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

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

برهمکنش میکروپلاستیک‌ها با فلزات سنگین : مروری بر مکانیسم ها و اثر ترکیبی آنها بر موجودات زنده و انسان

زهرا فولادی وندا[۱*]، میلاد میرزایی امینیان[۲]، مهدی شرفا[۳]، محمدحسین محمدی[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی علوم خاک – فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: Zah.fouladivanda@ut.ac.ir
۲- دانش آموخته دکتری مهندسی علوم خاک – فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- استاد گروه مهندسی علوم خاک– فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴- استاد گروه مهندسی علوم خاک– فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

آلودگی و انباشت فلزات سنگین در آب و خاک به دلیل سمّیت بالا و تجزیه‌ناپذیری، یکی از چالش‌های جدی در سطح جهان به شمار می‌رود. آگاهی از میزان آلودگی فلزات سنگین در آب و خاک، برای کاهش یا حذف آن‌ها و نیز حفاظت از انسان و محیط‌زیست در برابر خطرات ناشی از این آلاینده‌ها ضروری است. میکروپلاستیک‌ها به عنوان آلاینده‌های نوظهور، حاصل مصرف گسترده پلاستیک در جهان بوده و قادرند بر رفتار فلزات سنگین در خاک تأثیر بگذارند. حضور آن‌ها نه تنها ویژگی‌های محیط خاک را تغییر می‌دهد، بلکه می‌تواند به‌عنوان جاذب یا ناقل فلزات سنگین عمل کند. ترکیب این دو آلاینده، یعنی میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین، ممکن است تغییرات زیستی پیچیده‌ای را رقم زده و پیامدهای گسترده‌ای برای سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها به همراه داشته باشد. در این مقاله، مروری بر برهم‌کنش میان میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین بررسی شده و عواملی همچون خواص پلیمر، ویژگی‌های شیمیایی فلزات سنگین و شرایط محیطی مؤثر بر فرایند جذب آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اثرات سمی بالقوه ناشی از ترکیب این دو آلاینده بر موجودات زنده و سلامت انسان به اختصار مرور شده است. با توجه به محدود بودن مطالعات در ایران در این حوزه، انجام پژوهش‌های بیشتر برای درک جامع‌تر سازوکارهای اثرگذاری و پیامدهای ترکیبی این آلاینده‌ها ضرورت دارد.

واژگان کلیدی: برهمکنش، خاک، فلزات سنگین، محیط زیست، میکروپلاستیک

مقدمه

میکروپلاستیک‌ها عمدتاً از طریق فرآیندهای جذب فیزیکی و شیمیایی با فلزات سنگین برهم‌کنش می‌کنند (Liu et al., 2024). ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه، سن و گروه‌های عاملی سبب می‌شوند که میکروپلاستیک‌ها به‌راحتی به‌عنوان جاذب و حامل فلزات سنگین عمل نمایند. این فرآیند جذب تحت تأثیر عواملی چون نوع و خواص پلیمر، ویژگی‌های شیمیایی فلزات سنگین و شرایط محیطی مانندpH ، شوری، وجود مواد آلی طبیعی(NOM) ، غلظت پس‌زمینه آلاینده‌ها و میزان کهنگی میکروپلاستیک قرار دارد (Cao et al., 2021). مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که پلیمرهایی نظیرPVC ، PS، PP، PEو سایر ترکیبات می‌توانند فلزاتی همچون سرب، کادمیوم، مس و کروم را از طریق مکانیسم‌هایی نظیر جذب فیزیکی تک‌لایه) واسطه نیروهای الکترواستاتیک، برهم‌کنش‌هایπ-π ، پیوندهای هالوژنی و گروه‌های اکسیژنی (و نیز جذب شیمیایی که توسط ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ توصیف می‌شوند، به خود اختصاص دهند(Liu et al., 2024). با توجه به افزایش روزافزون حضور میکروپلاستیک‌ها در محیط‌های آبی و خاکی و نقش آن‌ها در تغییر تحرک، زیست‌فراهمی و سمیت فلزات سنگین، بررسی دقیق سازوکارهای این برهم‌کنش‌ها اهمیت دوچندانی دارد. این مطالعات نه‌تنها از منظر علمی در فهم بهتر فرآیندهای زیست‌محیطی حائز اهمیت هستند، بلکه می‌توانند پایه‌ای برای طراحی راهکارهای مدیریتی، بهبود سیاست‌های کاهش آلودگی و حفاظت از سلامت انسان و اکوسیستم‌ها فراهم آورند.

۱. عوامل مؤثر بر جذب فلزات سنگین توسط میکروپلاستیک‌ها

در چندین مطالعه مشخص شد که ظرفیت جذب میکروپلاستیک با افزایش اسیدته تقویت می‌شود(Zhou et al., 2020)، دلیل آن را می‌توان به این نسبت داد که گروه‌های عاملی در سطح میکروپلاستیک از بین می‌رود، و سایت‌های الکترونگاتیوی و جذب را در میکروپلاستیک افزایش می‌دهد (Zou et al., 2020). شوری هم‌چنین می‌تواند باعث محافظت الکترواستاتیک به فلز شود و بر رفتار جذب الکترواستاتیک آن تاثیر بگذارد(Lin et al., 2021). در رابطه با تفاوت در غلطت پس زمینه آلاینده-ها انواع فلزات سنگین مقدار ظرفیت جذب سطحی را تعیین می‌کنند و منجر به تفاوت پتانسیل سطحی می‌شود که بر جذب فلزات سنگین تاثیر می‌گذارد، ظرفیت جذب محلول‌های مخلوط (دارای همزیستی) بیش‌تر از محلول فلزی تک بود که نشان دهنده یک پدیده جذب رقابتی است(Gao et al., 2019). محققان دریافتند که فرایند پیری میکروپلاستیک با فرایند فیزیکی مانند خرد شدن، هوازدگی، سایش و فرایندهای شیمیایی مانند بارش اکسیداسیون UV، جذب، موج دار بودن سطح و ترک‌ها باعث افزایش جذب می‌شود (Cao et al., 2021). در همین حال، گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن (C_O، CO و OH-) پس از تابش UV تولید می‌شوند که دارای توانایی کمپلکس قوی یون‌های فلزی هستند. علاوه بر این، در طول فرایند پیرشدن، بارش مواد معدنی و مواد آلی بر روی سطح ذرات پلاستیکی نیزمی‌تواند منجر به اصلاح خواص سطحی و تشکیل سایت‌های اتصال فعال یون‌های مختلف فلزی شود (Wang et al., 2020).

۲. برهمکنش بین میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین

مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین توسط میکروپلاستیک شامل: برهمکنش مستقیم بین میکروپلاستیک و فلزات سنگین، همانطور که تعریف شده‌است، عمدتاً به تعامل بین میکروپلاستیک و فلزات سنگین در شرایط تماس آزاد اشاره دارد که معمولاً در محیط دارای رطوبت رخ می‌دهد. مکانیسم تعامل مستقیم عمدتاً شامل سه روش است:

(۱) برهمکنش تک الکترواستاتیکی یا برهمکنش الکترواستاتیکی همراه با کمپلکس شدن سطح، یکی از مکانیسم‌های اصلی جذب برای یون‌های فلزات سنگین است (Liao and Yang, 2019). فلزات سنگین قطبی (مناطق قطبی تشکیل شده روی سطح) یا میکروپلاستیک باردار از طریق برهمکنش کولمبی با یکدیگر تعامل دارند (Zhang et al., 2020).

(۲) میکروپلاستیک‌ها کمپلکس‌های جدیدی را از طریق جذب و/یا تجمع زیستی توسط فیلم‌های زیستی و مواد آلی طبیعی تشکیل می‌دهند (Yu et al., 2020; Ateia et al., 2020)، منجر به تغییر مساحت سطح و خواص سطح می‌شوند (Edwards and Kjellerup, 2013).

(۳) سایر فعل و انفعالات شامل بارش/هم رسوبی است: فلزات سنگین یا مکان‌های آن‌ها با اکسیدهای هیدروکسید آهن و منگنز از طریق جذب روی اکسیدهای آبدار آهن و منگنز رسوب می‌کنند (Ashton et al., 2010).

۳. اثرات ترکیبی میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین بر موجودات زنده و انسان‌ها

مطالعات قبلی نشان داده است کهMP ها و فلزات سنگین می‌توانند اثرات سمی بر ارگانیسم‌ها نشان دهند، ترکیب آنها ممکن است منجر به سه نوع اثر شود، یعنی اثر سینرژیک، آنتاگونیست یا تقویت‌کننده (Bhagat et al., 2020). اثر سینرژیک به این صورت تعریف می‌شود که اثر ترکیبی دو ماده شیمیایی بسیار بیشتر از مجموع اثرات هر ماده شیمیایی است (Bhagat et al., 2020). در مورد اثر آنتاگونیستی، برخی مطالعات نشان داده‌اند که به دلیل اینکهMP ها می‌توانند به عنوان حامل فلزات سنگین استفاده شوند، غلظت فلزات سنگین را در محیط مواجهه با جذب آنها کاهش می‌دهند و در نتیجه سمیت بیولوژیکی محیطی فلزات سنگین را کاهش می‌دهند (Bhagat et al., 2020). در حالی که اثر تقویت‌کننده زمانی رخ می‌دهد که یک ماده شیمیایی غیرسمی که به طور معمول اثر سمی ندارد به یک ماده شیمیایی دیگر اضافه شود و ماده شیمیایی دوم را بسیار سمی‌تر کند (Bhagat et al., 2020). برهمکنش‌های بین ریزپلاستیک‌ها و فلزات سنگین در خاک منجر به اثرات بیولوژیکی ترکیبی بر موجودات خاک می‌شود و انتقال آنها را از طریق زنجیره غذایی تسهیل می‌کند و در نتیجه در بدن انسان تجمع می‌یابد و خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند(Lio et al., 2020). میکروپلاستیک‌ها فلزات سنگین را جذب می‌کنند و غلظت آنها را پس از بلع افزایش می‌دهند .این تعامل ممکن است به پوشش روده آسیب برساند و خطرات سلامتی مانند سرطان، اختلالات تولید مثلی، بیماری‌های عصبی، بیماری‌های قلبی عروقی، بیماری‌های تنفسی و دیابت را تشدید کند و تهدیدات قابل توجهی را برای موجودات زنده و انسان ایجاد کند(Ameya, 2020).

نتیجه‌گیری

با افزایش فعالیت‌های انسانی، میزان میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین در محیط‌های آبی و خاکی همچنان در حال رشد است. این آلاینده‌های پایدار به سختی از محیط زیست حذف می‌شوند و مواجهه همزمان آن‌ها با اکوسیستم‌ها و انسان‌ها تهدیدی جدی به‌شمار می‌رود. مطالعات موجود نشان می‌دهند که برهم‌کنش بین میکروپلاستیک‌ها و فلزات سنگین می‌تواند اثرات پیچیده و متنوعی بر موجودات زنده ایجاد کند، از جمله اثرات سینرژیک، آنتاگونیست و تقویت‌کننده، که پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی به دنبال دارد. با توجه به محدودیت مطالعات و پیچیدگی ارزیابی ریسک‌های ترکیبی این آلاینده‌ها، انجام تحقیقات بیشتر در سطح ملی و منطقه‌ای ضروری است تا سازوکارهای برهم‌کنش و پیامدهای آن بر سلامت انسان و اکوسیستم‌ها به‌طور دقیق‌تر درک شود و مبنایی برای سیاست‌گذاری و مدیریت آلاینده‌ها فراهم گردد.

فهرست منابع

Ameya, L. (2024). Environmental Toxins and Microplastics: An In-Depth Comparative Analysis of Subtle Health Hazards. Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development, 12(4), 58-68.

Ashton, K., Holmes, L., & Turner, A. (2010). Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. Marine Pollution Bulletin, 60(11), 2050-2055.

Ateia, M., Zheng, T., Calace, S., Tharayil, N., Pilla, S., & Karanfil, T. (2020). Sorption behavior of real microplastics (MPs): insights for organic micropollutants adsorption on a large set of well-characterized MPs. Science Of The Total Environment, 720, 137634.

Bhagat, J., Nishimura, N., & Shimada, Y. (2021). Toxicological interactions of microplastics/nanoplastics and environmental contaminants: current knowledge and future perspectives. Journal Of Hazardous Materials, 405, 123913.

Cao, Y., Zhao, M., Ma, X., Song, Y., Zuo, S., Li, H., & Deng, W. (2021). A Critical Review On The Interactions Of Microplastics With Heavy Metals: Mechanism And Their Combined Effect On Organisms And Humans. Science Of The Total Environment, 788, 147620.

Edwards, S. J., & Kjellerup, B. V. (2013). Applications of biofilms in bioremediation and biotransformation of persistent organic pollutants, pharmaceuticals/personal care products, and heavy metals. Applied Microbiology And Biotechnology, 97, 9909-9921.

Fu, Q., Tan, X., Ye, S., Ma, L., Gu, Y., Zhang, P., ... & Tang, Y. (2021). Mechanism Analysis Of Heavy Metal Lead Captured By Natural-Aged Microplastics. Chemosphere, 270, 128624.

Gao, F., Li, J., Sun, C., Zhang, L., Jiang, F., Cao, W., & Zheng, L. (2019). Study On The Capability And Characteristics Of Heavy Metals Enriched On Microplastics In Marine Environment. Marine Pollution Bulletin, 144, 61-67.

Liao, Y. L., & Yang, J. Y. (2020). Microplastic serves as a potential vector for Cr in an in-vitro human digestive model. Science Of The Total Environment, 703, 134805.

Lin, L., Tang, S., Wang, X., Sun, X., Yu, A., 2020a. Hexabromocyclododecane Alters Malachite Green And Lead(Ii) Adsorption Behaviors Onto Polystyrene Microplastics: Interaction Mechanism And Competitive Effect. Chemosphere 265, 129079

Lin, Z., Hu, Y., Yuan, Y., Hu, B., & Wang, B. (2021). Comparative Analysis Of Kinetics And Mechanisms For Pb (Ii) Sorption Onto Three Kinds Of Microplastics. Ecotoxicology And Environmental Safety, 208, 111451.

Liu, B., Zhao, S., Qiu, T., Cui, Q., Yang, Y., Li, L., ... & Fang, L. (2024). Interaction of microplastics with heavy metals in soil: Mechanisms, influencing factors and biological effects. Science Of The Total Environment, 918, 170281.

Liu, Q., Wu, H., Chen, J., Guo, B., Zhao, X., Lin, H., ... & Huang, C. (2022). Adsorption mechanism of trace heavy metals on microplastics and simulating their effect on microalgae in river. Environmental Research, 214, 113777.

Turner, A., & Holmes, L. A. (2015). Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water. Environmental Chemistry, 12(5), 600-610.

Wang, F., Yang, W., Cheng, P., Zhang, S., Zhang, S., Jiao, W., & Sun, Y. (2019). Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions. Chemosphere, 235, 1073–1080.

Wang, Q., Zhang, Y., Wangjin, X., Wang, Y., Meng, G., & Chen, Y. (2020). The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. Journal Of Environmental Sciences, 87, 272-280.

Yu, H., Hou, J., Dang, Q., Cui, D., Xi, B., & Tan, W. (2020). Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. Journal Of Hazardous Materials, 395, 122690.

Zhang, H., Pap, S., Taggart, M. A., Boyd, K. G., James, N. A., & Gibb, S. W. (2020). A review of the potential utilisation of plastic waste as adsorbent for removal of hazardous priority contaminants from aqueous environments. Environmental Pollution, 258, 113698.

Zhou, Y., Yang, Y., Liu, G., He, G., & Liu, W. (2020). Adsorption mechanism of cadmium on microplastics and their desorption behavior in sediment and gut environments: The roles of water pH, lead ions, natural organic matter and phenanthrene. Water Research, 184, 116209.

Zou, J., Liu, X., Zhang, D., & Yuan, X. (2020). Adsorption Of Three Bivalent Metals By Four Chemical Distinct Microplastics. Chemosphere, 248, 126064.

Interaction of microplastics with heavy metals: A review of their mechanisms and combined effects on living organisms and humans

Z fouladi vanda[1]*, M aminian[2], M shorafa [3], MH mohammadi[4]

1-MS.C. Graduate, Soil Sc. Dept., University of Tehran,Tehran, Iran
2- Ph.D. Graduate, Soil Sc. Dept., University of Tehran,Tehran, Iran
3- Prof., Soil Sc. Dept, University of Tehran,Tehran, Iran
4- Prof., Soil Sc. Dept, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

The pollution and accumulation of heavy metals in water and soil, due to their high toxicity and persistence, represent a significant global challenge. Awareness of the levels of heavy metal contamination in water and soil is essential for their reduction or removal and for protecting humans and the environment from the associated risks. Microplastics, as emerging pollutants resulting from widespread plastic consumption, can influence the behavior of heavy metals in soil. Their presence not only alters soil properties but can also act as a carrier or adsorbent of heavy metals. The combination of these two pollutants—microplastics and heavy metals—may induce complex biological changes with broad implications for human health and ecosystem sustainability. This article provides a review of the interactions between microplastics and heavy metals, considering factors such as polymer properties, chemical characteristics of heavy metals, and environmental conditions affecting their adsorption processes. Additionally, the potential toxic effects resulting from the combined presence of these pollutants on living organisms and human health are briefly discussed. Given the limited studies in Iran on this topic, further research is necessary to achieve a more comprehensive understanding of the mechanisms and combined impacts of these pollutants.

Keywords: Interaction, soil, heavy metals, environment, microplastics