نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

(مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب)

۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart soil and water management)
16-18 September, 2025, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با رویکرد میکروبی: مروری بر مکانیسم‌ها، عوامل محیطی مؤثر و راهکارهای بهبود

احمد اصغرزاده[۱]، کبری ثقفی[۱]، بهمن خوشرو[۱*]، محدثه شیرین‌زاده[۲] و حمیدرضا زارع گیلدهی[۲]

۱- موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

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

نویسنده مسئول: **E-mail:** bahmankhoshru@yahoo.com

چکیده

آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی، یک چالش جهانی با پیامدهای منفی برای اکوسیستم‌ها و سلامت انسان است. زیست‌پالایی میکروبی به دلیل ماهیت طبیعی، اثربخشی و پتانسیل تجزیه کامل آلاینده‌ها به محصولات غیرسمی، راهکاری مؤثر و پایدار محسوب می‌شود. این مقاله مروری، با هدف تلفیق دانش موجود، به بررسی مکانیسم‌های کلیدی زیست‌تجزیه میکروبی هیدروکربن‌های نفتی، عوامل محیطی اصلی مؤثر بر سرعت و کارایی این فرآیند و راهکارهای نوین برای بهبود آن می‌پردازد. بررسی منابع نشان می‌دهد که تنوع گسترده ریزجانداران تجزیه‌کننده و مسیرهای متابولیکی پیچیده، اساس زیست‌پالایی هستند، اما عواملی چون ماهیت و غلظت آلاینده و شرایط محیطی، نقش حیاتی در پتانسیل زیست‌تجزیه دارند. بررسی منابع نشان می‌دهد که تنوع گسترده ریزجانداران تجزیه‌کننده و مسیرهای متابولیکی پیچیده، اساس زیست‌پالایی هستند. با این حال، شناخت چالش‌هایی نظیر محدودیت زیست‌فراهمی آلاینده و پیچیدگی‌های کاربرد در مقیاس مزرعه، در کنار درک عمیق این مکانیسم‌ها و عوامل، برای توسعه روش‌های زیست‌پالایی مؤثر و پایدار ضروری است.

کلمات کلیدی: خاک آلوده، زیست‌پالایی میکروبی، عوامل محیطی، مکانیسم تجزیه زیستی، هیدروکربن نفتی.

۱ مقدمه

آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی، یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی در سطح جهانی است. این هیدروکربن‌ها، شامل ترکیبات متنوعی از آلکان‌ها تا هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs[1])، می‌توانند برای سلامت اکوسیستم و انسان سمی و خطرناک باشند. آلودگی به این ترکیبات منجر به تخریب کیفیت خاک، کاهش حاصلخیزی و ورود آلاینده‌ها به زنجیره غذایی و منابع آب می‌شود (Pawar, 2015). بنابراین، توسعه راهکارهای مؤثر و سازگار با محیط زیست برای پاکسازی این خاک‌ها ضروری است.

زیست‌پالایی[2]، با بهره‌گیری از ریزجانداران، گیاهان یا آنزیم‌های آن‌ها برای پاکسازی محیط‌های آلوده، به عنوان یک رویکرد پایدار، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست شناخته شده است (Gkorezis et al., 2016). این روش پتانسیل تجزیه کامل آلاینده‌ها به ترکیبات غیرسمی مانند CO_2 و H_2O را دارد (Ite and Ibok, 2019). در این میان، زیست‌پالایی میکروبی به دلیل نقش محوری ریزجانداران خاک، در تجزیه زیستی[3] اهمیت ویژه‌ای دارد.

[1] Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
[2] Bioremediation
[3] Biodegradation

با توجه به پیچیدگی فرآیند زیست‌تجزیه هیدروکربن‌ها و تأثیر عوامل متعدد بر آن، درک عمیق جنبه‌های مختلف زیست‌پالایی میکروبی برای توسعه موفقیت‌آمیز این فناوری ضروری است.

۲ مکانیسم‌های زیست‌تجزیه هیدروکربن‌های نفتی توسط ریزجانداران در خاک

۲-۱ اصول و عوامل میکروبی در زیست‌تجزیه هیدروکربن‌ها

زیست‌تجزیه هیدروکربن‌های نفتی فرآیندی پیچیده و چند مرحله‌ای است که توسط طیف وسیعی از ریزجانداران، به‌ویژه باکتری‌ها و قارچ‌ها، از طریق مسیرهای متابولیکی متنوع صورت می‌گیرد. شناخت دقیق این مکانیسم‌ها برای توسعه و بهینه‌سازی استراتژی‌های زیست‌پالایی امری ضروری است. خاک‌های آلوده به هیدروکربن، زیستگاه جوامع میکروبی متنوعی هستند که قادر به استفاده از این ترکیبات به عنوان منبع کربن و انرژی می‌باشند. جنس‌های باکتریایی متعددی نظیر *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* و قارچ‌هایی چون *Aspergillus* و *Phanerochaete chrysosporium*، نقش کلیدی در تجزیه هیدروکربن‌های آلیفاتیک، آروماتیک و ترکیبات پیچیده‌تر مانند PAHs ایفا می‌کنند (Mekonnen et al., 2024). اغلب، تجزیه مؤثرتر توسط کنسرسیوم‌های میکروبی انجام می‌شود (Hamzah et al., 2017).

۲-۲ شرایط و مسیرهای عمومی تجزیه هوازی و بی‌هوازی

فرآیندهای زیست‌تجزیه هیدروکربن‌ها عمدتاً در دو شرایط هوازی و بی‌هوازی پیش می‌روند. تجزیه هوازی، که عموماً کارآمدتر و سریع‌تر است، با فعالیت آنزیم‌های اکسیژناز آغاز شده و اکسیژن مولکولی به سوبسترای هیدروکربنی افزوده می‌شود تا آن را برای مراحل بعدی تجزیه فعال سازد. در مقابل، تجزیه بی‌هوازی، فرآیندی کندتر است و نیازمند پذیرنده‌های الکترون جایگزین نظیر نیترات، سولفات یا دی‌اکسید کربن می‌باشد (Gkorezis et al., 2016). تجزیه هوازی آلکان‌ها معمولاً با اکسیداسیون انتهایی و فرآیند بتا-اکسیداسیون ادامه می‌یابد، در حالی که ترکیبات آروماتیک اغلب از طریق هیدروکسیلاسیون حلقه و سپس شکافت آن توسط دی‌اکسیژنازها تجزیه می‌شوند (Koshlaf and Ball, 2017).

۲-۳ نقش آنزیم‌های میکروبی و سورفکتانت‌های زیستی در تسهیل تجزیه

نقش آنزیم‌های میکروبی در فرآیندهای تجزیه حیاتی است. آنزیم‌های اکسیژناز به عنوان آغازگر در تجزیه هوازی عمل کرده و آنزیم‌های شکافنده حلقه در تجزیه ترکیبات آروماتیک نقش کلیدی دارند. علاوه بر این، دهیدروژنازها و سایر آنزیم‌ها در مراحل بعدی تجزیه نقش دارند. قارچ‌ها نیز با تولید آنزیم‌های خارج سلولی مانند لاکازها و پروکسیدازها به تجزیه ترکیبات مقاوم کمک می‌کنند (Mekonnen et al., 2024). یکی از چالش‌های اصلی در زیست‌پالایی، فراهمی زیستی پایین هیدروکربن‌های آب‌گریز است. بسیاری از ریزجانداران با تولید سورفکتانت‌های زیستی،این مشکل را برطرف می‌کنند (Abdulrasheed et al., 2020).

۳ عوامل محیطی مؤثر بر زیست‌پالایی میکروبی هیدروکربن‌ها در خاک

۳-۱ تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک

ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند بافت، ساختمان و میزان تهویه، نقش مهمی در زیست‌پالایی هیدروکربن‌ها دارند. بافت خاک بر اندازه ذرات، نفوذپذیری و در نتیجه سرعت تجزیه بیولوژیکی تأثیر می‌گذارد. خاک‌های ریزدانه (رسی) با نفوذپذیری کم، انتقال اکسیژن را محدود کرده، هیدروکربن‌ها را در سطح نگه داشته و دسترسی میکروب‌ها به عناصر غذایی را کاهش

می‌دهند، که این عوامل سرعت تجزیه را کند می‌کنند. بنابراین، افزایش تخلخل خاک برای بهبود فراهمی زیستی آلاینده‌ها، تأمین اکسیژن و رشد میکروبی ضروری است. حضور اکسیژن کافی (معمولاً ۱۰ تا ۴۰ درصد) برای تجزیه هوازی مؤثر هیدروکربن‌ها حیاتی است، زیرا تجزیه بی‌هوازی این ترکیبات بسیار کندتر صورت می‌گیرد و سطوح پایین اکسیژن، مسیرهای تجزیه هوازی را مختل می‌کند (Yap et al., 2021). در کنار این ویژگی‌های فیزیکی که بستر و چارچوب فعالیت میکروبی را فراهم می‌کنند، خصوصیات شیمیایی خاک نیز به طور مستقیم سرعت و کارایی فرآیند تجزیه را کنترل می‌نمایند.

۳-۲ اهمیت ویژگی‌های شیمیایی خاک

شرایط شیمیایی خاک شامل pH، رطوبت، شوری و محتوای عناصر غذایی، تأثیر قابل توجهی بر رشد باکتری‌ها و کارایی زیست‌پالایی دارد. pH بهینه (حدود ۷/۵) برای فعالیت آنزیمی و تجزیه بیولوژیکی هیدروکربن‌ها مهم است (Imron et al., 2020). رطوبت خاک، به عنوان واسطه انتقال عناصر غذایی، مستقیماً بر رشد و حرکت ریزجانداران اثر می‌گذارد. مقدار بهینه رطوبت (معمولاً در محدوده ۵۰-۸۰ درصد) به بافت خاک بستگی دارد؛ رطوبت کم فعالیت میکروبی را محدود کرده و رطوبت بیش از حد نیز با کاهش انتقال اکسیژن، تجزیه هوازی را مختل می‌کند. شوری بالا با افزایش فشار اسمزی و اختلال در فعالیت‌های متابولیکی، سرعت تجزیه را کاهش می‌دهد، هرچند باکتری‌های هالوفیل قادر به تجزیه هیدروکربن‌ها در محیط‌های شور نیز هستند (Abdulrasheed et al., 2020). همچنین، دسترسی به عناصر غذایی، به‌ویژه کربن، نیتروژن و فسفر (با نسبت پیشنهادی C:N:P حدود ۱۰۰:۱۰:۱ تا ۱۰۰:۲۰:۱)، برای متابولیسم و رشد میکروب‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن و تحریک زیستی ضروری است (Imron et al., 2020).

۳-۳ نقش حیاتی دما

دما یکی از عوامل کنترلی مهم در فرآیندهای تجزیه میکروبی است که بر سرعت رشد باکتری‌ها، فعالیت آنزیم‌ها، وضعیت شیمیایی آلاینده‌ها و تنوع جامعه باکتریایی تأثیر می‌گذارد. محدوده دمایی مطلوب (معمولاً ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) برای تخریب کامل هیدروکربن‌ها و حداکثر سرعت متابولیسم ضروری است. (Koshlaf and Ball, 2017).

۳-۴ تأثیر ماهیت و غلظت آلاینده

سرعت تجزیه هیدروکربن‌ها به شدت به ماهیت شیمیایی و غلظت آن‌ها در خاک وابسته است. ترکیبات پیچیده و کم‌محلول مانند آلکان‌های زنجیره بلند و آلکان‌های شاخه‌دار به دلیل آب‌گریزی و حلالیت پایین، کندتر از ترکیبات ساده‌تر تجزیه می‌شوند. همچنین غلظت‌های بسیار بالا می‌توانند برای ریزجانداران سمی باشند و سرعت رشد آن‌ها را کاهش دهند، در حالی که غلظت‌های بسیار پایین، کربن کافی برای حمایت از رشد میکروبی و القای مسیرهای تجزیه‌ای را فراهم نمی‌کنند (Álvarez et al., 2020).

۳-۵ اثرات متقابل با سایر آلاینده‌ها

حضور سایر آلاینده‌ها، مانند فلزات سنگین یا آفت‌کش‌ها، در خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند بر رشد و عملکرد ریزجانداران خاکزی تأثیر منفی بگذارد. غلظت بالای برخی فلزات سنگین (مانند سرب، کادمیوم، جیوه) می‌تواند با کاهش تولیدمثل، سرعت رشد و تنوع ریزجانداران، فعالیت بیولوژیکی آن‌ها را در خاک پایین آورد. با این حال، برخی ریزجانداران مقاوم به فلزات سنگین می‌توانند از طریق مکانیسم‌های تطبیقی، توانایی زیست‌پالایی را نشان دهند (Wakelin et al., 2014).

۴ استراتژی‌های بهبود کارایی زیست‌پالایی میکروبی هیدروکربن‌ها

۴-۱ تحریک زیستی[4] زیست‌پالایی

تحریک فعالیت میکروب‌های بومی خاک، یک استراتژی مؤثر و گسترده برای پالایش خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی است که با افزودن مواد مغذی، آب، اکسیژن و تنظیم pH و رطوبت انجام می‌شود. این روش با کنترل غلظت مواد مغذی افزوده شده از عدم تعادل در میکروفلور جلوگیری می‌کند (Guarino et al., 2017). فراهم کردن اکسیژن اضافی، از طریق هوادهی یا استفاده از عوامل حجیم‌کننده مانند خاک اره، تخلخل خاک را افزایش داده و شرایط را برای فعالیت میکروبی هوازی بهبود می‌بخشد. این رویکرد به جای معرفی سویه‌های غیربومی، بر تقویت جامعه میکروبی موجود و سازگار با محیط تمرکز دارد. مدیریت رطوبت نیز برای حفظ فراهمی زیستی آلاینده‌ها و فعالیت میکروبی حیاتی است (Imron et al., 2020).

۴-۲ تقویت زیستی[5] فرآیند زیست‌پالایی

افزودن میکروب‌های منتخب (بومی یا اصلاح‌شده ژنتیکی) با پتانسیل تجزیه بالا (معمولاً به میزان $>10^6$ CFU/g خاک)، سرعت تجزیه آلاینده‌های پیچیده را افزایش می‌دهد (Adams et al., 2015). این استراتژی شامل معرفی سویه‌های خالص، کنسرسیوم‌های از پیش سازگار شده، یا حتی ژن‌های تجزیه‌کننده از طریق ناقل‌ها برای انتقال به میکروب‌های بومی است. باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر ریزجانداران می‌توانند به عنوان عاملین بیواگمنتاسیون استفاده شوند. انتخاب سویه‌های مناسب باید بر اساس پتانسیل متابولیکی، توانایی رشد سریع، مقاومت به غلظت بالای آلاینده‌ها و پایداری در شرایط محیطی و رقابت با میکروب‌های بومی صورت گیرد. با این حال، بقا و فعالیت میکروب‌های تلقیح‌شده در خاک با چالش‌هایی نظیر تنش‌های محیطی، کمبود مواد مغذی، سمیت آلاینده، رقابت و شکار مواجه است (Gentry et al., 2004). بنابراین، بیواگمنتاسیون اغلب نیازمند همراهی با بهینه‌سازی شرایط فیزیکی و محیطی و استفاده از مواد حامل برای افزایش بقای میکروب‌ها است (Mishra et al., 2001).

۴-۳ کنسرسیوم‌های میکروبی: هم‌افزایی برای تجزیه بهتر

استفاده از کنسرسیوم‌های میکروبی، به جای سویه‌های منفرد، اغلب کارایی بیشتری در تجزیه کامل طیف وسیعی از هیدروکربن‌ها نشان می‌دهد. این برتری به دلیل تنوع آنزیمی گسترده‌تر، توانایی تجزیه اجزای مختلف هیدروکربن، تحمل بالاتر نسبت به شرایط فیزیکوشیمیایی متغیر و تولید بیشتر سورفکتانت‌های زیستی است که از طریق اثرات هم‌افزایی بین اعضای کنسرسیوم، نرخ زیست‌پالایی را به حداکثر می‌رساند (Hamzah et al., 2017). بنابراین درک ساختار، تنوع و تعاملات جوامع میکروبی برای تعیین پتانسیل متابولیکی و بهره‌برداری مؤثر از کنسرسیوم‌ها در زیست‌پالایی ضروری است (Kostka et al., 2014).

[4] Bio stimulation
[5] Bio augmentation

۴-۴ افزایش زیست‌فراهمی آلاینده با سورفکتانت‌ها

فراهمی زیستی پایین هیدروکربن‌های آب‌گریز، به دلیل جذب آن‌ها به ماتریکس خاک، یکی از موانع اصلی تجزیه بیولوژیکی است. افزودن سورفکتانت‌ها (شیمیایی یا زیستی) با افزایش حلالیت و امولسیون‌سازی هیدروکربن‌ها، این مشکل را کاهش می‌دهد (Jabbar et al., 2022). با این حال، سورفکتانت‌های شیمیایی به دلیل پتانسیل آلودگی ثانویه و سمیت، کمتر توصیه می‌شوند. در مقابل، سورفکتانت‌های زیستی، تولید شده توسط ریزجانداران یا گیاهان، به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کمتر و کارایی بالا در کاهش کشش سطحی و بین‌سطحی، گزینه مطلوب‌تری برای افزایش فراهمی زیستی و تسهیل جذب و متابولیسم آلاینده‌ها توسط میکروب‌ها هستند (Abdulrasheed et al., 2020).

۴-۵ ریزوپالایی: هم‌افزایی گیاه و میکروب

ریزوپالایی، یا زیست‌پالایی با تحریک ریزجانداران ریزوسفری توسط گیاه (MAPT[6])، یک رویکرد ترکیبی مؤثر برای پالایش خاک‌های آلوده به نفت است. ریزوسفر، ناحیه اطراف ریشه گیاه، به دلیل ترشحات ریشه‌ای (مانند اسیدهای آلی و قندها) دارای جمعیت میکروبی بیشتر و فعال‌تری نسبت به خاک توده‌ای است. در این ناحیه، گیاهان با فراهم کردن محیط و منبع کربن، میکروب‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن را تحریک می‌کنند و میکروب‌ها نیز با تجزیه آلاینده‌ها و افزایش فراهمی مواد مغذی، به رشد گیاه کمک می‌کنند. گیاهان همچنین می‌توانند با ترشح آنزیم‌های خارج سلولی مستقیماً در تجزیه هیدروکربن‌ها نقش داشته باشند. انتخاب گیاهان مناسب و ترکیب آن‌ها با سویه‌های میکروبی اندوفیت یا ریزوسفری کارآمد، پتانسیل این رویکرد را افزایش می‌دهد (Thijs et al., 2016).

۴-۶ بیوتکنولوژی مولکولی و مهندسی ژنتیک برای بهبود سویه‌ها

پیشرفت‌های بیوتکنولوژی، به‌ویژه مهندسی ژنتیک، فرصت‌هایی برای ایجاد ریزجانداران (GM[7]) کارآمدتر و مقاوم‌تر برای زیست‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی فراهم می‌کند (Mekonnen et al., 2024). با اصلاح ژنتیکی می‌توان مسیرهای تجزیه‌ای را بهبود بخشید، تولید آنزیم‌های کلیدی را افزایش داد، یا تحمل میکروب‌ها را به شرایط سخت محیطی و غلظت بالای آلاینده‌ها تقویت کرد و در نتیجه زمان و کارایی پاکسازی را افزایش داد (Jabbar et al., 2022). استفاده از گیاهان و میکروب‌های اصلاح‌شده ژنتیکی نیز می‌تواند به بهبود بیشتر این رویکرد مقرون‌به‌صرفه کمک کند (Ite and Ibok, 2019).

۴-۷- مروری بر مطالعات زیست‌پالایی و چالش‌های آن در خاک‌های ایران

پژوهش‌های متعددی در زمینه زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی در ایران، به‌ویژه با تمرکز بر مناطق نفت‌خیز و صنعتی، انجام شده است. بخش قابل توجهی از این تحقیقات بر جداسازی و شناسایی میکروارگانیسم‌های بومی از خاک‌های آلوده در مناطقی مانند خوزستان، اطراف پالایشگاه‌های تهران، اصفهان و تبریز متمرکز بوده است. این مطالعات به طور مکرر به جداسازی سویه‌های کارآمدی از جنس‌های باکتریایی *Pseudomonas*، *Bacillus*، *Acinetobacter* و *Rhodococcus* منجر شده‌اند که توانایی بالایی در تجزیه آلکان‌ها و ترکیبات آروماتیک از خود نشان داده‌اند (Hosseini et al., 2012).

یکی از جنبه‌های کلیدی که در تحقیقات ایران مورد توجه قرار گرفته، چالش‌های منحصر به فرد اکوسیستم‌های ایران است. بسیاری از خاک‌های آلوده در کشور دارای شوری بالا، pH قلیایی و بافت سنگین (رسی) هستند و در اقلیم خشک و

[6] Microbe assisted phytoremediation technology
[7] Genetically modified

نیمه‌خشک با دماهای بالا قرار دارند. از این رو، پژوهشگران ایرانی بر جداسازی و به‌کارگیری میکروارگانیسم‌های بومی مقاوم به شوری (هالوفیل) و مقاوم به خشکی تأکید ویژه‌ای داشته‌اند (Shahi et al., 2015). نتایج نشان داده است که استفاده از چنین سویه‌های سازگار شده‌ای در راهکار تقویت زیستی به مراتب مؤثرتر از سویه‌های غیربومی است. همچنین، تأثیر مثبت تحریک زیستی از طریق افزودن مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و مواد اصلاح‌کننده آلی مانند کمپوست و بیوچار برای بهبود ساختار خاک و افزایش فعالیت میکروبی در شرایط ایران به اثبات رسیده است (Asari et al., 2009).

۵ نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

زیست‌پالایی میکروبی راهکاری مؤثر و پایدار برای مدیریت خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی است که بر درک عمیق مکانیسم‌های تجزیه و عوامل محیطی استوار است. با این حال، دستیابی به نتایج پایدار در مقیاس مزرعه با چالش‌های مهمی نظیر محدودیت زیست‌فراهمی آلاینده و پایش دشوار فرآیند مواجه است؛ موانعی که در شرایط ویژه خاک‌های ایران، مانند شوری بالا، pH قلیایی و اقلیم خشک، پیچیدگی بیشتری می‌یابند و نیازمند راهکارهای بومی‌سازی شده هستند. در همین راستا، چشم‌انداز آینده تحقیقات در کشور باید از رویکردهای عمومی فراتر رفته و بر غربالگری و بهره‌برداری از پتانسیل میکروارگانیسم‌های بومی مقاوم به تنش (نمک‌دوست) که با اکوسیستم‌های ایران سازگار هستند، متمرکز شود. همچنین، توسعه استراتژی‌های بهبود مانند ریزوپالایی با استفاده از گیاهان بومی مقاوم به خشکی و به‌کارگیری اصلاح‌کننده‌های آلی نظیر بیوچار برای حفظ رطوبت و افزایش فعالیت میکروبی، نقشی کلیدی در موفقیت این فناوری در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا خواهد کرد. در نهایت، تبدیل دانش پایه به فناوری‌های میدانی کارآمد، نیازمند یک رویکرد جامع و میان‌رشته‌ای است تا بتوان از ظرفیت عظیم میکروبی برای حفاظت پایدار از منابع خاک و آب کشور بهره‌برداری نمود.

منابع

Abdulrasheed, M., Zakaria, N. N., Roslee, A. F. A., Shukor, M. Y., Zulkharnain, A., Napis, S., ... & Ahmad, S. A. (2020). Biodegradation of diesel oil by cold-adapted bacterial strains of *Arthrobacter* spp. from Antarctica. *Antarctic Science*, *32*(5), 341-353. DOI: https://doi.org/10.1017/S0954102020000206

Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, biostimulation and bioaugmention: A review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, *3*(1), 28-39.

Álvarez, L. M., Ruberto, L. A. M., Gurevich, J. M., & Mac Cormack, W. P. (2020). Environmental factors affecting reproducibility of bioremediation field assays in Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*, *169*, 102915. DOI: https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102915

Asari, M. R., Esmaili Sari, A., & Rajabzade, E. (2009). Bioremediation of Crude Oil Contaminated Soil using Biostimulation and Bioaugmentation techniques. *Iranian Journal of Health and Environment*, *2*(2), 118-127.

Gentry, T. J., Rensing, C., & Pepper, I. L. (2004). New approaches for bioaugmentation as a remediation technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *34*(5), 447-494. DOI: https://doi.org/10.1080/10643380490479458

Gkorezis, P., Daghio, M., Franzetti, A., Van Hamme, J. D., Sillen, W., & Vangronsveld, J. (2016). The interaction between plants and bacteria in the remediation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. *Frontiers in Microbiology*, *7*, 1836. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01836

Guarino, C., Spada, V., & Sciarrillo, R. (2017). Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioagumentation–Assistited Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil. *Chemosphere*, *170*, 10-16. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.142

Hamzah, A., Manikan, V., & Abd Aziz, N. A. F. (2017). Biodegradation of tapis crude oil using consortium of bacteria and fungi: Optimization of crude oil concentration and duration of incubation by response surface methodology. *Sains Malaysiana*, *46*(1), 43-50. DOI: http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4601-06

Hosseini, S. M., Emami, G., & Malekzadeh, F. (2012). Isolation and Identification of Crude Oil Degrading Bacteria from Contaminated Soils around Tehran Refinery. *Journal of Water and Soil*, *26*(4), 934-943.

Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2020). Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*, *251*, 119716. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119716

Ite, A. E., & Ibok, U. J. (2019). Role of plants and microbes in bioremediation of petroleum hydrocarbons contaminated soils. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, *7*(1), 1-19.

Jabbar, N. M., Alardhi, S. M., Mohammed, A. K., Salih, I. K., & Albayati, T. M. (2022). Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *18*, 100694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100694

Koshlaf, E., & Ball, A. S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS Microbiology*, *3*(1), 25-45. DOI: https://doi.org/10.3934/microbiol.2017.1.25

Kostka, J. E., Teske, A. P., Joye, S. B., & Head, I. M. (2014). The metabolic pathways and environmental controls of hydrocarbon biodegradation in marine ecosystems. *Frontiers in Microbiology*, *5*, 471. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00471

Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1354422. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422

Mishra, S., Jyot, J., Kuhad, R. C., & Lal, B. (2001). In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium. *Current Microbiology*, *43*(5), 328-335. DOI: https://doi.org/10.1007/s002840010311

Pawar, R. M. (2015). The effect of soil pH on bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS). *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, *6*(3), 291. DOI: http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000291

Shahi, A., Shirvani, M., & Dashti, A. (2015). Isolation and Identification of Halotolerant Crude Oil Degrading Bacteria from Bahregan Oil Field Sediments. *Iranian Journal of Marine Science and Technology*, *19*(75), 11-20.

Thijs, S., Sillen, W., Rineau, F., Weyens, N., & Vangronsveld, J. (2016). Towards an enhanced understanding of plant–microbiome interactions to improve phytoremediation: engineering the metaorganism. *Frontiers in Microbiology*, *7*, 341. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00341

Wakelin, S. A., Gerard, E., Black, A., Hamonts, K., Condron, L. M., Yuan, T., ... & O'Callaghan, M. (2014). Mechanisms of pollution induced community tolerance in a soil microbial community exposed to Cu. *Environmental Pollution*, *190*, 1-9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.03.001

Yap, H. S., Zakaria, N. N., Zulkharnain, A., Sabri, S., Gomez-Fuentes, C., & Ahmad, S. A. (2021). Bibliometric analysis of hydrocarbon bioremediation in cold regions and a review on enhanced soil bioremediation. *Biology*, *10*(5), 354. DOI: https://doi.org/10.3389/biology10050354

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

(مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب)

۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

19th Iranian Soil Science Congress (Holistic and Smart soil and water management)
16-18 September, 2025, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

Ahmad Asgharzadeh[1], Kobra Saghafi[1], Bahman Khoshru[1]*, Mohaddeseh Shirinzadeh[2] and Hamid Reza Zare Guildehi[2]

[1] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
[2] Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
Corresponding author: E-mail: bahmankhoshru@yahoo.com

Abstract

Soil contamination with petroleum hydrocarbons is a global challenge with negative consequences for ecosystems and human health. Microbial bioremediation is considered an effective and sustainable solution due to its natural basis, efficacy, and potential for the complete degradation of pollutants into non-toxic products. This review article, aiming to synthesize existing knowledge, examines the key mechanisms of microbial biodegradation of petroleum hydrocarbons, the main environmental factors affecting the rate and efficiency of this process, and novel strategies for its enhancement. A review of the literature indicates that the vast diversity of degrading microorganisms and complex metabolic pathways form the basis of bioremediation. However, acknowledging challenges such as limited pollutant bioavailability and the complexities of field-scale application, alongside a deep understanding of these mechanisms and factors, is essential for developing effective and sustainable bioremediation methods.

Keywords: Biodegradation mechanism, Contaminated soil, Environmental factors, Microbial bioremediation, Petroleum hydrocarbon.