19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

میکروپلاستیک در خاک: منابع ، خطرات بالقوه و انتقال

مازیار رجبی[۱]، ذوالفقار آلاداغلو[۲*]

۱- دانشجوی دکتری گرایش شیمی و حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، گروه علوم و مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران* (z.aladaghlo@ut.ac.ir)

چکیده

میکروپلاستیک‌ها یک آلاینده نوظهور نگران کننده در خاک در سطح جهان به دلیل خطرات گسترده و بالقوه آن هستند. سیستم اکولوژیکی برخی از مسائل اساسی مانند رخداد، منبع و خطرات بالقوه میکروپلاستیک‌ها در خاک هنوز پاسخ کاملی نگرفتند. این مشکلات به دلیل فقدان تحلیل سیستماتیک و جامع در مورد میکروپلاستیک در خاک به وجود می‌آیند. بنابراین، ما به طور جامع وضعیت فعلی دانش درباره میکروپلاستیک‌ها در خاک را در مورد شناسایی، وقوع، منبع، و خطر بالقوه بررسی کردیم. بررسی ما این را نشان می‌دهد میکروپلاستیک‌ها در همه جا در ماتریس‌های خاک در سطح جهان وجود دارند. با این حال، پیشرفت تحقیقات میکروپلاستیک در خاک به دلیل ناسازگاری‌های فنی ذاتی و مشکلات در تجزیه و تحلیل ذرات در مواد پیچیده محدود شده است. سازگاری ویژگی‌ها و ترکیب میکروپلاستیک‌ها در محیط آبی و خاک نشان می‌دهند که ممکن است منابع مشترک و تبادل داشته باشند. منابع وسیع و متنوع میکروپلاستیک‌ها به طور مداوم خاک را پر می‌کنند که باعث تجمع میکروپلاستیک در خاک می‌شوند. تحقیقات محدود نشان داده است که ترکیب و برهمکنش میکروپلاستیک‌ها با مواد آلوده جذب شده ممکن است بر سلامت و عملکرد خاک و حتی حرکت در طول زنجیره غذایی تأثیر بگذارد.

کلید واژه: ، آلاینده نوظهور، میکروپلاستیک منابع میکروپلاستیک

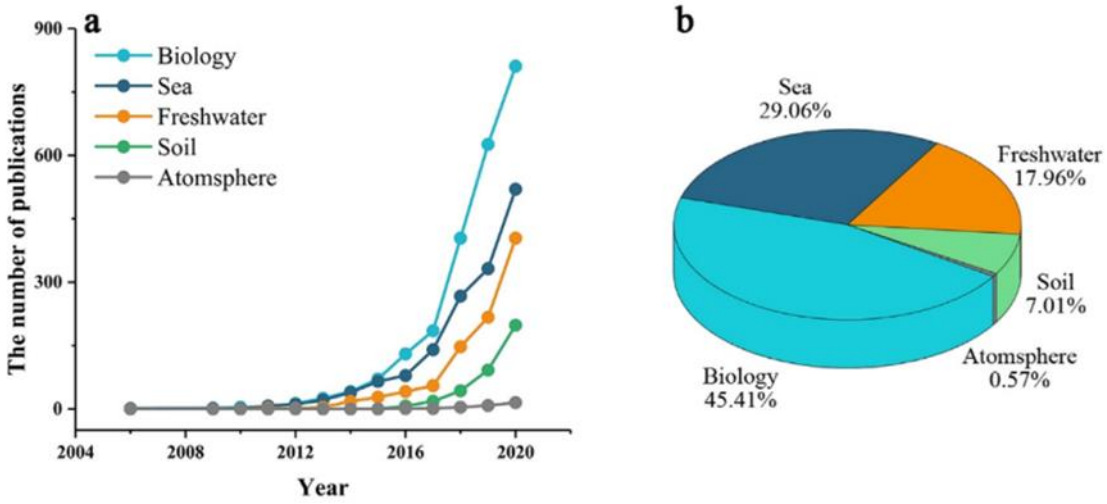
مقدمه

پلاستیک‌ها گروه مختلفی از مواد پلیمری مصنوعی هستند که تبدیل به یک نشانه معمولی از زباله‌های مصنوعی و آلودگی محیط زیست شده‌اند (Chenetal., 2020) . پلاستیک‌ها به عنوان یک ماده شیمیایی متفرقه، تطبیق پذیری، پایداری، سبک وزن و هزینه پایین تولید مواد طبیعی را تا حدی معین کاهش داده و آن‌ها را به یک ماده ضروری در زمینه‌های مختلف توسعه اجتماعی و اقتصادی می‌کند (BlasingandAmelung, 2018). تولید جهانی پلی اتیلن و پلی پروپیلن (متداول‌ترین میکروپلاستیک در خاک) با نرخ سالانه تقریباً ۷٪ (بین سال‌های ۱۹۵۰-۲۰۱۲) افزایش یافته است (Andrady, 2017) . تجمع سالانه میکرو پلاستیک‌ها و کاهش بازیافت سبب تجمع این مواد در بستر خاک می‌شود. بنابراین به تدریج، میکروپلاستیک را می‌توان در همه جا در مواد محیطی ازجمله در غذا، آب آشامیدنی و حتی بدن انسان یافت (Wangetal., 2021) میکروپلاستیک ها، ذرات پلاستیکی هستند که عموماً با اندازه کمتر از ۵ میلی متر تعریف می شوند (Akdogan and Guven, 2019) هنگامی که میکروپلاستیک‌ها در خاک انباشته می‌شوند، می‌توانند توسط گیاهان برداشته شوند و در طول زنجیره غذایی منتقل شوند(Guo et al., 2020)البته، این شامل آلاینده‌هایی که توسط میکروپلاستیک‌ها جذب می‌شوند نیز می‌شود. با این حال، منشأ و مسیرهای بالقوه ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک متنوع است که شامل استفاده از لجن فاضلاب، کمپوست(Zhang et al., 2020)،آبیاری، مالچ پلاستیکی ، ریختن زباله و همچنین رسوب اتمسفر می‌شود که خاک‌های شهری و کشاورزی به آلودگی میکروپلاستیک حساس‌تر هستند, به‌این دلیل که آن‌ها اغلب در معرض تماس با فعالیت‌های مصنوعی هستند که در نتیجه با راه‌های ورودی میکروپلاستیکی مواجه می‌شوند(Moller et al., 2020) . بنابراین، این مقاله بر دو

موضوع تمرکز دارد: (۱) ارائه یک موضوع عمیق ارزیابی روش‌های تحلیلی توسعه یافته و مورد استفاده در متون علمی برای نمونه برداری، استخراج، خالص سازی، شناسایی و خصوصیات میکروپلاستیک‌ها در بافت‌های محیطی و تاکید بر کاربرد آن‌ها برای تجزیه و تحلیل نمونه‌های خاک. هدف آن تعیین دقیق، حساس وکم هزینه است، که شامل روش پیش تصفیه و تجزیه و تحلیل نمونه می‌باشد (۲). توضیح دادنه وقوع، فراوانی، ویژگی ها (شکل، کسر اندازه، و رنگ) و پلیمر شناسایی میکروپلاستیک‌ها در خاک در مقیاس جهانی.

بازیابی متون

بازیابی ادبیات علمی با استفاده از رشته‌های جستجوی "میکروپلاستیک‌ها" در رابطه با "خاک"، "زمین" و "محیط زمینی". انتشارات فقط در صورتی تعیین و بازیابی می‌شوند که در یکی از سه دسته قرار گیرند: پایش میکروپلاستیک در محیط‌های خاک، نوآوری در روش‌شناسی تحلیلی و منابع و تعیین خطر بالقوه میکروپلاستیک‌ها در خاک. ادبیات مروری مرتبط با این مطالعات نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱. تعداد انتشارات در مورد آلودگی میکروپلاستیک در انواع مختلف بافت‌های محیطی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تعداد انتشارات در مورد آلودگی میکروپلاستیک در انواع مختلف بافت‌های محیطی. (a) افزایش تعداد انتشارات در مورد آلودگی میکروپلاستیک از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰؛ (b) درصد انتشارات در مورد آلودگی میکروپلاستیک در زیست شناسی، دریا، آب شیرین، خاک و جو در کل انتشارات بر اساس پایگاه داده (Web of Science).

روش‌شناسی تحلیلی

جمع‌آوری نمونه

با توجه به اینکه خاک یک بافت ناهمگن است به راحتی تحت تأثیر تعامل انسان قرار می‌گیردکه نمونه‌ها را می‌توان به صورت نمونه‌های تک‌محلی یا نمونه‌های مرکب جمع‌آوری کرد. با توجه به اینکه میکروپلاستیک‌ها به طور ناهمگن در خاک پراکنده هستند توصیه می‌شود در زمین‌های کشاورزی از عمق ۰تا ۳۰ نمونه برداری مرکب استفاده شود، Moller) .

(et al., 2020. وقتی که عمق آلودگی درک شود، نمونه برداری های طبقه ای باید انجام شود که با توجه به مشخصات خاک انجام می‌شود. اگر توزیع عمودی از میکروپلاستیک پس از کشت بررسی شود، عمق نمونه برداری باید با توجه به نوع کشت باشد(Blasing and Amelung, 2018).

.

آماده‌سازی نمونه

ذرات خاک می‌توانند خاکدانه‌های نسبتاً پایداری را تشکیل دهند که ممکن است ذرات میکروپلاستیک را بپوشاند وتجزیه وتحلیل را دشوار کند(Molleret al., 2020). به طور کلی، خلاصه پروتکل آماده‌سازی نمونه‌های خاک برای شناسایی میکروپلاستیک‌های خاک به شرح زیر است. ابتدا نمونه‌های خاک باید خشک شده و در صورت لزوم الک شوند. دوم، حذف مواد آلی مخلوط و متصل به ذرات میکروپلاستیک و حذف مواد آلی موجود در بافت خاک سوم، جداسازی ذرات میکروپلاستیک از بخش عمده ای از ماتریس نمونه، جداسازی چگالی متداول ترین استراتژی مورد استفاده است(Moller et al., 2020). در نهایت، میکروپلاستیک های بالقوه باید به صورت بصری در زیر میکروسکوپ تشخیص داده شوند و سپس توسط فروسرخ (FT-IR) و طیف سنجی رامان تأیید شود.

۱-خشک کردن و الک کردن نمونه

نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده معمولاً در دمای ۴ درجه سانتی گراد در آزمایشگاه نگهداری می‌شوند و به طور طبیعی قبل از تجزیه و تحلیل در هوا خشک می‌شود. استفاده از کوره حرارتی ممکن است سبب تغییر شکل یا شکستن میکرو-پلاستیک‌ها شود (Yang et al., 2021). حالت دمایی که نمونه در آن گرم و خشک می‌شود نباید بیشتر از ۵۰ درجه سانتی گراد شود. برای بازیابی میکروپلاستیک‌های یک اندازه خاص، نمونه خاک خشک شده در هوا معمولاً ابتدا از یک غربال فولادی ضد زنگ (۱ تا ۲ میلی متر) عبور داده می شود.(Wang et al., 2019). به صورتی که کلوخه‌ها خرد شود و بقایای گیاهی برداشته شود خاک پراکنده را می توان مستقیماً الک کرد.

۲-حذف مواد آلی

مواد آلی مانع از پراکنده شدن ذرات خاک شده بنابراین با اکسید هیدروژن (H_2O_2) مواد آلی را اکسید کرده و از محیط خارج می‌کنیم.

۳-استخراج میکروپلاستیک‌ها

میکروپلاستیک‌ها باید پس از خالص‌سازی از بافت خاک استخراج شوند. جداسازی براساس چگالی یک تکنیک رایج برای استخراج میکروپلاستیک‌ها در خاک است (Dioses-Salinas et al., 2020). متداول‌ترین محلول‌های مورد استفاده برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها عبارت است از آب مقطر (۱،۰ گرم بر سانتی متر مکعب) کلرید سدیم(NaCl) ۱،۲ گرم در سانتی متر مکعب، کلرید کلسیم($CaCl_2$) ۱،۵ گرم بر سانتی متر مکعب، کلرید روی($ZnCl_2$) ، ۱،۶ گرم بر سانتی متر مکعب

و یدید سدیم(NaI) ۱٫۸ گرم بر سانتی متر مکعب. از نظر تئوری، در میان آن‌ها، آب مقطر بی ضرر است و به راحتی به دست می‌آید، اما تنها می‌تواند چند نوع میکروپلاستیک را با چگالی کمتر از ۱٫۰ گرم بر سانتی متر مکعب جدا کند. NaCl همچنین به راحتی در دسترس، ارزان و غیر سمی است، و Na برای پراکندگی ذرات مفید است، اما برای میکروپلاستیک های با چگالی بالا مانند پلی استر (PET) و پلی وینیل کلراید(PVC) ، چگالی بسیار کمی دارد (Li et al., 2020). برای محلول های جداسازی با چگالی بالاتر، $ZnCl_2$ به طور گسترده ای استفاده می شود، اما محلول آبی آن خورنده و سمی است. چگالی محلول های NaI به اندازه کافی زیاد است (۱٫۸ گرم بر سانتی متر مکعب)، با این حال، هزینه بر است. از منظر چگالی، هزینه و سازگاری با محیط زیست، $CaCl_2$ به نظر می‌رسد انتخاب خوبی برای جداسازی میکروپلاستیک باشد. Ca^{2+} می تواند بار منفی مولکول‌ها آلی را خنثی کند که باعث لخته شدن و چسبیدن مواد آلی به غشای فیلتر می‌شوند که در شمارش و شناسایی میکروپلاستیک‌ها اختلال ایجاد می‌کند(Scheurer and Bigalke, 2018) . اخیراً سدیم بروماید (NaBr) به عنوان یک معرف جداسازی غیر سمی، غیر خورنده و اقتصادی برای خاک ارزیابی شده است(Liu et al., 2019) . راه حل های جداسازی چگالی که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند، همگی محدودیت های خود را دارند. لی و همکاران(۲۰۱۹) تایید کردند که محلول نمکی مورد استفاده بر راندمان جداسازی، شکل و اندازه میکروپلاستیک‌های تأثیر می‌گذارد. محلول‌های نمکی با چگالی بالا (مانند NaI) می‌توانند الیاف کوچک میکروپلاستیک‌ها را به طور مؤثرتری جدا کنند. با این حال، پس از ارزیابی راندمان جداسازی چندین محلول رایج، همچنان کلرید سدیم را به عنوان محلول چگالی توصیه می کنند، زیرا PVC و PET فقط اهمیت بسیار محدودی در بخش بزرگ میکروپلاستیک نمونه ها دارند و باعث انحراف بیش از حد نتیجه نمی شود (Scheurer and Bigalke, 2018).

استراتژی جداسازی چند مرحله ای برای غلبه بر محدودیت های جداسازی، برای به دست آوردن اثر جدا بهتر استفاده می شود، همچنین از جداسازی ترکیبی NaCl و $ZnCl_2$ نیزاستفاده می شود. راه حل جداسازی مخلوط نیز با در نظر گرفتن کارایی استخراج و هزینه اقتصادی اجرا می شود. هان و همکاران (۲۰۱۹) از مخلوطی از محلول NaCl اشباع و NaI با نسبت حجمی ۱:۱ استفاده می کند که محلول فلوتاسیون با چگالی ۱٫۵۰ گرم بر سانتی متر مکعب را فراهم می کند که این محلول می تواند حداقل ۵ بار با فیلتر کردن مجدد استفاده شود. میکروپلاستیک‌ها معمولاً در خاکدانه‌ها کمپلکس می شوند. می‌توان از انواعی از روش هایی برای آزادسازی آنها استفاده کرد که شامل هم زدن، سانتریفیوژ، درمان اولتراسونیک، هوادهی و جریان مداوم است (Li et al., 2020). برخی از روش‌های تازه توسعه‌یافته نیز مزایایی را در جداسازی و استخراج میکروپلاستیک‌ها نشان می‌دهند. خاصیت لیپوفیلیک پلیمر، روشی جایگزین برای جداسازی میکروپلاستیک‌ها فراهم می‌کند(Yang et al., 2021) . خاصیت چربی دوست پلیمر، یک روش جایگزین برای جداسازی میکروپلاستیک ها فراهم می کند. روغن کانولا ، روغن کرچک(Mani et al., 2019) و روغن زیتون. برای جداسازی میکروپلاستیک ها استفاده شده است. این روش مستقل از نوع پلیمر است. با این حال، محدودیت هایی در استخراج ماکروپلاستیک با اندازه ذرات کوچک (کوچکتر از ۲۰۰ میکرومتر) نیز دارد.

شناسایی و توصیف میکروپلاستیک‌ها

پس از جداسازی و خالص سازی میکروپلاستیک‌ها از ماتریس محیطی، شناسایی و کمی سازی مورد نیاز است. استراتژی

رایج این است که ابتدا میکروپلاستیک‌ها را با میکروسکوپ شناسایی کرده و سپس برای شناسایی نوع پلیمر از روش‌های طیف‌سنجی و ترمودینامیکی مانند طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل (FTIR) یا طیف‌سنجی‌های رامان و کروماتوگرافی گازی پیرولیز – طیف‌سنجی جرمی استفاده می‌شوند (He et al., 2018) میکروسکوپ های نوری، به ویژه استریومیکروسکوپ ها، تجهیزات مهمی برای ثبت خواص فیزیکی میکروپلاستیک ها هستند. ویژگی های مورفولوژیکی (مانند رنگ، شکل، و بافت سطح) مبنای اولیه برای تعیین میکروپلاستیک بودن ذرات هستند (Wang et al., 2020) معیارهایی را برای قضاوت در مورد میکروپلاستیک‌ها مطرح کرد.

نتیجه‌گیری

پلاستیک یک ماده ارزان و کاربردی است که به دلیل مقاومت بالا به تجزیه و بازیافت کم در طبیعت از جمله در خاک‌ها تجمع روز افزون دارد، که این افزایش سبب افزایش مقدار میکرو پلاستیک‌ها در خاک شده و خطر جذب توسط گیاه و وارد شدن به زنجیره غذایی بالا می رود . برای اطلاع از مقدار و شناسایی نمیکروپلاستیک‌ها در خاک پس از نمونه بردار و خالص سازی استخراج انجام می شود که برای خالص سازی پلیمر های با چگالی کم از آب مقطر و محلول کلرید سدیم و برای چگالیی های بالاتر از ۱,۲ ازکلیرید کلسیم، کلرید روی و یدید سدیم استفاده می‌شود. برای شناسایی نوع پلیمر ها استخراج شده از میکروسکوپ های نوری و طیف سنج های جرمی استفاده می‌شود.

فهرست منابع

Akdogan, Z., Guven, B., 2019. Microplastics in the environment: a critical review of current understanding and identification of future research needs. Environ. Pollut. 254,113011. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011.
Andrady, A.L., 2017. The plastic in microplastics: a review. Mar. Pollut. Bull. 119, 12–22. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5.
Blasing, M., Amelung, W., 2018. Plastics in soil: analytical methods and possible sources. Sci. Total Environ. 612, 422–435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086
Chen, Y., Leng, Y., Liu, X., Wang, J., 2020. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb
Dioses-Salinas, D.C., Pizarro-Ortega, C.I., De-la-Torre, G.E., 2020. A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: current knowledge and baseline considerations. Sci. Total Environ. 730,139164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139164.
Wuhan,central China. Environ. Pollut. 257, 113449. https://doi.org/10.1016/j. envpol.2019.113449.
He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Lei, L., 2018. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. Trac-Trend Anal. Chem. 109,163–172. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006
Wang, C., Zhao, J., Xing, B., 2021. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. J. Hazard. Mater. 407, 124357. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124357.
Guo, J., Huang, X.-P., Xiang, L., Wang, Y.-Z., Li, Y.-W., Li, H., Cai, Q.-Y., Mo, C.-H., Wong, M.H., 2020. Source, migration and toxicology of microplastics in soil. Environ. Int. 137, 105263. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263.

Zhang, S., Liu, X., Hao, X., Wang, J., Zhang, Y., 2020c. Distribution of low-densitymicroplastics in the mollisol farmlands of northeast China. Sci. Total Environ. 708, 135091. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135091.
Moller, J.N., Loder, M.G.J., Laforsch, C., 2020. Finding microplastics in soils: a review of analytical methods. Environ. Sci. Technol. 54, 2078–2090. https://doi.org/10.1021/acs. est.9b04618
Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., Wu, C., 2021. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. Sci. Total Environ, 146546 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546.
Liu, M., Song, Y., Lu, S., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Bigalke, M., Shi, H., He, D., 2019. A method for extracting soil microplastics through circulation of sodium bromide solutions. Sci. Total Environ. 691, 341347.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.144.
Li, J., Song, Y., Cai, Y., 2020b. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. Environ. Pollut. 257, 113570. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113570.

.

Microplastics in Soil: Sources, Potential Risks, and Transport

Maziar Rajabi[1], Zolfaghar Aladaghlo[2]*
1- PhD Student, Department of Soil Science, faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj 31587-77871, Islamic Republic of Iran

Abstract

Microplastics are an emerging and concerning pollutant in soil worldwide due to its widespread and potential hazards. Key ecological system issues such as the occurrence, sources, and potential risks of microplastics in soil remain incompletely answered. These problems arise primarily from the lack of a systematic and comprehensive analysis of microplastics in soil. Therefore, we comprehensively reviewed the current state of

knowledge on microplastics in soil, including their identification, occurrence, sources, and potential risks. Our review shows that microplastics exist ubiquitously in soil matrices around the world. However, progress in microplastic research in soil is limited by inherent technical inconsistencies and difficulties in analyzing particles in complex materials. The similarity in characteristics and composition of microplastics in aquatic and soil environments suggests possible common sources and exchanges. The broad and diverse sources of microplastics continuously fill the soil, leading to their accumulation. Limited research indicates that the composition and interaction of microplastics with adsorbed contaminants may impact soil health, function, and even migration through the food chain.

Keywords: Emerging pollutant, Microplastic, Sources of microplastic