



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌های پلی اتیلنی بکر و هوادیده

مژده جعفری^{۱*}، مهراں شیروانی^۲، محمدرضا مصدقی^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان؛*

(m_jafari@ag.iut.ac.ir)

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

میکروپلاستیک‌ها (ذرات پلیمری در اندازه کوچکتر از ۵ میلی‌متر) به دلیل داشتن سطح ویژه زیاد و گروه‌های عامل سطحی، توانایی جذب و انتقال آلاینده‌های سمی مانند فلزات سنگین را دارند و به‌عنوان تهدیدی جدی برای کیفیت خاک شناخته می‌شوند. این پژوهش به بررسی جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلنی در دو حالت بکر و هوادیده پرداخته است. بدین منظور، میکروپلاستیک‌ها ابتدا به روش فنتون در معرض هوادیدگی تسریع شده قرار گرفته و تغییر ویژگی‌های سطحی آن‌ها بررسی شد. سپس، هم‌دماهای جذب سرب توسط این ذرات مطالعه گردید. نتایج طیف سنجی فرورسرخ نشان داد گروه‌های عامل حاوی اکسیژن مانند کربوکسیل در سطح میکروپلاستیک‌های هوادیده افزایش یافته و تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی تغییرات مورفولوژیکی سطوح صاف پلی اتیلن بکر را بعد از هوادیدگی به حالت ناهموار و متخلخل تأیید کرد. نتایج آزمایشات هم‌دما نشان داد که میکروپلاستیک‌های هوادیده ظرفیت جذب بیشتری در مقایسه با نمونه‌های بکر دارند. همچنین، میکروپلاستیک‌های هوادیده سرب را با قدرت بیشتری جذب می‌نمایند. بطورکلی نتایج این مطالعه بر پتانسیل میکروپلاستیک‌های هوادیده در کنترل رفتار سرب در خاک‌های آلوده و اهمیت بررسی برهمکنش میکروپلاستیک‌ها با این فلز سنگین در خاک‌ها تأکید دارد.

واژگان کلیدی: آلودگی خاک، جذب سطحی، هوادیدگی، فلزات سنگین، پلاستیک، پلیمر

مقدمه

میکروپلاستیک‌ها (MPs)، ذرات پلاستیکی با اندازه کمتر از ۵ میلی‌متر، به‌عنوان یکی از ده آلاینده مهم زیست‌محیطی توسط سازمان ملل معرفی شده‌اند (UNEP, 2021). این ذرات علاوه بر آثار مستقیم بر کیفیت و سلامت خاک، می‌توانند بر تحرک و زیست‌فراهمی سایر آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین در خاک تأثیر بگذارند. مطالعات نشان داده که MPs هوادیده نسبت به نمونه‌های تازه، ظرفیت بیشتری برای جذب فلزات دارند (Liu, 2021). برهمکنش MPs با فلزات سنگین در محیط آبی و خاک در مطالعات زیادی بررسی شده است. به‌عنوان نمونه Rochman و همکاران (2014) گزارش دادند که MPs در محیط آبی قادر به جذب برخی فلزات سنگین مانند کادمیوم، روی، نیکل و سرب هستند. در محیط خاک نیز بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که MPs توانایی جذب عناصر مانند آهن، مس، روی و نیز آلاینده‌هایی از قبیل سرب، کادمیوم را دارند. جذب و واجذب آلاینده‌ها تحت تأثیر فاکتورهای مانند میزان هوادیدگی، سطح ویژه، حضور مواد آلی محلول و فعالیت میکروبی قرار می‌گیرد. گذشت زمان نیز نقش مهمی را در جذب فلزات توسط MPs ایفا می‌کند (Bradney, 2019). بررسی Duis و همکاران (2016) نشان داد MPs



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



می‌توانند به عنوان ناقل آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین عمل کنند. از آن‌جا که پلی‌اتیلن (PE) شایع‌ترین میکروپلاستیک در اکوسیستم‌های آبی و خاکی است (khalid,2021)، برهمکنش آن با فلزات سنگین می‌تواند زیست‌فراهمی و انتقال این فلزات را در اکوسیستم‌ها افزایش دهد (Holmes,2012). سرب یک فلز سنگین سمی است که می‌تواند اثرات مخربی بر سلامت موجودات زنده و اکوسیستم‌ها داشته باشد. گزارش شده است که MPs، به‌ویژه در حالت هوادیده، به دلیل ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه زیاد و وجود گروه‌های عامل (مانند C=O و C-O)، توانایی قابل توجهی در جذب فلزات سنگین مانند سرب دارند. مطالعه Tang و همکاران (2019) نشان داد که میکروپلاستیک‌ها، به‌ویژه در خاک، می‌توانند به‌عنوان حامل‌هایی برای سرب عمل کنند. این جذب به دلیل برهمکنش‌های شیمیایی، پیوندهای الکترواستاتیکی یا کمپلکس‌سازی با گروه‌های عامل و فیزیکی (مانند به‌دام‌اندازی در تخلخل‌های سطحی) رخ دهد. بنابراین با توجه به فراوانی پلی‌اتیلن در محیط‌های آبی و خاکی و اهمیت آن در جذب و انتقال سایر آلاینده‌ها، این مطالعه با هدف بررسی جذب سرب توسط پلی‌اتیلن بکر و هوادیده انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

الف - میکروپلاستیک‌ها

در این پژوهش از میکروپلاستیک پلی‌اتیلن (PE) با درجه خلوص بالا با اندازه ذرات ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد. به منظور نزدیکی به شرایط طبیعی هوادیدگی تسریع‌شده میکروپلاستیک‌ها با روش فنتون انجام شد. بدین منظور ۶ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۵٪، ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۶ میلی‌لیتر محلول ۲۰۰ میلی‌مولار فرسولفات در pH برابر با ۴ به ۴ گرم MPs افزوده و به مدت ۱۰ روز در دمای ۲۵ نگهداری شدند. این مقادیر طی مدت نگهداری بصورت روزانه دو بار به مخلوط اضافه شدند. پس از این مدت MPs از محلول جدا و پس از شستشو با آب مقطر هوا خشک شدند. تغییرات سطحی MPs پس از هوادیدگی توسط طیف‌سنجی بازتاب کلی تضعیف شده (ATR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد.

ب- آزمایش‌های جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌ها در محیط بسته

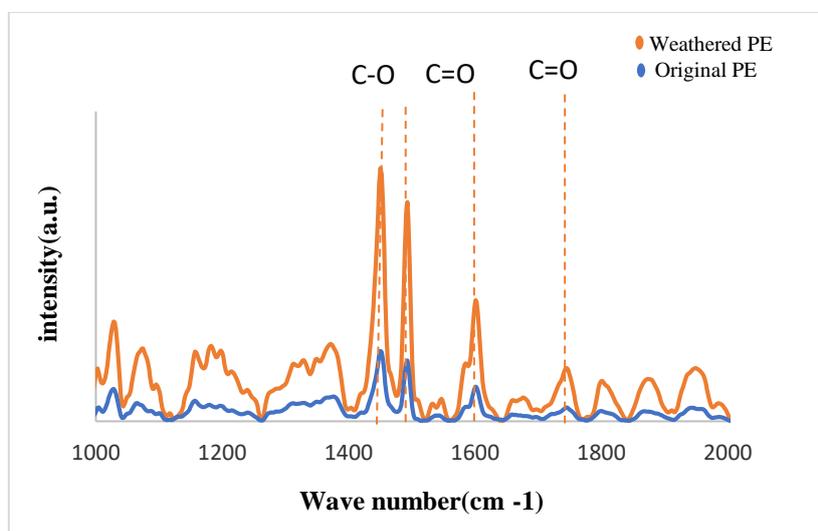
برای ارزیابی توانایی MPs در جذب سرب، آزمایش‌های جذب در محیط بسته انجام شد. بدین منظور، به نمونه‌های ۰/۵ گرمی MPs در دو حالت بکر و هوادیده، ۵۰ میلی‌لیتر محلول سرب با غلظت‌های مختلف ۱۵-۰ میلی‌گرم در لیتر در سه تکرار افزوده و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در شیکر انکوباتور قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت، MPs جدا و غلظت باقی‌مانده سرب در محلول‌ها توسط طیف‌سنج جذب اتمی اندازه‌گیری شد. در نهایت داده‌های تعادلی جذب سرب توسط مدل فروندلیچ برازش داده شد:

$$q_e = K_f C_e^N$$

و در آن مقدار سرب جذب شده K_f ، (mmol g^{-1}) ، ثابت فروندلیچ به عنوان شاخص ظرفیت نسبی جذب $(\text{L}^N \text{mg}^{(1-N)} \text{kg}^{-1})$ ، C_e غلظت تعادلی سرب (mmol L^{-1}) و N ثابت تجربی مربوط به شدت جذب و درجه ناهمگنی سطح جاذب می‌باشد.

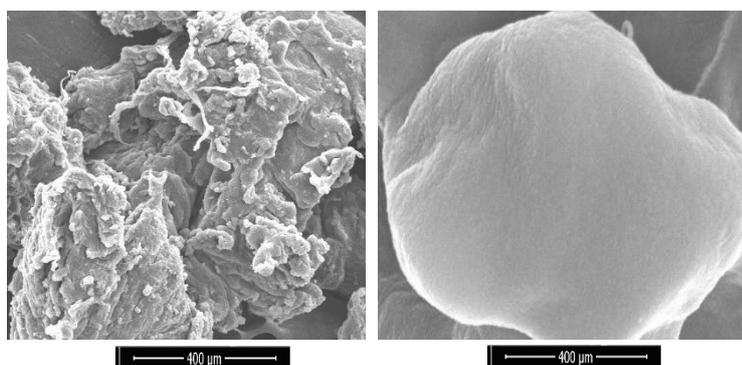
نتایج و بحث

شکل ۱ طیف ATR پلی اتیلن را قبل و بعد از هوازدگی نشان می‌دهد. در این طیف، پیک‌های قابل توجهی در نواحی مختلف مشاهده می‌شود که می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد ساختار و ترکیبات موجود در نمونه ارائه دهد. شدت این پیک‌ها پس از هوازدگی بطور قابل توجهی افزایش یافته که نشان دهنده افزایش تعداد گروه‌های عامل در سطح این ذرات است. در ناحیه $1500-1000 \text{ cm}^{-1}$ ، یک پیک قوی در حدود 1445 cm^{-1} ظاهر می‌شود که نشان دهنده پیوندهای C-O در ساختار مولکولی است. در ناحیه $2000-1500 \text{ cm}^{-1}$ ، سه پیک قوی در عدد موج 1749 ، 1656 ، و $1720-1700 \text{ cm}^{-1}$ مشاهده می‌شود که مربوط به گروه کربونیل (C=O) است (Wang et al., 2020).



شکل ۱ - طیف ATR پلی اتیلن قبل و بعد از هوازدگی

تصاویر SEM (شکل ۲) میکروپلاستیک‌ها قبل و بعد از هوازدگی، تغییرات چشمگیری در مورفولوژی سطح آن‌ها را بعد از اعمال هوازدگی نشان می‌دهند. ذرات بکر دارای سطحی صاف و تخلخل کمتری هستند، در حالی که ذرات هوازیده سطحی زبر، شکلی نامنظم و تخلخل افزایش یافته‌ای را نشان می‌دهند (Wang, 2020). گزارش شده است هوازدگی می‌تواند سبب جذب بیشتر آلاینده‌ها توسط میکروپلاستیک‌ها شود (Frere et al., 2016).





۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

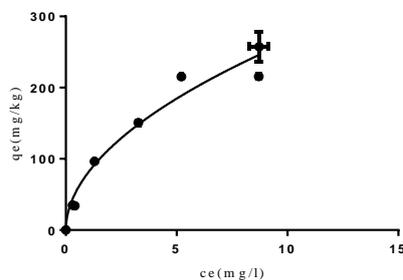


(ب)

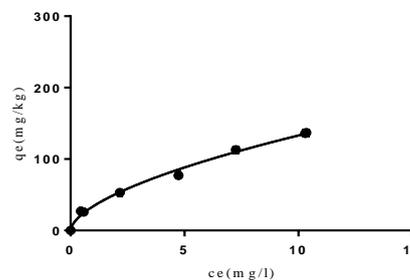
(الف)

شکل (۲) تصاویر SEM میکروپلاستیک‌ها قبل (الف) و بعد (ب) از هوادیدگی

داده‌های جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلنی بکر (OPE) و هوادیده (WPE) به خوبی توسط مدل فروندلیچ برازش شدند (جدول ۱ و شکل ۳). ثابت K_f که معیاری از ظرفیت جذب سرب است برای OPE برابر با ۳۶/۵۰ و برای WPE ۸۱/۴۰ بدست آمد که نشان دهنده افزایش ظرفیت جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌ها پس از هوادیدگی به دلیل افزایش گروه‌های عامل دارای اکسیژن است. شاخص شدت جذب (N) برای OPE و WPE به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۴۹ تعیین گردیدند. از آنجا که قدرت جذب با مقدار شاخص N ارتباط معکوس دارد می‌توان نتیجه گرفت که هوادیدگی سبب افزایش قدرت جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌ها شده است. نتایج Song و همکاران (2024) در محیط‌های خاکی نشان می‌دهد، WPE زیست‌فراهمی سرب را تشدید کرده، pH خاک را کاهش می‌دهد و چرخه‌های زیستی را مختل می‌کند. نتایج مطالعه دیگری نیز نشان می‌دهد میکروپلاستیک‌های هوادیده ظرفیت بیشتری برای جذب فلزات سنگین مانند سرب دارند و می‌توانند زیست‌فراهمی و انتقال آن‌ها در اکوسیستم‌های آبی و خاکی را افزایش دهند، که این به نوبه خود می‌تواند خطرات آلودگی زیست‌محیطی را تشدید کند (Wang, 2023).



(ب)



(الف)

شکل ۳- هم‌دماهای جذب سرب توسط میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلنی قبل (الف) و بعد (ب) از هوادیدگی برازش یافته با مدل فروندلیچ

جدول ۱- ضرایب معادله فروندلیچ برازش شده در داده‌های جذب سرب

نمونه	شاخص شدت جذب (-)	شاخص ظرفیت جذب ($L^N \text{ mg}^{(1-N)} \text{ kg}^{-1}$)	ضریب تبیین (R^2)
میکروپلاستیک‌های بکر	۰/۵۳	۳۶/۵۰	۰/۹۸
میکروپلاستیک‌های هوادیده	۰/۴۹	۸۱/۴۰	۰/۹۶

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که هوادیدگی میکروپلاستیک‌های پلی‌اتیلن با ایجاد تغییرات شیمیایی (تشکیل گروه‌های عامل) و فیزیکی (افزایش زبری و تخلخل سطح)، ظرفیت جذب سرب را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این امر می‌تواند تحرک و



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

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



زیست‌فراهمی سرب را در محیط‌های آبی و خاکی تغییر داده و خطرات زیست محیطی را تشدید کند. اهمیت این یافته‌ها در شناسایی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان حامل‌های بالقوه آلاینده‌های فلزی و نقش آن‌ها در انتقال این آلاینده‌ها در اکوسیستم‌ها است. نتایج این پژوهش بر ضرورت تدوین راهکارهای مؤثر برای مدیریت و کاهش آلودگی میکروپلاستیک‌ها تأکید دارد و زمینه‌ساز تحقیقات آینده برای درک بهتر برهمکنش این مواد با سایر آلاینده‌ها و تأثیرات بلندمدت آن‌ها بر سلامت محیط‌زیست و موجودات زنده است.

فهرست منابع

- 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.
- Bradney, L., Wijesekara, H., Palansooriya, K. N., Obadamudalige, N., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Kim, K.-H., & Kirkham, M. B. (2019). Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environment International*, 131, 104937.
- Duis, K., Coors, A., 2016. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ. Sci. Eur.* 28, 1–25.
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160, 42-48
- Frère, L., Paul-Pont, I., Moreau, J., Soudant, P., Lambert, C., Huvet, A., & Rinnert, E. (2016). A semi-automated Raman micro-spectroscopy method for morphological and chemical characterizations of microplastic litter. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2), 461–468
- Gao, X., Hassan, I., Peng, Y., Huo, S., & Ling, L. (2021). Behaviors and influencing factors of heavy metals adsorption onto microplastics: A review. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128777.
- Liu, X., Zhang, Y., & Wang, Z. (2021). Adsorption of heavy metals on weathered microplastics in aquatic environments. *Environmental Pollution*, 284-117245 .
- Liu, X., Zhang, Y., & Wang, Z. (2021). Adsorption of heavy metals on weathered microplastics in aquatic environments. *Environmental Pollution*, 284, 117245.
- Rochman, C.M., Hentschel, B.T., & Teh, S.J. (2014). Long-term sorption of metals is similar among plastic types: Implications for plastic debris in aquatic environments. *PLoS ONE*, 9(1), e85433.
- Song, Y., Zhou, L., & Zhang, K. (2024). Microplastics as vectors for heavy metal bioavailability in contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 189-108976
- Tang, S., Lin, L., Wang, X., Feng, A., & Yu, A. (2019). Pb(II) uptake onto nylon microplastics: Interaction mechanism and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*, 386, 121960.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Global Chemicals Outlook II: From Legacies to Innovative Solutions*. Available at: <https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions> (Accessed: 20 December 2022).
- Wang, J., Liu, X., & Li, Y. (2020). Surface modification of polyethylene microplastics during weathering: Implications for heavy metal adsorption. *Science of the Total Environment*, 737, 139706.



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Wang, F., Zhang, X., & Xu, Y. (2023). Enhanced adsorption of heavy metals by weathered microplastics: Role of surface roughness and chemical reactivity in aquatic and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution**, 315, 120432. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120432>

چکیده انگلیسی

Lead adsorption by pristine and weathered polyethylene microplastics

Mozhdeh Jafari, Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology

Mehran Shirvani, Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology

Mohammadreza mosaddeghh, Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology

Abstract

Microplastics (polymer particles smaller than 5 mm) are recognized as a serious threat to soil quality due to their high specific surface area and surface functional groups, which enable them to adsorb and transport toxic pollutants such as heavy metals. This study investigates the adsorption of lead by polyethylene microplastics in both pristine and weathered states. To this end, microplastics were first subjected to accelerated weathering using the Fenton method, and changes in their surface properties were examined. Subsequently, the adsorption isotherms of lead by these particles were studied. Fourier-transform infrared spectroscopy results revealed an increase in oxygen-containing functional groups, such as carboxyl, on the surface of weathered microplastics. Scanning electron microscopy images confirmed morphological changes, showing that the smooth surfaces of pristine polyethylene became rough and porous after weathering. Isotherm experiments demonstrated that weathered microplastics exhibited a higher adsorption capacity compared to pristine ones. Additionally, weathered microplastics adsorbed lead with greater strength. Overall, the findings of this study highlight the potential of weathered microplastics in influencing the behavior of lead in contaminated soils and underscore the importance of investigating the interactions between microplastics and this heavy metal in soil environments.

Keywords: Soil pollution, surface adsorption, weathering, heavy metals, plastic, polymer