

A Review of the Effects of Emerging Microplastic Pollutants on the Physical Properties of Agricultural Soils and Their Implications

Shayan Shariati^{1*}, Golshid Khamooshi¹ and Mohammad Hossein Mohammadi²

1- Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Alborz, Iran

* Corresponding author, Email: shayan_shariati@ut.ac.ir

Abstract

Microplastics are persistent and emerging pollutants that enter soils through residues of plastic mulch and coverings, sewage sludge, compost, wastewater, atmospheric deposition, and the fragmentation of agricultural plastic waste. By altering soil structure, pore networks, water and air movement, and aggregate stability, these particles may reduce the quality of agricultural soils. This review aimed to examine the sources, fate, and effects of microplastics on soil bulk density, porosity, hydraulic conductivity, water retention, wettability, aggregate stability, and erodibility. Findings from laboratory experiments, field studies, review articles, and meta-analyses were collected. Relevant literature was retrieved from *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *SID*, *Magiran*, and *Civilica*. Data were extracted and compared according to polymer type, particle shape and size, concentration, soil texture, experimental duration, and moisture conditions. The findings indicated that approximately 72% of plastic particles may become incorporated into soil aggregates, whereas 28% remain dispersed. On average, microplastics reduced soil bulk density by about 5.7–6%. Depending on soil type and particle characteristics, saturated hydraulic conductivity varied from a reduction of nearly 70% to an increase of 40%. In some soils, polypropylene decreased hydraulic conductivity by 69.79–95.79%, whereas polyester fibers reduced bulk density by 9% and increased aeration porosity by 34% in one soil. The contrasting responses among soils also indicate that laboratory results should be extrapolated to field conditions with caution and that long-term, standardized studies are required to assess future environmental risks. The effects of microplastics on soil physical properties are not uniform and depend on polymer type, particle shape, size, concentration, soil texture, and moisture conditions. Therefore, preventing microplastic entry into soil, reducing the use of agricultural plastics, and improving waste management are the most effective strategies for protecting the physical quality and long-term sustainability of agricultural soils.

Keywords: Aggregate stability, soil water retention curve, soil wettability, soil structure, saturated hydraulic conductivity, water retention.

مرور اثر آلاینده‌های نوظهور میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های زراعی و پیامدهای آن

شایان شریعتی^{۱*}، گل شید خاموشی^۱ و محمد حسین محمدی^۲

^۱ گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: shayan_shariati@ut.ac.ir

چکیده

میکروپلاستیک‌ها آلاینده‌های پایدار و نوظهوری هستند که از راه بقایای خاک‌پوش‌ها و پوشش‌های پلاستیکی، لجن فاضلاب، کمپوست، پساب، رسوب جوی و خردشدن پسماندهای کشاورزی وارد خاک می‌شوند. این ذرات با تغییر ساختمان خاک، شبکه منافذ، حرکت آب و هوا و پایداری خاکدانه‌ها می‌توانند کیفیت خاک‌های زراعی را کاهش دهند. این پژوهش با هدف بررسی منابع ورود، سرنوشت و اثر میکروپلاستیک‌ها بر چگالی ظاهری، تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع، نگهداشت آب، ترشوندگی، پایداری خاکدانه‌ها و فرسایش‌پذیری خاک انجام شد. در این مقاله مروری، نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی، میدانی، مقالات مروری و فراتحلیل‌های مرتبط گردآوری شد. منابع از پایگاه‌های Web of Science، Scopus، Magiran، SID، ScienceDirect، Google Scholar و Civilica انتخاب شدند. اطلاعات پژوهش‌ها بر اساس نوع پلیمر، شکل و اندازه ذرات، غلظت، بافت خاک، مدت آزمایش و شرایط رطوبتی استخراج، مقایسه و تحلیل شد. یافته‌ها نشان داد حدود ۷۲ درصد ذرات پلاستیکی در اجزای خاکدانه‌ای قرار می‌گیرند و ۲۸ درصد به صورت پراکنده باقی می‌مانند. میکروپلاستیک‌ها به‌طور میانگین چگالی ظاهری خاک را حدود ۵/۷ تا ۶ درصد کاهش دادند. هدایت هیدرولیکی اشباع، بسته به نوع خاک و ویژگی ذرات، از حدود ۷۰ درصد کاهش تا ۴۰ درصد افزایش متغیر بود. پلی‌پروپیلن در برخی خاک‌ها هدایت هیدرولیکی اشباع را ۶۹/۷۹ تا ۹۵/۷۹ درصد کاهش داد، درحالی‌که الیاف پلی‌استر در یک خاک، چگالی ظاهری را ۹ درصد کاهش داده و تخلخل تهویه‌ای را ۳۴ درصد افزایش داد. همچنین، تفاوت پاسخ خاک‌ها نشان داد که تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط مزرعه باید با احتیاط انجام شود و پژوهش‌های بلندمدت و استاندارد برای ارزیابی خطرهای محیطی آینده ضروری است. اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک یکنواخت نیست و به نوع پلیمر، شکل، اندازه، غلظت، بافت خاک و شرایط رطوبتی بستگی دارد. بنابراین، پیشگیری از ورود میکروپلاستیک‌ها، کاهش مصرف پلاستیک‌های کشاورزی و مدیریت مناسب پسماندها، مؤثرترین راهکارهای حفاظت از کیفیت خاک‌های زراعی هستند.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه، منحنی مشخصه رطوبتی، ترشوندگی خاک، ساختمان خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، نگهداشت آب.

کلیات و ضرورت موضوع

خاک به عنوان یکی از بنیادی‌ترین اجزای محیط زیست، بستر اصلی تولید غذا، تنظیم چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی، ذخیره و انتقال آب، تبادل گازها و حفظ تنوع زیستی به‌شمار می‌رود. پایداری عملکرد خاک‌های زراعی تا حد زیادی به حفظ کیفیت فیزیکی آن‌ها وابسته است؛ زیرا ویژگی‌هایی مانند ساختمان خاک، چگالی ظاهری، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، ظرفیت نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی اشباع، مسیر حرکت آب و هوا، توسعه ریشه، دسترسی گیاه به عناصر غذایی و مقاومت خاک در برابر تخریب را کنترل می‌کنند. از آنجا که تشکیل و احیای خاک در مقیاس زمانی زیست انسان فرآیندی بسیار کند است، هرگونه اختلال در کیفیت فیزیکی خاک می‌تواند پیامدهایی بلندمدت برای تولید کشاورزی، امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌های زراعی به همراه داشته باشد (FAO & ITPS, 2015; FAO & UNEP, 2021; Wang et al., 2022).

در دهه‌های اخیر، آلودگی خاک به واسطه ورود ترکیبات پایدار و آلاینده‌های نوظهور به یکی از چالش‌های جدی مدیریت منابع خاک تبدیل شده است. در میان این آلاینده‌ها، میکروپلاستیک‌ها به دلیل پایداری زیاد، اندازه کوچک، قابلیت جابه‌جایی در محیط و توانایی برهم‌کنش با اجزای معدنی، آلی و زیستی خاک، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند (Rillig, 2012; Horton et al., 2017; Bläsing & Amelung, 2018; Wang et al., 2022; En-Nejmy et al., 2024). سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۴ میکروپلاستیک‌ها را در میان ۱۰ آلاینده اصلی محیط‌زیست قرار داد و در سال ۲۰۱۶ آن‌ها به عنوان دومین چالش علمی زیست‌محیطی مطرح شدند. همچنین، در سال ۲۰۲۲، چین میکروپلاستیک‌ها را در فهرست آلاینده‌های نوظهور قرار داد (Abdolrahimi et al., 2025).

میکروپلاستیک‌ها عموماً به ذرات پلاستیکی کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر اطلاق می‌شوند که یا به صورت مستقیم در اندازه‌های ریز تولید می‌شوند یا در اثر خرد شدن، هوازدگی و فرسایش

پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط شکل می‌گیرند (Rillig, 2012; Frias & Nash, 2019; Hartmann et al., 2019; Chandel et al., 2025). اگرچه مطالعات اولیه درباره میکروپلاستیک‌ها عمدتاً بر محیط‌های دریایی و آب‌های سطحی متمرکز بود، اما امروزه روشن شده است که خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های کشاورزی، یکی از مهم‌ترین مخازن و مسیرهای انتقال این آلاینده‌ها در محیط‌های خشکی هستند (Rillig, 2012; Horton et al., 2017; En-Nejmy et al., 2024). خاک‌های زراعی به دلیل دریافت مداوم نهاده‌ها و تماس مستقیم با فعالیت‌های انسانی، در معرض ورود پیوسته میکروپلاستیک‌ها قرار دارند. استفاده گسترده از مالچ‌های پلاستیکی، پوشش‌های گلخانه‌ای، لوله‌ها و نوارهای آبیاری، بسته‌بندی کود و سم، کاربرد لجن فاضلاب، کمپوست‌های آلوده، آبیاری با پساب و رسوب جوی ذرات پلاستیکی از مهم‌ترین مسیرهای ورود میکروپلاستیک به اراضی کشاورزی محسوب می‌شوند (Bläsing & Amelung, 2018; FAO, 2021; Huang et al., 2020; Wu et al., 2024). این ذرات پس از ورود به خاک، می‌توانند در سطح خاک باقی بمانند، درون خاکدانه‌ها و منافذ خاک تجمع یابند، همراه با جریان آب و عملیات زراعی جابه‌جا شوند یا در اثر فعالیت موجودات خاکزی یا حرکت ترجیحی آب به لایه‌های عمیق‌تر منتقل گردند (Ren et al., 2021; Li et al., 2025). بنابراین، آلودگی میکروپلاستیکی خاک یک وضعیت ثابت نیست، بلکه فرآیندی پویا است که تحت تأثیر ویژگی‌های ذره آلاینده، ویژگی‌های خاک و شرایط مدیریتی مزرعه تغییر می‌کند. ویژگی فیزیکی خاک به شدت تحت تأثیر میکروپلاستیک‌ها قرار می‌گیرند. ذرات میکروپلاستیک می‌توانند با تغییر آرایش ذرات خاک، کاهش تماس میان اجزای معدنی و آلی، مسدود کردن منافذ، ایجاد فضاهای خالی جدید، تغییر پیوستگی منافذ و افزایش آب‌گریزی سطحی، عملکرد فیزیکی خاک را دگرگون کنند (de Souza Machado et al., 2018; Lozano et al., 2021b; Wang et al., 2022). به عنوان مثال، حضور ذرات پلاستیکی سبک ممکن است در برخی شرایط سبب

زراعی هنوز محدود است (Dehghani et al., 2017; Abbasi et al., 2021; Samadi et al., 2025).

این خلأ علمی ضرورت مرور دقیق مطالعات موجود و تحلیل سازوکارهای اثرگذاری میکروپلاستیک‌ها بر کیفیت فیزیکی خاک را دوچندان می‌کند. بر این اساس، مقاله مروری حاضر با هدف بررسی منابع ورود، سرنوشت و جابه‌جایی میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های زراعی، تبیین نقش نوع و ویژگی‌های ذرات پلیمر در رفتار آن‌ها، و تحلیل اثرات این آلاینده‌ها بر ویژگی فیزیکی خاک تدوین شده است. همچنین، با مرور مطالعات جهانی و داخلی، شکاف‌های پژوهشی موجود و جهت‌گیری‌های آینده برای مدیریت بهتر آلودگی میکروپلاستیکی در خاک‌های کشاورزی مورد بحث قرار می‌گیرد.

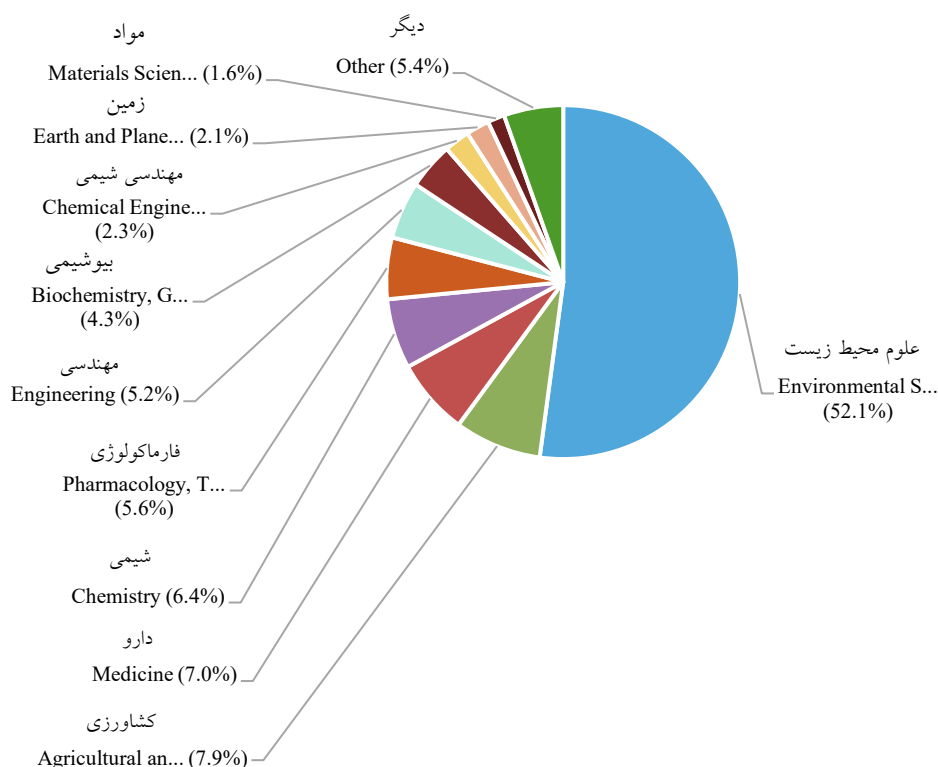
روش بررسی

این مقاله به بررسی نتایج موجود درباره اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌پردازد. برای این منظور، نتایج مطالعات آزمایشگاهی، پژوهش‌های میدانی، مقالات مروری و فراتحلیل‌های مرتبط با حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک و اثر آن‌ها بر شاخص‌هایی مانند چگالی ظاهری، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، ظرفیت نگهداری آب، هدایت هیدرولیکی اشباع، نفوذپذیری، آب‌گریزی و پایداری خاکدانه‌ها گردآوری و تحلیل شد. تمرکز اصلی مقاله بر خاک‌های کشاورزی و زراعی بود؛ با این حال، برخی مطالعات مربوط به خاک‌های شهری، صنعتی و طبیعی نیز در صورتی که به تبیین سازوکارهای فیزیکی اثر میکروپلاستیک‌ها کمک می‌کردند، مورد استفاده قرار گرفتند.

منابع مورد استفاده از پایگاه‌ها و ناشران علمی شامل Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, Web of Science, Taylor & Francis, MDPI, Frontiers و همچنین پایگاه‌های فارسی مانند SID, Civilica و Magiran گردآوری شدند. برای جست‌وجوی منابع، از ترکیب کلیدواژه‌هایی مانند soil, microplastic, soil porosity, bulk density, agricultural soil, physical properties

کاهش چگالی ظاهری خاک شود، درحالی‌که تجمع ذرات در منافذ می‌تواند تخلخل مؤثر و هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش دهد. در مقابل، برخی اشکال میکروپلاستیک مانند الیاف یا قطعات نامنظم ممکن است با ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان، باعث تغییر رفتار هیدرولیکی خاک شوند (Guo et al., 2022; Yu et al., 2023; Xie et al., 2024). از این نظر، اثر میکروپلاستیک پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند بر توزیع اندازه منافذ، ظرفیت نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی اشباع، نفوذپذیری، پایداری خاکدانه‌ها، آب‌گریزی و فرسایش‌پذیری خاک اثر بگذارند (Souza Machado et al., 2018; Maqbool et al., 2023; Mondol et al., 2025). با این حال، نتایج گزارش شده در مطالعات مختلف همواره یکسان نیست. بخشی از این ناهمخوانی به تفاوت در نوع پلیمر، شکل ذرات، اندازه و درصد میکروپلاستیک، مدت زمان تماس، بافت خاک، مقدار ماده آلی و شرایط رطوبتی مربوط می‌شود (Lozano et al., 2021b; Wang et al., 2022; Yu et al., 2025). به همین دلیل، یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، عبور از نگاه صرف به «میکروپلاستیک» و توجه دقیق‌تر و به ویژگی‌های ذره آلاینده و ویژگی‌های خاک در کنار یکدیگر است.

میکروپلاستیک‌ها را نباید صرفاً به‌عنوان ذرات آلاینده قابل شمارش در خاک در نظر گرفت، بلکه باید آن‌ها را عواملی بالقوه مؤثر بر کارکرد فیزیکی و پایداری خاک‌های کشاورزی دانست. با وجود رشد سریع مطالعات جهانی درباره میکروپلاستیک‌های خاک، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها همچنان در شرایط آزمایشگاهی، کوتاه‌مدت و با غلظت‌هایی بالاتر از شرایط واقعی مزرعه انجام شده‌اند. افزون بر این، در بسیاری از مطالعات، اثر هم‌زمان نوع پلیمر، شکل ذره، اندازه، غلظت و ویژگی‌های ذاتی خاک به‌طور کامل بررسی نشده است (Maqbool et al., 2023; Pan et al., 2024). در ایران نیز اگرچه حضور میکروپلاستیک‌ها در گردوغبار، خاک‌های شهری و صنعتی، رسوبات، مناطق خشک و برخی خاک‌های زراعی گزارش شده است، اما مطالعات اثرمحور درباره پیامدهای این ذرات بر ویژگی فیزیکی خاک‌های



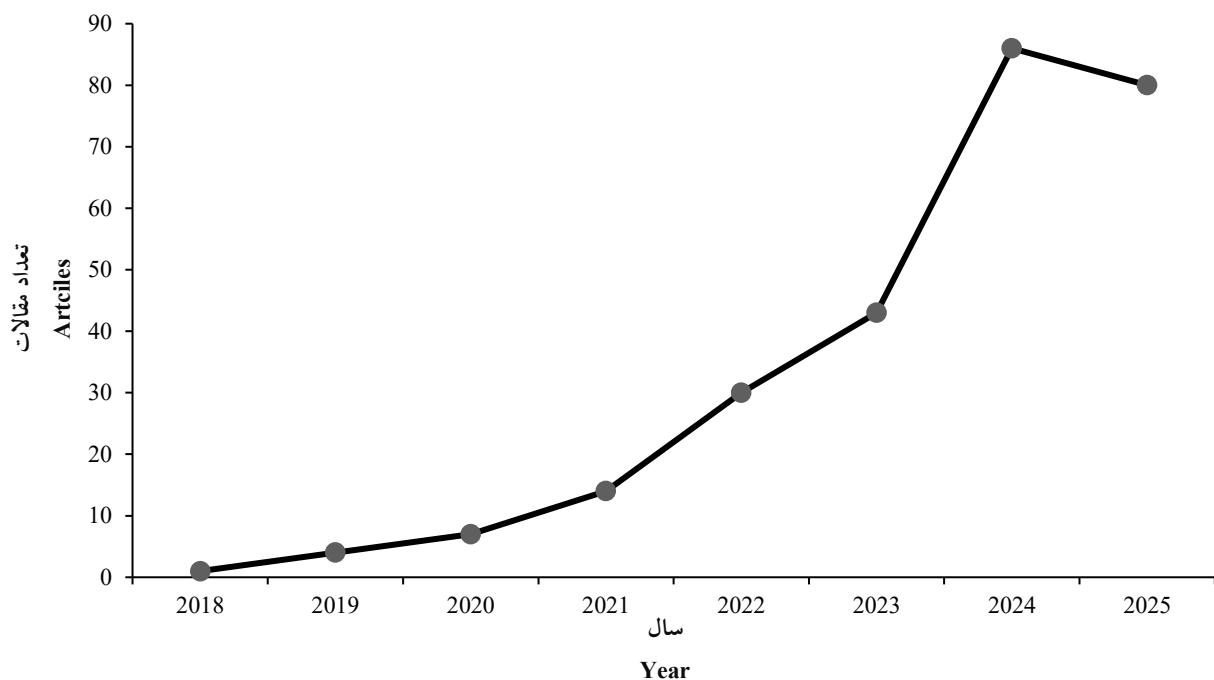
شکل ۱. توزیع حوزه‌های موضوعی مقالات مرتبط با اثر میکروپلاستیک‌ها در پایگاه Scopus

Fig 1. Distribution of the subject areas of articles related to the effects of microplastics indexed in the Scopus database

بیشتری گرفت، به طوری که تعداد مقالات در سال ۲۰۲۴ به حدود ۸۵-۸۶ مقاله و در سال ۲۰۲۵ به حدود ۸۰ مقاله رسید. مقدار ثبت شده برای سال ۲۰۲۶ حدود ۳۰ مقاله بود، اما به دلیل کامل نبودن سال، این عدد برای تفسیر روند کاهشی قابل اتکا نیست. در مجموع، در کل این بازه زمانی (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۶)، ۳۱۲ مقاله با جستجوی عبارت microplastic impact on soil physical properties (در عنوان، چکیده و کلیدواژه) در Scopus ثبت شده است. افزایش تعداد مقالات در سال‌های ۲۰۲۳، ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ بیانگر آن است که اثر میکروپلاستیک‌ها بر خاک از یک موضوع نوظهور به یکی از محورهای فعال در پژوهش‌های محیط‌زیستی و خاک‌شناسی تبدیل شده است (شکل ۲). همچنین، چین بیشترین سهم را در تولید اسناد این حوزه داشته و کشورهایی مانند هند، ایالات متحده، آلمان، استرالیا، پاکستان، انگلستان، هلند، ژاپن و مکزیک نیز در میان کشورهای فعال قرار گرفته‌اند (شکل ۳). در این تحلیل، ایران نیز در میان کشورهای دارای اسناد

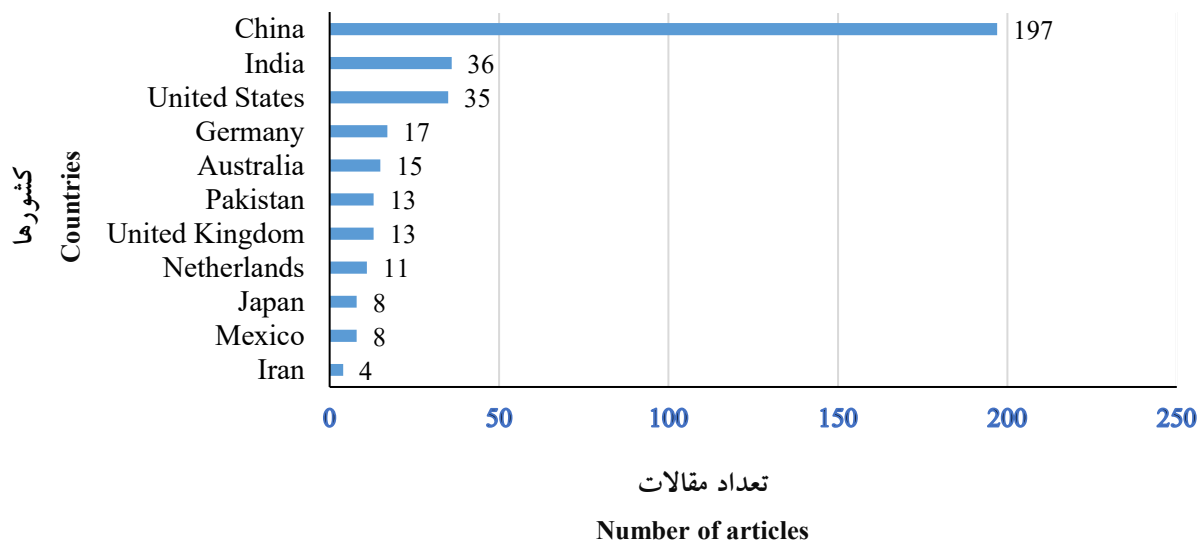
aggregate hydraulic conductivity, water retention, polyethylene, soil hydrophobicity, stability, polypropylene, PVC و polyethylene terephthalate استفاده شد (شکل ۱).

برای بررسی وضعیت جغرافیایی و روند پژوهش‌های مرتبط با اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، از بخش Analyze search results پایگاه Scopus استفاده شد. جست‌وجو با عبارت microplastic impact on soil physical properties در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۶ انجام گرفت. روند سالانه انتشار منابع، کشورهای فعال، نویسندگان پرتکرار، مؤسسات پژوهشی، حوزه‌های موضوعی، نوع مدارک و حامیان مالی بررسی شد. داده‌های Scopus نشان دادند که تعداد مقالات مرتبط با اثر میکروپلاستیک بر ویژگی‌های فیزیکی خاک از حدود ۲ مقاله در سال ۲۰۱۸ به حدود ۳۰ مقاله در سال ۲۰۲۲ و حدود ۴۳ مقاله در سال ۲۰۲۳ افزایش یافت. این روند در سال‌های اخیر شدت



شکل ۲. تغییرات سالانه تعداد مقالات منتشر شده در مورد اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در پایگاه Scopus

Fig 2. Annual changes in the number of articles published on the effects of microplastics on soil physical properties in the Scopus database



شکل ۳. توزیع تعداد مدارک علمی مرتبط با اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در پایگاه Scopus کشورهای مختلف

Fig 3. Distribution of scientific documents on the effects of microplastics on soil physical properties across different countries in the Scopus database.

چین، هند، ایالات متحده و آلمان بسیار کمتر بود. این موضوع بیانگر آن است که اگرچه پژوهش درباره میکروپلاستیک‌های

علمی مرتبط با اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های خاک قرار داشت؛ با این حال، سهم آن در مقایسه با کشورهای پیشرو مانند

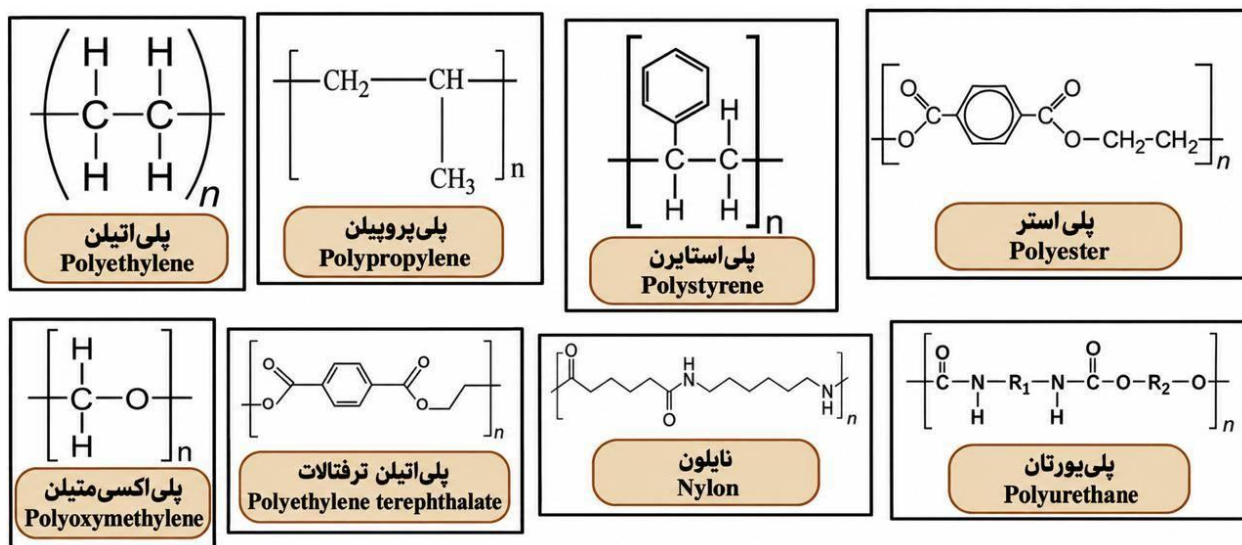
خاک در ایران آغاز شده، اما مطالعات اثرمحور درباره پیامدهای آن بر ویژگی فیزیکی خاک‌های زراعی هنوز محدود است. همچنین جستجو کلید واژه "تاثیر میکروپلاستیک بر ویژگی فیزیکی خاک" در پایگاه‌های ملی Magiran و SID نیز نشان داد در این رابطه کمتر از ده مطالعه در کشور انجام شده است. درمجموع مقایسه جایگاه ایران با کشورهای پیشرو بیانگر آن است که حجم مطالعات منتشرشده در این حوزه هنوز محدودتر است.

ساختار میکروویلاستیک ها

میکروپلاستیک‌ها از پلیمرهای آلی ساخته شده‌اند (شکل ۴). ساختار شیمیایی این پلیمرها بسیاری از ویژگی‌های محیطی آن‌ها را تعیین می‌کند. نوع زنجیره پلیمری، وجود گروه‌های عاملی، چگالی ظاهری، آب‌گریزی و پایداری شیمیایی از عواملی هستند که بر رفتار میکروپلاستیک در خاک اثر می‌گذارند. به همین دلیل، دو ذره با اندازه مشابه اما از دو پلیمر متفاوت ممکن است از نظر حرکت در خاک، نگهداشت آب، جذب آلاینده‌ها و اثر بر

موجودات زنده رفتار متفاوتی داشته باشند (Andrady, 2011; Wang et al., 2022) پلیمرهایی مانند پلی اتیلن^۲ و پلی پروپیلن^۳ عمدتاً از زنجیره‌های هیدروکربنی تشکیل شده‌اند. این پلیمرها معمولاً ماهیت آب‌گریز، چگالی ظاهری پایین و مقاومت نسبتاً بالایی در برابر تخریب دارند. همین ویژگی‌ها باعث می‌شود در بسیاری از محیط‌های خاکی، به‌ویژه خاک‌های کشاورزی و شهری، به وفور یافت شوند. پلی اتیلن به دلیل کاربرد گسترده در فیلم‌های مالچ، کیسه‌ها، پوشش‌های پلاستیکی و بسته‌بندی‌ها، از مهم‌ترین پلیمرهای مرتبط با خاک‌های کشاورزی به‌شمار می‌رود (Huang et al., 2020; En-Nejmy et al., 2024). در مقابل، پلیمرهایی مانند پلی اتیلن ترفتالات^۴، پلی وینیل کلراید^۵ و پلی آمید^۶ دارای گروه‌های عاملی متفاوتی هستند که می‌تواند بر قطبیت سطح، چگالی ظاهری، پایداری و توان جذب آلاینده‌ها اثر بگذارد. برای نمونه، وجود کلر در ساختار پلی وینیل کلراید و گروه‌های استری در پلی اتیلن ترفتالات باعث می‌شود رفتار این پلیمرها از پلیمرهای هیدروکربنی ساده متفاوت باشد (Hartmann et al., 2019; Wang et al., 2022; Wu et al., 2021a; Shariati et al., 2024). شکل ۴ تنوع ساختاری پلیمرهای رایج تشکیل‌دهنده میکروپلاستیک‌ها را نشان می‌دهد. تفاوت در آرایش زنجیره کربنی، وجود حلقه‌های آروماتیک و حضور اتم‌هایی مانند اکسیژن، نیتروژن یا کلر سبب می‌شود هر پلیمر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی متفاوتی داشته باشد. برای مثال، ساختار ساده و غیرقطبی پلی اتیلن و پلی پروپیلن موجب آب‌گریزی بیشتر آن‌ها می‌شود، درحالی‌که وجود گروه‌های استری، آمیدی یا اورتانی در پلیمرهایی مانند پلی اتیلن ترفتالات، نایلون و پلی اورتان می‌تواند ظرفیت برهم‌کنش آن‌ها با آب، ذرات رس، ماده آلی و آلاینده‌ها را افزایش دهد. بنابراین، شکل ۴ نشان می‌دهد که «نوع پلیمر» تنها یک طبقه‌بندی ساده نیست، بلکه یک عامل تعیین‌کننده در رفتار محیطی میکروپلاستیک‌ها در خاک است.

4- Polyethylene terephthalate



شکل ۴. نمای کلی از ساختار شیمیایی انواع پلیمرهای پلاستیک (Sharma & Vuppu, 2023).

Fig 4. Overview of the chemical structures of different types of plastic polymers (Sharma & Vuppu, 2023)

انواع میکروپلاستیک

(Hartmann et al., 2019; European Commission, 2023;)

از این منابع معمولاً کوچک، آماده انتقال و از نظر اندازه نسبتاً یکنواخت هستند و برای ورود به محیط نیازی به مرحله خرد شدن اولیه ندارند.

میکروپلاستیک‌های ثانویه بر اثر خردشدن، هوازدهی و فرسایش پلاستیک‌های بزرگ‌تر، به‌ویژه خاکپوش‌ها، پوشش‌های گلخانه‌ای، تجهیزات آبیاری و بسته‌بندی نهاده‌های کشاورزی، ایجاد می‌شوند. تابش فرابنفش، تغییرات دما و رطوبت، سایش مکانیکی و عملیات خاک‌ورزی، تجزیه این مواد به قطعات کوچک‌تر را تسریع می‌کنند (Andrady, 2011; Huang et al., 2020; FAO, 2021; Jansen et al., 2024). این فرآیندها با افزایش زبری، شکنندگی، گروه‌های عاملی و ظرفیت جذب آلاینده‌ها، رفتار و اثرگذاری ذرات را نیز تغییر می‌دهند (Wu et al., 2024; Li et al., 2025). میکروپلاستیک‌ها به‌شکل الیاف، ورقه، قطعه، گرانول، فوم و ذرات نامنظم در خاک حضور دارند و شکل آن‌ها نحوه استقرار، تماس با خاکدانه‌ها، حرکت در منافذ

میکروپلاستیک‌ها از نظر منشأ معمولاً به دو گروه اصلی، یعنی میکروپلاستیک‌های اولیه و ثانویه، تقسیم می‌شوند (شکل ۵). این تقسیم‌بندی از نظر مدیریت آلودگی و شناسایی مسیرهای ورود ذرات به خاک اهمیت دارد؛ زیرا کنترل منابع اولیه به محدودسازی تولید و مصرف مستقیم ذرات کوچک پلاستیکی وابسته است، درحالی‌که کنترل منابع ثانویه نیازمند کاهش مصرف، رهاسازی و خرد شدن پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط است (GESAMP, 2016; Frias & Nash, 2019). میکروپلاستیک‌های اولیه ذرات هستند که از ابتدا در اندازه‌های کوچک تولید می‌شوند. این ذرات می‌توانند در محصولات صنعتی، ساینده‌ها، رنگ‌ها، پوشش‌ها، مواد اولیه پلیمری، محصولات آرایشی و بهداشتی و برخی کاربردهای کشاورزی یا صنعتی به‌کار روند. اگرچه مصرف برخی ریزدانه‌های پلاستیکی در محصولات آرایشی در بسیاری از کشورها محدود شده است، اما ذرات اولیه همچنان می‌توانند از مسیرهایی مانند فاضلاب، پسماند صنعتی، گرانول‌های پلیمری و افزودنی‌های پلاستیکی وارد محیط و در نهایت وارد خاک شوند



شکل ۵. تقسیم‌بندی منشأ و محل انواع میکروپلاستیک‌های یافت شده در محیط زیست (Sharma et al., 2025)

Fig 5. Classification of the sources and locations of different types of microplastics found in the environment (Sharma et al., 2025)

و اثر بر ویژگی فیزیکی خاک را تعیین می‌کند (Hartmann et al., 2019; Lozano et al., 2021b; Yu et al., 2023). الیاف می‌توانند با ایجاد ساختاری شبکه‌ای، آرایش ذرات، چگالی ظاهری و پیوستگی منافذ را تغییر دهند (Lozano et al., 2021b; Ingraffia et al., 2022). درحالی‌که ورقه‌ها و قطعات نامنظم بیشتر از طریق انسداد منافذ و تغییر مسیر حرکت آب اثر می‌گذارند. گرانول‌های کوچک قابلیت بیشتری برای نفوذ عمقی دارند و فوم‌ها نیز به دلیل چگالی ظاهری پایین می‌توانند وزن مخصوص ظاهری و تهویه خاک را تغییر دهند (Huang et al., 2020; Qi et al., 2020; Lozano et al., 2021b; Ingraffia et al., 2022; Wang et al., 2022). ذرات کوچک‌تر به دلیل سطح ویژه بیشتر، توانایی بالاتری برای ورود به منافذ ریز و اتصال به رس و ماده آلی دارند؛ در مقابل، ذرات درشت‌تر بیشتر در سطح باقی می‌مانند و تحت تأثیر شخم، آبیاری، رواناب و فعالیت جانوران خاکری بازتوزیع می‌شوند (Ren et al., 2021; Li et al., 2025). بنابراین، اندازه و شکل ذرات باید در ارزیابی اثر آن‌ها بر ساختمان و عملکرد فیزیکی خاک در نظر گرفته شود (Lozano et al., 2025).

ساختار شیمیایی، چگالی ظاهری، آب‌گریزی و درجه هوازدهی پلیمرها نیز موجب تفاوت رفتار آن‌ها در خاک می‌شود (Hartmann et al., 2019; Wang et al., 2022; En-Nejmy et al., 2024). ترکیب پلیمرهای موجود در خاک‌های زراعی به نوع پلاستیک‌های مصرفی و مدیریت مزرعه وابسته است (Huang et al., 2020; FAO, 2021; Wu et al., 2024). پلیمرهای سبک ممکن است چگالی ظاهری را کاهش دهند، درحالی‌که پلیمرهای متراکم‌تر با تغییر استقرار ذرات در منافذ بر تخلخل مؤثر و حرکت آب اثر می‌گذارند (de Souza Machado et al., 2018; Wang et al., 2022). همچنین، آب‌گریزی پلیمرها می‌تواند ترشوندگی، هدایت هیدرولیکی اشباع و نگهداشت آب را کاهش دهد (Wang et al., 2022; Shafea et al., 2023) و زبری، سطح ویژه و بار سطحی آن‌ها، تثبیت در خاکدانه‌ها یا حرکت در منافذ را کنترل کند (Hartmann et al., 2019; Li et al., 2025). هوازدهی نیز با افزایش شکنندگی و سطح ویژه، رفتار ذرات را تغییر می‌دهد

منجر می‌شود (Dris et al., 2016; Allen et al., 2019; Brahney et al., 2020). مدیریت نامناسب پسماندهای شهری و نزدیکی اراضی کشاورزی به محل‌های دفن، انباشت یا رهاسازی زباله از دیگر عوامل تشدیدکننده آلودگی خاک به میکروپلاستیک‌ها به‌شمار می‌روند؛ زیرا این مناطق می‌توانند منبعی برای ورود تدریجی خرده‌پلاستیک‌ها، الیاف مصنوعی و سایر ذرات پلاستیکی به خاک باشند (Horton et al., 2017; Bläsing & Amelung, 2018). اگرچه میکروپلاستیک‌های اولیه، ممکن است در خاک مشاهده شوند، در خاک‌های کشاورزی معمولاً میکروپلاستیک‌های ثانویه حاصل از فرسایش و خردشدن پلاستیک‌های درشت، به‌ویژه بقایای خاک‌پوش‌ها و سایر مواد پلاستیکی مصرف‌شده در مزرعه، سهم بیشتری دارند (Frias & Nash, 2019; Hartmann et al., 2019). در نهایت، تنوع مسیرهای ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک نه تنها باعث پراکنش ناهمگون آن‌ها در مزرعه می‌شود، بلکه نوع پلیمر، شکل ذرات و الگوی رفتار آن‌ها در خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین شناخت این منابع، پیش‌نیاز ارزیابی دقیق اثرات بعدی میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک است (Huang et al., 2020; FAO, 2021).

سرنوشت میکروپلاستیک‌ها

پس از ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک، این ذرات ممکن است در سطح باقی بمانند، در منافذ و خاکدانه‌ها تثبیت شوند، به لایه‌های عمقی انتقال یابند، همراه رواناب و فرسایش جابه‌جا شوند یا بر اثر هوازدگی به ذرات ریزتر و نانوپلاستیک‌ها تبدیل گردند؛ بنابراین، خاک محیطی فعال برای نگهداشت، انتقال و تغییر شکل این آلاینده‌هاست (Rillig, 2012; Ren et al., 2021). اتصال ذرات به اجزای معدنی، ماده آلی و خاکدانه‌ها و به‌دام‌افتادن آن‌ها در منافذ، خاک‌های زراعی را به یکی از مخازن مهم میکروپلاستیک تبدیل کرده است (Nizzetto et al., 2016; Bläsing & Amelung, 2018; En-Nejmy et al., 2024). مطالعه‌ای در خاک‌های شهر اصفهان حضور میکروپلاستیک‌ها را

(Andrady, 2011; Wu et al., 2024). افزون بر این، آزادشدن نرم‌کننده‌ها (Shariati et al., 2022a) و سایر افزودنی‌ها یا جذب آلاینده‌ها می‌تواند پیامدهای شیمیایی و زیستی ایجاد کند (Campanale et al., 2020; Sajjad et al., 2022; Jansen et al., 2024). در مجموع، نوع پلیمر، شکل، اندازه و درجه هوازدگی از متغیرهای اصلی تفسیر اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی فیزیکی خاک هستند (Hartmann et al., 2019; Yu et al., 2023; Mondol et al., 2025).

منابع ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک

پلاستیک‌های مصرفی در مزرعه این مواد به دلیل جمع‌آوری ناکامل پس از برداشت، تحت تأثیر تابش فرابنفش، نوسانات دما و عملیات خاک‌ورزی خرد شده و در خاک انباشته می‌شوند (Steinmetz et al., 2016; Qi et al., 2020; Wu et al., 2024). فرسایش فیزیکی تجهیزات زیرساختی مانند لوله‌ها و نوارهای آبیاری قطره‌ای نیز به‌ویژه در سامانه‌های متراکم و گلخانه‌ای، سهم قابل ملاحظه‌ای در این آلودگی دارد (FAO, 2021; Jansen et al., 2024). همچنین، کاربرد لجن فاضلاب و کمپوست پسماندهای شهری به دلیل تکرارشونده و پنهان بودن، حجم عظیمی از ذرات پلاستیکی را وارد خاکهای زراعی می‌کند (Nizzetto et al., 2016; Corradini et al., 2019; van den Berg et al., 2020). آبیاری با پساب‌های تصفیه‌شده یا آب‌های سطحی آلوده نیز می‌تواند الیاف مصنوعی، ذرات حاصل از سایش لاستیک خودرو، گردوغبار شهری و خرده‌ذرات پلاستیکی را به‌طور مداوم وارد ناحیه ریشه کند. ورود مکرر این ذرات همراه با جریان آب آبیاری، می‌تواند الگوی پراکنش میکروپلاستیک‌ها را در خاک تغییر دهد و موجب تجمع آن‌ها در سطح خاک، اطراف ریشه یا در امتداد منافذ درشت شود (Panno et al., 2019; Huang et al., 2020; Li et al., 2025). در کنار این ورودی‌ها، رسوب جوی و انتقال ذرات ناشی از سایش لاستیک خودروها و فعالیت‌های صنعتی توسط باد، به پراکنش گسترده آلاینده‌ها در مناطق کشاورزی مجاور شهرها و راه‌های ارتباطی

در تمامی نمونه‌های بررسی شده نشان داد و فراوانی آن‌ها را بین ۱۷۸ تا ۸۶۳۵ ذره در کیلوگرم خاک گزارش کرد. ذرات شناسایی شده به شکل قطعه‌ای و فیبری بودند و پلیمرهای پلی‌اتیلن، پلی‌آمید، پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل کلراید نیز در برخی نمونه‌ها شناسایی شدند (Roghani and Shirvani, 2025). انتقال افقی عمدتاً از طریق رواناب، فرسایش بادی، عملیات زراعی و جابه‌جایی رسوبات رخ می‌دهد (Horton et al., 2017; Ren et al., 2025; Kang et al., 2021)، درحالی‌که انتقال عمقی به اندازه، شکل، چگالی ظاهری و ویژگی‌های سطحی ذرات وابسته است؛ ذرات کوچک‌تر آسان‌تر از منافذ عبور می‌کنند، اما الیاف و قطعات نامنظم ممکن است در خاک گیر بيفتند (Ren et al., 2021; Apte et al., 2024; Li et al., 2025). تلفت، رس، ماده آلی، رطوبت، پایداری خاکدانه‌ها، ترک‌ها و منافذ درشت نیز انتقال یا تثبیت ذرات را کنترل می‌کنند؛ به‌طوری‌که خاک‌های ریزبافت و غنی از ماده آلی معمولاً ذرات بیشتری نگه می‌دارند، درحالی‌که منافذ درشت و جریان ترجیحی انتقال عمقی را افزایش می‌دهند (Rillig et al., 2017; Wang et al., 2022; Li et al., 2025). در نتیجه، رفتار میکروپلاستیک‌ها حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های ذره و خاک است (Wu et al., 2024; Li et al., 2025). کرم‌های خاکی نیز از طریق بلع، دفع، ایجاد دالان و اختلاط خاک می‌توانند توزیع و انتقال عمقی ذرات را تغییر دهند (Rillig et al., 2017; Möhrke et al., 2022; Zhang et al., 2025a). افزون بر این، تابش فرابنفش، تغییرات دما و رطوبت، چرخه‌های خشک و تر شدن، سایش و فعالیت میکروبی موجب ترک‌خوردگی، افزایش زبری و کاهش مقاومت میکروپلاستیک‌ها می‌شوند (Andrady, 2025; Rostampour et al., 2011). خردشدن ذرات و افزایش سطح ویژه می‌تواند اتصال به ماده آلی، جذب آلاینده‌ها، ورود به منافذ ریز و اثر بر پیوستگی منافذ، ترشوندگی خاکدانه‌ها و حرکت آب را افزایش دهد (Hartmann et al., 2019; Wu et al., 2024; Li et al., 2025). ادامه این فرآیند ممکن است به تشکیل نانوپلاستیک‌هایی منجر شود که به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، توان بیشتری برای عبور از موانع فیزیکی و زیستی و

برهم‌کنش با رس، کلونیدهای آلی، ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌ها دارند (Li et al., 2020; Boctor et al., 2025). همچنین، ریشه گیاهان می‌تواند در نگهداشت و تجمع میکروپلاستیک‌ها در خاک، به‌ویژه در ناحیه ریشه، نقش داشته باشد. Li و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که بین مقدار میکروپلاستیک موجود در خاک و مقدار تجمع آن در ریشه‌های ظریف گیاه، رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد که بیانگر نقش ریشه در نگهداشت و تغییر الگوی توزیع این ذرات در خاک است (Vaezi and Golchin, 2025; Li et al., 2021).

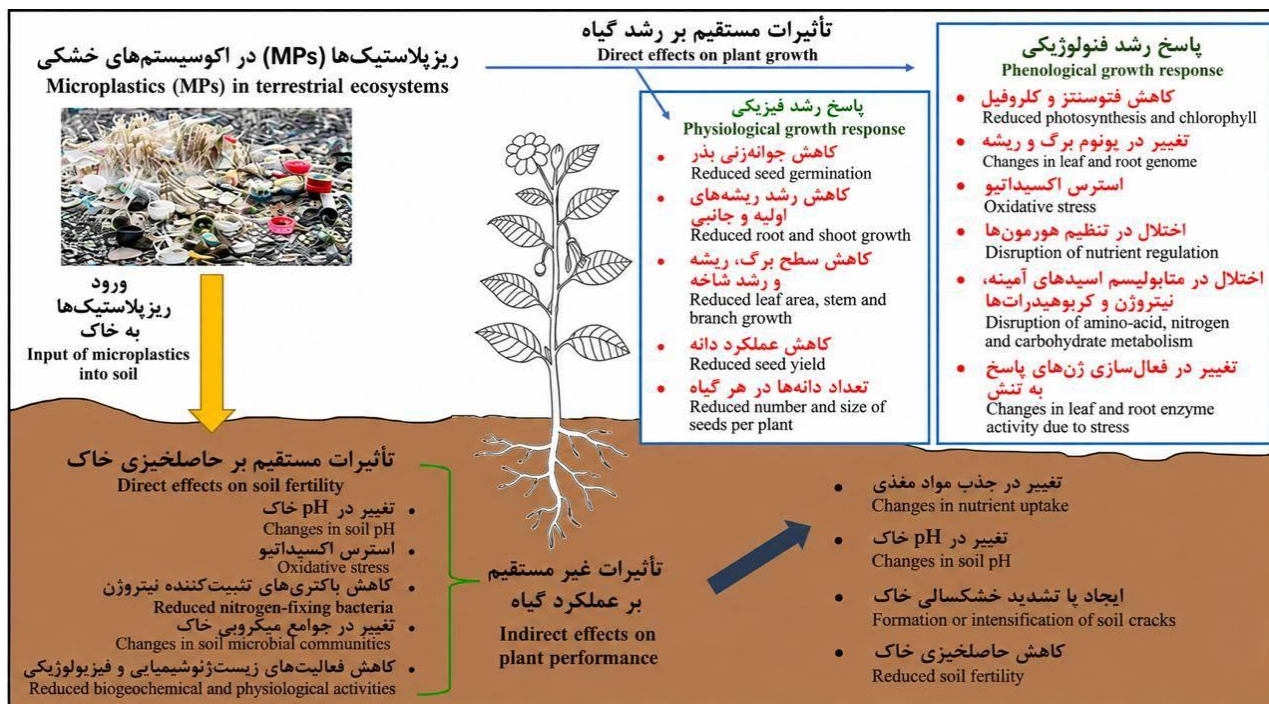
نرم‌کننده‌های پلاستیکی به‌عنوان آلاینده‌های همراه میکروپلاستیک‌ها
فتالات‌ها و بیسفنول A گروهی از مواد افزودنی هستند که به‌طور گسترده برای افزایش انعطاف‌پذیری مواد پلاستیکی استفاده می‌شوند. این ترکیبات معمولاً به‌صورت فیزیکی در ساختار پلیمر قرار گرفته‌اند و می‌توانند در اثر هوازدگی، سایش و تماس با محیط از پلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها آزاد شوند. بنابراین، میکروپلاستیک‌ها علاوه بر نقش خود به‌عنوان آلاینده ذره‌ای، می‌توانند به‌عنوان منبع ثانویه انتشار فتالات‌ها در محیط نیز عمل کنند (Liu et al., 2024; Shariati et al., 2021a). فتالات‌ها حدود ۸۰-۷۰ درصد نرم‌کننده‌های مصرفی جهان را تشکیل می‌دهند و استرهای اسید فتالیک (PAEs) از مهم‌ترین انواع آن‌ها هستند که کاربرد گسترده‌ای در صنایع پلاستیک، به‌ویژه PVC، دارند. در میان آن‌ها، دی (۲-اتیل‌هگزیل) فتالات (DEHP) یکی از پرمصرف‌ترین نرم‌کننده‌هاست (Shariati et al., 2025). از آنجاکه فتالات‌ها می‌توانند به‌راحتی از محصولات پلاستیکی آزاد شده و وارد محیط‌زیست شوند، این ترکیبات به‌عنوان آلاینده‌های فراگیر در آب، خاک، رسوبات و جو شناسایی شده‌اند (Shariati et al., 2021b). ورود فتالات‌ها به خاک نیز می‌تواند از مسیرهای مختلفی از جمله پوشش‌های پلاستیکی PVC، آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی، فاضلاب و لجن فاضلاب صورت گیرد؛ در نتیجه، این ترکیبات می‌توانند در خاک‌های کشاورزی تجمع یافته و از طریق جذب توسط گیاهان وارد زنجیره غذایی شوند. پس

از ورود فتالات‌ها به خاک، حلالیت پایین آن‌ها موجب می‌شود که تمایل قابل‌توجهی به جذب و تجمع در خاک و رسوبات داشته باشند. نوع خاک، بارندگی، دما و کاربری زمین نیز بر انتقال، آبشویی و ماندگاری این ترکیبات در خاک تأثیر می‌گذارند و می‌توانند موجب جابه‌جایی آن‌ها در پروفیل خاک و انتقال به آب‌های زیرزمینی شوند. در میان PAEs، DEHP به دلیل مصرف گسترده و تجزیه‌پذیری پایین، معمولاً یکی از ترکیبات غالب در خاک‌های کشاورزی است (Shariati et al., 2021a). از سوی دیگر، ویژگی‌های خاک و رسوب می‌توانند در سرنوشت و ماندگاری فتالات‌های مرتبط با میکروپلاستیک‌ها نقش مهمی داشته باشند. ماده آلی خاک و رسوب، یکی از عوامل مؤثر در نگهداشت فتالات‌هاست و می‌تواند موجب افزایش تجمع این ترکیبات در بخش‌های جامد محیط شود. بنابراین، پس از ورود میکروپلاستیک‌های حاوی فتالات به خاک، این ترکیبات ممکن است بین سطح میکروپلاستیک، ذرات خاک و ماده آلی توزیع شده و در خاک و یا رسوبات باقی بمانند یا در اثر فرایندهایی مانند آبشویی و انتقال ذرات جابه‌جا شوند. در نتیجه، ویژگی‌های خاک و رسوب می‌توانند بر میزان ماندگاری، تحرک و سرنوشت فتالات‌های مرتبط با میکروپلاستیک‌ها در محیط اثرگذار باشند (Shariati et al., 2019; Shariati et al., 2022a).

اثرات میکروپلاستیک بر ویژگی شیمیایی و زیستی خاک

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اثر میکروپلاستیک‌ها (MPs) بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک به‌طور معمول به‌صورت تدریجی ظاهر می‌شود و شدت و جهت این اثرات به عواملی مانند نوع پلیمر، اندازه و غلظت ذرات و میزان هوازدهی آن‌ها وابسته است. میکروپلاستیک‌ها پس از ورود به خاک می‌توانند با تغییر شرایط فیزیکی محیط، بر سطح تماس جامد-آب، توزیع مواد آلی و برهم‌کنش یون‌ها و ترکیبات محلول تأثیر گذاشته و در نتیجه برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک را تغییر دهند. از نظر شیمیایی، مهم‌ترین تغییرات شامل افزایش خفیف pH، کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر در ماده آلی محلول و احتمال

آزادسازی افزودنی‌هایی مانند فتالات‌هاست (Shariati et al., 2025; 2022b; Seo et al., 2025). از نظر زیستی، کاهش فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوکراز، اوره‌آز، کاتالاز و FDA hydrolase و افت شاخص‌های تنوع باکتریایی، نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند چرخه عناصر غذایی خاک را مختل کنند. از سوی دیگر آلودگی خاک با میکروپلاستیک می‌تواند ساختار و فعالیت جامعه میکروبی خاک را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد. گزارش شده است میکروپلاستیک‌ها با تغییر منفی بر فعالیت ریزجانداران، رشد قارچ‌های همزیست را کاهش می‌دهند (Mirzaei & Sepehri, 2026). در پژوهش میرزایی و سپهری (۲۰۲۶)، اثر همزیستی قارچ *Serendipita indica* بر رشد، جذب عناصر غذایی و رفتار کادمیوم در گیاه کوشیا (*Bassia scoparia*) تحت تنش همزمان خشکی، کادمیوم و میکروپلاستیک PVC بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش ترکیبی موجب کاهش زیست‌توده و همزیستی شد، اما همزیستی قارچی باعث بهبود رشد، جذب عناصر غذایی و تنظیم یونی گیاه گردید. همچنین جذب کادمیوم در ریشه افزایش و انتقال آن به شاخساره کاهش یافت. به‌طور کلی، این همزیستی با حفظ تعادل یونی و افزایش تجمع کادمیوم در ریشه، تحمل گیاه به تنش‌های ترکیبی و ظرفیت گیاه‌پالایی آن را افزایش داد. با این حال، شدت این اثرات به نوع پلیمر، اندازه ذره، غلظت، هوازدهی، نوع خاک و مدت زمان مواجهه وابسته است؛ بنابراین، ارزیابی خطر میکروپلاستیک‌ها باید هم‌زمان بر پایه شاخص‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی انجام شود (Wang et al., 2022; Aralappanavar et al., 2024; Seo et al., 2025; Lai et al., 2024; Wang et al., 2025; Wu et al., 2024). در مطالعه سودایی و همکاران (۱۴۰۴)، اثر پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و پلی‌استر (PS) در سطوح مختلف (۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد) بر ویژگی‌های زیستی خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که سطح مصرف میکروپلاستیک بر تنفس خاک اثر معنی‌داری داشت، درحالی‌که تغییرات کربن زیست‌توده میکروبی، کربن آلی و pH معنی‌دار نبود. بیشترین کاهش تنفس پایه در سطح مصرف ۳ درصد مشاهده شد که نسبت به شاهد ۴۹/۵ درصد کاهش داشت؛ در



شکل ۶. نحوه تأثیر میکروپلاستیک بر گیاهان کشت شده در خاک آلوده به آن (Jia et al., 2023)

Fig 6. Effects of microplastics on plants grown in microplastic-contaminated soil (Jia et al., 2023)

سطح ۱۰ درصد نیز تنفس پایه ۳۶/۵ درصد کاهش نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که پاسخ فعالیت میکروبی خاک به میکروپلاستیک‌ها می‌تواند وابسته به غلظت باشد و لزوماً با افزایش غلظت، شدت اثر به صورت خطی افزایش نمی‌یابد.

نفوذ میکروپلاستیک‌ها به گیاه

میکروپلاستیک‌ها از طریق تماس مستقیم با بذر، ریشه و بافت‌های گیاهی یا به طور غیرمستقیم از طریق تغییر تخلخل، تهویه، نگهداشت آب، دسترسی عناصر غذایی و فعالیت میکروبی خاک بر گیاهان اثر می‌گذارند (شکل ۶) و شدت این اثر به نوع پلیمر، اندازه، شکل و غلظت ذرات، نوع گیاه و ویژگی‌های خاک وابسته است (Rillig et al., 2019; Azeem et al., 2021; Jia et al., 2023). تجمع ذرات، به‌ویژه ذرات ریز، روی سطح و منافذ بذر می‌تواند جذب آب، تبادل گاز، جوانه‌زنی و رشد اولیه ریشه را مختل کند (Bosker et al., 2019) و الیاف و ورقه‌ها به دلیل ساختار کشیده یا صفحه‌ای ممکن است موانع فیزیکی قوی‌تری

ایجاد کنند (Lozano et al., 2022). پس از جوانه‌زنی ذرات بسیار ریز یا نانوپلاستیک‌ها ممکن است وارد بافت ریشه و اندام‌های هوایی شوند، هرچند شدت و اهمیت این انتقال در شرایط مزرعه هنوز به طور کامل مشخص نیست (Li et al., 2020; Azeem et al., 2021). ذرات MPs با اتصال به ریشه‌ها و انسداد کانال‌های یونی، جذب عناصر غذایی ضروری توسط گیاه را تحت تأثیر قرار داده و رشد و نمو آن را مختل می‌کنند (Mirzaei & Sepehri, 2026). این تغییرات می‌توانند با ایجاد تنش اکسیداتیو، کاهش زیست‌توده، سطح برگ، کلروفیل و کارایی فتوسنتز، در نهایت موجب افت رشد گیاه شوند (Jia et al., 2023; Chaudhary et al., 2025). نیکومرام و سپهری (۲۰۲۲) نشان دادند که کادمیم و میکروپلاستیک PVC شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه ارزن دمرواره را کاهش می‌دهند. افزایش PVC از ۱ به ۶ درصد در غلظت ۲۰۰ میکرومولار Cd، کارایی استفاده از ذخایر بذر، درصد جوانه‌زنی و شاخص تحمل ریشه را به ترتیب ۴۵/۹، ۱۲/۷ و ۵۸/۷ درصد کاهش داد. با این حال، غلظت‌های

ویژگی فیزیکی خاک

ویژگی فیزیکی خاک، چارچوب اصلی عملکرد خاک در ذخیره و انتقال آب، تهویه، توسعه ریشه، پایداری ساختمان و مقاومت در برابر فرسایش را تعیین می‌کنند. از این‌رو، ورود ذراتی با ماهیت متفاوت از اجزای معدنی و آلی خاک می‌تواند تعادل فیزیکی خاک را تغییر دهد (شکل ۷). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نوع پلیمر، شکل ذره، اندازه، غلظت، بافت خاک، مقدار ماده آلی، تراکم اولیه، رطوبت و مدت زمان تماس، جهت و شدت اثر میکروپلاستیک‌ها را کنترل می‌کنند (de Souza Machado et al., 2018; Lozano et al., 2021b; Wang et al., 2022; Maqbool et al., 2023).

چگالی ظاهری خاک

چگالی ظاهری یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت فیزیکی خاک است و با تراکم خاک، تخلخل، نفوذ ریشه و حرکت آب و هوا ارتباط مستقیم دارد. ورود ذرات پلاستیکی سبک به خاک می‌تواند باعث کاهش چگالی ظاهری شود؛ زیرا بخشی از حجم خاک توسط ذراتی اشغال می‌شود که چگالی ظاهری کمتری نسبت به ذرات معدنی دارند. با این حال، این اثر همیشه قطعی نیست. de Souza Machado و همکاران (2018) نشان دادند که افزودن انواع مختلف میکروپلاستیک به خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله چگالی ظاهری و ساختمان خاک را تغییر دهد. تیمارهای این مطالعه شامل افزودن الیاف پلی‌اکریلیک، دانه‌های پلی‌آمید، الیاف پلی‌استر و قطعات پلی‌اتیلن در غلظت‌های اسمی تا ۲ درصد وزنی بود. در این مطالعه، الیاف پلی‌استر بیشترین تغییرات را ایجاد کردند و با افزایش غلظت آن‌ها، چگالی ظاهری و تجمع ذرات خاک کاهش یافت. در حالی که ظرفیت نگهداشت آب افزایش یافت. سایر انواع میکروپلاستیک‌ها اثرات مشابه و یکنواختی بر این ویژگی‌ها نشان ندادند. Ingraffia و همکاران (2022) اثر الیاف پلی‌استر را بر ویژگی‌های فیزیکی سه نوع خاک کشاورزی بررسی کردند و نشان دادند که الیاف به دلیل شکل کشیده و انعطاف‌پذیر خود

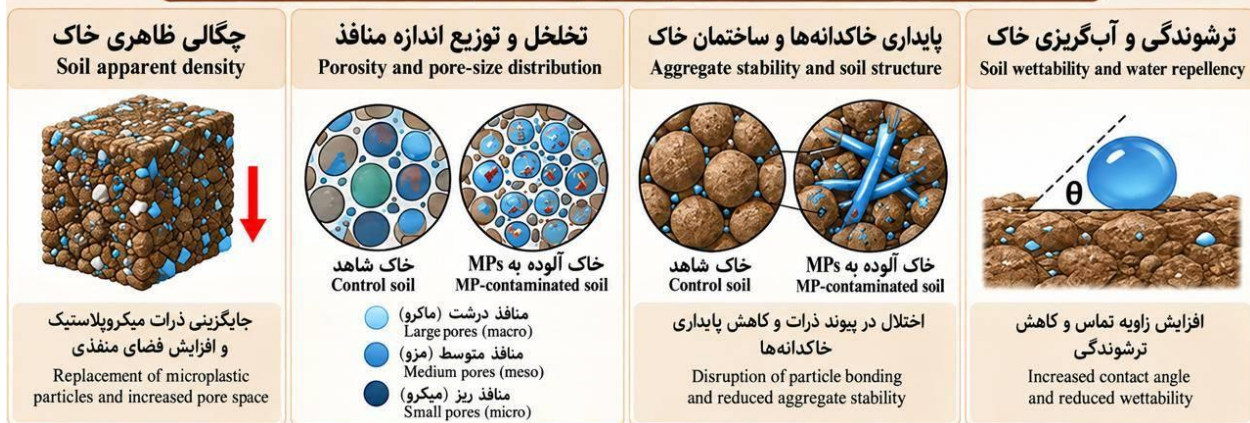
پایین PVC توانستند تا حدی اثر سمیت Cd را تعدیل کنند، هرچند این موضوع را نمی‌توان به‌عنوان اثر مثبت میکروپلاستیک تلقی کرد و به بررسی‌های بیشتری نیاز دارد.

تأثیر عوامل محیطی بر میکروپلاستیک‌ها

سرنوشت و رفتار میکروپلاستیک‌ها در خاک تنها به ویژگی‌های ذاتی آن‌ها وابسته نیست، بلکه عوامل محیطی و ویژگی‌های خاک از جمله دما، رطوبت، تابش فرابنفش، چرخه‌های خشک و تر شدن، pH، بافت و ماده آلی نیز بر هوازدهی، تجمع و جابه‌جایی آن‌ها اثر می‌گذارند (Rostampour et al., 2025; Li et al., 2025). افزایش دما می‌تواند با تسریع فرآیندهای اکسیداسیون، موجب شکنندگی و خردشدگی بیشتر پلیمرها شود (Rostampour et al., 2025). رطوبت نیز با فراهم کردن شرایط مناسب برای هیدرولیز و فعالیت میکروبی و همچنین تسهیل حرکت ذرات در منافذ خاک، بر هوازدهی و انتقال میکروپلاستیک‌ها اثرگذار است (Li et al., 2025).

مطالعه Lin و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که افزایش pH تا یک محدوده بهینه، بار سطحی منفی میکروپلاستیک‌ها را افزایش داده و جذب کاتیون‌های فلزی را بهبود می‌بخشد. با این حال، در pH های بالا، فلزات سنگین ممکن است به‌صورت رسوب یا گونه‌های کم تحرک و کم‌قابل جذب، مانند $Pb(OH)_2$ ، درآیند (Lin et al., 2021; Abdolrahimi et al., 2025). افزایش شوری و یون‌هایی مانند Na^+ می‌تواند با ایجاد رقابت برای مکان‌های جذبی، برهم‌کنش میکروپلاستیک‌ها با فلزات سنگین را کاهش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش شوری، جذب فلزاتی مانند سرب، مس، کروم و کادمیم توسط میکروپلاستیک‌های پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌اتیلن (PE) کاهش می‌یابد (Yu et al., 2020; Wang et al., 2019; Liu et al., 2022). بنابراین، شوری و قدرت یونی از عوامل مؤثر بر رفتار جذب و برهم‌کنش میکروپلاستیک‌ها با آلاینده‌های فلزی در خاک هستند (Abdolrahimi et al., 2025).

تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک Changes in the physical properties of soil



شکل ۷. اثر میکروپلاستیک بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

Fig7. Effects of microplastics on soil physical properties

در برخی دیگر کاهش تخلخل مؤثر گزارش شده است. Lozano و همکاران (2021a) نشان دادند که شکل میکروپلاستیک در تغییر ویژگی فیزیکی خاک اهمیت زیادی دارد. الیاف، ورقه‌ها و قطعات نامنظم به دلیل نحوه استقرار متفاوت در خاک، اثر یکسانی بر شبکه منافذ ندارند. الیاف می‌توانند در برخی شرایط فضاهای جدیدی میان ذرات خاک ایجاد کنند، درحالی‌که ورقه‌ها و قطعات نامنظم ممکن است بخشی از منافذ را مسدود کنند یا مسیر جریان آب را تغییر دهند. Guo و همکاران (2022) نیز نشان دادند که اثر میکروپلاستیک بر شبکه منافذ و رفتار هیدرولیکی خاک، به نحوه قرارگیری ذرات آلاینده در منافذ خاک بستگی دارد. بر اساس نتایج گزارش شده در مطالعات مختلف، میکروپلاستیک‌ها ممکن است تخلخل کل را افزایش دهند، اما هم‌زمان موجب کاهش تخلخل مؤثر شوند؛ یعنی حجم فضای خالی بیشتر شود، اما مسیرهای پیوسته برای عبور آب و هوا کمتر شوند. این تمایز برای تفسیر اثر میکروپلاستیک بر خاک بسیار مهم است، زیرا کیفیت فیزیکی خاک بیشتر به منافذ فعال و پیوسته وابسته است تا صرفاً مقدار کل تخلخل.

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، شامل هدایت هیدرولیکی اشباع و

می‌توانند نحوه اتصال و آرایش ذرات خاک را تغییر دهند. نتایج نشان داد که اثر الیاف به‌شدت به نوع خاک وابسته است؛ به‌طوری‌که چگالی ظاهری در Vertisol حدود ۹ درصد کاهش یافت، در Entisol کاهش جزئی داشت و در Alfisol تغییری مشاهده نشد. در مطالعه ای اثر الیاف میکروپلاستیک پلی‌استر را در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی بر یک خاک لوم رسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن میکروپلاستیک تأثیر معنی‌داری بر چگالی ظاهری خاک نداشت (Zhang et al., 2019). جزئیات مطالعات و نتایج گزارش شده در خصوص اثر میکروپلاستیک‌ها بر چگالی ظاهری خاک در جدول ۱ جمع‌بندی شده است.

تخلخل و توزیع اندازه منافذ

تخلخل خاک بیانگر سهم فضای خالی در حجم خاک است، اما برای تفسیر رفتار خاک، فقط مقدار کل تخلخل کافی نیست؛ بلکه اندازه، پیوستگی و عملکرد منافذ نیز اهمیت دارد. میکروپلاستیک‌ها می‌توانند از دو مسیر متفاوت بر تخلخل اثر بگذارند: نخست، با ایجاد فضای خالی و تغییر آرایش ذرات خاک، و دوم، با انسداد منافذ یا کاهش پیوستگی مسیرهای جریان آب و هوا. به همین دلیل، در برخی مطالعات افزایش تخلخل و

جدول ۱. اثر میکروپلاستیک‌ها بر چگالی ظاهری خاک

Table 1. Effects of microplastics on soil bulk density

منبع Reference	نتیجه گزارش شده Effects	نوع خاک Soil type	مدت آزمایش Incubation / exposure time	ابعاد میکروپلاستیک‌ها (طول و قطر) Microplastic dimensions (length and diameter)	درصد وزنی MP dose (w/w)	نوع میکروپلاستیک MP type
Ingraffia et al. (2022)	۹ درصد کاهش ورتیسول کاهش جزئی در انتیسول و بدون تاثیر بر آلفیسول -9% in Vertisol; slight decrease in Entisol; no change in Alfisol	ورتیسول، انتیسول آلفیسول Vertisol ,Entisol Alfisol	۶ ماه 6 months	2.87 ± 0.31 mm; 87 ± 3 μ m	0.5%	الیاف پلی استر Polyester microfibers, PES
de Souza Machado et al. (2018)	بدون اثر معنی دار No significant effect	لوم شنی Loamy sand	۵ هفته 5 weeks	15–20 μ m	0.25–2%	پلی آمید PA
de Souza Machado et al. (2018)	کاهش چگالی ظاهری Decrease in soil bulk density	لوم شنی Loamy sand	۵ هفته 5 weeks	5000 μ m; 8 μ m	0.05–0.4%	الیاف پلی استر Polyester microfibers, PES
Zhang et al. (2019)	بدون اثر معنی دار No significant effect	خاک رسی لومی Clay loam	۷۲ روز و یک سال 72 days; 1 year	<5 μ m; 2.65 mm	0.1%, 0.3%	الیاف پلی استر Polyester microfibers, PES

(Xie et al., 2024).

در ارتباط با نگهداشت آب، Wang و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که غلظت ۵/۰ درصد پلی اتیلن اثر معنی داری بر میزان آب خاک نداشت، درحالی که در غلظت ۲ درصد، اندازه ذرات نقش تعیین کننده ای داشت. در خاک لومی، ذرات ۱۵۰ میکرومتری موجب افزایش نگهداشت آب شدند، درحالی که ذرات ۹۵۰ میکرومتری آن را کاهش دادند؛ در خاک شنی نیز ذرات ۹۵۰ میکرومتری، به ویژه در غلظت های بالاتر، موجب کاهش مقدار آب شدند (Wang et al., 2023). بنابراین، افزایش منافذ ریز و متوسط می تواند نگهداشت آب را افزایش دهد، درحالی که ایجاد منافذ درشت و مسیرهای ترجیحی می تواند موجب تخلیه سریع تر آب شود. در شرایط غیراشباع، هدایت هیدرولیکی علاوه بر ساختار منافذ، به میزان رطوبت خاک وابسته است؛ بنابراین، با خشک و تر شدن خاک، بخشی از منافذ آب دار از شبکه جریان خارج شده و هدایت آب به صورت غیرخطی کاهش می یابد. Xie و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که اگرچه افزودن میکروپلاستیک های ۵۰، ۱۵۰ و ۵۰۰ میکرومتری در غلظت های ۵ تا ۵۰ درصد موجب تغییر هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت باقیمانده و فشار ورود هوا شد، اثر آن بر هدایت هیدرولیکی نسبی غیراشباع محدود بود. این نتایج نشان می دهد که اثر میکروپلاستیک ها بر جریان آب در شرایط غیراشباع لزوماً از تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع پیروی نمی کند و به وضعیت رطوبتی و پیوستگی منافذ آب دار نیز وابسته است. جزئیات مطالعات و نتایج گزارش شده در خصوص اثر میکروپلاستیک ها بر ویژگی های هیدرولیکی خاک در جدول ۲ جمع بندی شده است.

آب گریزی و ترشوندگی خاک

آب گریزی خاک معمولاً با افزایش زاویه تماس آب با سطح ذرات همراه است و می تواند موجب تأخیر در نفوذ آب، تر شدن غیریکنواخت و افزایش رواناب شود. از آنجاکه بسیاری از پلیمرهای رایج، به ویژه پلیمرهای آب گریز مانند پلی اتیلن،

غیراشباع، ظرفیت نگهداشت آب و منحنی مشخصه رطوبتی خاک، ارتباط نزدیکی با توزیع اندازه و پیوستگی منافذ دارند. میکروپلاستیک ها با تغییر ساختار منافذ، ترشوندگی و مسیرهای جریان می توانند هم حرکت آب و هم نگهداشت آن را تغییر دهند. Guo و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که افزودن پلی پروپیلن با اندازه های ۲۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ میکرومتر و غلظت های ۶ تا ۶۰ درصد وزنی، هدایت هیدرولیکی اشباع را در خاک های لومی، رسی و شنی به ترتیب ۷۰، ۷۷ و ۹۶ درصد کاهش داد. همچنین، ذرات بزرگ تر اثر کاهنده ضعیف تری داشتند. این مطالعه نشان داد که برهم کنش میکروپلاستیک و خاک با تغییر توزیع اندازه منافذ و کاهش منافذ قابل دسترسی، نفوذ آب را محدود می کند (Guo et al., 2022). Shafea و همکاران (۲۰۲۳) نیز در یک نمونه خاک Luvisol با افزودن پلی اتیلن ترشالات (PET) و پلی استایرن (PS) در غلظت های ۵/۰ تا ۲۰ درصد وزنی، کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع را در تمامی تیمارها گزارش کردند. بیشترین کاهش در غلظت ۲ درصد و برای بزرگ ترین ذرات، با اندازه حدود ۳ میلی متر، مشاهده شد. همچنین، ظرفیت نگهداشت آب با افزایش غلظت میکروپلاستیک کاهش یافت و آب گریزی خاک در غلظت ۲ درصد و اندازه های بزرگ تر از ۱ میلی متر افزایش پیدا کرد (Shafea et al., 2023). Jing و همکاران (۲۰۲۳) در خاک لوم سیلتی (silt loam) نشان دادند که افزودن میکروپلاستیک در شرایط چرخه های تر و خشک، هدایت هیدرولیکی اشباع و ظرفیت نگهداشت آب را به طور معنی داری کاهش می دهد و اندازه ذرات و غلظت میکروپلاستیک در شدت این تغییرات مؤثر هستند (Jing et al., 2023). در مقابل، Xie و همکاران (۲۰۲۴) در خاک رسی سیاه طبیعی نشان دادند که میکروپلاستیک ها می توانند با تغییر الگوی ترک های ناشی از خشک شدن، ویژگی های هیدرولیکی خاک را تغییر دهند. شدت ترک ها در محدوده ۲/۰ تا ۱ درصد میکروپلاستیک افزایش یافت و در غلظت های بالاتر اندکی کاهش پیدا کرد؛ بنابراین، اثر میکروپلاستیک ها در خاک رسی الزاماً به افزایش عبور آب منجر نمی شود و به غلظت، اندازه ذرات و شرایط رطوبتی وابسته است.

جدول ۲. اثر میکروپلاستیک‌ها بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

Table 2. Effects of Microplastics on Soil Hydraulic Properties

منبع Reference	نتیجه گزارش شده Effects	نوع خاک Soil type	اندازه میکروپلاستیک MP size	درصد وزنی MP dose (w/w)	ویژگی خاک Soil property	نوع میکروپلاستیک MP type
Guo et al. (2022)	کاهش ۷۰٪، ۷۷٪ و ۹۶٪ Decreased by ~70%, 77%, and 96%,	لومی، رسی و شنی Loam, clay, sandy	20, 200, 500 μm	6%	هدایت هیدرولیکی اشباع Ks	پلی پروپیلن PP
Shafea et al. (2023)	کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع؛ کاهش نگهداشت آب Decrease in (Ks); decrease in soil water retention	لویسول Luvisol	up to ~3 mm	0.5–2%	هدایت هیدرولیکی اشباع، نگهداشت آب Ks, Water retention	پلی اتیلن ترفتالات و پلی استایرن PS, PET
Jing et al. (2023)	کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع؛ کاهش نگهداشت آب Decrease in (Ks); decrease in soil water retention	لوم سیلتی Silt loam	25, 150, 550, 1000 μm	1, 3, and 5%	هدایت هیدرولیکی اشباع، نگهداشت آب Ks, Water retention	پلی اتین Polyethylene
Xie et al. (2023)	کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع، کاهش نگهداشت آب و معنی‌دار نبودن اثر تیمار بر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع Decrease in (Ks), decrease in soil water retention, and no significant effect of treatment on unsaturated hydraulic conductivity	سیلتی Silty	50-150 μm	0.5-5.0%	هدایت هیدرولیکی اشباع، نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع Ks, Water retention, Unsaturated hydraulic conductivity	پلی اتین Polyethylene

پلی‌پروپیلن و پلی‌استایرن، تمایل کمی به جذب آب دارند، قرارگیری آن‌ها روی سطح خاکدانه‌ها یا میان ذرات خاک می‌تواند ترشوندگی خاک را کاهش داده و رفتار ورود آب به خاک را تغییر دهد (Doerr et al., 2000; Jordán et al., 2013). این موضوع از نظر فیزیک خاک اهمیت زیادی دارد، زیرا ضریب جذبی که تابعی از ترشوندگی است، کنترل‌کننده نفوذ آب، و توزیع رطوبت در خاک است. Wang و همکاران (2022) نشان دادند که حضور میکروپلاستیک‌های آب‌گریز می‌تواند با تغییر ترشوندگی سطح خاک و توزیع اندازه منافذ، نفوذ، حرکت و نگهداشت آب در خاک را تغییر دهد. آب ممکن است دیرتر وارد خاک شود، به‌صورت یکنواخت در خاک پخش نشود، بخشی از آن از مسیرهای ترجیحی عبور کند یا به‌جای نفوذ، به رواناب تبدیل شود. Fang و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای روی خاکدانه‌های آلوده به پلی‌اتیلن نشان دادند که آب‌گریزی با افزایش غلظت میکروپلاستیک و کاهش اندازه ذرات تشدید می‌شود. همچنین، Cramer و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تجمع میکروپلاستیک‌های آب‌گریز می‌تواند نفوذ آب و جریان موئینگی را محدود کرده و پیچاپیچی مسیرهای جریان را افزایش دهد. Shafea و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که افزایش غلظت PET (پلی‌اتیلن ترفتالات) و PS (پلی‌استایرن)، به‌ویژه در غلظت ۲ درصد و برای ذرات بزرگ‌تر از ۱ میلی‌متر، آب‌گریزی خاک را افزایش داد. در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که نوع، اندازه و غلظت میکروپلاستیک و همچنین ویژگی‌های خاک، عوامل مهمی در تعیین ترشوندگی، نفوذ و الگوی حرکت آب در خاک هستند.

پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک

پایداری خاکدانه‌ها یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت فیزیکی خاک است و مقاومت خاک را در برابر بارش، جریان آب، چرخه‌های خشک و تر شدن و تنش‌های مکانیکی نشان می‌دهد (Bronick & Lal, 2005; Rabot et al., 2018). شواهد مطالعات مختلف نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با تغییر

تماس و پیوند میان ذرات معدنی و آلی، نفوذ در ساختار خاکدانه و تغییر ترشوندگی، پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار دهند (Ju et al., 2023; Fang et al., 2024). در مطالعات انجام‌شده با پلی‌اتیلن، کاهش خیس‌شوندگی خاکدانه‌ها، چگالی ظاهری خاکدانه و قطر میانگین وزنی خاکدانه‌ها گزارش شده است و این اثر در برخی موارد برای ذرات کوچک‌تر شدیدتر بوده است؛ موضوعی که به سطح تماس بیشتر و احتمال برهم‌کنش قوی‌تر این ذرات با اجزای خاک نسبت داده شده است. نتایج de Souza Machado و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که پاسخ خاک به میکروپلاستیک‌ها به نوع و شکل ذرات وابسته است. در خاک لوم‌شنی، تیمارهای حاوی الیاف پلی‌اکریلیک، دانه‌های پلی‌آمید، الیاف پلی‌استر و قطعات پلی‌اتیلن اثر یکسانی بر ویژگی‌های خاک نداشتند و الیاف پلی‌استر موجب کاهش پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر شدند. این یافته‌ها در کنار نتایج سایر مطالعات نشان می‌دهد که اثر میکروپلاستیک بر پایداری خاکدانه‌ها الگوی ثابتی ندارد و به نوع پلیمر، شکل و اندازه ذرات، غلظت و نحوه اختلاط آن‌ها با خاک وابسته است (de Souza Machado et al., 2018; Ju et al., 2023; Fang et al., 2024). الیاف نیز به دلیل شکل کشیده و انعطاف‌پذیر خود ممکن است با ایجاد اتصالات یا شبکه‌های بین ذرات، رفتاری متفاوت از قطعات و ذرات کروی ایجاد کنند.

فرسایش‌پذیری خاک

فرسایش‌پذیری خاک به حساسیت خاک نسبت به جدایش و انتقال ذرات توسط آب یا باد گفته می‌شود. از آنجاکه پایداری خاکدانه، ترشوندگی، نفوذپذیری و رواناب از عوامل کنترل‌کننده فرسایش هستند، میکروپلاستیک‌ها می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر فرسایش‌پذیری خاک اثر بگذارند. اگر حضور میکروپلاستیک باعث کاهش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش آب‌گریزی و افزایش رواناب شود، احتمال فرسایش سطحی افزایش می‌یابد. در مقابل، برخی اشکال میکروپلاستیک، به‌ویژه الیاف، ممکن است در شرایط خاص با ایجاد اتصال فیزیکی میان ذرات خاک، مقدار

هدررفت خاک را کاهش دهند (Rehm, Maqbool et al., 2023). Fiener و (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌سازی در یک حوضه کشاورزی ۳۹۰ کیلومترمربعی نشان دادند که فرسایش خاک می‌تواند مسیر مهمی برای انتقال میکروپلاستیک‌ها از اراضی کشاورزی به منابع آب باشد؛ به‌طوری‌که شار سالانه میکروپلاستیک به شبکه رودخانه‌ای حدود ۶/۳۳ کیلوگرم در سال برآورد شد و ۰/۱۱ تا ۰/۱۷ درصد از میکروپلاستیک‌های واردشده به خاک‌های زراعی طی دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۰ از طریق فرسایش به شبکه رودخانه‌ای منتقل شدند (Rehm and Fiener, 2024). Nosrat و همکاران (۲۰۲۶) با استفاده از آزمایش تونل باد نشان دادند که فرسایش بادی می‌تواند موجب انتقال انتخابی و غنی‌شدن میکروپلاستیک‌ها در مناطق خشک شود. طی سه رخداد متوالی فرسایش، نرخ ویژه انتقال رسوب در اغلب واحدهای سطحی ۳۱ تا ۴۸ درصد کاهش یافت، درحالی‌که در تپه‌های ماسه‌ای ۲۲ درصد افزایش داشت. هم‌زمان، مقدار میکروپلاستیک در لایه سطحی یک سانتی‌متری خاک حدود ۲۲ تا ۲۷ درصد کاهش یافت و نسبت غنی‌شدگی میکروپلاستیک‌ها در رسوبات بادی در برخی کاربری‌ها به ۱/۱ تا ۵/۳ رسید. این نتایج نشان می‌دهد که فرسایش بادی نه‌تنها موجب جابه‌جایی میکروپلاستیک‌ها می‌شود، بلکه می‌تواند آن‌ها را به‌صورت انتخابی در مواد فرسایش‌یافته غنی کند (Nosrati et al., 2026).

محدودیت تعمیم نتایج آزمایشگاهی به شرایط مزرعه

بیشتر شواهد موجود از مطالعات آزمایشگاهی، گلدانی و ستونی به‌دست آمده‌اند که اگرچه کنترل‌پذیرند، شرایط پیچیده مزرعه را به‌طور کامل بازنمایی نمی‌کنند. در آزمایشگاه، میکروپلاستیک‌ها معمولاً به‌صورت یکنواخت و در یک مرحله با خاک مخلوط می‌شوند، اما در مزرعه به‌تدریج، به‌شکل ناهمگن و از مسیرهای مختلف وارد خاک می‌شوند (Maqbool et al., 2023; Wu et al., 2024). همچنین، عواملی مانند بارندگی، آبیاری، چرخه‌های خشک و تر شدن، خاک‌ورزی، رشد ریشه و فعالیت جانوران خاکری می‌توانند توزیع، هوازدهی و اثر ذرات بر ساختمان خاک

را تغییر دهند؛ بنابراین، پاسخ واقعی خاک ممکن است با نتایج آزمایشگاهی متفاوت باشد (Li et al., 2025; Ren et al., 2021; Rillig et al., 2017).

یکی دیگر از محدودیت‌ها، استفاده از غلظت‌های نسبتاً بالا و ذرات تازه، تمیز و یکنواخت در مطالعات آزمایشگاهی است؛ درحالی‌که غلظت میکروپلاستیک‌ها در مزرعه معمولاً کمتر، دوره مواجهه طولانی‌تر و ذرات هوازده، ترک‌خورده و پوشیده از مواد آلی یا بیوفیلم هستند. ازاین‌رو، مطالعات آزمایشگاهی بیشتر برای شناخت سازوکارها مناسب‌اند و نمی‌توان شدت اثرات آن‌ها را مستقیماً به شرایط مزرعه تعمیم داد (Maqbool et al., 2023; Pan et al., 2024; Wu et al., 2024). برای نزدیک‌شدن به شرایط واقعی، استفاده از میکروپلاستیک‌های هوازده یا شبیه‌سازی هوازدهی ضروری است (Ren et al., 2021; Rostampour et al., 2025). در مجموع، نتایج آزمایشگاهی باید با مطالعات میدانی بلندمدت، پایش مستمر و غلظت‌های نزدیک به شرایط واقعی تکمیل شوند.

نتیجه‌گیری کلی

آلودگی میکروپلاستیکی خاک به دلیل پایداری بالا، گسترش وسیع، قابلیت خردشدن تدریجی و اثرگذاری بر کیفیت خاک، به یکی از چالش‌های مهم در مدیریت پایدار اراضی کشاورزی تبدیل شده است. مرور مطالعات نشان می‌دهد که این ذرات پس از ورود به خاک، تنها به‌عنوان آلاینده‌های قابل شمارش عمل نمی‌کنند، بلکه می‌توانند از طریق تغییر در ساختمان خاک، شبکه منافذ، رفتار آب، ترشوندگی و پایداری خاکدانه‌ها، عملکرد فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهند. اهمیت این موضوع در خاک‌های زراعی بیشتر است؛ زیرا کیفیت فیزیکی خاک مستقیماً با نفوذ آب، تهویه، رشد ریشه، پایداری تولید و مقاومت خاک در برابر تخریب ارتباط دارد. یافته‌های مرور حاضر نشان می‌دهد که اثر میکروپلاستیک‌ها بر خاک یک پاسخ ثابت و یکنواخت نیست. نوع پلیمر، شکل و اندازه ذرات، غلظت، درجه هوازدهی، بافت خاک، ماده آلی، رطوبت و شرایط مدیریتی، جهت و شدت اثر

شاخص مشخص بوده‌اند؛ درحالی‌که پیامدهای واقعی میکروپلاستیک‌ها در خاک به‌ویژه در شرایط مزرعه‌ای، بلندمدت و تحت تأثیر هم‌زمان عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی شکل می‌گیرد. بنابراین، توسعه روش‌ها و استانداردهای جدید برای استخراج، شناسایی کیفی و کمی، پایش و ارزیابی خطر میکروپلاستیک‌ها در خاک ضروری است.

تشکر و سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۰۲۸۷ انجام شده است.

تضاد منافع

این ذرات را تعیین می‌کنند. از این‌رو، تفاوت نتایج میان مطالعات را باید بازتاب پیچیدگی واقعی برهم‌کنش میان میکروپلاستیک و ماتریس خاک دانست، نه صرفاً تناقض در داده‌ها. بر این اساس، هرگونه ارزیابی علمی درباره اثر میکروپلاستیک‌ها بر خاک باید با گزارش دقیق نوع پلیمر، شکل ذره، اندازه، غلظت و شرایط خاک همراه باشد. از نظر آینده آلودگی، شواهد موجود هشدار می‌دهند که در صورت نبود اقدامات کاهشی، غلظت میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های کشاورزی می‌تواند در دهه‌های آینده به‌طور قابل توجهی افزایش یابد؛ به‌گونه‌ای که برخی برآوردها احتمال دو تا سه برابر شدن غلظت این ذرات تا سال ۲۰۶۰ را مطرح کرده‌اند.

از منظر پژوهشی، هنوز شاخص‌های متعددی از سلامت خاک در ارتباط با میکروپلاستیک‌ها به‌طور کامل بررسی نشده‌اند. بیشتر مطالعات موجود کوتاه‌مدت، آزمایشگاهی و محدود به چند

References

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, S., Turner, A., Hoseini, M., Amiri, H., 2021. Microplastics in the Lut and kavir deserts, Iran. *Environ. Sci. Technol.* 55(9), 5993–6000. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00615>.
2. Abdolrahimi, S., Rahmat, M., Chatarnour, N., Khodabandeh, A., Fotovat, A., 2025. A review on the co-contamination of microplastics and chemical pollutants in soil environments. 19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart Soil and Water Management), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, 16–18 September 2025. (In Persian with English abstract).
3. Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., Galop, D., 2019. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat. Geosci.* 12, 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>.
4. Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>.
5. Apte, S., Dike, S., Dabir, V., 2024. Vertical transport of HDPE microplastics through sandy and silty soil. *Environ. Chall.* 17(101050). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101050>.
6. Aralappanavar, V.K., Mukhopadhyay, R., Yu, Y., Liu, J., Bhatnagar, A., Praveena, S.M., Li, Y., Paller, M., Adyel, T.M., Rinklebe, J., Bolan, N., Sarkar, B., 2024. Effects of microplastics on soil microorganisms and microbial functions in nutrients and carbon cycling: A review. *Sci. Total Environ.* 924(171435). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171435>.
7. Azeem, I., Adeel, M., Ahmad, M.A., Shakoar, N., Jiangcuo, G.D., Azeem, K., Ishfaq, M., Shakoar, A., Ayaz, M., Xu, M., Rui, Y., 2021. Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: A critical review. *Nanomaterials* 11(2935), 1–22. <https://doi.org/10.3390/nano11112935>.
8. Bakhshaei, A., Babakhani, P., Ashiq, M.M., Bell, K., Salehi, M., Jazaei, F., 2025. Potential impacts of microplastic pollution on soil–water–plant dynamics. *Sci. Rep.* 15(9784). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93668-0>.
9. Bläsing, 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>.
10. Boctor, J., Hoyle, F.C., Farag, M.A., Ebaid, M., Walsh, T., Whiteley, A.S., Murphy, D.V., 2025. Microplastics and nanoplastics: Fate, transport, and governance from agricultural soil to food webs and humans. *Environ. Sci. Eur.* 37(68). <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01104-x>.

11. Bosker, T., Bouwman, L.J., Brun, N.R., Behrens, P., Vijver, M.G., 2019. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>.
12. Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., Sukumaran, S., 2020. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368(6496), 1257–1260. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>.
13. Bronick, C. J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
14. Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., Uricchio, V.F., 2020. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17(1212), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>.
15. Chandel, R., Singh, L., Khan, N. A., Thakur, S., 2025. Microbial remediation of microplastic-contaminated soil, focusing on mechanisms, benefits, and research gaps. *npj Emerg. Contam.* 1(1), 14. <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00014-0>.
16. Chaudhary, H.D., Shah, G., Bhatt, U., Singh, H., Soni, V., 2025. Microplastics and plant health: A comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation. *npj Emerg. Contam.* 1(8). <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00007-z>.
17. Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V., 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Sci. Total Environ.* 671, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>.
18. de Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J.B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A.S., Rillig, M.C., 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environ. Sci. Technol.* 53(10), 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>.
19. de Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., Rillig, M.C., 2018. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environ. Sci. Technol.* 52(17), 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>.
20. Dehghani, S., Moore, F., Akhbarizadeh, R., 2017. Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24(25), 20360–20371. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1>.
21. Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Walsh, R. P. D., 2000. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Sci. Rev.* 51(1–4), 33–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).
22. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., Tassin, B., 2016. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Mar. Pollut. Bull.* 104(1–2), 290–293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>.
23. En-Nejmy, K., El Hayany, B., Al-Alawi, M., Jemo, M., Hafidi, M., El Fels, L., 2024. Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 288(117332). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117332>.
24. European Commission., 2023. Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 as regards synthetic polymer microparticles. *Off. J. Eur. Union*, L 238, 67–88. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2055/oj>.
25. Fang, Z., Sallach, J.B., Hodson, M.E., 2024. Size- and concentration-dependent effects of microplastics on soil aggregate formation and properties. *J. Hazard. Mater.* 465(133395). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133395>.
26. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Intergovernmental Technical Panel on Soils., 2015. Status of the world's soil resources: Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>.
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Environment Programme., 2021. Global assessment of soil pollution: Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>.
28. Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2021. Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb7856en>.
29. Frias, J.P.G.L., Nash, R., 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>.
30. GESAMP., 2016. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment. In P.J. Kershaw & C.M. Rochman (Eds.), Reports and Studies GESAMP No. 93. IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts. <https://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2>.
31. Ghasemi, P., Hashemi, S.H., Salehi, Z., 2021. Occurrence and characteristics of microplastics in farmlands of Kermanshah County. Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University.

32. Guo, L., Xu, X., Wang, Q., Park, J., Zhou, L., Lei, H., Wang, X., 2025. Effects of microplastics on the hydraulic properties and pore characteristics of compacted soil. *Soil Tillage Res.* 254(106742). <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106742>.
33. Guo, Z., Li, P., Yang, X., Wang, Z., Lu, B., Chen, W., Wu, Y., Li, G., Zhao, Z., Liu, G., Ritsema, C.J., Geissen, V., Xue, S., 2022. Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. *Environ. Int.* 165(107293). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293>.
34. Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., Wagner, M., 2019. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environ. Sci. Technol.* 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>.
35. Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C., 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.* 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>.
36. Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., Wang, J., 2020. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ. Pollut.* 260(114096). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>.
37. Ingrassia, R., Amato, G., Iovino, M., Frenda, A.S., Giambalvo, D., Rillig, M.C., 2022. Polyester microplastic fibers affect soil physical properties and erosion as a function of soil type. *SOIL* 8(2), 421–435. <https://doi.org/10.5194/soil-8-421-2022>.
38. Jansen, M.A.K., Andrady, A.L., Bornman, J.F., Aucamp, P.J., Bais, A.F., Banaszak, A.T., Barnes, P.W., Bernhard, G.H., Bruckman, L.S., Busquets, R., Häder, D.P., Hanson, M.L., Heikkilä, A.M., Hylander, S., Lucas, R.M., Mackenzie, R., Madronich, S., Neale, P.J., Neale, R.E., Olsen, C.M., Ossola, R., Pandey, K.K., Petropavlovskikh, I., Revell, L.E., Robinson, S.A., Robson, T.M., Rose, K.C., Solomon, K.R., Sulzberger, B., Wallington, T.J., Wang, Q.W., Wängberg, S.Å., White, C.C., Young, A.R., Zepp, R.G., Zhu, L., 2024. Plastics in the environment in the context of UV radiation, climate change and the Montreal Protocol: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2023. *Photochem. Photobiol. Sci.* 23(4), 629–650. <https://doi.org/10.1007/s43630-024-00552-3>.
39. Jenner, L.C., Rotchell, J.M., Bennett, R.T., Cowen, M., Tentzeris, V., Sadofsky, L.R., 2022. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* 831(154907). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>.
40. Jia, L., Liu, L., Zhang, Y., Fu, W., Liu, X., Wang, Q., Tanveer, M., Huang, L., Xiang, L., 2023. Microplastic stress in plants: Effects on plant growth and their remediations. *Front. Plant Sci.* 14(1226484). <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1226484>.
41. Jing, X., Su, L., Wang, Y., Yu, M., Xing, X., 2023. How do microplastics affect physical properties of silt loam soil under wetting-drying cycles? *Agronomy* 13(844). <https://doi.org/10.3390/agronomy13030844>.
42. Jordán, A., Zavala, L. M., Mataix-Solera, J., Doerr, S. H., 2013. Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena* 108, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.005>.
43. Ju, T., Yang, K., Chang, L., Zhang, K., Wang, X., Zhang, J., Xu, B., Li, Y., 2023. Microplastics sequestered in the soil affect the turnover and stability of soil aggregates: A review. *Sci. Total Environ.* 904(166776). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166776>.
44. Kang, Q., Zhang, K., Dekker, S.C., Mao, J., 2025. Microplastics in soils: A comprehensive review. *Sci. Total Environ.* 960(178298). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178298>.
45. Kim, S.W., Waldman, W.R., Kim, T.Y., Rillig, M.C., 2021. Indirect effects of microplastic-contaminated soils on adjacent soil layers: Vertical changes in soil physical structure and water flow. *Front. Environ. Sci.* 9, 681934. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.681934>.
46. Lai, S., Fan, C., Yang, P., Fang, Y., Zhang, L., Jian, M., Dai, G., Liu, J., Yang, H., Shen, L., 2025. Effects of different microplastics on the physicochemical properties and microbial diversity of rice rhizosphere soil. *Front. Microbiol.* 15(1513890). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1513890>.
47. Lehmann, A., Fitschen, K., Rillig, M.C., 2019. Abiotic and biotic factors influencing the effect of microplastic on soil aggregation. *Soil Syst.* 3(21). <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010021>.
48. Lehmann, A., Leifheit, E.F., Gerdawischke, M., Rillig, M.C., 2021. Microplastics have shape- and polymer-dependent effects on soil aggregation and organic matter loss: An experimental and meta-analytical approach. *Microplast. Nanoplast.* 1(7). <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00007-x>.
49. Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, A.D., Garcia-Vallejo, J.J., Lamoree, M.H., 2022. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environ. Int.* 163(107199). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>.
50. Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W.J.G.M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., Zhang, Y., 2020. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nat. Sustain.* 3, 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>.

51. Li, Q., Bogush, A., Van De Wiel, M., Wu, P., Holtzman, R., 2025. Microplastics transport in soils: A critical review. *Earth-Sci. Rev.* 264(105108). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105108>.
52. Liang, Y., Lehmann, A., Ballhausen, M.B., Müller, L., Rillig, M.C., 2019. Increasing temperature and microplastic fibers jointly influence soil aggregation by saprobic fungi. *Front. Microbiol.* 10(2018). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02018>.
53. Liang, Y., Lehmann, A., Yang, G., Leifheit, E.F., Rillig, M.C., 2021. Effects of microplastic fibers on soil aggregation and enzyme activities are organic matter dependent. *Front. Environ. Sci.* 9(650155). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.650155>.
54. Liu, Y., Wu, N.-N., Xu, R., Li, Z.-H., Xu, X.-R., Liu, S., 2024. Phthalates released from microplastics can't be ignored: Sources, fate, ecological risks, and human exposure risks. *Trends Anal. Chem.* 179, 117870. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117870>.
55. Lozano, Y.M., Aguilar-Trigueros, C.A., Onandia, G., Maass, S., Zhao, T., Rillig, M.C., 2021a. Effects of microplastics and drought on ecosystem functions and multifunctionality. *J. Appl. Ecol.* 58(5), 988–996. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13839>.
56. Lozano, Y.M., Caesaria, P.U., Rillig, M.C., 2022. Microplastics of different shapes increase seed germination synchrony while only films and fibers affect seed germination velocity. *Front. Environ. Sci.* 10(1017349). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1017349>.
57. Lozano, Y.M., Lehnert, T., Linck, L.T., Lehmann, A., Rillig, M.C., 2021b. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. *Front. Plant Sci.* 12(616645). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616645>.
58. Maqbool, A., Soriano, M.A., Gómez, J.A., 2023. Macro- and micro-plastics change soil physical properties: A systematic review. *Environ. Res. Lett.* 18(123002). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0a1a>.
59. Mirzaei, A., Sepehri, A., 2026. Effect of *Serendipita indica* fungus on biomass, bioaccumulation, and translocation of some nutrients in *Koshia* (*Bassia scoparia*) exposed to cadmium, microplastic and drought stress. *J. Soil Plant Interactions* 17(1), 51–74. <https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21222>. (In Persian with English abstract).
60. Möhrke, A.C.F., Haegerbaeumer, A., Traunsperger, W., Höss, S., 2022. Underestimated and ignored? The impacts of microplastic pollution on soil invertebrates—Current scientific knowledge and research needs. *Front. Environ. Sci.* 10(975904). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.975904>.
61. Mondol, M., Angon, P.B., Roy, A., 2025. Effects of microplastics on soil physical, chemical and biological properties. *Nat. Hazards Res.* 5(1), 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.02.002>.
62. Nikoumaram, S., Sepehri, A., 2024. Tolerance Indices, Germination and Transfer Efficiency of Seed Reserves in Foxtail Millet Seedlings (*Setaria italica* L.) as Affected by Cadmium and Polyvinyl Chloride Stresses. *J. Soil Plant Interactions* 15(1), 33–50. <https://doi.org/10.47176/jspi.15.1.21221>. (In Persian with English abstract).
63. Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S., 2016. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environ. Sci. Technol.* 50(20), 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>.
64. Nosrati, K., Taherinezhad-Javazm, K., Fiener, P., 2026. The impact of wind erosion on the transport and enrichment of microplastics in arid lands. *Aeolian Res.*, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2026.101053>.
65. Pan, B., Zhang, F., Zhu, X., Huang, L., Wu, Y., Tang, J.Q., Feng, N.X., 2024. Global trends and hotspots evolution in soil microplastic pollution research: A bibliometric analysis based on the Web of Science. *Ecol. Indic.* 161(111974). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111974>.
66. Panno, S.V., Kelly, W.R., Scott, J., Zheng, W., McNeish, R.E., Holm, N., Hoellein, T.J., Baranski, E.L., 2019. Microplastic contamination in karst groundwater systems. *Groundwater* 57(2), 189–196. <https://doi.org/10.1111/gwat.12862>.
67. Qi, Y., Beriot, N., Gort, G., Huerta Lwanga, E., Gooren, H., Yang, X., Geissen, V., 2020. Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties. *Environ. Pollut.* 266(115097). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115097>.
68. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
69. Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M.C.A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., Giorgini, E., 2021. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environ. Int.* 146(106274). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>.
70. Ren, Z., Gui, X., Xu, X., Zhao, L., Qiu, H., Cao, X., 2021. Microplastics in the soil-groundwater environment: Aging, migration, and co-transport of contaminants: A critical review. *J. Hazard. Mater.* 419(126455). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126455>.
71. Rillig, M.C., 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environ. Sci. Technol.* 46(12), 6453–6454. <https://doi.org/10.1021/es302011r>.
72. Rillig, M.C., Bergmann, J., Lehmann, A., Liang, Y., Lück, M., Müller, A., Ryo, M., 2019. Microplastic effects on

- plants. *New Phytol.* 223(3), 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>.
73. Rillig, M.C., Ziersch, L., Hempel, S., 2017. Microplastic transport in soil by earthworms. *Sci. Rep.* 7(1362). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7>.
74. Roghani, M., Shirvani, M., 2025. Determination of the number and types of microplastic particles in urban soils of Isfahan city. 19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart Soil and Water Management), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, 2–4 December 2025. (In Persian with English abstract).
75. Rostampour, S., Jhang, S.S., Hsu, J.K., Cook, R., Li, Y., Fan, C., Sung, L.P., 2025. Evaluating the environmental factors on microplastic generation: An accelerated weathering study. *Microplastics* 4(13). <https://doi.org/10.3390/microplastics4010013>.
76. Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M.A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., Guo, G., 2022. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environ. Technol. Innov.* 27(102408). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>.
77. Samadi, A., Nosrati, K., Dehbandi, R., 2025. The impact of microplastic on selected soil physical and chemical properties. *Iran. J. Soil Water Res.* 56(4), 919–934. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387179.669855>.
78. Seo, Y., Lai, Y., Chen, G., Dearnaley, J., Li, L., Song, P., 2025. Size and concentration-dependent effects of polyethylene microplastics on soil chemistry in a microcosm study. *J. Hazard. Mater.* 497(139668). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139668>.
79. Shafea, L., Felde, V.J.M.N.L., Woche, S.K., Bachmann, J., Peth, S., 2023. Microplastics effects on wettability, pore sizes and saturated hydraulic conductivity of a loess topsoil. *Geoderma* 437(116566). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116566>.
80. Shariati, S., Ebenau-Jehle, C., Pourbabaee, A. A., Alikhani, H. A., Rodriguez-Franco, M., Agne, M., et al., 2022a. Degradation of dibutyl phthalate by *Paenarthrobacter* sp. Shss isolated from Saravan landfill, Hyrcanian Forests, Iran. *Biodegradation* 33(1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09966-7>.
81. Shariati, S., Karbassi, A., Baghdadi, M., 2025. Forest Soil Exposed to Leachate as a New Source of DEHP-Degrading *Rhodococcus*. *Soil Sediment Contam.* 34(8), 2533–2547. <https://doi.org/10.1080/15320383.2025.2505931>.
82. Shariati, S., Pourbabaee, A. A., Alikhani, H. A., Rezaei, K., 2022b. Degradation of phthalic acid esters by the microbial consortium isolated from a contaminated soil. *Appl. Soil Res.* 10(2), 1–13. (In Persian with English abstract).
83. Shariati, S., Pourbabaee, A.A., Alikhani, H.A., Rezaei, K.A., 2019. Assessment of phthalic acid esters pollution in Anzali wetland, north of Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 7025–7036. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2110-3>.
84. Shariati, S., Pourbabaee, A.A., Alikhani, H.A., Rezaei, K.A., 2021b. Anaerobic biodegradation of phthalic acid by an indigenous *Ralstonia pickettii* strain SHAn2 isolated from Anzali international wetland. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03677-5>.
85. Shariati, S., Pourbabaee, A.A., Alikhani, H.A., Rezaei, K.A., Shariati, F., 2021a. Phthalic acid esters as pervasive emerging pollutants in the environment and their role in threatening food security and human health: A review. *Iran. J. Soil Water Res.* 52(8), 2253–2277. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.323985.668980>.
86. Sharma, E., Surendra, K.C., Thanh, D.T., Koottatep, T., 2025. A geospatial investigation of microplastics leaching in Ubon Ratchathani province, Thailand: Fuzzy logic-based analysis. *Environ. Monit. Assess.* 197(821). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14263-4>.
87. Sharma, N., Vuppu, S., 2023. In silico study of enzymatic degradation of bioplastic by microalgae: An outlook on microplastic environmental impact assessment, challenges, and opportunities. *Mol. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1007/s12033-023-00886-w>.
88. Soodaie Mashaei, S., Gharahi, N., Omid, R., 2025. Investigation of the state of microbial respiration in soil under microplastic contamination. 19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart Soil and Water Management), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, 16–18 September 2025. (In Persian with English abstract).
89. Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., Muñoz, K., Frör, O., Schaumann, G.E., 2016. Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Sci. Total Environ.* 550, 690–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>.
90. United Nations Environment Programme., 2023. Turning off the tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>.
91. Vaezi, S., Golchin, A., 2025. A review of the effects of microplastics on soil pollution: origin, behavior, and environmental consequences. 19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart Soil and Water Management), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran, 2–4 December 2025. (In Persian with English abstract).
92. van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., Geissen, V., 2020. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environ. Pollut.* 261(114198).

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114198>.

93. Vethaak, A.D., Legler, J., 2021. Microplastics and human health. *Science* 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>.

94. Wang, F., Wang, Q., Adams, C.A., Sun, Y., Zhang, S., 2022. Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. *J. Hazard. Mater.* 424(127531). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>.

95. Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., Zhang, P., 2019. Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Sci. Total Environ.* 691, 848–857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>.

96. Wang, K., Wang, F., Yu, Y., Yang, S., Han, Y., Yao, H., 2025. Microplastics and soil microbiomes. *BMC Biol.* 23(273). <https://doi.org/10.1186/s12915-025-02387-5>.

97. Wang, Z., Li, W., Li, W., Yang, W., Jing, S., 2023. Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures. *Chemosphere* 317(137762). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137762>.

98. Wu, J.Y., Gao, J.M., Pei, Y.Z., Luo, K.Y., Yang, W.H., Wu, J.C., Yue, X.H., Wen, J., Luo, Y., 2024. Microplastics in agricultural soils: A comprehensive perspective on occurrence, environmental behaviors and effects. *Chem. Eng. J.* 489(151328). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151328>.

99. Xie, Y., Wang, H., Guo, Y., Wang, C., Cui, H., Xue, J., 2024. Effects of microplastic contamination on the hydraulic, water retention, and desiccation crack properties of a natural clay exposed to leachate. *J. Environ. Manage.* 351(119858). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119858>.

100. Xing, X., Yu, M., Xia, T., Ma, L., 2021. Interactions between water flow and microplastics in silt loam and loamy sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 85(6), 1956–1962. <https://doi.org/10.1002/saj2.20337>.

101. Yu, Y., Battu, A.K., Varga, T., Denny, A.C., Zahid, T.M., Chowdhury, I., Flury, M., 2023. Minimal impacts of microplastics on soil physical properties under environmentally relevant concentrations. *Environ. Sci. Technol.* 57(13), 5296–5304. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09822>.

102. Zhang, G., Zhang, F., Li, X., 2019. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Sci. Total Environ.* 670, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.149>.

103. Zhang, G.S., Liu, Y.F., 2018. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Sci. Total Environ.* 642, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>.

104. Zhang, X., Liu, Y., He, D., 2025a. Earthworms multifacetedly drive size- and type-dependent microplastic transport in soils. *Environ. Pollut.* 382(126789). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126789>.

105. Zhang, X., Tang, D., Xiao, M., 2025b. Microplastics and human health: Unraveling the toxicological pathways and implications for public health. *Front. Public Health* 13(1567200). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1567200>.

اصلاح نشده