem Phys*, 2014. 16(43): p. 23671-8.
- Östmark, H., Nordberg, M., & Carlsson, T. E., Stand-off detection of explosives particles by multispectral imaging Raman spectroscopy. *Applied optics*, 2011. 50(28): p. 5592–5599.

- Patnana, D.P. and B.P. Chandra, Determination of mass concentrations of airborne PET microplastics using liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). *Environmental Science: Atmospheres*, 2024. 4(12): p. 1352-1357.
- Payel Bandyopadhyay, A.H.U., Dibyendu Bandyopadhyay, Prabhat K. Singh, Detection of micro- and nanoplastics in biological systems, in *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2026, Elsevier.
- Peng, C., et al., Development and Application of a Mass Spectrometry Method for Quantifying Nylon Microplastics in Environment. *Anal Chem*, 2020. 92(20): p. 13930-13939.
- Prata, J.R., Vanessa & Da Costa, Joao & Mouneyrac, Catherine & Duarte, Armando & Rocha-Santos, Teresa, Contamination issues as a challenge in quality control and quality assurance in microplastics analytics. *Journal of Hazardous Materials*, 2020.
- Prata, J.R., Vanessa & Matos, João & Da Costa, Joao & Duarte, Armando & Rocha-Santos, Teresa, A new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT). *Science of The Total Environment*, 2019. 690.
- Pimpke, S., et al., Critical Assessment of Analytical Methods for the Harmonized and Cost-Efficient Analysis of Microplastics. *Appl Spectrosc*, 2020. 74(9): p. 1012-1047.
- Rathikannu, S., et al., FTIR based assessment of microplastic contamination in soil water and insect ecosystems reveals environmental and ecological risks. *Scientific Reports*, 2025. 15.(1)
- Rathore, C., et al., Standardization of micro-FTIR methods and applicability for the detection and identification of microplastics in environmental matrices. *Sci Total Environ*, 2023. 888: p. 164157.
- Rosa Peñalver, I.C.-G., Natalia Arroyo-Manzanares, José María Moreno, Ignacio López-García, Stella Moreno-Grau, Manuel Hernández Córdoba <Assessing the level of airborne polystyrene microplastics using thermogravimetry-mass spectrometry Results for an agricultural area..pdf>. *Science of The Total Environment*, 2021. 787: p. 147656.
- Sakali, A., et al., A new protocol to assess the microplastics in sewage sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 2021. 44.
- Samsu, D.D., Deswati & Syafrizayanti, Syafrizayanti & Putra, Adewirli & Suteja, Yulianto, Presence of microplastics contamination in table salt and estimated exposure in humans. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2024. 10(1): p. 1-20.
- San Sebastián Martínez, N., Fíguls Fernández, J., Font Segura, X., & Sánchez Ferrer, A, Pre-oxidation of an extremely polluted industrial wastewater by the Fenton's reagent. *Journal of hazardous materials*, 2003. 101(3): p. 315–322.
- Santos, L., et al., Analysis of microplastics in the environment: Identification and quantification of trace levels of common types of plastic polymers using pyrolysis-GC/MS. *MethodsX*, 2023. 10: p. 102143.
- Schwaferts, C., et al., Methods for the analysis of submicrometer- and nanoplastic particles in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019. 112: p. 52-65.
- Schymanski, D., et al., Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Res*, 2018. 129: p. 154-162.
- Shi, K., et al., Sampling and Sample Preparation Techniques for Micro- and Nanoplastics, in *Microplastics and Nanoplastics in the Environment*, N. Singh, T.R. Walker, and T. Hofmann, Editors. 2026, Royal Society of Chemistry. p. 0.
- Shim, W.J., et al., Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Mar Pollut Bull*, 2016. 113(1-2): p. 469-476.
- Tarring, E.C., et al., Water-soluble polymers: Emerging contaminants detected, separated and quantified by a novel GPC/MALDI-TOF method. *Environ Pollut*, 2024. 340(Pt 1): p. 122888.
- Tirkey, A. and L.S.B. Upadhyay, Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Mar Pollut Bull*, 2021. 170: p. 112604.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Microplastics Research. Available from
- Umurhan, Y., et al., Applications of Raman spectroscopy for microplastic detection and characterization: a comprehensive spectral reference. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2025. 32(50): p. 28630-28677.

- Wang, L., et al., A Simple Method for Quantifying Polycarbonate and Polyethylene Terephthalate Microplastics in Environmental Samples by Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology Letters*, 2017. 4(12): p. 530-534.
- Wang, Z.M., et al., SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Sci Total Environ*, 2017. 603-604: p. 616-626.
- Xianjin An, J.Y., Muhammad Adnan, Huicheng Fu, Yaqin Zhang, Wei Li, Lihui An, Unveiling the complex impact of microplastics on environmental health, ecosystems, and humans. *Journal of Environmental Management*, 2026. 401: p. 128744.
- Xie, L., et al., Machine learning advancements and strategies in microplastic and nanoplastic detection. *Environmental Science & Technology*, 2025. 59(18): p. 8885-8899.
- Xinkang Li, L.T., Ran Xu, Hongliang Duan, Baoqiong Li, Jingjing Guo A unified deep learning framework for infrared spectroscopy-based prediction of plastic recyclability, type classification, and microplastic identification. *Journal of Hazardous Materials*, 2005. 500.
- Xiong, Y., et al., Simultaneous separation of microplastics and emulsified oil droplets from water using magnetic nanoparticles :A balanced synergism between surface charge and magnetic responsiveness. *Chemical Engineering Journal*, 2026. 529.
- Yang, X., et al., Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body. *Sci Total Environ*, 2018. 645: p. 154025.
- Yuzhi Liu, S.C., Yu Gao, Intelligent technology-enabled comprehensive research on microplastics: Detection, fate, and ecological effects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2026. 14(3): p. 122269.
- Zeng, L.L., Long & Xiao, Jueyan & Zhou, Penghui & Han, Xiaoxiang & Shen, Bohao & Dai, Li. , Microplastics in the Environment: A Review Linking Pathways to Sustainable Separation Techniques. *Separations*, 2025. 12.(4)
- Zhang, X., et al., Stoichiometric synthesis of Fe/CaxO catalysts from tailored layered double hydroxide precursors for syngas production and tar removal in biomass gasification. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* :120-121, p. 371-378.
- Zhang ,Y., et al., Comparison of Detection Methods of Microplastics in Landfill Mineralized Refuse and Selection of Degradation Degree Indexes. *Environ Sci Technol*, 2021. 55(20): p. 13802-13811.
- Ziani, K., et al., Microplastics: A Real Global Threat for Environment and Food Safety: A State of the Art Review. *Nutrients*, 2023. 15.(9)