



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



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مروری بر چالش‌ها و راهکارهای حذف استرهای فتالات از خاک‌های آلوده

سبحة نیک‌مهر^۱، احمدعلی پوربابایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و

منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه:

pourbabaei@ut.ac.ir

چکیده

امروزه آلودگی خاک به استرهای فتالات در نتیجه گسترش استفاده از پلاستیک در بخش صنعت و کشاورزی به یک مشکل زیست محیطی نوظهور و نگران کننده تبدیل شده است. استرهای فتالات به عنوان نرم کننده در ساخت پلاستیک به کار می‌روند اما تحقیقات متعددی نشان داده است که این ترکیبات می‌توانند براحتی از پلیمرها خارج شده و با ورود به زنجیره غذایی و اختلال در عملکردهای زیستی موجودات زنده پیامدهای جبران‌ناپذیری بر سلامت انسان و رشد گیاهان داشته باشند. این ترکیبات می‌توانند تنوع و عملکرد میکروبی خاک را تغییر دهند و با تغییر میکروبیوم خاک بر چرخه عناصر غذایی مانند چرخه کربن و نیتروژن و فعالیت آنزیم‌ها اثر بگذارند. امروزه برای حذف این آلاینده‌ها از محیط زیست از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی استفاده می‌شود که روش‌های زیستی به دلیل کارایی بالا و سازگاری با محیط زیست به ویژه در مقیاس وسیع مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. با توجه به گسترش استفاده از پلاستیک در بخش کشاورزی و خطرات آلودگی میکروپلاستیک و نانوپلاستیک در سیستم آب-خاک-گیاه، توجه به رویکردهای نوین زیست پالایی مانند درک مکانیسم‌های مولکولی و همچنین حل چالش‌های زیست محیطی پاکسازی این آلاینده‌ها از خاک جهت حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی ضروری است.

واژگان کلیدی: استرهای فتالات، آلودگی خاک، تجزیه زیستی، میکروپلاستیک، نانوپلاستیک

خاک به عنوان رکن اساسی اکوسیستم زمینی، نقشی حیاتی در پایش اکولوژیک و تولید کشاورزی ایفا می‌کند. امروزه آلودگی خاک به ترکیبات و عناصر سمی از جمله میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها به عنوان یک معضل زیست محیطی جهانی توجه محققان را به خود جلب نموده است. از جمله ترکیباتی که به طور گسترده در محصولات پلاستیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد گروهی از نرم‌کننده‌های پرکاربرد به نام استرهای فتالات^۱ (PAEs) هستند. این ترکیبات به دلیل پیوند شیمیایی ضعیف براحتی از ساختار پلاستیک خارج شده و وارد خاک، آب و هوا می‌شوند. از طرفی میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها به دلیل چرخه محیطی مشترک با استرهای فتالات می‌توانند به عنوان حامل عمل کرده و انتقال آن‌ها را در محیط تسهیل نمایند. تحقیقات نشان داده است استرهای فتالات توانایی ورود به زنجیره غذایی و تجمع در بافت‌های چربی را دارند و به علت شباهت ساختاری به استروژن و اتصال به گیرنده‌های آن می‌توانند باعث اختلال در عملکردهای هورمونی، ناهنجاری‌های رشد، ایجاد برخی تومورها و ... شوند (Cheon, 2020; Singh and Li, 2011; Gao et al., 2018; Zheng et al., 2019). با توجه به هزینه پایین تولید و کمبود جایگزین کاربرد محصولات حاوی فتالات به طور مداوم در حال افزایش است از این رو توسعه روش‌های موثر در حذف این ترکیبات سمی ضروری بنظر می‌رسد.

روش‌شناسی مرور

این مرور سیستماتیک با جستجوی جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی Science, PubMed, Web of Science و Direct و Google Scholar انجام شده است. کلیدواژه‌های اصلی و ترکیبی "Phthalate esters" or "PAE" or "Microplastic and environmental contamination" or "Environmental pollution" or "Soil pollution" or "nanoplastic pollution" در "Biodegradation" or "Advanced oxidation processes" or "Bioremediation" جستجوی منابع مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب‌های جستجوی اصلی شامل "Biohazards and phthalate esters" or "Phthalates and endocrine disrupting" or "Phthalate esters and agricultural soil" or "PAEs and endocrine disrupting" "Biodegradation or Remediation" می‌باشد. در رابطه با معیارهای ورود و خروج مقالات همگی به زبان انگلیسی و در بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۵ و با تمرکز بیشتر بر مطالعات ده سال اخیر می‌باشد. در مجموع ۱۳۰ مقاله در جستجوی اولیه شناسایی شدند و پس از مطالعه و حذف موارد تکراری نهایتاً حدود چهل مقاله در این مقاله مروری سیستماتیک گنجانده شدند.

ساختار استرهای فتالات و اثرات متابولیکی آن‌ها

پیش‌ساز اصلی استرهای فتالات، استرهای دی‌آلکیل یا دی‌آلکیل‌آریل فتالیک‌اسید می‌باشد. ساختار شیمیایی اسید فتالیک از دو گروه کربوکسیلیک در موقعیت ارتو یک حلقه بنزن تشکیل شده است که معمولاً زنجیره‌های جانبی خطی یا شاخه‌ای از گروه‌های آلکیل به آن متصل می‌باشند. شش گروه از استرهای فتالات شامل دی‌متیل فتالات (DMP)، دی‌اتیل فتالات (DEP)، دی‌ان‌بوتیل فتالات (DnBP)، دی‌(۲-اتیل هگزیل) فتالات (DEHP)، بوتیل بنزیل فتالات (BBP) و دی‌ان‌اکتیل فتالات (DnOP) به دلیل اثرات سرطان‌زا به عنوان آلاینده‌های با اولویت بالا معرفی شده‌اند (Duenas-Moreno et al., 2023). این ترکیبات از نظر شیمیایی به پلیمرها متصل نیستند و نسبتاً به راحتی به محیط نفوذ می‌کنند از این رو حتی اگر پلاستیک‌ها مستقیماً بلعیده نشوند باز هم می‌توانند خطر ایجاد کنند (Groh et al., 2019). گزارش شده که مونواسترهای حاصل از استرهای فتالات مانند MEHP به دلیل تولید رادیکال‌های آزاد بیشتر در بدن موجودات زنده نسبت به فتالات‌های اصلی می‌توانند سمی‌تر باشند (Wang et al., 2012).

¹ Phthalate esters

منابع اصلی ورود استرهای فتالات به خاک کشاورزی و خطرات زیست محیطی آن

امروزه علاوه بر صنعت در کشاورزی نیز محصولات پلاستیکی به دلیل مقرون به صرفه بودن، انعطاف پذیری و مقاومت در برابر خوردگی برای افزایش بهره‌وری به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. از آنجایی که اولین مصرف کننده آب در جهان بخش کشاورزی است و با توجه به منابع آبی محدود، استفاده کارآمد از آب در کشاورزی بسیار مهم است. مالچ‌پاشی تکنیکی در کشاورزی است که در آن برای جلوگیری از رشد علف‌های هرز، تبخیر رطوبت و فرسایش، سطح خاک با لایه‌ای از مواد پوشیده می‌شود تا بدین طریق نیاز به آبیاری و آفت کش کاهش یافته و عملکرد و کیفیت محصول بهبود یابد (Amare and Desta, 2021). اگرچه کاربرد مالچ‌های پلاستیکی منجر به افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی می‌گردد اما بازیافت بسیاری از این پلاستیک‌ها به طور موثری قابل اجرا نیست از این رو فیلم مالچ‌های پلاستیکی را می‌توان منبع مستقیم ورود پلاستیک به خاک کشاورزی نامید. یکی دیگر از منابع اصلی ورود آلودگی PAE به خاک کشاورزی آبیاری با فاضلاب تصفیه شده و بیوسولیدها^۱ (جامدات زیستی) است (Ng et al., 2018). تخمین زده شده که حدود ۹۵ درصد از میکروپلاستیک‌ها در بیوسولیدها باقی می‌ماند (Ziajahromi et al., 2016). از آنجایی که فاضلاب تصفیه شده و بیوسولیدها در کشاورزی به ترتیب برای آبیاری و کود استفاده می‌شوند به احتمال زیاد کاربرد آن‌ها میزان ورود میکروپلاستیک به زمین‌های کشاورزی را افزایش می‌دهد. کودهای زیستی^۲ (BBFs) تولید شده از زباله‌های آلی نیز اگرچه پتانسیل کاهش وابستگی بخش کشاورزی به کودهای معدنی را دارند با این حال می‌توانند حاوی قطعات پلاستیکی و نرم کننده‌های فتالات باشند که تهدیدی برای خاک کشاورزی محسوب می‌شوند (Chojnacka et al., 2020). مطالعات نشان داده است تجمع PAEs در بافت گیاهی منجر به آسیب‌های شدید و گوناگونی در رشد گیاه مانند اختلال در عملکرد شبکه آندوپلاسمی، میتوکندری و فتوسنتز می‌گردد (Zhao et al., 2016a; Ranauda et al., 2024; Kong et al., 2018). حضور آلاینده‌های حاوی فتالات می‌تواند باعث تغییر ساختار و تنوع جامعه میکروبی خاک و اثرگذاری قابل ملاحظه بر چرخه کربن و نیتروژن شود. از بین رفتن تدریجی جوامع میکروبی خاک به دلیل آلودگی‌های PAE همراه با تغییر فعالیت آنزیم‌های خاک مانند آنزیم نیتروژناز در مطالعات بسیاری گزارش شده است (Wu et al., 2019; Gao et al., 2024; Ranauda et al., 2024; Kim et al., 2023). همچنین به تازگی اثر میکروپلاستیک‌ها و نانوپلاستیک‌ها بر افزایش میکروارگانیزم‌های حامل ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی^۳ (ARGs) در سیستم خاک-گیاه و تجمع این ترکیبات در بخش خوراکی سبزیجات مورد توجه قرار گرفته است (Xu et al., 2024).

حذف استرهای فتالات و عوامل محیطی موثر بر آن

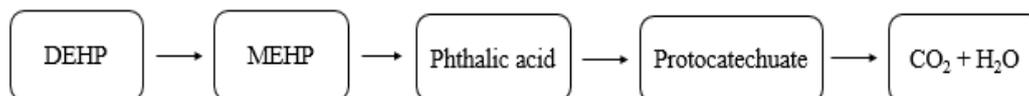
طی سال‌های گذشته برخی از فناوری‌های فیزیکی و شیمیایی مانند اکسیداسیون پیشرفته، تخریب فتوشیمیایی و فتوکاتالیزتی برای حذف آلاینده‌های خاک توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی کمتر از روش‌های زیستی تحت تاثیر شرایط محیطی مانند pH، دما و غلظت اکسیژن محیط قرار می‌گیرند و انعطاف پذیری عملیاتی بالاتری دارند همچنین در غلظت‌های بسیار بالای آلاینده می‌توانند سرعت و کارایی بالاتری داشته باشند. از چالش‌های فنی روش‌های فیزیکی و شیمیایی در انتقال تکنولوژی‌های آزمایشگاهی به محیط واقعی خاک می‌توان به مشکلاتی مانند نفوذپذیری ضعیف مواد شیمیایی در خاک ریز بافت، توزیع ناهمگن آلاینده‌ها، تداخل مواد آلی و معدنی خاک با واکنشگرها، تغییر ساختار طبیعی خاک و امکان تولید آلودگی ثانویه اشاره کرد. از این رو ممکن است کاربرد این روش‌ها در مساحت‌های زیاد در عین حال که پرهزینه باشد چندان موفقیت‌آمیز نباشد (Zheng et al., 2009; Santhosh et al., 2018). با توجه به این چالش‌ها پژوهشگران برای حذف آلاینده‌هایی مانند PAE به فناوری‌های پاک کننده زیستی روی آورده‌اند. از مزایای این فناوری می‌توان به سازگاری زیست محیطی، هزینه و انرژی کمتر، قابلیت تجزیه کامل آلاینده

¹ Biosolids

² Bio-Based Fertilizers

³ Antibiotic Resistance Genes

و امکان ترکیب آن با سایر روش‌ها اشاره کرد. یکی از ایمن‌ترین روش‌های پاک‌کننده زیستی، تجزیه میکروبی است که در طی آن میکروارگانیسم‌ها فتالات‌های سمی را به فرم‌های کمتر سمی و یا غیر سمی تبدیل می‌کنند (Kong et al., 2018; Chatterjee and Dutta, 2008a; Wu et al., 2010). مطالعات نشان می‌دهد مهم‌ترین مرحله در اصلاح و تجزیه زیستی PAE شکسته شدن دو پیوند استری است که فرایند تجزیه زیستی با آن شروع می‌شود. دو واکنش استریفیکاسیون پی در پی منجر به تبدیل دی‌آلکیل فتالات‌ها به اسیدهای فتالیک می‌شود (Fan et al., 2018; Tang et al., 2016; Wu et al., 2010). هم باکتری هوازی و هم بی‌هوازی این دو مرحله هیدرولیز استرهای فتالات را به صورت خارج سلولی انجام می‌دهند و تخریب بیشتر اسید فتالیک با ورود به سیتوپلاسم باکتری هوازی و بی‌هوازی در مسیرهای مختلفی انجام می‌گیرد (شکل ۱). مقدار تخریب میکروبی فتالات‌ها بستگی زیادی به شرایط محیطی مختلف مانند pH، دما، میزان تلقیح، وزن مولکولی PAE و ... دارد و بیشترین حذف در محدوده پی‌اچ ۸-۶ و دمای بهینه ۳۵-۲۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است (Li et al., 2018; Nahurira et al., 2017; Pradeep et al., 2015; Wu et al., 2010). همچنین غلظت بالای استرهای فتالات می‌تواند بازدارنده باشد (Li et al., 2018; Zhao et al., 2016b)؛ در حالی که اضافه کردن مکمل‌هایی از سوپستراها مانند استات، گلوکز یا عصاره مخمر و همچنین غلظت مناسب عناصر غذایی مانند Fe^{3+} و Mn^{2+} و کشت چند سویه با هم (کنسرسیوم میکروبی) می‌تواند به افزایش سرعت فرآیند حذف کمک کند (Ahuactzin-Pérez et al., 2018; Ren et al., 2016; Tao et al., 2019; Xu et al., 2017; Chatterjee and Dutta, 2008b). اگرچه تجزیه زیستی یکی از رویکردهای مهم در حذف استرهای فتالات است اما این فناوری نیز با چالش‌های مهمی از جمله گزینش‌پذیری باکتری‌ها، نیاز به کشت کنسرسیوم میکروبی در برخی موارد، محدودیت سازگاری، بقا و ماندگاری حداکثری باکتری در یک محیط باز نسبت به شرایط آزمایشگاهی، ناکافی بودن دانش علمی در رابطه با ژن‌های تجزیه‌کننده فتالات و محصولات ژنی مرتبط به آن است (Feng et al., 2020; Kong et al., 2018; Chatterjee and Dutta, 2008b).



شکل ۱- دیاگرام کلی تجزیه استرفتالات DEHP در شرایط هوازی

نتیجه‌گیری

امروزه با افزایش کاربرد محصولات مختلف حاوی استرهای فتالات این آلاینده‌ها به طور گسترده‌ای در محیط‌های مختلف آبی و خاکی حضور دارند. به دلیل توانایی استرهای فتالات در ورود به زنجیره غذایی و اثرات مخرب زیست محیطی آن‌ها بر سلامت انسان و سایر جانداران باید به دنبال روش‌های کارآمد و توسعه استراتژی‌های قدرتمندی رفت که بتوانند به طور موثری این آلاینده‌ها را از خاک و آب حذف و معدنی‌سازی کنند. روش‌های پاک‌سازی فیزیکی و شیمیایی در شرایط با آلودگی شدید و در مقیاس کم کارایی بالاتری از خود نشان داده‌اند اما روش‌های زیستی مانند تجزیه میکروبی برای پاک‌سازی در مقیاس گسترده از نظر اقتصادی و سازگاری زیست‌محیطی برتری دارند. مکانیسم اصلی تجزیه زیستی شامل شکستن پیوندهای استری و تبدیل به اسید فتالیک و سپس تجزیه بیشتر می‌باشد اما کارایی این فرآیند به شدت وابسته به شرایط محیطی مختلف از جمله pH، دما و غلظت آلاینده است.

پیشنهادات پژوهشی برای آینده

پیشنهاد می‌شود طی پژوهش‌های آینده ۱- کشت کنسرسیوم‌های میکروبی اختصاصی با توانایی‌های تکمیلی برای تجزیه استرهای فتالات با وزن مولکولی بالا، ۲- ترکیب روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی جهت بررسی کارایی سیستم‌های

ترکیبی برای پیش‌تیمار اکسیداسیون ملایم جهت افزایش دسترسی زیستی و سپس تجزیه میکروبی و ۳-بررسی اثرات متابولیت‌های میانی مانند مطالعه سمیت و سرنوشت محیطی متابولیت‌های میانی حاصل از تجزیه ناقص استرهای فتالات با احتمال سمیت بیشتر نسبت به ترکیبات اصلی مورد توجه و بررسی قرار گیرند.

فهرست منابع

- 1 Ahuactzin-Pérez, M., Tlecuitl-Beristain, S., García-Davila, J., Santacruz-Juarez, E., Sanchez, C. (2018). A novel biodegradation pathway of the endocrine-disruptor Di-(2-ethyl hexyl) phthalate by *Pleurotusostreatus* based on quantum chemical investigation. *Ecotoxicol. Environ*, 147, 494–499.
- 2 Amare, G., Desta, B. (2021). Coloured plastic mulches: impact on soil properties and crop productivity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8.
- 3 Chatterjee, S., Dutta, T. (2008a). Complete degradation of Butyl benzoyl phthalate by a defined bacterial consortium: role of individual isolates in the assimilation pathway. *Chemosphere*, 70, 933–941.
- 4 Chatterjee, S., Dutta, T. (2008b). Metabolic cooperation of *Gordonia* sp. strain MTCC 4818 and *Arthrobacter* sp. strain WY in the utilization of Butyl benzoyl phthalate: effect of a novel co-culture in the degradation of a mixture of phthalates. *Microbiology*, 154, 3338–3346.
- 5 Cheon, Y. (2020). Di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) and uterine histological characteristics. *Reprod*, 24.
- 6 Chojnacka, K., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A. (2020). Bio-based fertilizers: a practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*, 295.
- 7 Duenas-Moreno, J., Mora, A., Kumar, M., Meng, Z., Mahlknecht, J. (2023). Worldwide risk assessment of phthalates and bisphenol A in humans: the need for updating guidelines. *Environ. Int*, 181.
- 8 Fan, S., Wang, J., Yan, Y., Jia, Y. (2018). Excellent degradation performance of a versatile phthalic acid esters-degrading bacterium and catalytic mechanism of monoalkyl phthalate hydrolase, 19.
- 9 Feng, F., Chen, X., Wang, Q., Xu, W., Long, L. (2020). Use of *Bacillus-siamensis*-inoculated biochar to decrease uptake of dibutyl phthalate in leafy vegetables. *Environmental Management*, 253.
- 10 Gao, M., Bai, L., Xiao, L., Song, Zh. (2024). Micro (nano)plastics and phthalate esters drive endophytic bacteria alteration and inhibit wheat root growth. *Science of The Total Environment*, 906.
- 11 Gao, D., Li, Z., Wang, H., Liang, H. (2018). An overview of phthalate acid ester pollution in China over the last decade: environmental occurrence and human exposure. *Sci.Total Environ*, 645, 1400–1409.
- 12 Groh, K.J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., Geueke, B., AMuncke, J. (2019). Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Total Environ*, 651, 3253–3268.
- 13 Kim, K., Song, I, G., Yoon, H. and Park, J, W. (2023). Sub-micron microplastics affect nitrogen cycling by altering microbial abundance and activities in a soil-legume system. *Journal of Hazardous Materials*
- 14 Kong, X., Jin, D.C., Jin, S.L., Wang, Z.G., Yin, H. (2018). Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem. *J. Hazard. Mater*, 353, 142–150.
- 15 Li, F., Liu, Y., Wang, D., Zhang, C., Yang, Z., Lu, S., Wang, Y. (2018). Biodegradation of Di-(2-ethylhexyl) phthalate by a halotolerant consortium LF. *PLoS One*, 13.
- 16 Liu, L., Zhang J, TangG, Huang Y, Xie X, Geng J, Lü, H., Li, C, Zhao, H., Cai Q. (2023). Endophytic Phthalate-degrading *Bacillus subtilis* N-1-gfp colonizing in soil-crop system shifted indigenous bacterial community to remove di-n-butyl phthalate. *Journal of Hazardous Materials*, 449(4).
- 17 Nahurira, R., Ren, L., Song, J., Jia, Y. et al. (2017). Degradation of di-(2-ethylhexyl) phthalate by a novel *Gordoniaalkankivorans* strain YC-RL2. *Curr. Microbiol*, 74, 309–319.
- 18 Ng, E. L. Lwanga E, H, Eldridge S,M, Johnston P, Hu H, W, Geissen V, Chen D. (2018). An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment*.
- 19 Pradeep, S., Sarath Josh, M., Binod, P., Anderson, R. (2015). *Achromobacterdenitrificans* strain SP1 efficiently remediates DEHP phthalate. *Ecotoxicol. Environ. Saf*, 112, 114–121.
- 20 Ranauda, M. A., Zuzolo, D., Maisto, M., Tartaglia, M., Scarano, P., Prigioniero, A., Sciarrillo, R., Guarino, C. (2024). Microplastics affect soil-plant system: Implications for rhizosphere biology and fitness of sage (*Salvia officinalis* L.). *Environmental Pollution*, 346.
- 21 Ren, L., Jia, Y., Yan, Y. (2016). Biodegradation of phthalic acid esters by a newly isolated *Mycobacterium* sp. YC-RL4 and the bioprocess with environmental samples. *Environ. Pollut. Res*, 23 (16).
- 22 Santhosh, C., Malathi, A., Daneshvar, E., Kollu, P., Bhatnagar, A. (2018). Photocatalytic degradation of toxic aquatic pollutants by novel magnetic 3D-TiO₂@HPGA nanocomposite. *Sci. Rep*, 8.
- 23 Singh, S., Li, S. (2011). Phthalates: toxicogenomics and inferred human diseases. *Genomics*, 97.

- 24 Tang W.J., Zhang L.S., Fang, Zhou, Y, Ye, B.C. (2016). Biodegradation of phthalate esters by newly isolated *Rhizobium* sp. LMB-1 and its biochemical pathway of di-n-butyl phthalate. *Journal of Applied Microbiology* . Appl Microbiol, 121.
- 25 Tao, Y., Li, H., Gu, J., Shi, H., Han, S., Jiao, Y. (2019). Metabolism of Diethyl phthalate (DEP) and identification of degradation intermediates by *Pseudomonas* sp. DNE-S1. *Ecotoxicol Environ*, 173.
- 26 Wang, W., Craig, Z.R., Basavarajappa, M.S., Hafner, K.S., Flaws, J.A. (2012). Mono (2-ethylhexyl) phthalate induces oxidative stress and inhibits growth of mouse ovarian antral follicles. *Biol. Reprod.* 87.
- 27 Wu, K., Dumat, C., Li, H., Xia, H., Li, Z., Wu, J. (2019). Responses of soil microbial community and enzymes during plant-assisted biodegradation of Di-(2-ethylhexyl) phthalate and pyrene. *Phytoremediation*, 21.
- 28 Wu, X.L., Liang, R.X., Dai, Q.Y., Jin, D.C., Wang, Y.Y. and Chao, W.L. (2010). Complete degradation of di-n-octyl phthalate by biochemical cooperation between *Gordonia* sp strain JDC-2 and *Arthrobacter* sp strain JDC-32 isolated from activated sludge. *Hazard Mater*, 176, 262–268.
- 29 Xu, G, Li, Y, Lin X, Yu Y. (2024). Effects and mechanisms of polystyrene micro- and nano-plastics on the spread of antibiotic resistance genes from soil to lettuce. *Science of the Total Environment*.
- 30 Xu, J., Lu, Q., de Toledo, R., Shim, H. 2017. Degradation of Di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) by an indigenous isolate *Acinetobacter* sp. SN13. *Int. Biodeterior. Biodegradation*. 117. 205–214.
- 31 Zhao, H.M., Du, H., Xiang, L., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H., (2016a). Physiological differences in response to di-n-butyl phthalate (DBP) exposure between low- and high-DBP accumulating cultivars of Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.). *Environ. Pollut*, 208.
- 32 Zhao H, M., Du, H., Lin, J., Chen, X., Li, Y., Li, H. (2016b). Complete degradation of the endocrine disruptor di-(2-ethylhexyl) phthalate by a novel *Agromyces* sp. strain and its application to bioremediation of contaminated soil. *Sci Total Environ*, 562, 170–178.
- 33 Zheng, Z., Zhang, H., He, P., Shao, L. (2009). Co-removal of phthalic acid esters with dissolved organic matter from landfill leachate by coagulation and flocculation process. *Chemosphere*, 75.
- 34 Zheng, X., Yan, Z., Liu, P., Li, H., Zhou, J., Wang, Y. (2019). Derivation of aquatic life criteria for four phthalate esters and their ecological risk assessment in Liao River. *Chemosphere*, 220, 802–810.
- 35 Ziajahromi, S., Neale, P.A., Leusch, D.D.L. (2016). Wastewater treatment plant effluent as a source of microplastics: review of the fate, chemical interactions and potential risks to aquatic organisms. *Water Scienc Technology*, 74, 2253–2269.

A Review of Challenges and Strategies for the Removal of Phthalate Esters from Contaminated Soils

Sobheh Nikmehr¹, Ahmadali Pourbabaie^{2*}

1- Ph.D student in Soil Biology and Biotechnology, Department of Soil Science, Faculties of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

pourbabaie@ut.ac.ir

Abstract

Soil contamination with phthalate esters has emerged as a concerning environmental issue due to the widespread use of plastics in industrial and agricultural sectors. Phthalate esters, used as plasticizers in plastic production, can easily leach from polymers and enter the food chain, causing irreversible consequences for human health and plant growth through disruption of biological functions in living organisms. These compounds can alter soil microbial diversity and function, affecting nutrient cycles such as carbon and nitrogen cycles, and enzyme activities by modifying the soil microbiome. Currently, physical, chemical, and biological methods are employed to remove these pollutants from the environment, with biological approaches receiving greater attention due to their high efficiency and environmental compatibility, especially at large scales. Considering the increasing use of plastics in agriculture and the risks associated with microplastic and nanoplastic pollution in the water-soil-plant system, attention to novel bioremediation approaches, including understanding molecular mechanisms and addressing environmental challenges in cleaning up these contaminants from soil, is essential for maintaining the health and sustainability of agricultural ecosystems.

Keywords: Phthalate esters, Soil pollution, Microplastics, Nanoplastics, Biodegradation