نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۱ / شماره ۲ / ۱۴۰۲. ص۲۴۹- ۲۶۳
https://doi.org/10.22092/lmj.2023.360499.321

مروری بر منابع ورودی میکروپلاستیک به خاک و اثرات آن بر سلامت خاک

شنو کریمی* و زهرا کلاه‌چی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. **shno.karimi71@gmail.com**

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان. **zkolahchi@basu.ac.ir**

دریافت: آذر ۱۴۰۱ و پذیرش: مرداد ۱۴۰۲

چکیده

تولید و استفاده انبوه از محصولات پلاستیکی راحتی را برای مردم به ارمغان می‌آورد و در عین حال منجر به تجمع آلاینده‌های پلاستیکی در محیط می‌شود، به‌طوری‌که آلودگی میکروپلاستیک و خطرات زیست‌محیطی مرتبط اخیراً به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. میکروپلاستیک‌ها عموماً به‌عنوان ذرات پلاستیکی با اندازه کمتر از پنج میلی‌متر تعریف می‌شوند. ازآنجایی‌که سالانه مقادیر زیادی ضایعات پلاستیکی در محیط رها می‌شود، میکروپلاستیک‌ها در حال حاضر به‌طور گسترده در محیط‌های مختلف، مانند اقیانوس‌ها، آب‌های شیرین، درون بدن حیوانات آبزی، خاک و لجن شناسایی می‌شوند. مطالعه میکروپلاستیک‌ها در خاک از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا خاک‌ها مخزن مهمی برای میکروپلاستیک‌ها هستند و طیف وسیعی از خدمات اکوسیستمی را ارائه می‌دهند که برای زندگی ضروری هستند. منابع متعدد میکروپلاستیک در خاک شناسایی شده است. در حال حاضر، منابع شناخته شده میکروپلاستیک‌ها عبارتند از کمپوست، لجن فاضلاب، آبیاری، مالچ پلاستیک، ریختن زباله و ته‌نشست اتمسفری. برهمکنش ویژگی‌های مختلف میکروپلاستیک‌ها (وسعت ورود میکروپلاستیک‌ها به محیط، اندازه ذرات و نوع ترکیبات ساختاری میکروپلاستیک‌ها) و عوامل محیطی، انتقال و ماندگاری میکروپلاستیک‌ها در خاک را کنترل می‌کند. در سیستم خاک، پلاستیک می‌تواند برهمکنش بین ذرات، آب، ترکیبات شیمیایی و موجودات زنده را تغییر دهد و بر خصوصیات مختلف اگرواکوسیستم‌ها تأثیرگذار باشد. در این مطالعه، مروری بر تحقیقات صورت گرفته در جهان و ایران در مورد منابع ورودی میکروپلاستیک در خاک و اثرات و خطرات آن بر سلامت خاک و انسان پرداخته شده است.

واژه‌هایی کلیدی: آلودگی، میکروپلاستیک‌ها، عوامل محیطی، اکوسیستم

*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: shno.karimi71@gmail.com

نوع مقاله: مروری

مقدمه

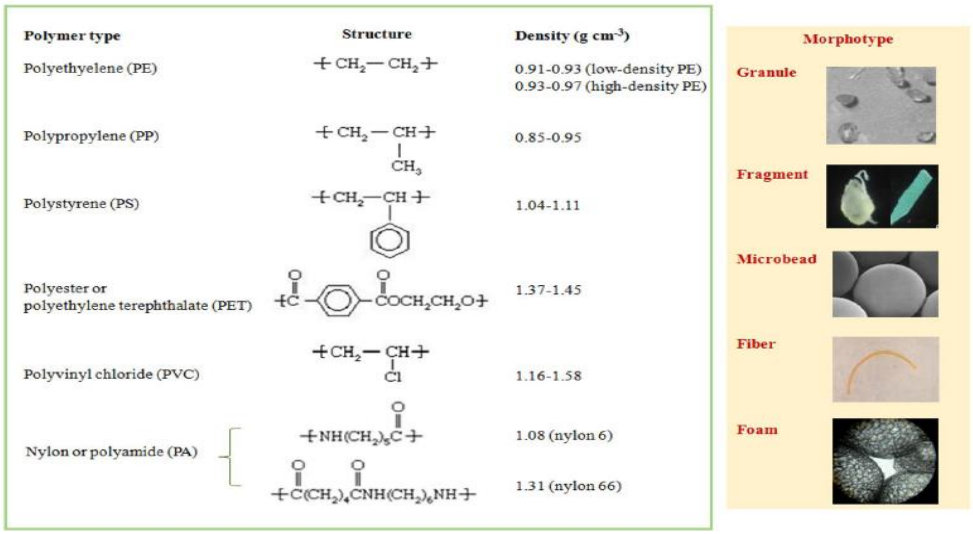
پلاستیک‌ها گروه مختلفی از مواد پلیمری مصنوعی هستند که به جزئی از زباله‌های مصنوعی و آلودگی محیطی تبدیل شده‌اند (Chen *et al.*, 2020; Weber and de Souza Machado *et al.*, 2018; Opp, 2020). پلاستیک‌ها به‌عنوان یک ماده شیمیایی متفرقه، به دلیل دارا بودن ویژگی‌های تطبیق‌پذیری، پایداری، سبکی و هزینه‌های تولید پایین آن، کمبود مواد طبیعی را تا حدودی کاهش داده و آن‌ها را به‌عنوان مواد ضروری در زمینه‌های مختلف توسعه اجتماعی و اقتصادی تبدیل کرده است، در نتیجه تقاضا و تولید پلاستیک سال‌به‌سال در حال افزایش است. سالانه حدود ۴/۹ میلیارد تن پلاستیک تولید می‌شود و نزدیک به ۶۰ درصد از کل پلاستیک‌ها در محل‌های دفن زباله و محیط‌زیست دفع می‌شوند و در حال انباشته شدن هستند (*Shafea et al.*, 2020). تولید جهانی پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن (متداول‌ترین میکروپلاستیک‌ها در خاک) با نرخ سالانه تقریباً هفت درصد (در سال‌های ۱۹۵۰ تا-۲۰۱۲) در حال افزایش است (Andrady, 2017). با این حال، بازیابی محدود و نامناسب زباله‌های پلاستیکی منجر به تجمع قابل مشاهده زباله‌های پلیمری در محیط شده است تا جایی که آن‌ها در معرض تجزیه شدن سیستماتیک[1] (تجزیه با استفاده از یک روش نظام‌مند) ناشی از اشعه ماوراء بنفش (UV) و سایش مکانیکی هستند (Chen *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). چنانچه مدیریت زباله‌های پلاستیکی به همین منوال ادامه یابد، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ بالغ بر ۱۲ میلیارد تن زباله پلاستیکی به محل‌های دفن زباله یا سامانه‌های خشکی وارد شود (Geyer *et al.*, 2017) و به‌تدریج، میکروپلاستیک را می‌توان در جاهای مختلف محیطی، غذا، آب آشامیدنی و حتی بدن انسان یافت (Wang *et al.*, 2021). میکروپلاستیک‌ها هم از نظر علمی و هم از نظر اجتماعی توجه مردم را به خود جلب می‌کنند و حقایقی درباره آن‌ها در حال بررسی است.

میکروپلاستیک‌ها، ذرات پلاستیکی هستند که عموماً با اندازه کمتر از پنج میلی‌متر تعریف می‌شوند (Akdogan and Guven, 2019; Rillig, 2018) که بیش از یک دهه با مطالعات دقیق و فشرده یک موضوع تحقیقاتی ثابت در محیط‌های آبی بوده است (Rillig, 2018).

شناسایی پلیمری

شناسایی میکروپلاستیک‌ها برای ردیابی منبع آلودگی اهمیت زیادی دارد (Huang *et al.*, 2020a, b). انواع رایج پلیمرهای شناسایی شده در خاک عبارت‌اند از پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌آمید (PA)، پلی-استایرن (PS)، پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌استر (PET). PE و PP انواع پلیمرهایی هستند که اغلب در خاک یافت می‌شوند (شکل ۱). به‌عنوان مثال، در زمین‌های کشاورزی در استان سین کیانگ چین، میکروپلاستیک غالب ناشی از مالچ پلاستیک، پلی‌اتیلن، بوده است (Huang *et al.*, 2020a, b; Li *et al.*, 2020).

[1] -systematic fragmentation



شکل ۱- میکروپلاستیک‌های معمولی که در محیط‌های آبی و خاکی دیده می‌شوند. نوع پلیمر به ساختار پلیمری و تراکم پلیمر به مورفوتایپ (شکل ظاهری) میکروپلاستیک اشاره دارد (Andrady, 2011)

Fig1- Typical microplastics encountered in aquatic (and terrestrial) environments. Polymer type; polymer structure; polymer density and microplastic morphotype (Andrady 2011)

با این حال، با توجه به اینکه بیش‌تر زباله‌های پلاستیکی در خشکی تولید و تخلیه می‌شوند، جای تعجب است که مدت زمان کوتاهی است که به مطالعه میکرو پلاستیک‌ها در سامانه‌های خشکی پرداخته شده است، در حالی که خاک یک مخزن بلندمدت مهم برای زباله‌های میکروپلاستیک است (Kumar *et al.*, 2020; Moller *et al.*, 2020; Rilig and Leman, 2020). مطالعات محدود نشان داده است که تعداد زیادی میکروپلاستیک فیبری و تجزیه شده در خاک‌های سراسر جهان یافت می‌شود (Van den Berg *et al.*, 2020). به‌عنوان مثال، اخیراً میکروپلاستیک‌های تجزیه‌شده در خاک‌های مزارع کشاورزی شناسایی شده است، جایی که کاربرد لجن فاضلاب به تجمع میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های کشاورزی کمک می‌کند (Van den Berg *et al.*, 2020). علاوه بر این، منشأ و مسیرهای بالقوه ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک متنوع است که شامل کاربرد لجن فاضلاب و کمپوست (Huerta Lwanga *et al.*, 2017) ، آبیاری (Blasing and amelung, 2018) ، پوشش پلاستیکی (Zhang *et al.*, 2020b) ، زباله‌ریزی (Akdogan and Guven, 2019) و همچنین ته‌نشست جوی است (Allen *et al.*, 2019). هنگامی که میکروپلاستیک‌ها در خاک انباشته می‌شوند، می‌توانند توسط گیاهان جذب شوند و در طول زنجیره‌ی غذایی منتقل شوند (Gou *et al.*, 2020). البته آلاینده‌های جذب شده توسط میکروپلاستیک‌ها نیز وارد زنجیره‌ی غذایی می‌شود. خاک‌های شهری و کشاورزی، به‌ویژه، در برابر آلودگی میکروپلاستیک آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند، زیرا اغلب در معرض فعالیت‌های مصنوعی و در نتیجه راه‌های ورودی میکروپلاستیک قرار می‌گیرند (Moller *et al.*, 2020). امروزه شواهد بیش‌تر و بیش‌تری نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها در همه خاک‌ها وجود دارند. با این حال، شناخت ما از میکروپلاستیک‌ها در خاک هنوز ناقص است (Huang *et al.*, 2020a, b). علاوه بر این، کمی‌سازی و روش‌های مورد استفاده برای جمع‌آوری، پردازش و تجزیه‌وتحلیل نمونه فاقد هماهنگی یا استانداردسازی است که امکان مقایسه جامع در مورد تجمع میکروپلاستیک‌ها در خاک جوامع تحقیقاتی مختلف را نمی‌دهد (Yang *et al.*, 2021).

منابع ورودی میکروپلاستیک به خاک

خاکپوش (پوشش) پلاستیکی

در اثر استفاده زیاد از پوشش‌های پلاستیکی، مقادیر زیادی میکروپلاستیک به خاک اضافه می‌شود بدون اینکه راه حلی برای توقف آن‌ها وجود داشته باشد (Huang *et al.*, 2020b). لایه خاکپوش که از پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌اتیلن (PE) تشکیل شده است، به دلیل مزایای اقتصادی قابل توجهی مانند برداشت بیش‌تر محصول، بهبود کیفیت میوه و بهبود راندمان استفاده از آب به یک فناوری پرکاربرد در تولید کشاورزی جهانی تبدیل شده است (Huang *et al.*, 2020b). بازار جهانی مصرف لایه‌های پلاستیکی کشاورزی چهار میلیون تن در سال ۲۰۱۶ بوده است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ با نرخ سالانه ۵/۶ درصد رشد کند (Huang *et al.*, 2020b). حدود ۲۰ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در سراسر جهان با پوشش پلاستیکی پوشیده شده است که چین بیش‌ترین سهم (تقریباً ۹۰٪) را به خود اختصاص داده است (Huang *et al.*, 2020a). حذف تمام لایه‌های خاکپوش از زمین‌های کشاورزی کار سخت و زمان‌بر است، بنابراین، لایه‌های خاکپوش یا قطعاتی از آن‌ها اغلب به‌صورت عمدی یا ناخواسته در زمین‌های کشاورزی رها می‌شوند. یک همبستگی خطی قوی ($R^2 = 0.61$، $p < 0.001$) بین حضور و تجمع بقایای میکروپلاستیکی و استفاده از پوشش پلاستیکی در خاک‌های کشاورزی در سراسر چین (بین سال‌های ۲۰۱۲ تا-۲۰۱۶) مشاهده شده است که به این معنی است که کاربرد خاکپوش پلاستیکی منبع اصلی میکروپلاستیک‌ها است (Huang *et al.*, 2020a).

زباله‌های پلاستیکی

طیف گسترده‌ای از زباله‌های میکروپلاستیک به دلیل توسعه بیش از حد پلاستیک‌ها و اقدامات مدیریتی برنامه‌ریزی نشده یا ناکافی در محیط خاک مشابه محیط‌های آبی، موجود است (Kumar *et al.*, 2020; Akdogan and Guven, 2019). میکروپلاستیک‌ها می‌توانند از مقدار زیادی زباله پلاستیکی حاصل شوند (Blasing and Amelung, 2018; Wong *et al.*, 2020). تخمین زده می‌شود که بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۵، تقریباً ۶/۳ میلیارد تن زباله پلاستیکی در سطح جهان تولید شده است که ۴/۹۷ میلیارد تن آن در محل‌های دفن زباله و محیط‌های طبیعی انباشته شده است (Geyer *et al.*, 2017). زباله‌های پلاستیکی با مدیریت ضعیف معمولاً در نزدیکی جاده‌ها، در خاک یا مکان‌های تخلیه غیرقانونی پراکنده می‌شوند (Zhang *et al.*, 2018a). در طول کار میدانی، کیسه‌ها و بطری‌های پلاستیکی مورد استفاده برای آفت‌کش‌ها و کودها در اطراف زمین‌های کشاورزی پراکنده شده‌اند. ویژگی‌های مورفولوژیکی میکروپلاستیک‌ها نشان می‌دهد که سطح بیش‌تر میکروپلاستیک‌ها در زمین‌های کشاورزی به‌شدت هوازده شده است که فرضیه تبدیل پلاستیک‌ها به میکروپلاستیک‌ها را اثبات می‌کند (Li *et al.*, 2020). با این حال، تاکنون هیچ مطالعه‌ای میزان میکروپلاستیکی را که از طریق ریختن زباله یا ریختن غیرقانونی زباله به خاک می‌رسد، تعیین نکرده است ولی ممکن است راه ورود این میکروپلاستیک‌ها به خاک از طریق باد، رواناب شهری و سیل باشد (Wong *et al.*, 2020).

لجن فاضلاب

استفاده از لجن فاضلاب و فاضلاب منجر به وقوع آلودگی میکروپلاستیک می‌شود و میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با استفاده مکرر از لجن در خاک تجمع کنند (Xu *et al.*, 2019). تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، میکروپلاستیک‌ها را از فاضلاب در مسیرهای متعدد دریافت می‌کنند (Gao *et al.*, 2020). ریزدانه‌های پلاستیکی[2] حاصل از استفاده از محصولات تمیزکننده و مراقبت شخصی، همراه با الیاف پلیمری آزاد شده از شستشوی پارچه‌های نساجی، همچنین مواد پلاستیکی

[2] -Microbeads

نشت شده از کارخانه فرآوری پلاستیک و میکروپلاستیک‌های حاصل از لاستیک‌های خودرو به فاضلاب منتقل می‌شوند. این میکروپلاستیک‌ها در فرآیند تصفیه فاضلاب جریان یافته و ته‌نشین می‌شوند. بخشی از آن‌ها از سیستم فاضلاب تخلیه می‌شود، درحالی‌که بیش‌تر میکروپلاستیک‌ها از طریق فرآیند ته‌نشینی تصفیه فاضلاب جدا شده و در نهایت همراه لجن فاضلاب می‌شوند (Gao *et al.*, 2020). به‌عنوان محصول نهایی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، لجن فاضلاب غنی از مواد آلی و عناصر کمیاب است، بنابراین معمولاً به‌عنوان کود استفاده می‌شود و در زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود (Blasing and Amelung, 2018). تقریباً ۵۰ درصد از لجن فاضلاب برای اهداف کشاورزی استفاده می‌شود، درحالی‌که در فنلاند و ایرلند تا ۷۲ درصد از لجن در زمین‌های کشاورزی ریخته می‌شود (Blasing and Amelung, 2018). علاوه بر این، مقداری از لجن به‌طور نامناسب (بدون ارزیابی محتوای لجن و مقدار آن) تخلیه می‌شود که همچنین می‌تواند آلودگی میکروپلاستیک خاک را تشدید کند. بر اساس گزارشی، میانگین غلظت میکروپلاستیک‌ها در خاک می‌تواند در یک سال پس از پنج بار ته‌نشست لجن (۲۰۰ تن وزن خشک در هکتار) به ۳/۵ ذره در گرم خاک برسد (Corradini *et al.*, 2019). مطالعه دیگری که در خاک‌های تحت کشاورزی فشرده چین انجام شد، نشان می‌دهد که در خاک‌هایی که حدود ۲۳ تن لجن در هکتار در سال استفاده می‌شود، دارای غلظت ۷ تا ۴۳ ذره میکروپلاستیک در گرم خاک، هستند (Zhang *et al.*, 2018b). همچنین با ارزیابی مزارعی با تعداد متفاوت کاربرد لجن فاضلاب نشان دادند که لجن حاوی مقادیر زیادی میکروپلاستیک است. افزایش چگالی میکروپلاستیک‌ها در خاک با هر بار استفاده متوالی از لجن فاضلاب به ترتیب ۲۸۰ مورد میکروپلاستیک در کیلوگرم خاک و ۴۳۰ مورد میکروپلاستیک در کیلوگرم خاک است (Van den Berg *et al.*, 2020). اگرچه افزایش میکروپلاستیک‌های گزارش شده متفاوت است، اما این یک واقعیت غیرقابل انکار است که استفاده از لجن فاضلاب منجر به آلودگی میکروپلاستیک می‌شود.

کمپوست زباله و لجن فاضلاب

اصلاح خاک با کمپوست می‌تواند مسیری برای رسیدن میکروپلاستیک‌ها به خاک فراهم کند. به‌طورکلی، پسماندهای آلی پس از کمپوست شدن و تخمیر برای استفاده مجدد از مواد مغذی، عناصر کمیاب و هوموس، به‌عنوان کود آلی در زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شوند. کاربرد کمپوست در اصل یک روش تولید کشاورزی سازگار با محیط‌زیست است. بااین‌حال، نشان داده شده است که در ترکیب کمپوست‌های تهیه‌شده از زباله‌هایی با جداسازی و طبقه‌بندی غیراصولی، پلاستیک مشاهده می‌شود (Blasing and Amelung, 2018). در یک کارخانه کمپوست‌سازی در شهر بن آلمان، محتوای قطعات پلاستیکی قابل‌مشاهده با چشم غیرمسلح ۲/۳۸ تا ۱۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که وجود میکروپلاستیک در کمپوست آلی را تأیید می‌کند (Blasing and Amelung, 2018). Wheitmann *et al.*, 2018 دریافتند که کودهای آلی تولید شده از زباله‌های زیستی حاوی میکروپلاستیک‌هایی هستند که حدود ۱۴ تا ۸۹۵ عدد از آن‌ها اندازه ذرات بزرگ‌تر از یک میلی‌متر دارند. علاوه بر این، Crossman *et al.*, 2020 نشان دادند که علیرغم انطباق با قوانین قابل اجرا، کاربردهای جامد زیستی ممکن است منجر به نرخ بالای ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک شود. Zhang *et al.*, 2020a اخیراً دریافتند که غلظت کل میکروپلاستیک‌ها در خاک پس از استفاده سالانه با ۳۰ و ۱۵ تن در هکتار کمپوست لجن ۵۴۵/۹ و ۸۷/۶ مورد میکروپلاستیک در کیلوگرم خاک است که به‌طور قابل توجهی بالاتر از خاک بدون کاربرد کمپوست است. این عدد شگفت‌انگیز، کمپوست را به یکی از راه‌های مهم ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک تبدیل می‌کند. علاوه بر این، کمپوست به‌طور گسترده در

سراسر جهان استفاده می‌شود و میکروپلاستیک‌های حمل شده توسط کمپوست لجن را نمی‌توان نادیده گرفت (Zhang *et al.*, 2020a).

آبیاری

وجود میکروپلاستیک‌ها در منابع آبی مورد استفاده برای آبیاری کشاورزی به‌طور گسترده تأیید شده است (Hu *et al.*, 2018). در سطح جهان، منابع اصلی آب آبیاری شامل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و آب‌های زیرزمینی است. در برخی مناطق که منابع آب کمیاب هستند، از فاضلاب برای آبیاری نیز استفاده می‌شود (Blasing and Amelung, 2018). اگرچه تعداد زیادی میکروپلاستیک را می‌توان در فرآیند تصفیه فاضلاب حذف کرد، اما هنوز غلظت بالایی از میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب تصفیه‌شده وجود دارد (Li *et al.*, 2018). همچنین تاکنون، مطالعات گسترده و دقیق وجود سطوح بالای میکروپلاستیک در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و آب‌های زیرزمینی را گزارش کرده‌اند (Li *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2021). Li *et al.*, 2018 و Yang *et al.*, 2021 گزارش کردند که میکروپلاستیک‌های موجود در این منابع آبی از طریق آبیاری به خاک منتقل می‌شوند و منبعی از میکروپلاستیک‌ها در خاک تشکیل می‌دهند.

رواناب شهری و سیل

علاوه بر آبیاری، رواناب شهری و جاری شدن سیل مسیرهای مهمی برای انتقال و تجمع ماکروپلاستیک‌ها و میکروپلاستیک‌ها به خاک هستند (Blasing and Amelung, 2018؛ He *et al.*, 2018). رواناب شهری و جاری شدن سیل می‌تواند باعث تخلیه نامناسب زباله در نزدیکی جاده‌ها و سایش لاستیک (حاوی لاستیک، یک پلیمر عمدتاً مصنوعی) در خاک شود (He *et al.*, 2018).

ورودی اتمسفر

ته‌نشست اتمسفری راه مهمی برای رسوب میکروپلاستیک‌ها به خاک است (Zhang *et al.*, 2020b). Dris *et al.*, 2017 ابتدا رسوب میکروپلاستیک‌های فیبری را در داخل و خارج از خانه گزارش و تخمین زدند که جریان ته‌نشینی میکروپلاستیک‌های جوی در فضای باز می‌تواند به ۰/۳ تا ۱/۵ فیبر در مترمکعب برسد. مطالعات موجود تأیید کرده‌اند که ته‌نشست اتمسفری یکی از منابع اصلی ورود میکروپلاستیک به خاک است. بااین‌حال، مناطق بزرگ نمونه‌برداری و نظارت طولانی‌مدت باید برای تعیین سهم انتقال میکروپلاستیک‌ها به خاک ایجاد شود. شایان ذکر است که محققان به‌طور تقریبی منبع میکروپلاستیک‌ها را می‌دانند، در واقع، نیروی محرکه و نرخ تخریب در تولید میکروپلاستیک‌های منبع ثانویه ناشی از هوازدگی محیطی مشخص نیست (Eerkes-Medrano *et al.*, 2015). ممکن است درجات مختلفی از نیروهای فیزیکی مانند تابش فرابنفش و نیروهای برشی ناشی از شخم در خاک سطحی وجود داشته باشد (Piehl *et al.*, 2018). آزمایش‌های شبیه‌سازی باید نرخ تخریب میکروپلاستیک‌ها را تحت شرایط و نیروهای مختلف محیطی مشخص کنند (Piehl *et al.*, 2018).

انتقال میکروپلاستیک‌ها در خاک

جابه‌جایی یک عامل مهم و کلیدی در گسترش نفوذ میکروپلاستیک‌ها در خاک است که شامل جابه‌جایی افقی و عمودی، جابه‌جایی زیستی و غیرزیستی است (Xu *et al.*, 2020). میکروپلاستیک‌ها در خاک سطحی می‌توانند در اثر رواناب سطحی یا باد جابجا شوند (Li *et al.*, 2020) و از نفوذ آن‌ها در خاک جلوگیری شود. وجود میکروپلاستیک‌ها در خاک عمیق شواهدی را برای انتقال میکروپلاستیک‌ها به سمت پایین فراهم می‌کند (Liu *et al.*, 2018). ماهیت متخلخل خاک اجازه می‌دهد تا میکروپلاستیک‌ها در محدوده میکرومتر از طریق منافذ

خاک با شستشو منتقل شوند. برای میکروپلاستیک‌های بزرگ‌تر، نیروهای خارجی مانند اختلالات زیستی و فعالیت‌های کشاورزی باعث می‌شوند این بخش از میکروپلاستیک‌ها در خاک جابجا شوند. درعین‌حال حرکت ریشه، گسترش ریشه، استخراج آب ریشه و غیره نیز ممکن است بر انتقال میکروپلاستیک‌ها در خاک تأثیر بگذارد. جانوران خاک ممکن است به انتقال عمودی و افقی میکروپلاستیک‌ها در خاک کمک کنند (Xu *et al.*, 2019). کشف شده است که کرم‌های خاکی و گونه‌های کلمبولا[3] میکروپلاستیک‌ها را از طریق چسبندگی یا از طریق دفع منتقل و پراکنده می‌کنند (de SouzaMachado *et al.*, 2018). علاوه بر این، پیدایش ترک‌هایی در خاک ناشی از آب‌وهوای خشک، امکان دسترسی میکروپلاستیک‌ها به خاک عمیق را فراهم می‌کند (Li *et al.*, 2020).

فراوانی میکروپلاستیک در خاک

Fuller and Gautam, 2016 وجود میکروپلاستیک‌ها را در خاک‌های صنعتی سیدنی استرالیا بررسی و دریافتند که غلظت میکروپلاستیک‌ها به‌طور گسترده‌ای در محدوده ۳۰۰ تا ۶۷۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر است. Zhou *et al.*, 2016 میکروپلاستیک‌ها را از خاک‌های منطقه ساحلی (هبی، چین) جدا کردند و ویژگی‌های سطحی آن‌ها را مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند که میانگین فراوانی میکروپلاستیک‌ها ۶۳۴ عدد بر کیلوگرم وزن خشک خاک است که ۷۵ درصد آن را گرانول و ۲۰ درصد را قطعه‌ای تشکیل می‌دهند. مطالعه دیگر آن‌ها نشان داد که فراوانی میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های ساحلی (شانگدونگ، چین) از ۱/۳ تا ۱۴۷۱۲/۵ عدد بر کیلوگرم وزن خشک خاک بود و تقریباً ۶۰ درصد میکروپلاستیک‌های مشاهده شده دارای اندازه کمتر از یک میلی‌متر بودند (Zhou *et al.*, 2018). در گزارشی دیگر تا غلظت ۵۵/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم (۵۹۳ عدد بر کیلوگرم) ذره میکروپلاستیک در ۲۶ نمونه خاک دشت سیلابی در سوئیس یافت شد (Scheurer and Bigalke, 2018). Li *et al.*, 2018 فراوانی میکروپلاستیک‌ها را در ۷۹ نمونه لجن فاضلاب در چین تجزیه‌وتحلیل کردند و نتایج نشان داد که فراوانی بین ($۱/۶ - ۴/۵۶\times۱۰^{۳}$) عدد بر کیلوگرم وزن خشک خاک است که این مقدار بیش‌تر از فراوانی میکروپلاستیک‌ها در دشت سیلابی یا خاک‌های ساحلی است. جدول ۱ فراوانی و ویژگی‌های میکروپلاستیک در خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد.

[3] -Collembola

جدول ۱- وجود و ویژگی‌های میکروپلاستیک در انواع مختلف خاک (He *et al.*, 2018)

Table 1- The existence and characteristics of microplastics in different types of soil (He *et al.*, 2018)

نوع خاک	فراوانی	اندازه	شکل	ترکیب
خاک صنعتی	300-67.500 میلی‌گرم بر کیلوگرم	–	–	PVC(>80%), PE, PS
خاک ساحلی	14712.5- 1.3 مورد بر کیلوگرم	60 درصد در محدود اندازه کوچک‌تر از یک میلی‌متر	فوم‌ها، گلوله‌ها، قطعات، تکه‌ها، الیاف، فیلم‌ها و اسفنج‌ها	PE, PP, PS, Polyether urethane
خاک دشت سیلابی	بیشتر از 55.5 میلی‌گرم بر کیلوگرم یا 593 مورد بر کیلوگرم	80 درصد در محدوده اندازه 125-500 میکرومتر	–	PE, PS, SBR,PVC
خاک کشاورزی (مزرعه)	کمتر از 0.54 میلی‌گرم بر کیلوگرم	100< میکرومتر	-	PE
خاک کشاورزی (باغ)	42960- 7100 مورد بر کیلوگرم	10 – 0.05 میلی‌متر	الیاف غالب و به دنبال آن قطعات و فیلم‌ها را تشکیل می‌دهند	-
زمین زراعی	78 مورد بر کیلوگرم	16- 0.03 میلی‌متر	الیاف، فیلم، قطعه	PE (50.51%), PP (43.43%), PES (6.06%)

اثرات و خطرات بالقوه میکروپلاستیک در اکوسیستم خاک

تأثیر بر ویژگی‌های خاک

میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با تأثیر بر pH، ساختار خاک، حاصلخیزی و مواد مغذی خاک، میکروب‌های خاک و خاکدانه‌های پایدار در برابر آب، خواص بیوفیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهند (de SouzaMachado *et al.*, 2019). میکروپلاستیک‌ها به‌تدریج در ساختار خاکدانه‌ها وارد شده و به شکل‌های مختلف با خاکدانه پیوندهای سست یا محکم برقرار می‌کنند و از این طریق امکان تأثیرگذاری بر پایداری خاکدانه‌ها را خواهند داشت (Guo *et al.*, 2020). خاکدانه‌های خاک واحد اساسی ساختار خاک هستند و نقش مهمی در شکل دادن به زیستگاه موجودات خاک ایفا می‌کنند علاوه بر این، نقش اصلی در تخلخل کل خاک دارند که به نوبه خود بر حرکت گاز و آب و فعالیت‌های جوامع میکروبی مرتبط تأثیر می‌گذارد (Rillig and Lemann, 2020). هنگامی‌که میکروپلاستیک‌ها وجود دارند، چگالی ظاهری خاک کم است که اثرات غیرمستقیم کاملاً متفاوتی بر کل سیستم خاک خواهد داشت. در حال حاضر، اطلاعات زیادی در مورد چگونگی واکنش گیاهان در حضور میکروپلاستیک‌ها در دسترس نیست (Rillig and Lemann, 2020). اخیراً مطالعه‌ای توسط de SouzaMachado *et al.*, 2019 تأیید کردند که افزودن میکروپلاستیک پارامترهای فیزیکی خاک را تغییر می‌دهد و در نتیجه بر هیدرودینامیک و فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد و از طرفی تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر روی خاک به شکل و اندازه ذرات میکروپلاستیک بستگی دارد. همچنین این پژوهشگران نشان دادند که پس از افزودن پلی‌اتیلن با چگالی بالا، چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد، درحالی‌که چگالی خاک روند افزایشی را در ریزوسفر نشان می‌دهد. صفات ریشه گیاه، صفات برگ گیاه و زیست‌توده کل نیز تغییر کرده‌اند. Wan *et al.*, 2019 دریافتند که میکروپلاستیک‌ها می‌توانند با ایجاد کانال‌هایی برای حرکت آب، تبخیر آب خاک را تسریع کنند و این اثر با افزایش غلظت میکروپلاستیک افزایش می‌یابد. تجمع میکروپلاستیک‌ها همچنین می‌تواند یکپارچگی ساختاری خاک را از بین ببرد و باعث

ترک‌خوردگی خشکی در سطح خاک شود. پس از افزودن میکروپلاستیک‌ها، خاک نیز تغییر می‌کند (Boots *et al.*, 2019).

جذب میکروپلاستیک توسط گیاهان

میکروپلاستیک‌ها در خاک ممکن است آلاینده‌های محیطی مرکب باشند، زیرا اغلب، آلاینده‌های شیمیایی دیگر از جمله فلزات سنگین، دیوکسین‌ها و آلاینده‌های آلی پایدار را جذب می‌کنند (Kumar *et al.*, 2020؛ Wang *et al.*, 2020). همچنین ترکیبات آلاینده-ای که جزئی از ساختار خود میکروپلاستیک‌ها هستند ولی با ماتریکس پلیمری آن‌ها پیوند شیمیایی ندارند، پتانسیل آزاد شدن در محیط را دارند و به‌عنوان آلودگی مضاعف تلقی می‌شوند (Groh *et al.*, 2019). بااین‌حال، اثرات نامطلوب روی گیاهان نیز ممکن است با افزودنی‌های پلیمر مرتبط باشد (Rillig and Lemann, 2020). چندین افزودنی پرکاربرد، مانند بازدارنده‌های شعله، نرم‌کننده‌ها، تثبیت‌کننده‌های حرارتی و آنتی‌اکسیدان‌ها، به‌عنوان خطرات زیست‌محیطی بزرگ تعریف می‌شوند (Yang *et al.*, 2021). علاوه بر این، وجود میکروپلاستیک‌ها باعث تغییراتی در پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود که سیستم ریشه و مرحله رویشی را تغییر داده و در نتیجه رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهشی که توسط Ramos *et al.*, 2015 انجام شد نشان داده شده است که بقایای فیلم پلی‌اتیلن می‌توانند آفت‌کش‌های بیش‌تری (۵۸۴ میکروگرم تا ۲۲۸۴ میکروگرم آفت‌کش در گرم پلاستیک) نسبت به خاک (۱۳ تا ۳۲ میکروگرم آفت‌کش در گرم خاک) جذب کنند. یک آزمایش شبیه‌سازی کرم‌های خاکی و خاک تحت کشت چچم[۴]، نشان داد که آلودگی میکروپلاستیک خاک بر هر دو بخش سطح و عمق اکوسیستم خاک، با تغییر خصوصیات کلیدی خاک، تأثیر دارد. هنگامی‌که میکروپلاستیک‌های متشکل از پلی‌لاکتیک اسید زیست-تخریب‌پذیر و پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و میکروپلاستیک‌های فیبری به خاک اضافه شدند، تعداد کمتری از بذرها جوانه زدند و ارتفاع جوانه‌زنی چچم نیز کاهش یافت (Boots *et al.*, 2019). در مطالعه دیگری، Jiang *et al.*, 2019a سمیت زیست محیطی و سمیت ژنی میکروپلاستیک‌های پلی استایرن (PS) را روی باقلا[۵] بررسی کردند و متوجه شدند که وقتی غلظت میکروپلاستیک‌ها به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر برسد، میکروپلاستیک‌های PS یک اثر بازدارنده قابل توجهی بر رشد باقلا دارند و این میکروپلاستیک‌ها به‌طور بالقوه اتصالات سلولی یا منافذ دیواره سلولی برای انتقال مواد مغذی را مسدود کردند. علاوه بر این، Guo *et al.*, 2020 ثابت کردند که بقایای ماکروسکوپی و میکروسکوپی پلی اتیلن و فیلم مالچ زیست‌تخریب‌پذیر اثرات نامطلوبی بر گندم در طول تغذیه و رشد تولید مثلی دارند. بااین‌حال، مطالعه‌ای توسط de SouzaMachado *et al.*, 2019 نشان داد که زیست‌توده ریشه در حضور HDPE (پلی اتیلن با چگالی بالا) بیش‌تر است.

انتقال به زنجیره غذایی

خطرات اکولوژیکی و بهداشتی ناشی از قرار گرفتن در معرض میکروپلاستیک مهم‌ترین مسئله مربوط به تحقیقات میکروپلاستیک در خاک است (Guo *et al.*, 2020؛ He *et al.*, 2018؛ Kumar *et al.*, 2020؛ Sarker *et al.*, 2020). شبیه‌سازی زنجیره غذایی و مطالعات میدانی این فرضیه را تأیید می‌کند که میکروپلاستیک می‌تواند از طعمه (در سطح مواد مغذی پایین‌تر) به یک شکارچی (در سطح مواد مغذی بالاتر) در زنجیره غذایی منتقل شود (Rillig *et al.*, 2017). Rillig *et al.*, 2017 یک آزمایش گلخانه‌ای فاکتوریل با چهار اندازه مختلف میکروپلاستیک انجام دادند که نشان داد وجود کرم‌های خاکی به میزان زیادی حضور میکروپلاستیک در عمق خاک را افزایش می‌دهد و

[۴] -Lolium temulentum

[۵] -Vicia faba

میکروسفرهای (ذرات کوچک کروی تجزیه‌پذیر) پلی‌اتیلن (PE) کوچک به میزان بیش‌تری به پایین منتقل شده‌اند (Rillig *et al.*, 2017). به‌جز کرم‌های خاکی، میکروپلاستیک‌ها در دیگر بی‌مهرگان خاکی کوچک مانند دم فنری، موش‌ها، نماتدها و حلزون‌ها یافت می‌شوند. این جانداران می‌توانند میکروپلاستیک‌ها را احتمالاً از طریق قالب‌ها و حفره‌ها، هضم و چسبیدن به بیرون میزبان، در خاک بگنجانند (Rillig *et al.*, 2017). این حرکات پیامدهای بالقوه‌ای برای قرار گرفتن سایر موجودات خاک در معرض میکروپلاستیک‌ها، زمان ماندن میکروپلاستیک‌ها در سطح عمیق‌تر و احتمال ورود میکروپلاستیک‌ها به آب‌های زیرزمینی دارد (Guo *et al.*, 2020؛ Rillig *et al.*, 2017). اخیراً میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌های مدفوع انسان و کولکتومی (روده بزرگ) بزرگسالان شناسایی شده‌اند که وجود میکروپلاستیک در دستگاه گوارش انسان را تأیید می‌کند منشأ و مسیر آن ممکن است از طریق زنجیره غذایی منتقل شود، درحالی‌که نمی‌توان مسیرهای دیگر را رد کرد، به‌عنوان‌مثال، استنشاق میکروپلاستیک، خوردن نمک، آب آشامیدنی و سایر مواد غذایی آلوده به میکروپلاستیک‌ها خطرات سلامتی میکروپلاستیک‌ها برای انسان از داده‌های محدود مشخص نیست (Ibrahim *et al.*, 2021). اثرات نامطلوب بر روده‌ها بر روی موجودات دریایی نشان داده شده است (Andrady, 2011). بااین‌حال، برای ایجاد یک سیستم ارزیابی ریسک برای میکروپلاستیک‌هایی که توسط شبکه غذایی خاک وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند، تحقیق در مورد خطرات میکروپلاستیک‌ها برای انسان ضروری است (Zhou *et al.*, 2020).

پیشگیری و کنترل آلودگی میکروپلاستیک در خاک

با افزایش آگاهی از خطرات زباله‌های پلاستیکی و میکروپلاستیک‌ها، این موضوع توجه گسترده بین‌المللی را نیز به خود جلب کرده است. مطالعات گسترده و دقیقی در مورد مطالعات میکروپلاستیک در محیط دریایی انجام شده است و بسیاری از کشورها، پایش معمول زباله‌های پلاستیکی و میکروپلاستیک‌های دریایی را آغاز کرده‌اند (Guo *et al.*, 2020) درحالی‌که نظارت بر میکروپلاستیک‌ها در خاک نسبتاً عقب است (Guo *et al.*, 2020). تا حدودی، کاهش آلودگی میکروپلاستیک می‌تواند از طریق قوانین بهتر و اجرای قانون انجام شود (Wong *et al.*, 2020). سازمان ملل گزارشی را با عنوان «محدودیت‌های قانونی در مورد پلاستیک‌های یکبار مصرف و میکروپلاستیک‌ها: بررسی جهانی قوانین و مقررات ملی» منتشر کرد که نشان می‌دهد تا جولای ۲۰۱۸، ۱۲۷ کشور از ۱۹۲ کشور مورد بررسی، یا حدود ۶۶ درصد، قانون کنترل کیسه‌های پلاستیکی برخی از موارد را اجرایی نموده‌اند. این قوانین و مقررات شامل ممنوعیت‌ها، مالیات‌ها و اقدامات مدیریت زباله برای افزایش دفع، تشویق استفاده مجدد و بازیافت و ترویج جایگزین‌های محصولات پلاستیکی است. کیسه‌های پلاستیکی، سایر پلاستیک‌های یکبار مصرف و ریزدانه‌های پلاستیکی کانون توجه هستند. به‌عنوان‌مثال، ۲۷ کشور برای ساخت و تولید کیسه‌های پلاستیکی مالیات وضع می‌کنند، درحالی‌که ۳۰ کشور برای کیسه‌های پلاستیکی از مصرف‌کنندگان پول دریافت می‌کنند. افزودن ریزدانه‌های پلاستیکی به محصولات مراقبت شخصی در کشورهای توسعه‌یافته مانند ایالات‌متحده، کانادا، هلند و نیوزلند ممنوع است. این نسبتاً آسان است و تأثیر کمی بر زندگی افراد دارد که می‌تواند راهی سریع و مؤثر برای کاهش منبع میکروپلاستیک باشد (Zhang *et al.*, 2018a). محصولات پلاستیکی یکبار مصرف به‌شدت کنترل می‌شوند و استفاده از پلاستیک‌های تجزیه‌پذیر تشویق می‌شود (Wong *et al.*, 2020). در حال حاضر، بیش‌تر مونومرهای ساخته‌شده از پلاستیک از هیدروکربن‌های فسیلی به دست می‌آیند و سرعت تجزیه زیستی آن‌ها بسیار کند است که علت اصلی آلودگی میکروپلاستیک است (Sarker *et al.*, 2020).

پلاستیک‌های زیستی به پلاستیک‌هایی گفته می‌شود که تحت تأثیر میکروارگانیسم‌ها بر اساس مواد طبیعی مانند نشاسته تولید می‌شوند. قابل‌تجدید است و بنابراین بسیار سازگار با محیط‌زیست است. جایگزینی محصولات پلاستیکی با پلاستیک‌های زیستی یک راه‌حل پایدار است (Guo *et al.*, 2020). در سال ۲۰۱۷، چین مقرراتی را برای ممنوعیت واردات زباله‌های جامد خارجی وضع کرد. این مقررات باید انگیزه‌ای برای توسعه مدیریت زباله‌های پلاستیکی پایدار، افزایش نرخ تصفیه و بازیافت در کشورهای صادرکننده زباله باشد (Guo *et al.*, 2020). همچنین دفن مستقیم زباله‌های پلاستیکی در بسیاری از کشورها محدود شده است که می‌تواند بخش زیادی از زباله‌های پلاستیکی را کاهش دهد. از سال ۲۰۰۵، کل خاک آلمان دفن مستقیم زباله را ممنوع کرده است. نسبت دفن زباله در ایالات‌متحده نیز در حال کاهش است. حذف میکروپلاستیک‌ها در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از طریق روش‌های فنی و زیستی نیز جهتی است که کشورها روی آن کار می‌کنند (Yang *et al.*, 2019). مشارکت عمومی نقش بسیار مهمی در مدیریت زباله‌های پلاستیکی و آلودگی میکروپلاستیک ایفا می‌کند.

مطالعات انجام‌شده در ایران

در ایران تاکنون مطالعه‌ای در موردسنجش فراوانی میکروپلاستیک‌ها در خاک صورت نگرفته است. یکی از مطالعات صورت گرفته بر روی خاک در ایران، مطالعه صورت گرفته توسط Abbasi *et al.*, 2021 بر روی خاک کویر لوت بوده که نتایج نشان داد میانگین کلی فراوانی میکروپلاستیک‌ها در حدود ۲۰ ذره بر کیلوگرم خاک بوده است. اکثریت میکروپلاستیک‌ها از لحاظ شکلی فیبر مانند و با توزیع اندازه ۱۰۰–۱۰۰۰ میکرومتر و از جنس پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌آمید بوده‌اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تخریب برخی از ذرات میکروپلاستیکی در اثر هوازدگی را نشان داد. حضور مزوپلاستیک‌ها و ماکروپلاستیک‌ها در کویر در نتیجه انتقال آن‌ها به این منطقه در اثر وزش باد بوده است. در مطالعه دیگر Abbasi *et al.*, 2017 به بررسی فراوانی میکروپلاستیک در گردوغبار خیابان‌های بوشهر پرداختند. نتایج نشان داد که میکروپلاستیک‌ها، عمدتاً الیاف و قطعه بوده و فراوانی آن‌ها در محدوده ۱۶۵۸۰۰–۲۱۰۰۰ ذرات بر کیلوگرم بوده است. Shariati *et al.*, 2019 غلظت استرهای فتالیک اسید را در خاک پایین‌دست محل دفن زباله سراوان (با فاصله دو کیلومتری از محل دفن زباله ولی در معرض شیرابه) در تالاب انزلی را مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد میانگین غلظت دی اتیل هگزیل فتالات (DEHP) در این خاک ۴/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که شش برابر استاندارد جهانی آن (۰/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود.

نتیجه‌گیری

امروزه، میکروپلاستیک‌ها به یک طبقه اصلی از آلاینده‌ها تبدیل‌شده‌اند و در اقیانوس‌ها، آب شیرین و خاک توزیع می‌شوند. به‌طور خلاصه، دانش فعلی منابع میکروپلاستیک‌ها، توزیع و انتقال آن‌ها و راه‌های پیشگیری و کنترل میکروپلاستیک‌ها را توضیح داده است. میکروپلاستیک‌ها بیش‌تر در آب، خاک، نمک خوراکی و حتی غذا شناسایی‌شده‌اند. اثرات سمی شدیدی برای محیط‌زیست دارند و ممکن است از طریق زنجیره‌های غذایی اثرات نامطلوبی برای حیوانات و انسان‌ها داشته باشند. ذرات میکروپلاستیک‌ها آلاینده‌هایی با عمر طولانی هستند که در برابر تخریب محیط‌زیست بسیار مقاوم هستند؛ بنابراین، بررسی و پتانسیل تجزیه زیستی میکروپلاستیک‌ها توسط میکروارگانیسم‌های مختلف در محیط، پس از استفاده از پوشش پلاستیکی و بهسازهایی مانند لجن فاضلاب و کمپوست در محیط‌زیست خاک، به‌عنوان روشی کارآمد و دوستدار محیط‌زیست باید صورت گیرد. این کار به درک بهتر و شناسایی آلودگی میکروپلاستیک‌ها در محیط، سمیت و تجزیه زیستی کمک می‌کند که ممکن است گام مهمی در ارزیابی و کنترل قرار

گرفتن در معرض میکروپلاستیک‌ها باشد. مطالعه میکروپلاستیک در خاک دانشی نوپا بوده که به یک نقطه داغ علمی تبدیل شده است و شاهد بررسی جنبه‌های مختلف آن از جمله خطرات آن بر اکوسیستم خاک، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، آلودگی‌های آن و اثرات آن بر انسان و حیوانات همچنین روش‌های اندازه‌گیری و کنترل آن در سطح جهانی هستیم، بااین‌حال این مطالعات در ایران بسیار محدود است.

پیشنهادها

برای تقویت نظارت و تجزیه‌وتحلیل میکروپلاستیک‌ها در محیط‌زیست با توجه به دانسته‌های موجود و اطلاعات مورد جستجو، بررسی جنبه‌های زیر پیشنهاد می‌شوند: ۱. میزان واقعی آلودگی میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های خاکی مختلف هنوز کاملاً مشخص نیست و برای تجزیه‌وتحلیل انتقال و سرنوشت میکروپلاستیک‌ها در محیط خاک نیاز به روشی سریع، حساس و دقیق است تا بتوان ارزیابی درستی را ارائه نمود. ۲. بررسی و استفاده از پتانسیل زیستی محیط‌های مختلف به‌ویژه محیط خاک برای شناسایی و تکثیر موجودات زنده فعال، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها که می‌توانند میکروپلاستیک‌ها را تخریب کنند و از جمله روش‌های مورد توجه جدید برای کنترل آلاینده‌ها در محیط‌زیست و خاک هستند.

Reference

1. Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore F., Delshab, H., Soltani, N., Sorooshian, A., 2017. Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in stret dust: a study in Bushehr city, Iran. Environmental Earth Sciences. 76. 798.
2. Abbasi, S., Turner, A., Hoseini, M., Amiri, H., 2021. Microplastics in the Lut and Kavir deserts, Iran. Environmental Science & Technology. 55(9):5993-6000.
3. 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.
4. Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Jimenez, P.D., 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.
5. Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. Mar Pollut Bull 62:1596–1605.
6. 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.
7. 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.
8. Boots, B., Russell, C.W., Green, D.S., 2019. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. Environ. Sci. Technol. 53, 11496–11506. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304.
9. Chen, Y., Leng, Y., Liu, X., Wang, J., 2020. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburbWuhan, central China. Environ. Pollut. 257, 113449. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449.
10. 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.
11. Crossman, J., Hurley, R.R., Futter, M., Nizzetto, L., 2020. Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment. Sci. Total Environ. 724, 138334. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138334.

12. 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, 9656–9665. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212.
13. de SouzaMachado, A.A., Lau, C.W., Kloas,W., Bergmann, J., Bachelier, J.B., Faltin, E., Becker, R., Gorlich, A.S., Rillig, M.C., 2019. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. Environ. Sci. Technol. 53, 6044–6052. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339.
14. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Tassin, B., 2017. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environ. Pollut. 221, 453–https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013.
15. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R.C., Aldridge, D.C., 2015. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. Water Res. 75, 63–82. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012.
16. Fuller, S., Gautam, A. A. 2016. Procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction, Environ. Sci. Technol. 11. 5774–5780.
17. Gao, D., Li, X.Y., Liu, H.T., 2020. Source, occurrence, migration and potential environmental risk ofmicroplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. Sci. Total Environ. 742, 140355. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140355.
18. Geyer, R., Jambeck, Jenna R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.
19. Groh, K. J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., Geueke, B., Inostroza, P. A., Lennquist, A., Leslie, H. A., Maffini. M., Slunge, D., Trasande, L., Warhurst, A. M., Muncke, J. 2019. Overview of known plastic packaging associated chemicals and their hazards. Sci. Total Environ. 651, 3253-3268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015
20. 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.
21. 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.
22. Hu, L., Chernick, M., Hinton, D.E., Shi, H., 2018. Microplastics in smallwaterbodies and tadpoles from Yangtze River Delta, China. Environ. Sci. Technol. 52, 8885–8893. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02279.
23. Huang, B., Sun, L., Liu, M., Huang, H., He, H., Han, F., Wang, X., Xu, Z., Li, B., Pan, X., 2020a. Abundance and distribution characteristics of microplastic in plateau cultivated land of Yunnan Province, China. Environ Sci Pollut Res Int, 1675–1688 https://doi.org/10.1007/s11356-020-10527-3.
24. Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., Wang, J., 2020b. Agricultural plasticmulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. Environ. Pollut. 260, 114096. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096.
25. Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J.L.A., Sanchez Del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., Salanki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A.A., Geissen, V., 2017. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. Sci. Rep. 7, 14071. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2.
26. Ibrahim, Y.S., Tuan Anuar, S., Azmi, A.A., Wan Mohd Khalik, W.M.A., Lehata, S., Hamzah, S.R., Ismail, D., Ma, Z.F., Dzulkarnaen, A., Zakaria, Z., Mustaffa, N., Tuan Sharif, S.E., Lee, Y.Y., 2021. Detection of microplastics in human colectomy specimens. JGH Open 5, 116–121. https://doi.org/10.1002/jgh3.12457.
27. Jiang, C., Yin, L., Li, Z., Wen, X., Luo, X., Hu, S., Yang, H., Long, Y., Deng, B., Huang, L., Liu, Y., 2019a. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau. Environ. Pollut. 249, 91–98. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.022.

28. Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., Klobucar, G., 2019b. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrenemicroplastics on higher plant Vicia faba. Environ. Pollut. 250, 831–838. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055.
29. Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D.C.W., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y.S., Bolan, N.S., 2020.Microplastics as pollutants in agricultural soils. Environ. Pollut. 265, 114980. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980.
30. Li, J., Song, Y., Cai, Y., 2020. 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.
31. Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., Zeng, E. 2018. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. Water Res. 142. 75–85.
32. Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., Zhou, W., Cao, C., Shi, H., Yang, X., He, D., 2018. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. Environ. Pollut. 242, 855–862. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051.
33. 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.
34. Piehl, S., Leibner, A., Löder, M.G.J., Dris, R., Bogner, C., Laforsch, C., 2018. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. Sci. Rep. 8, 17950. https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y.
35. Ramos, L., Berenstein, G., Hughes, E.A., Zalts, A., Montserrat, J.M., 2015. Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina. Sci. Total Environ. 523, 74–81. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.142.
36. Rillig, M.C., 2018. Microplastic disguising as soil carbon storage. Environ. Sci. Technol. 52, 6079–6080. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02338.
37. Rillig, M.C., Lehmann, A., 2020. Microplastic in terrestrial ecosystems research shifts from ecotoxicology to ecosystem effects and Earth system feedbacks. Science 368, 1430–1431. https://doi.org/10.1126/science.abb5979.
38. 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.
39. Sarker, A., Deepo, D.M., Nandi, R., Rana, J., Islam, S., Rahman, S., Hossain, M.N., Islam, M.S., Baroi, A., Kim, J.-E., 2020. A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: a global and Bangladesh perspective. Sci. Total Environ. 733, 139296. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139296.
40. Scheurer, M., Bigalke, M. 2018. Microplastics in Swiss floodplain soils. Environ. Sci. Technol. 52. 3591–3598.
41. Shafea, L., Yap, J., Beriot, N., Felde, V.J.M.N.L., Okoffo, E.D., Ebere Enyoh, Ch., Peth, S. 2022. Microplastics in agroecosystems. A review of effects on soil biota and key soil functions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 1-18. DOI:10.1002/jpln.202200136.
42. Shariati, S., Pourbabaee, A. A., Alikhani, H. A. and Rezaei, K. A., 2019. Assessment of phthalic acid esters pollution in Anzali wetland, north of Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 7025–7036.
43. 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.
44. Wan, Y.,Wu, C., Xue, Q., Hui, X., 2019. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. Sci. Total Environ. 654, 576–582. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123.
45. 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.

46. Wang, W., Ge, J., Yu, X., Li, H., 2020. Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: progress and perspective. Sci. Total Environ. 708, 134841. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841.
47. Weber, C.J., Opp, C., 2020. Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. Environ. Pollut. 267, 115390. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115390.
48. Weithmann, N., Möller, U.N., Löder, M.G.J., Piehl, S., Laforsch, C., Freitag, R., 2018. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. Sci. Adv. 4, eaap8060. https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8060.
49. Wong, J.K.H., Lee, K.K., Tang, K.H.D., Yap, P.-S., 2020. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. Sci.Total Environ. 719, 137512. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512.
50. Xu, B., Liu, F., Cryder, Z., Huang, D., Lu, Z., He, Y., Wang, H., Lu, Z., Brookes, P.C., Tang, C., Gan, J., Xu, J., 2019. Microplastics in the soil environment: occurrence, risks, interactions and fate – a review. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 50, 2175–2222. https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1694822.
51. Xu, C., Zhang, B., GU, C., Shen, C., Yin, S., Aamir, M., Li, F., 2020. Are we underestimating the sources of microplastic pollution in terrestrial environment? J. Hazard. Mater. 400, 123228. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123228.
52. Yang, L., Li, K., Cui, S., Kang, Y., An, L., Lei, K., 2019. Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant. Water Res. 155, 175–181. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.046.
53. 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.
54. Zhang, G.S., Liu, Y.F., 2018a. 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.
55. Zhang, K., Shi, H., Peng, J., Wang, Y., Xiong, X., Wu, C., Lam, P.K.S., 2018b. Microplastic pollution in China's inland water systems: a review of findings, methods, characteristics, effects, and management. Sci. Total Environ. 630, 1641–1653. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.300.
56. Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., Gao, P., 2020a. An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. Environ. Sci. Technol. 54, 4248–4255. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07905?ref=pdf.
57. Zhang, S., Liu, X., Hao, X., Wang, J., Zhang, Y., 2020b. Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China. Sci. Total Environ. 708, 135091. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135091.
58. Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., Sillanpää, M., 2020c. Atmospheric microplastics: a review on current status and perspectives. Earth Sci. Rev. 203. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118.
59. Zhou, Q., Zhang, H., Fu, C., Zhou, Y., Dai, Z., Li, Y., Tu, C., Luo, Y. 2018. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea, Geoderma. 322. 201–208.
60. Zhou, Q., Zhang, H., Zhou, Y., Li, Y., Xue, Y., Fu, C., Tu, C., Luo, Y. 2016. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features, Chin. Sci. Bull. 61. 1604– 1611.
61. Zhou, Y., Wang, J., Zou, M., Jia, Z., Zhou, S., Li, Y., 2020. Microplastics in soils: a review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks. Sci. Total Environ. 748, 141368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141368.

Sources of Microplastics in Soil and Their Adverse Effects on Soil: A Review

Sh. Karimi* and Z. Kolahchi

PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology.
shno.karimi71@gmail.com
Assistant Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu -Ali Sina University, Hamedan.
zkolahch@yahoo.com.

Received: December 2022 and Accepted: July 2023

Abstract

Although plastic products nowadays widely mass-produced bring convenience to people, they definitely cause plastic pollutants to accumulate in the environment. Microplastics are generally defined as plastic particles less than 5 mm in size. Large amounts of such wastes are annually released and dumped into the environment so that they are now widely detected in open oceans, freshwater, marine organisms, soil, and sewage sludge, among others. Pollution with microplastics and the associated environmental hazards are nowadays a major global concern, with soil pollution with microplastics being of special importance because soils provide a wide range of ecosystem services essential for life while they house most of the microplastic waste released into the environment. A wide array of sources has been identified for soil pollution with these materials including composts, sewage sludge, irrigation, plastic mulch, littering, and atmospheric deposits. The transport and persistence of microplastics in soil are governed by the interaction effects of microplastic properties (namely, the extent of their swarm into the environment, particle size, and type of their constituent compounds) and environmental factors. Moreover, plastic materials present in soil can change the interactions among soil particles, water, chemical compounds, and living organisms to alter the different characteristics of agro-ecosystems. To shed more light on these issues, the present article provides a review of the research projects performed, both at the national and international levels, on the sources of microplastics in soil and their detrimental impacts on soil and human beings.

Keywords: Pollution, Microplastics, Environmental factors, Ecosystem

* - Corresponding author's email: shno.karimi71@gmail.com