



Review Article



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2090407.2053



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

A Review of the Efficiency and Novel Approaches of Landfarming for the Remediation of Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons

Hashem Ara¹, Ali Akbar Zare^{2*}, Rouhollah Rezaei-Arshad³

¹ PhD Candidate in Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

^{2,3} Soil and Water Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

Received: 22 May 2026 Accepted: 13 Aug 2026

Abstract

Soil contamination with petroleum compounds is a major environmental challenge. Landfarming, owing to its simplicity, low cost, and feasibility at large scales, is one of the commonly used bioremediation methods for soils contaminated with petroleum hydrocarbons. This study aimed to review the mechanisms governing landfarming, the factors controlling its efficiency, and innovative strategies for its improvement. The review of previous studies indicated that landfarming performance is primarily governed by three processes: pollutant transport, bioavailability, and biodegradation. Accordingly, this study proposes a novel framework for classifying landfarming enhancement strategies based on the principal process bottleneck. The proposed framework categorizes these strategies into three groups: enhancement of biological capacity; improvement of pollutant bioavailability and transport; and pretreatment and reduction of pollutant resistance. This framework can provide a basis for the targeted selection of integrated approaches and improve landfarming efficiency according to soil characteristics and pollutant type.

Keyword: Landfarming, Petroleum Compounds, Bioavailability, Soil, Pollution

* Soilsience347@gmail.com



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2090407.2053



This journal is an open access journal licensed under an
Attribution-Non Commercial 4.0
International Licenses (CC BY-NC 4.0).

مروری بر کارایی و رویکردهای نوین روش زمین‌کشت در پالایش خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی

هاشم آرام^۱، علی اکبر زارع^{۲*}، روح اله رضائی ارشد^۳

^۱ دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

^۲ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

^۳ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

چکیده

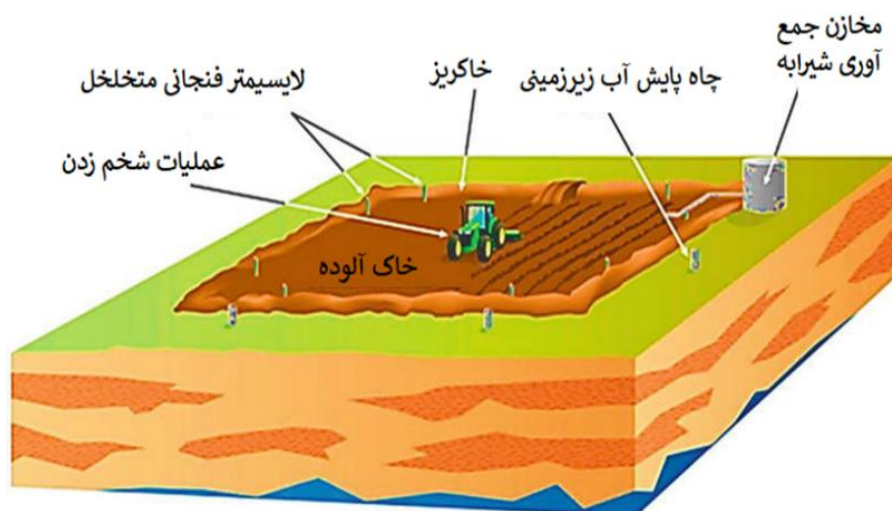
آلودگی خاک به ترکیبات نفتی یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی است. زمین‌کشت به دلیل سادگی، هزینه پایین و قابلیت اجرا در مقیاس وسیع، یکی از روش‌های متداول پالایش زیستی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی است. این مطالعه با هدف بررسی مکانیسم‌های مؤثر بر زمین‌کشت، عوامل کنترل‌کننده کارایی و راهکارهای نوین بهبود آن انجام شد. بررسی مطالعات نشان داد که عملکرد زمین‌کشت عمدتاً تحت تأثیر سه فرآیند انتقال آلاینده، فراهمی زیستی و تجزیه زیستی قرار دارد. بر این اساس، در این مطالعه یک چارچوب جدید برای دسته‌بندی راهکارهای بهبود زمین‌کشت پیشنهاد شد که این راهکارها را بر اساس گلوگاه اصلی فرآیند در سه گروه شامل تقویت ظرفیت زیستی، افزایش فراهمی زیستی و بهبود انتقال آلاینده و پیش‌تیمار و کاهش مقاومت آلاینده طبقه‌بندی می‌کند. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای انتخاب هدفمند روش‌های تلفیقی و افزایش کارایی زمین‌کشت متناسب با ویژگی‌های خاک و نوع آلاینده باشد.

کلمات کلیدی: زمین‌کشت؛ ترکیبات نفتی؛ فراهمی زیستی؛ خاک؛ آلودگی

* Soilsience347@gmail.com

۱- مقدمه

آلودگی خاک به ترکیبات نفتی یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی است که عمدتاً در اثر استخراج، فرآوری، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی ایجاد می‌شود [۱،۲]. نشت مخازن و خطوط لوله، حوادث حمل‌ونقل و تخلیه پساب‌های صنعتی از منابع اصلی ورود این آلاینده‌ها به خاک هستند [۲،۳]. ترکیبات نفتی به دلیل آبگریزی و پایداری شیمیایی می‌توانند مدت طولانی در خاک باقی بمانند و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن را تغییر دهند [۲،۴،۵]. در میان آلاینده‌های نفتی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) به دلیل سمیت، جهش‌زایی، سرطان‌زایی و پایداری بالا، تهدید قابل‌توجهی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها محسوب می‌شوند [۶-۸]. آلودگی نفتی با کاهش تخلخل و نفوذپذیری، افزایش رواناب، اختلال در هوادهی و ایجاد شرایط بی‌هوایی، رشد ریشه و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک را محدود می‌کند [۱۰-۱۲]. همچنین تغییر pH، کاهش دسترسی عناصر غذایی و اختلال در فعالیت آنزیم‌ها و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، در نهایت موجب کاهش حاصلخیزی و بهره‌وری خاک می‌شود [۱۳،۱۴]. روش‌های پاکسازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی به سه گروه فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم می‌شوند [۵،۱۵]. روش‌های فیزیکوشیمیایی اگرچه معمولاً سریع و مؤثرند، به دلیل هزینه و مصرف انرژی بالا، نیاز به تجهیزات تخصصی و احتمال تولید آلاینده‌های ثانویه محدودیت‌هایی دارند [۵،۱۵]. در مقابل، پالایش زیستی با استفاده از توانایی طبیعی میکروارگانیسم‌ها، روشی اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست محسوب می‌شود [۱۴]. زمین‌کشت یکی از روش‌های متداول پالایش زیستی برون‌جا برای تصفیه خاک و لجن آلوده به هیدروکربن‌های نفتی است [۱۶]. در این روش، خاک آلوده پس از حفاری در لایه‌ای مناسب پخش شده و با شخم و تنظیم رطوبت، شرایط هوایی و فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی برای تجزیه آلاینده‌ها تقویت می‌شود [۱۶،۱۷]. سادگی، هزینه نسبتاً پایین، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و قابلیت اجرا در مقیاس وسیع از مهم‌ترین مزایای آن است [۱۸،۱۹]. با این حال، کارایی زمین‌کشت به شرایط محیطی و ویژگی‌های خاک و آلاینده وابسته است. از این رو، این مطالعه با رویکرد مروری، عوامل مؤثر بر کارایی، مکانیسم‌های حذف، محدودیت‌ها و راهکارهای بهبود زمین‌کشت را بررسی کرده و چارچوبی برای بهینه‌سازی این فناوری بر اساس گلوگاه‌های اصلی فرآیند پالایش ارائه می‌کند.



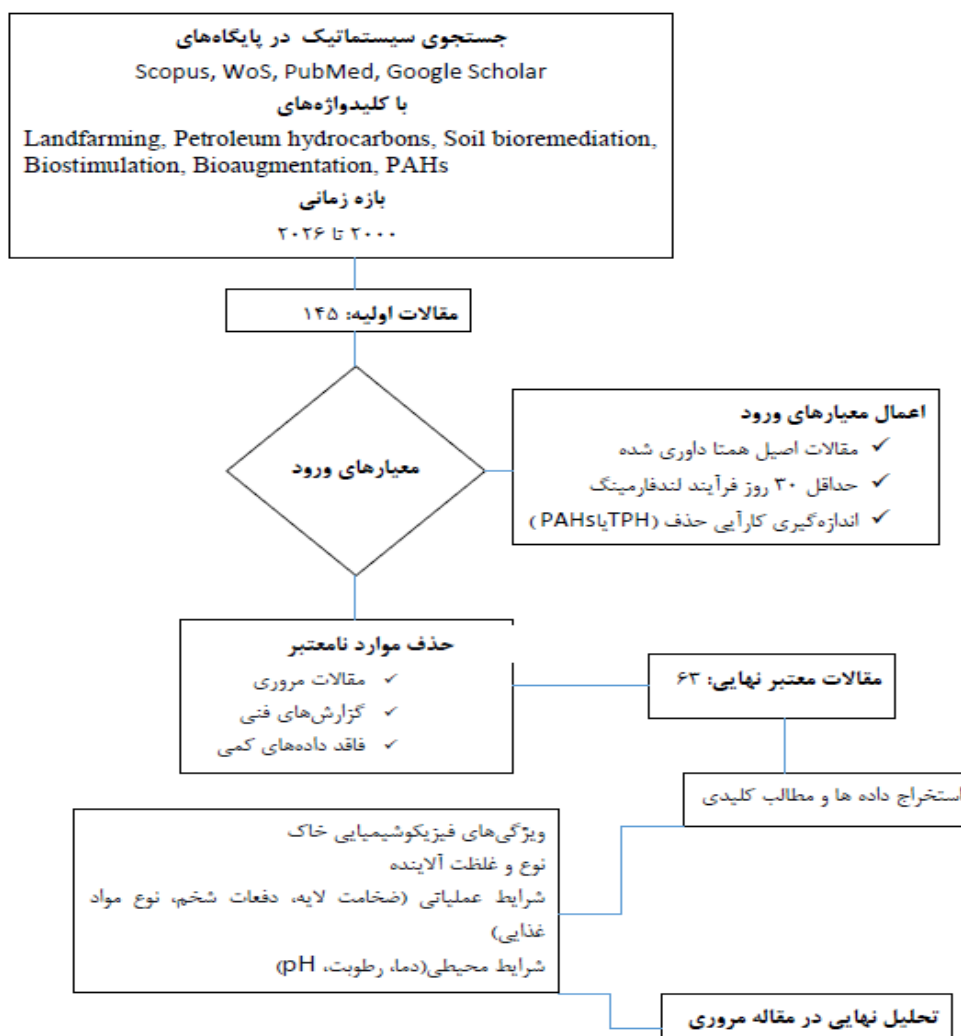
شکل ۱- روش زمین‌کشت

۲- روش انجام پژوهش

این پژوهش مروری با جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی شامل Web of Science، Scopus، PubMed و Google Scholar با استفاده از کلیدواژه‌های تخصصی "Landfarming"، "Petroleum hydrocarbons"، "Soil bioremediation"، "Bioaugmentation" و "PAHs" برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۶ انجام شد. معیارهای ورود شامل مقالات اصیل دارای داوری همتا با گزارش حداقل ۳۰ روز فرآیند زمین‌کشت و اندازه‌گیری کارایی حذف آلاینده (TPH یا PAHs) بود. گزارش‌های فنی و مطالعات فاقد داده‌های کمی معتبر از تحلیل حذف شدند. داده‌های کلیدی از مقالات نهایی شامل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، نوع و غلظت آلاینده، شرایط عملیاتی (ضخامت لایه، دفعات شخم، نوع مواد غذایی)، شرایط محیطی دما، رطوبت، (pH) و راندمان حذف آلاینده استخراج گردید. در نهایت، از میان ۱۴۵ مقاله اولیه، تعداد ۶۳ مطالعه معتبر برای تحلیل نهایی در این مقاله مروری انتخاب شدند. این پژوهش مروری با وجود تلاش برای جامعیت، دارای محدودیت‌هایی است. محدودیت‌های این پژوهش عبارتند از: تمرکز بر مقالات انگلیسی، احتمال سوگیری انتشار به نفع نتایج مثبت، ناهمگونی بالای مطالعات اولیه و حذف گزارش‌های فنی و پایان‌نامه‌ها. با این وجود، نتایج اصلی پژوهش تحت تأثیر این محدودیت‌ها قرار نگرفت. مراحل جستجوی سیستماتیک و انتخاب مقالات در پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- مبانی و مکانیسم‌های فرآیند زمین‌کشت

زمین‌کشت به عنوان یکی از قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و در عین حال پایدارترین فناوری‌های پالایش زیستی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی، بر پایه تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی خاک از طریق ایجاد شرایط هوازی، بهینه‌سازی رطوبت و تعادل عناصر غذایی استوار است [۱۶، ۲۰]. در این فرآیند، خاک یا لجن آلوده پس از آماده‌سازی اولیه (شامل غربالگری، تنظیم pH و در برخی موارد افزودن مواد حجیم‌کننده)، در لایه‌هایی به ضخامت ۰/۳ تا ۰/۵ متر بر روی سطحی زهکشی‌شده و معمولاً مجهز به لایه نفوذناپذیر پخش می‌شود. سپس با اعمال عملیات دوره‌ایی شخم (جهت هوادهی و یکنواخت‌سازی)، آبیاری (جهت حفظ رطوبت در محدوده ۸۰-۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و افزودن کودهای نیتروژن‌دار و فسفات (جهت تنظیم نسبت C:N:P در محدوده ۱:۱۰:۱۰۰)، شرایط فیزیکوشیمیایی مطلوب برای تجزیه زیستی هیدروکربن‌ها فراهم می‌گردد [۲۱]. مبانی علمی زمین‌کشت بر سه مکانیسم فیزیکی-شیمیایی و زیستی اصلی استوار است که به طور همزمان و با شدت‌های متفاوت در طی زمان عمل می‌کنند: (۱) تبخیر ترکیبات فرار، (۲) تجزیه زیستی هوازی توسط میکروارگانیسم‌ها و (۳) جذب سطحی بر روی ذرات آلی و معدنی خاک. عملیاتی نظیر شخم، آبیاری و تغذیه مستقیماً بر شدت و سهم هر یک از این مکانیسم‌ها تأثیر می‌گذارند [۲۲].



شکل ۲- مراحل جستجوی و انتخاب مقالات در پژوهش حاضر

۳-۱- تبخیر

هیدروکربن‌های نفتی با وزن مولکولی پایین، به‌ویژه آلکان‌های خطی کمتر از C12 و ترکیبات آروماتیک تک‌حلقه‌ای مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن‌ها، عمدتاً از طریق تبخیر از سطح خاک حذف می‌شوند [۲۲، ۲۳]. میزان تبخیر به فشار بخار آلاینده، دما، سرعت باد، سطح تماس و رطوبت خاک وابسته است [۱۶] و در شرایط مناسب می‌تواند طی هفته نخست سهم قابل توجهی از حذف اولیه TPH را به خود اختصاص دهد [۲۱]. با این حال، تبخیر حذف واقعی آلاینده محسوب نمی‌شود، بلکه موجب انتقال آن از خاک به اتمسفر می‌گردد. ترکیبات آلی فرار وارد شده به جو می‌توانند در واکنش‌های فتوشیمیایی شرکت کرده و موجب تشکیل ازن تروپوسفری و اکسیدان‌های ثانویه شوند [۱۶، ۲۴]. بنابراین، کنترل رطوبت خاک در محدوده ۶۰-۸۰٪ ظرفیت زراعی می‌تواند با ایجاد یک سد آبی اطراف ذرات خاک، تبخیر ترکیبات فرار را کاهش دهد [۲۲].

۲-۳- تجزیه زیستی

تجزیه زیستی توسط میکروارگانیسم‌های بومی یا افزوده‌شده، اصلی‌ترین و سازگارترین مکانیسم حذف هیدروکربن‌ها در زمین‌کشت است [۲۵]. باکتری‌های هیدروکربن‌خوار از جنس‌های *Rhodococcus*، *Bacillus*، *Pseudomonas*، *Acinetobacter* و *Sphingomonas* با تولید آنزیم‌های اکسیژناز، ترکیبات آلیفاتیک و آروماتیک را تجزیه می‌کنند [۲۶-۲۸]. همچنین قارچ‌های پوسیدگی سفید مانند *Phanerochaete chrysosporium* و *Pleurotus ostreatus* با تولید آنزیم‌های لیگنینولیتیک، در تجزیه PAHs با وزن مولکولی بالا مؤثرند [۲۱، ۲۸]. کارایی این فرآیند به تأمین همزمان اکسیژن کافی، رطوبت مناسب و مواد مغذی متعادل وابسته است [۲۵]. در زمین‌کشت، خانواده‌های باکتریایی *Sphingomonadaceae*، *Xanthobacteraceae*، *Pseudomonadaceae* و *Comamonadaceae* از گروه‌های مهم مرتبط با تجزیه هیدروکربن‌ها هستند [۲۷].

۳-۳- جذب سطحی

جذب سطحی هیدروکربن‌ها توسط ذرات خاک، ماهیتی دوگانه و عمدتاً چالش‌برانگیز دارد. هیدروکربن‌های با وزن مولکولی بالا، مانند آلکان‌های زنجیره‌بلندتر از C20 و PAH‌های چهارحلقه‌ای و بیشتر، به دلیل آبگریزی بالا، تمایل زیادی به جذب سطحی بر ماده آلی خاک و کانی‌های رسی، به‌ویژه اسمکتیت‌ها، دارند [۲۹]. این فرآیند از یک سو با تثبیت آلاینده، خطر آشوبی و آلودگی آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد، اما از سوی دیگر با کاهش فراهمی زیستی، دسترسی میکروارگانیسم‌ها به آلاینده را محدود می‌کند [۲۸]. این محدودیت در خاک‌های آلوده قدیمی‌تر به دلیل پدیده پیرشدگی آلاینده تشدید می‌شود [۳۰]. برای افزایش فراهمی زیستی آلاینده‌ها می‌توان از سورفکتانت‌ها برای جدا کردن ترکیبات جذب‌شده و انتقال آن‌ها به فاز آبی [۲۹] و نیز روش‌های الکتروکینتیک برای انتقال آلاینده‌های آزادشده به سمت الکترودها استفاده کرد [۳۰].

۴- عوامل مؤثر بر کارایی فرآیند زمین‌کشت

کارایی فرآیند زمین‌کشت در پالایش خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، تابعی از واکنش‌های پیچیده میان ویژگی‌های ذاتی خاک، ماهیت شیمیایی آلاینده، متغیرهای محیطی و روش‌های مدیریت عملیاتی است. شناخت سیستماتیک این عوامل برای بهینه‌سازی فرآیند و دستیابی به حداکثر کارایی حذف آلاینده‌ها ضروری است [۳۱، ۱۹].

۴-۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

بافت خاک از طریق تأثیر بر تخلخل، تهویه و انتقال اکسیژن، نقش مهمی در کارایی فرآیند زمین‌کشت دارد. خاک‌های درشت‌بافت و شنی معمولاً به دلیل تهویه و نفوذپذیری بیشتر، شرایط مناسب‌تری برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تجزیه زیستی فراهم می‌کنند، در حالی که خاک‌های ریزبافت و رسی به دلیل محدودیت انتقال اکسیژن، کارایی کمتری دارند [۳۲]. همچنین، بافت و عمق خاک بر ساختار جوامع میکروبی مؤثر بوده و باکتری‌ها بیشتر تحت تأثیر شدت آلودگی، در حالی که قارچ‌ها بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک قرار می‌گیرند [۳۳]. ماده آلی خاک نیز نقش دوگانه‌ای در زمین‌کشت دارد. اگرچه می‌تواند فعالیت میکروبی را تقویت کند، افزایش آن ممکن است با جذب هیدروکربن‌های آب‌گریز، فراهمی زیستی آلاینده‌ها را کاهش دهد. برای مثال، سرعت تجزیه هیدروکربن‌ها در خاک با ۲٪ ماده آلی حدود چهار برابر بیشتر از خاک با ۲۰٪ ماده آلی گزارش شده و راندمان تجزیه pristane نیز

به ترتیب ۹۵ و ۳۸ درصد بوده است [۳۴]. بنابراین، بافت و مقدار ماده آلی خاک از عوامل مهم کنترل کننده انتقال اکسیژن، فعالیت میکروبی و فراهمی زیستی آلاینده‌ها در فرآیند زمین‌کشت محسوب می‌شوند.

۲-۴- ماهیت شیمیایی آلاینده و غلظت اولیه

ترکیب شیمیایی و غلظت اولیه هیدروکربن‌های نفتی از عوامل اصلی تعیین کننده کارایی فرآیند زمین‌کشت هستند. سرعت تجزیه زیستی علاوه بر غلظت کل TPH، به نوع ترکیبات، دامنه کربنی و سهم ترکیبات مقاوم وابسته است. مطالعات نشان داده‌اند که حتی در خاک‌هایی با غلظت مشابه TPH، تفاوت در ترکیب هیدروکربن‌ها می‌تواند موجب تفاوت چشمگیر در کارایی پالایش شود؛ به‌طوری‌که بررسی توزیع دامنه کربنی و ویژگی‌های مخلوط پیچیده تفکیک نشده (UCM) می‌تواند شاخص دقیق تری برای پیش‌بینی قابلیت پالایش باشد [۳۵]. هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) به دلیل پایداری شیمیایی، آب‌گریزی بالا و جذب قوی به مواد آلی خاک، از مقاوم‌ترین آلاینده‌ها در فرآیند زمین‌کشت محسوب می‌شوند و فراهمی زیستی محدود، مهم‌ترین عامل کاهش تجزیه آن‌ها است [۱۵]. در پژوهش لوویک و همکاران نشان دادند که با وجود حذف نسبتاً پایین PAHs کل، بخش زیست‌فراهم برخی ترکیبات می‌تواند به‌طور کامل تجزیه شود که اهمیت فراهمی زیستی را در کارایی پالایش نشان می‌دهد [۳۶]. همچنین، پراکنش فضایی و غلظت آلاینده در خاک بر سرعت تجزیه تأثیر دارد و در نواحی با آلودگی بالا، فعالیت میکروبی و سرعت حذف ممکن است کاهش یابد. بنابراین، ارزیابی هم‌زمان غلظت، ترکیب شیمیایی، فراهمی زیستی و پراکنش فضایی هیدروکربن‌ها برای طراحی مؤثر فرآیند زمین‌کشت ضروری است [۳۱، ۳۵].

۳-۴- عوامل محیطی و جمعیت میکروبی

۱-۳-۴- دما

دمای محیط به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر فعالیت میکروبی، نقش تعیین کننده‌ای در سرعت تجزیه هیدروکربن‌ها ایفا می‌کند [۳۷]. به‌طور کلی، محدوده دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای بیشینه کردن فعالیت میکروبی تجزیه کننده هیدروکربن‌ها مناسب گزارش شده است [۳۸]. دماهای پایین‌تر از این محدوده، نرخ واکنش‌های آنزیمی را کاهش داده و منجر به کاهش کارایی تجزیه می‌شوند [۳۷]. در مقابل، دماهای بالاتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌توانند با دنا توره کردن پروتئین‌ها و آسیب به غشای سلولی، جمعیت میکروبی را با خطر مواجه سازند [۳۸]. در شرایط نیمه‌خشک که دماهای بالا و بارندگی کم حاکم است، فرآیند زمین‌کشت همچنان می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد [۳۹]. مطالعه Marín و همکاران بر روی پسماند پالایشگاه نفتی در شرایط نیمه‌خشک نشان داد که ۸۰٪ از هیدروکربن‌های کل در مدت ۱۱ ماه حذف شدند که نیمی از این کاهش در سه ماه اول رخ داد. با این حال، شرایط خشک و دمای بالا می‌توانند سرعت تجزیه را در ماه‌های بعدی کاهش دهند که لزوم مدیریت دقیق رطوبت خاک را نشان می‌دهد [۳۹].

۲-۳-۴- رطوبت

رطوبت خاک نه تنها برای حفظ متابولیسم میکروبی حیاتی است، بلکه بر حلالیت مواد غذایی و انتقال آلاینده‌ها به میکروارگانیسم‌ها نیز تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان داده‌اند که رطوبت بسیار کم، فعالیت سلولی را با القای تنش اسمزی محدود کرده و دسترسی به بستر را کاهش می‌دهد. در مقابل، رطوبت بیش از حد نیز با اشباع کردن منافذ

خاک، مانع از انتقال اکسیژن شده و شرایط غرقابی ایجاد می‌کند [۴۰]. محدوده رطوبتی ۴۰ تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی به عنوان محدوده عملیاتی ایده‌آل برای اغلب سیستم‌های زمین‌کشت در نظر گرفته می‌شود [۴۰].

۳-۳-۴- pH خاک

اسیدیته یا قلیائیت خاک تأثیر مستقیمی بر حلالیت مواد غذایی، سمیت یون‌های سنگین و فعالیت آنزیم‌های میکروبی دارد. اغلب باکتری‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن، محیط خنثی تا کمی قلیایی را ترجیح می‌دهند. بیشتر تحقیقات انجام شده محدوده pH بین ۶/۵ تا ۸/۰ را به عنوان شرایط بهینه برای تجزیه لجن‌های نفتی در فرآیند زمین‌کشت معرفی کرده‌اند [۳۸، ۴۱]. pH اسیدی می‌تواند با اختلال در انتقال غشایی و کاهش تنوع گونه‌های باکتریایی، فرآیند زیست‌پالایی را با اختلال جدی مواجه کند [۴۲].

۴-۳-۴- هوادهی

از آنجایی که واکنش‌های اولیه تجزیه هیدروکربن‌های آروماتیک و آلیفاتیک توسط آنزیم‌های اکسیژناز کاتالیز می‌شوند، حضور اکسیژن مولکولی به عنوان پذیرنده نهایی الکترون در متابولیسم هوازی، یک شرط حیاتی است [۲۵]. در روش زمین‌کشت که اغلب یک فرآیند هوازی محسوب می‌شود، تأمین اکسیژن مورد نیاز از طریق عملیات فیزیکی خاک انجام می‌گیرد. شخم دوره‌ای اصلی‌ترین راهکار تأمین اکسیژن در زمین‌کشت می‌باشد [۱۶]. این عمل ضمن ورود اکسیژن تازه به درون توده خاک، ساختار آن را شکسته و از ایجاد کانال‌های ترجیحی و نواحی بی‌هوازی جلوگیری می‌کند. مطالعات نشان داده است که پایش و کنترل عوامل محیطی می‌تواند کارایی حذف آلاینده‌ها را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش دهد [۳۱، ۱۹].

۵-۳-۴- نسبت کربن به نیتروژن و فسفر

نسبت کربن به نیتروژن (C/N) و کربن به فسفر (C/P) به عنوان پارامترهای کلیدی در تنظیم فعالیت میکروبی و کارایی فرآیند زمین‌کشت مطرح هستند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از منابع کربن با نسبت C/N بالا می‌تواند جمعیت میکروارگانیسم‌های هتروتروف (از جمله باکتری‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن) را افزایش دهد [۴۱]. با این حال، نسبت C:N:P بهینه برای تجزیه زیستی هیدروکربن‌ها معمولاً در محدوده ۱۰۰:۱۰:۱ توصیه می‌شود و انحراف از این محدوده، به ویژه در شرایط کمبود نیتروژن (نسبت C/N بالا)، می‌تواند فرآیند تجزیه را محدود کند [۴۱، ۴۷]. مطالعات تحریک زیستی با منابع آلی مختلف نشان داده است که نسبت C:N بهینه بسته به نوع ماده آلی و شرایط خاک می‌تواند متغیر باشد [۴۷].

۶-۳-۴- فعالیت های آنزیمی خاک

فعالیت آنزیمی خاک به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی جهت ارزیابی وضعیت جوامع میکروبی در فرآیند زمین‌کشت محسوب می‌شود. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در طی این فرآیند، فعالیت آنزیم‌هایی نظیر دهیدروژناز (dehydrogenase)، β -گلوکوزیداز (β -glucosidase)، اوره‌از (urease) و پروتئاز (protease) در مقایسه با خاک شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد [۴۳]. این افزایش بیانگر تحریک فعالیت میکروبی در پاسخ به حضور آلاینده‌های هیدروکربنی و مواد غذایی افزوده شده است. با پیشرفت فرآیند پالایش زیستی و کاهش تدریجی غلظت هیدروکربن‌ها،

فعالیت این آنزیم‌ها رو به کاهش گذاشته و در نهایت به سطحی مشابه خاک شاهد بازمی‌گردد که نشانه بازیابی شرایط طبیعی و پایدار خاک می‌باشد [۴۴].

۴-۴- مدیریت عملیاتی و نوع اصلاح‌کننده‌ها

انتخاب نوع و ترکیب اصلاح‌کننده‌ها از عوامل مهم مؤثر بر کارایی زمین‌کشت است. در مطالعه‌ای روی سه نوع خاک و دو سطح آلودگی، در غلظت TPH برابر با ۲۰۰۰ ppm، ترکیب کود شیمیایی، آبیاری و شخم مؤثرترین تیمار بود و موجب کاهش ۴۹ تا ۶۲ درصدی TPH، بسته به نوع خاک، شد؛ در این سطح، افزودن سورفکتانت بهبود معناداری ایجاد نکرد. در مقابل، در غلظت ۵۰۰۰ ppm، ترکیب کود شیمیایی، سورفکتانت، آبیاری و شخم بیشترین کارایی را نشان داد و کاهش ۴۷ تا ۶۳ درصدی TPH را به همراه داشت؛ به‌طوری‌که سورفکتانت در این سطح آلودگی با افزایش فراهمی زیستی آلاینده، نقش مؤثرتری ایفا کرد [۳۲]. افزون بر نوع اصلاح‌کننده، بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مانند رطوبت، دفعات شخم و جمعیت اولیه میکروبی برای دستیابی به راندمان مناسب ضروری است. Kwon و همکاران با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ، اهمیت این عوامل را در حذف TPH به‌ترتیب جمعیت میکروبی، دفعات شخم و رطوبت گزارش کردند. همچنین، حفظ رطوبت در سطح مناسب ضمن جلوگیری از تبخیر بیش از حد آلاینده‌ها، می‌تواند شرایط مطلوب‌تری برای زیست‌تجزیه فراهم کند [۲۲]. بنابراین، کارایی زمین‌کشت حاصل تعامل میان نوع اصلاح‌کننده و شرایط عملیاتی است و انتخاب تیمار باید متناسب با شدت آلودگی و ویژگی‌های خاک انجام شود.

۴-۵- مزایا و محدودیت‌های زمین‌کشت

جدول ۱- مزایای استفاده از روش زمین‌کشت

ردیف	مزیت	توضیحات	منابع
۱	سادگی عملیاتی و هزینه پایین	این روش به تجهیزات پیچیده نیاز ندارد و عمدتاً از ماشین‌آلات معمول کشاورزی استفاده می‌کند که هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی را کاهش می‌دهد. برآورد هزینه بین ۳۰ تا ۵۰ دلار به ازای هر تن خاک آلوده است.	[۱۶، ۱۸]
۲	قابلیت اجرا در مقیاس وسیع	برای حجم بالای خاک‌های آلوده و لجن‌های نفتی (مثلاً در پالایشگاه‌ها) مناسب بوده و نیازی به راکتورهای تخصصی ندارد.	[۱۶، ۶۱]
۳	اثربخشی بر طیف گسترده آلاینده‌های آلی	در تجزیه زیستی بسیاری از هیدروکربن‌های نفتی از جمله بنزین، روغن‌های معدنی، دیزل و برخی ترکیبات آروماتیک مؤثر است. راندمان حذف TPH در مطالعات مختلف بین ۴۷ تا ۸۹ درصد گزارش شده است.	[۱۹، ۴۷]
۴	استفاده از میکروارگانیسم‌های بومی خاک	نیاز به تلقیح میکروبی خارجی را کاهش می‌دهد و با هوادهی و افزودن مواد مغذی، فعالیت جمعیت میکروبی موجود را تحریک می‌کند.	[۲۷]
۵	کاهش سمیت خاک	فرآیند زمین‌کشت منجر به کاهش سمیت خاک و بازیابی فعالیت‌های آنزیمی و بیولوژیکی آن می‌شود.	[۴۳، ۴۴]
۶	قابلیت تلفیق با سایر روش‌ها	زمین‌کشت به راحتی با روش‌های دیگر مانند تحریک زیستی، افزایش زیستی، الکتروکینتیک و گرمی‌پالایی تلفیق می‌شود.	[۳۰، ۵۸]

جدول ۲- محدودیت‌های استفاده از روش زمین‌کشت

ردیف	محدودیت	توضیحات	منابع
۱	نیاز به زمین وسیع	به سطح زیادی از زمین برای پخش لایه نازک خاک آلوده نیاز دارد که در مناطق پرجمعیت یا با کاربری محدود امکان‌پذیر نیست.	[۱۶،۲۴]
۲	زمان تصفیه طولانی	نسبت به روش‌های حرارتی یا شیمیایی بسیار کندتر است و تکمیل فرآیند برای ترکیبات پایدار (مانند هیدروکربن‌های سنگین) ماه‌ها تا سال‌ها طول می‌کشد.	[۱۶،۴۲]
۳	خطرات زیست‌محیطی ثانویه	انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) به هوا و نشت شیرابه حاوی آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی از معایب جدی این روش است.	[۲۳،۲۴]
۴	عدم کارایی برای فلزات سنگین و آلاینده‌های غیرآلی	این روش کاملاً یک فرآیند تجزیه زیستی برای مواد آلی است و فلزات سنگین یا سایر آلاینده‌های غیرآلی را حذف نمی‌کند (صرفاً تغییری در شکل آنها ایجاد می‌شود).	[۱۸،۶۱]
۵	محدودیت در غلظت‌های بالای آلودگی	در خاک‌هایی با غلظت هیدروکربن بیش از حدود ۵۰،۰۰۰ ppm یا زمانی که نیاز به کاهش آلودگی بیش از ۹۵٪ باشد، کارایی روش به شدت کاهش می‌یابد.	[۲۵،۳۲]
۶	وابستگی شدید به شرایط محیطی	دما، رطوبت، pH، میزان اکسیژن و بافت خاک تأثیر مستقیمی بر سرعت تجزیه دارند و در مناطق سرد یا خشک کارایی پایینی دارد.	[۳۷،۴۲]
۷	تشکیل محصولات میانی مقاوم	در خاک‌های هوازده، ترکیبات قطبی و کمپلکس‌های حاصل از تجزیه تجمع یافته و TPH به تنهایی معیار کافی برای ارزیابی کیفیت پالایش نیست.	[۶۲]

۵- رویکردهای نوین در بهبود کارایی زمین‌کشت

علیرغم کاربرد گسترده زمین‌کشت به عنوان یک روش پایدار و مقرون‌به‌صرفه در پالایش خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، این روش با محدودیت‌هایی نظیر زمان نسبتاً طولانی پالایش، فراهمی زیستی پایین آلاینده‌های با وزن مولکولی بالا، و وابستگی شدید به شرایط محیطی مواجه است. در سال‌های اخیر، پژوهشگران رویکردهای نوآورانه متعددی را برای رفع این محدودیت‌ها و افزایش کارایی زمین‌کشت ارائه داده‌اند [۵،۹].

۵-۱- تحریک زیستی

تحریک زیستی با هدف افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی از طریق تأمین مواد مغذی، تنظیم pH و بهبود شرایط فیزیکی خاک، یکی از راهبردهای مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای افزایش تجزیه هیدروکربن‌های نفتی محسوب می‌شود [۵۰،۵۱]. استفاده از کودهای آلی نیز می‌تواند با تأمین مواد مغذی و تحریک فعالیت میکروبی، کارایی پالایش را افزایش دهد؛ با این حال، مقدار اصلاح‌کننده باید بهینه‌سازی شود، زیرا افزایش بیش از حد مواد آلی لزوماً موجب افزایش تجزیه نمی‌شود [۴۵]. سورفکتانت‌ها و بیوسورفکتانت‌ها نیز از طریق افزایش فراهمی زیستی هیدروکربن‌ها و بهبود توزیع آلاینده در خاک می‌توانند کارایی تحریک زیستی را افزایش دهند. برای مثال، ترکیب لجن فعال، مواد مغذی و بیوسورفکتانت موجب کاهش ۷۹/۴ درصدی TPH طی ۱۰ روز گزارش شده است [۴۶]. با این حال، افزودن مواد خارجی همیشه مؤثر نیست و در برخی شرایط، میکروارگانیسم‌های بومی عملکرد بهتری نسبت به جمعیت‌های افزوده‌شده داشته‌اند؛ زیرا ورود مواد آلی یا میکروارگانیسم‌های خارجی ممکن است موجب رقابت، تغییر شرایط محیطی یا کاهش فعالیت جمعیت‌های بومی شود [۴۷،۴۸]. روش‌های جدید تحریک زیستی نیز شامل تأمین متناوب

پذیرنده‌های الکترونی مانند نیترات است. گیانگ و همکاران نشان دادند که افزودن متناوب نیترات می‌تواند تجزیه فناترن را در شرایط هیپوکسیک به‌طور معنی‌داری افزایش دهد و نسبت به افزودن یک‌باره نیترات یا افزایش زیستی کارایی بیشتری داشته باشد [۴۹]. بنابراین، موفقیت تحریک زیستی در زمین‌کشت به نوع آلاینده، ویژگی‌های خاک، نوع و مقدار اصلاح‌کننده و شرایط محیطی وابسته است [۴۵، ۴۹-۵۱]. برخی از نتایج گزارش‌شده برای کاربرد تحریک زیستی در روش زمین‌کشت در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- برخی از مطالعات تحریک زیستی در فرآیند زمین‌کشت در کشورهای مختلف

ردیف	مکان	نوع آلاینده	نوع اصلاح کننده	راندمان حذف	زمان تیمار	منبع
۱	کانادا	TPH	کود NPK + شخم	حذف کامل BTEX و ۵۶ روز	[۲۷]	
۲	کانادا	TPH	کود + آهک + شخم	۷۵٪	۲ ماه	[۲۷]
۳	کانادا	TPH	اوره + آمونیوم فسفات + شخم	۸۰٪	۳ ماه	[۲۷]
۴	کره جنوبی	TPH	کود + میکروب های تجزیه کننده	۷۳/۷٪	۳۳ روز	[۲۷]
۵	نیجریه	TPH	کود مرغی کمپوست شده ۲۰٪	۸۹٪	۳۳۶ روز	[۴۵]
۶	کره جنوبی	PAHs	تحریک زیستی + شخم	۸۹٪	۱۲۹ روز	[۶۳]
۷	برزیل	دیزل	کود شیمیایی + شخم	۷۰٪	۹۰ روز	[۶۴]
۸	اسپانیا	PAHs	کمپوست + کود NPK	۶۰٪	۴۰ روز	[۴۸]
۹	مکزیک	TPH	تحریک زیستی + کود شیمیایی	۱۴-۱۶٪	۹۰ روز	[۶۵]
۱۱	استرالیا	TPH	کمپوست	۶۹-۸۰٪	۱۹۵ روز	[۶۶]
۱۲	مکزیک	PAHs -TPH	ترکیب گیاهپالایی+ورمی پالایی + تحریک زیستی (PAHs)	۷۶٪ (TPH) و ۶۸٪ (PAHs)	۱۱۲ روز	[۶۷]
۱۳	هند	نفت خام	NPK+ باکتری ها ریزوسفری	۹۱٪	۶۰ روز	[۶۸]
۱۴	استرالیا	TPH	NPK	۴۹٪	۱۹۵	[۶۶]

۲-۵- افزایش زیستی

افزایش زیستی به تلقیح میکروارگانیسم‌های دارای توان تجزیه‌کنندگی بالا به خاک آلوده اطلاق می‌شود و به‌عنوان یک راهکار هدفمند در زیست‌پالایی هیدروکربن‌ها شناخته می‌شود [۵۰]. با این حال، موفقیت این روش همواره تضمین‌شده نیست، زیرا سویه‌های معرفی‌شده ممکن است در رقابت با جوامع میکروبی بومی موفق نبوده یا سازگاری کافی با شرایط محیطی خاک پیدا نکنند [۵۱]. بنابراین، در سایت‌هایی که جمعیت میکروبی بومی توانایی تجزیه آلاینده را دارد، تحریک زیستی معمولاً گزینه مناسب‌تری محسوب می‌شود [۵۱]. با وجود این محدودیت‌ها، استفاده از میکروارگانیسم‌های مهندسی‌شده و فرمولاسیون‌های زیستی حاوی مواد محافظ و نگهدارنده رطوبت می‌تواند زنده‌مانی و استقرار سویه‌های تلقیح‌شده را افزایش دهد [۵۱، ۵۲]. همچنین، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزایش

زیستی به تنهایی، به‌ویژه در خاک‌های رسی، لزوماً موجب افزایش حذف PAHs نمی‌شود، اما ترکیب آن با تحریک زیستی می‌تواند عملکرد بهتری در تجزیه آلاینده‌ها ایجاد کند [۶۳].

۳-۵- تلفیق با اکسیداسیون شیمیایی

رویکرد تلفیقی زمین‌کشت با پیش‌تیمار اکسیداسیون شیمیایی، به‌ویژه برای پالایش خاک‌های هوازده و مقاوم حاوی هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای با وزن مولکولی بالا، استراتژی اثربخشی محسوب می‌شود [۱۵]. در این روش، اکسیداسیون شیمیایی اولیه با استفاده از معرف‌هایی نظیر پراکسید هیدروژن، فرآیند فتون یا ازن، با شکستن ساختار مولکولی ترکیبات مقاوم و کاهش آبگریزی آن‌ها، فراهمی زیستی آلاینده‌ها را برای ریزجانداران افزایش می‌دهد [۵۳]. نتایج مطالعات نشان داده است که اعمال پیش‌تیمار اکسیداسیونی نه تنها بازده حذف کلی PAHs را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش اثرات بازدارندگی و افزایش فعالیت میکروبی، زمان مورد نیاز برای پالایش زیستی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۵۴]. همچنین، آنالیزهای مدل‌سازی تأیید کرده‌اند که این رویکرد تلفیقی می‌تواند بازه زمانی دستیابی به اهداف پالایش را در مقایسه با روش زمین‌کشت به تنهایی به میزان قابل توجهی کوتاه نماید [۱۵].

۴-۵- ورمی‌پالایی تلفیقی

ترکیب روش زمین‌کشت با استفاده از کرم‌های خاکی مانند گونه *Eisenia fetida* به عنوان ورمی‌پالایی تلفیقی شناخته می‌شود [۵۵]. کرم‌های خاکی از طریق چندین سازوکار فیزیکی-شیمیایی و بیولوژیک، کارایی تجزیه هیدروکربن‌ها را افزایش می‌دهند: (۱) ایجاد حفرات در ماتریکس خاک که موجب بهبود هوادهی و نفوذپذیری می‌گردد؛ (۲) خرد کردن و تکه‌تکه کردن مواد آلی که سطح تماس برای کلونیزاسیون میکروبی را افزایش می‌دهد؛ (۳) جابجایی و اختلاط لایه‌های خاک در اثر حرکت و تغذیه کرم‌ها که یکنواختی توزیع آلاینده و اکسیژن را به دنبال دارد و (۴) تحریک جمعیت میکروبی از طریق دفع کرمی و افزایش فعالیت آنزیم‌های برون‌سلولی [۵۶]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که حضور *Eisenia fetida* می‌تواند زیست‌فراهمی ترکیبات آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) را به طور چشمگیری افزایش دهد [۵۶]. به طوری که در یک مطالعه، کرم‌های خاکی زیست‌فراهمی PAHs را بیش از ۴۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند [۵۶]. همچنین تحقیقات نشان داده است که حضور این گونه کرم خاکی میزان حذف آنتراسن را از ۴۲ درصد در تیمار شاهد به ۹۱ درصد افزایش می‌دهد که مؤید نقش کلیدی ورمی‌پالایی تلفیقی در تسریع فرآیندهای پالایش زیستی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی است [۵۷].

۵-۵- الکتروکینتیک-زمین‌کشت

الکتروکینتیک یکی از روش‌های نوین پالایش خاک‌های آلوده است که با اعمال جریان مستقیم ولتاژ پایین، از طریق پدیده‌هایی مانند الکترواسموز و الکترومایگریشن، انتقال آلاینده‌ها و رطوبت در ماتریکس خاک را افزایش می‌دهد [۵۹]. تلفیق این روش با زمین‌کشت می‌تواند با بهبود انتقال اکسیژن و مواد مغذی، افزایش فراهمی زیستی آلاینده‌ها و رهايش ترکیبات جذب‌شده از ذرات خاک، شرایط مناسب‌تری برای فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده فراهم کند [۵۸، ۶۰]. در فرآیند ترتیبی الکتروکینتیک-زمین‌کشت، مرحله الکتروکینتیک می‌تواند آلاینده‌ها را متمرکز کرده و بخشی از ترکیبات پیچیده را به شکل‌های ساده‌تر و زیست‌دسترس‌تر تبدیل کند؛ در نتیجه، مرحله زمین‌کشت با کارایی بیشتری انجام می‌شود [۳۰]. مطالعات نشان داده‌اند که عملکرد این سیستم تلفیقی نسبت به کاربرد مستقل

هر یک از دو روش بالاتر است [۳۰،۶۰]. در تحقیقی افندی و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که کاربرد الکتروکینتیک-زمین‌کشت در خاک رسی آلوده به TPH، همراه با سورفکتانت، موجب حذف ۷۱/۱ درصدی آلاینده شد، در حالی که کارایی الکتروکینتیک به‌تنهایی ۴۹/۹ درصد بود [۶۰]. بنابراین، این رویکرد تلفیقی می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای پالایش خاک‌های ریزبافت و کم‌نفوذ آلوده به هیدروکربن‌های نفتی باشد. برخی از مطالعات الکتروکینتیک-زمین‌کشت تلفیقی در در کشورهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است

جدول ۴- برخی از مطالعات الکتروکینتیک-زمین‌کشت تلفیقی در در کشورهای مختلف

ردیف	مکان	نوع آلاینده	زمان تیمار	راندمان حذف	روش تلفیقی	منبع
۱	رومانی	در TPH و PAHs	۲۰ روز ^۱ NA +	۴۷،۲٪	(TPH)	ابتدا اعمال میدان الکتریکی [۳۰]
		خاک آلوده به	۵۰ روز ^۲ EKR	و ۴۶،۲٪	(tim) پس از	با قطبیت معکوس (۱ ولت بر سانتی‌متر) و سپس گذشت زمان برای طبیعت‌زایی بدون افزودن میکروب
		دیزل		EKR ۶۴،۱٪	(TPH)	
				و ۵۶،۳٪ (PAHs)		
۲	رومانی	در TPH و PAHs	۲۰ روز تقویت	۴۷،۲٪	(TPH)	ابتدا اعمال میدان الکتریکی [۳۰]
		خاک آلوده به	زیستی + ۵۰ روز	و ۴۶،۲٪	(PAHs) پس از	با قطبیت معکوس (۱ ولت بر سانتی‌متر) و سپس تقویت زیستی با افزودن کنسرسیوم میکروبی
		دیزل	EKR	EKR		
				← ۷۶،۰٪	(TPH)	
				و ۷۸،۶٪ (PAHs) پس از		
				تقویت زیستی		
۴	برزیل	نفت خام	۲۰ روز	حدود ۷۰٪		ترکیب همزمان میدان الکتریکی با قطبیت معکوس و کشت گیاه آفتابگردان در خاک [۶۹]
۵	رومانی	در خاک رسی و شنی	۱۴ روز	۴۵،۶۹٪ در خاک رسی و ۱۴،۵۷٪ در خاک شنی		ابتدا تصفیه الکتروشیمیایی خاک و سپس تجزیه زیستی توسط قارچ <i>Pleurotus ostreatus</i> [۷۰]

^۱ Natural Attenuation

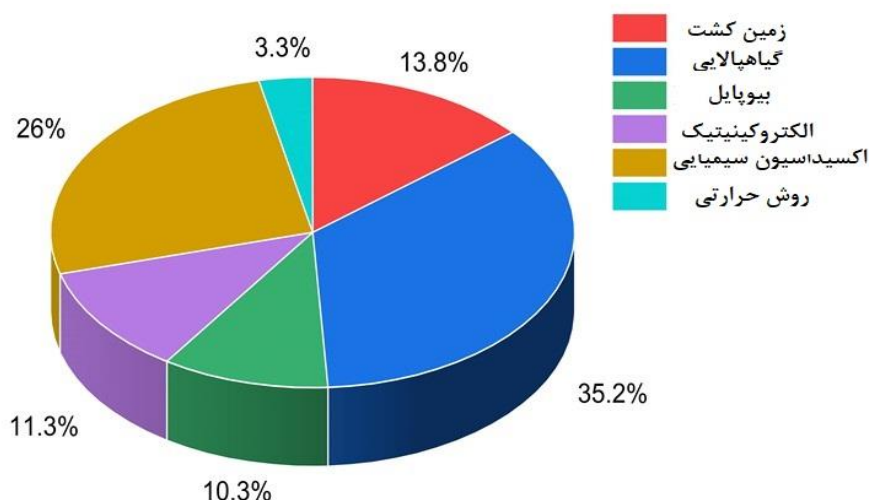
^۲ Electro kinetic



شکل ۳- رویکردهای نوین در بهبود کارآیی روش زمین‌کشت. (الف) اکسیداسیون شیمیایی، (ب) افزایش زیستی، (ج) ورمی پالایی، (د) الکترودکینیتیک

۵-۶- مقایسه روش زمین‌کشت با سایر روش‌های اصلاح خاک

مقایسه مطالعات انجام‌شده در زمینه پالایش خاک‌های آلوده به نفت نشان می‌دهد که بیشترین توجه پژوهشی به روش‌های گیاه‌پالایی، اکسیداسیون شیمیایی و زمین‌کشت اختصاص داشته است (شکل ۴). انتخاب فناوری مناسب به نوع و غلظت آلاینده، ویژگی‌های خاک، زمان مورد نیاز و محدودیت‌های اقتصادی و عملیاتی وابسته است و هیچ روش واحدی در همه شرایط برتری ندارد [۷۱]. زمین‌کشت به دلیل سادگی، هزینه و مصرف انرژی نسبتاً پایین و سازگاری زیست‌محیطی، نسبت به بسیاری از روش‌های فیزیکی و حرارتی مزیت دارد؛ اما سرعت پالایش آن کمتر بوده و برای ترکیبات سنگین و مقاوم محدودیت دارد [۷۱، ۷۲]. در مقایسه با بیوپایل، زمین‌کشت ساده‌تر است، در حالی که بیوپایل امکان کنترل دقیق‌تر هواهی و شرایط عملیاتی را فراهم می‌کند [۷۳]. گیاه‌پالایی نیز کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست است، اما سرعت پایین و وابستگی به شرایط اقلیمی از محدودیت‌های آن محسوب می‌شود [۷۱، ۷۴]. اکسیداسیون شیمیایی و الکترودکینیتیک نیز برای آلاینده‌های مقاوم و خاک‌های کم‌نفوذ می‌توانند مؤثر باشند، اما هزینه و پیچیدگی عملیاتی بیشتری دارند [۷۵]. در مجموع، زمین‌کشت را نمی‌توان فناوری برتر در همه شرایط دانست و انتخاب آن باید بر اساس ویژگی‌های سایت و گلوگاه اصلی فرآیند انجام شود. در خاک‌های دارای آلودگی مقاوم یا زیست‌فراهمی پایین، استفاده از فناوری‌های مکمل و روش‌های تلفیقی می‌تواند کارایی پالایش را افزایش دهد.



شکل ۴- مقایسه مطالعات انجام شده در اصلاح خاک های آلوده به نفت به روش های مختلف

۵-۷- زمین کشت و توسعه پایدار

از منظر توسعه پایدار، روش زمین کشت به دلیل هزینه و مصرف انرژی نسبتاً پایین، اجرای در محل و امکان استفاده مجدد از خاک پس از پالایش، رویکردی قابل توجه محسوب می‌شود. با این حال، پایداری آن مستلزم کنترل خطراتی مانند انتقال ثانویه آلاینده‌ها و ارزیابی هم‌زمان شاخص‌هایی همچون زمان، هزینه، مصرف منابع و ایمنی زیست‌محیطی است.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که زمین کشت به دلیل سادگی، هزینه نسبتاً پایین و قابلیت اجرا در مقیاس وسیع، یکی از روش‌های مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی است؛ با این حال، کارایی آن به ویژگی‌های خاک، نوع و غلظت آلاینده، شرایط محیطی و مدیریت عملیاتی وابسته است. انتقال آلاینده، فراهمی زیستی و تجزیه زیستی سه فرآیند اصلی تعیین‌کننده عملکرد زمین کشت هستند و محدودیت در هر یک از آن‌ها می‌تواند راندمان پالایش را کاهش دهد. بنابراین، بهبود کارایی زمین کشت باید بر شناسایی عامل محدودکننده اصلی در هر سایت و انتخاب راهکار متناسب با آن استوار باشد. در این چارچوب، راهکارهای بهبود را می‌توان در سه گروه شامل تقویت ظرفیت زیستی، افزایش فراهمی زیستی و انتقال آلاینده، و کاهش مقاومت آلاینده از طریق پیش‌تیمار طبقه‌بندی کرد. زمین کشت را نمی‌توان فناوری برتر برای همه شرایط دانست، بلکه بیشترین کارایی آن در قالب یک روش قابل تنظیم و تلفیق با فناوری‌های زیستی و فیزیکوشیمیایی حاصل می‌شود. با توجه به محدودیت مطالعات موجود، انجام پژوهش‌های میدانی بلندمدت با روش‌های ارزیابی استاندارد و بررسی هم‌زمان غلظت آلاینده، فراهمی زیستی، سمیت و شاخص‌های میکروبی، برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد واقعی زمین کشت ضروری است.

۷- منابع

- [1] Falih, K. T., Mohd Razali, S. F., Abdul Maulud, K. N., Abd Rahman, N., Abba, S. I., & Yaseen, Z. M. Assessment of petroleum contamination in soil, water, and atmosphere: A comprehensive review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(13), pp. 8803-8832, 2024.
- [2] Majeed, B. K., et al. A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons, its effects and remediation approaches. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27(3), pp. 526-548, 2025.
- [3] Akbar, N. I., Ahmadi, R., Bhawani, S. A., Namakka, M., & Ramli, N. H. Impacts of oil spill on geotechnical properties of soil. In *Biobased Materials and Their Composites for Oil Spill Treatment* (pp. 39-52), 2025. Springer Nature.
- [4] Toto-Goxcon, I., et al. Effect of a permanent oil spillage on agricultural soil in Tihuatlán, Veracruz, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 41, 55274, 2025.
- [5] Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. Recent Advances in Soil Cleanup Technologies for Oil Spills: A Systematic Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234, 503, 2023.
- [6] Ambaye, T. G., & Vaccari, M. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contaminants in agricultural soils: Occurrence and remediation. Burleigh Dodds Science Publishing, 2025.
- [7] Shu, A., Yang, Z., Cui, Q., Liu, Z., Liu, S., Zhang, M., Sun, H., & Jiaqi, S. Spatial variations and vertical migration potentials of petroleum hydrocarbons with varying chain lengths in soils of different depths. *Science of The Total Environment*, 954, 176589, 2025.
- [8] Suman, S., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, toxicity, and remediation approaches. *Frontiers in Microbiology*, 11, 562813, 2020.
- [9] García-Rincón, J., Gatsios, E., Lenhard, R. J., Atekwana, E. A., & Naidu, R. (Eds.). *Advances in the characterisation and remediation of sites contaminated with petroleum hydrocarbons*, 2024. Springer.
- [10] Nazari, S., et al. Impact of Oil Contamination and Physical Weathering on Water Repellency and Hydraulic Properties of Sandy Loam and Clay Loam Soils. *Journal of Water and Soil*, University of Tabriz, 2024.
- [11] Yang, H., Shi, J., Li, Z., & Hu, F. Influence of Petroleum Hydrocarbon Pollution on Soil Water Holding Characteristics and Soil Water Availability. *Research of Soil and Water Conservation*, 29(3), 2022.
- [12] Ren, L., Zhang, J., Geng, B., Zhao, J., Jia, W., & Cheng, L. Ecological Shifts and Functional Adaptations of Soil Microbial Communities Under Petroleum Hydrocarbon Contamination. *Water*, 17(8), 1216, 2025.
- [13] Kolesnikov, S. A., et al. Enzyme Activity of Oil-Contaminated Chernozem and Soddy-Podzolic Soil. *Eurasian Soil Science*, 58(4), 47, 2025.
- [14] Yang, K. M. Recent trend in phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a bibliometric review. *International Journal of Phytoremediation*, 2025.
- [15] Kuppusamy, S., Thavamani, P., Venkateswarlu, K., Lee, Y. B., Naidu, R., & Megharaj, M. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils. *Chemosphere*, 168, pp. 944-968, 2017.
- [16] Maila, M. P., & Cloete, T. E. Bioremediation of petroleum hydrocarbons through land farming: A review. *Bioremediation Journal*, 8(3-4), pp. 101-113, 2004.
- [17] Lin, T. C., Pan, P. T., Young, C. C., Chang, J. S., Chang, T. C., & Cheng, S. S. Evaluation of the optimal strategy for ex situ bioremediation of diesel oil-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(9), pp. 1487-1496, 2011.
- [18] University of Hawaii. Land farming for remediation of petroleum contaminated soils (Technical Report No. 04-01). Department of Natural Resources and Environmental Management, 2004.

- [19] Sayqal, A., & Ahmed, O. B. Advances in bioremediation of petroleum hydrocarbons: A review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56(14), pp.1477-1490, 2021.
- [20] Sanscartier, D., Laing, T., Reimer, K., & Zeeb, B. Bioremediation of weathered petroleum hydrocarbon soil contamination in the Canadian North: A field study. *Polar Research*, 34(1), 24492, 2016.
- [21] Jalali, M. Landfarming: Principles and applications. In *Soil Remediation Series*. Tehran University Press, 2022.
- [22] Kwon, I., Lee, H., Kim, J. H., & Park, J. W. Identification of Optimal Operation Factors for Landfarming using Response Surface Methodology. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 21(1), pp. 94-103, 2016.
- [23] Park, J. W., Lee, K. B., & Kim, Y. K. Volatilization of petroleum hydrocarbons from contaminated soil during landfarming. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 39(8), pp. 2125-2136, 2004.
- [24] Maila, M. P., & Cloete, T. E. Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages? *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3, pp. 349-360, 2004.
- [25] Das, N., & Chandran, P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International*, 2011, pp. 1-13, 2011.
- [26] Bogatyrenko, E. A., Kim, A. V., Dashkov, D. V., & Ammosova, D. A. A review of the taxonomic diversity and enzyme systems of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the marine environment. *Russian Journal of Marine Biology*, 51(1), pp. 1-15, 2025.
- [27] Meyer, D., et al. Oily sludge stimulates microbial activity and changes microbial structure in a landfarming soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 115, pp. 296-304, 2016.
- [28] Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), pp. 1-15, 2009.
- [29] Volkering, F., Breure, A. M., & Rulkens, W. H. Microbiological aspects of surfactant use for biological soil remediation. *Biodegradation*, 8(6), pp. 401-417, 1998.
- [30] Effendi, A. J., Ramadan, B. S., & Helmy, Q. Enhanced remediation of hydrocarbons contaminated soil using electrokinetic soil flushing – Landfarming processes. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100959, 2022.
- [31] Bang, S., Kim, M., Chun, M., Kim, J., & Ahn, H. A Study on the Quality Management Method for Landfarming Technique Applied to Petroleum Contaminated Soil. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 29(6), pp. 22-34, 2024.
- [32] Covino, S., Fabiani, A., & Cipriani, G. Optimization of Landfarming Amendments Based on Soil Texture and Crude Oil Concentration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, Article 234, 2018.
- [33] Philipp, L., Sünemann, M., Schädler, M., Blagodatskaya, E., Tarkka, M., Eisenhauer, N., & Reitz, T. Soil depth shapes the microbial response to land use and climate change in agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, 208, 106025, 2025.
- [34] Chen, C.-H., Liu, P.-W. G., & Whang, L.-M. Effects of natural organic matters on bioavailability of petroleum hydrocarbons in soil-water environments. *Chemosphere*, 233, pp. 843-851, 2019.
- [35] Kim, S. H., Woo, H., An, S., Chung, J., Lee, S., & Lee, S. What determines the efficacy of landfarming for petroleum-contaminated soils: Significance of contaminant characteristics. *Chemosphere*, 290, 133392, 2022.
- [36] Lukic, B., Huguenot, D., Panico, A., van Hullebusch, E. D., & Esposito, G. Influence of activated sewage sludge amendment on PAH removal efficiency from a naturally contaminated soil: application of the landfarming treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017.
- [37] Margesin, R., & Schinner, F. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 56(5-6), pp. 650-663, 2001.

- [38] Zhang, Y., et al. Temperature effects on hydrocarbon biodegradation: A meta-analysis. *Environmental Pollution*, 342, 123045, 2024.
- [39] Marín, J. A., Hernández, T., & García, C. Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity. *Environmental Research*, 98(2), pp. 185-195, 2005.
- [40] Lee, S., et al. Moisture effects on hydrocarbon biodegradation in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 318, pp. 234-242, 2016.
- [41] Pancrazi, M., et al. Bioremediation of diesel contamination at an underground storage tank site. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(8), 132, 2016.
- [42] Aislabie, J., Saul, D. J., & Foght, J. M. Bioremediation of hydrocarbon-contaminated polar soils. *Extremophiles*, 10(3), pp. 171-179, 2006.
- [43] Molina-Barahona, L., Rodríguez-Vázquez, R., Hernández-Velázquez, M., Vega-Jarquín, C., Zapata-Pérez, O., Mendoza-Cantú, A., & Albores, A. Enzyme activities as indicators of the stabilization of petroleum hydrocarbons in soil during landfarming. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(2-3), pp. 143-150, 2004.
- [44] Margesin, R., Zimmerbauer, A., & Schinner, F. Monitoring of bioremediation by soil biological activities. *Chemosphere*, 40(4), pp. 339-346, 2000.
- [45] Oghoje, S. U., Ejeomo, C., Arienmughare, E., Ifijen, I. H., Afure, M. A., Emoyan, O. O., Ukpebor, J. E., Ukpebor, E. E., & Agbaire, P. O. The effective application rates and efficiency of organic stimulation for optimal landfarming of heavily petroleum hydrocarbon-polluted soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(12), 1300, 2025.
- [46] Ambaye, T. G., Chebbi, A., Formicola, F., Rosatelli, A., Prasad, S., Gomez, F. H., Sbaffoni, S., Franzetti, A., & Vaccari, M. Ex-situ bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using mixed stimulants. *ENEA-IRIS*, 2022.
- [47] Dike, C. C., et al. Comparative summary of biostimulant materials, treatment conditions, and TPH removal efficiencies in contaminated soils. *PMC*, 2024.
- [48] Sayara, T., Borràs, E., Caminal, G., Sarrà, M., & Sánchez, A. Bioremediation of PAHs-contaminated soil through composting: Influence of bioaugmentation and biostimulation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(6), pp. 859-865, 2011.
- [49] Jiang, X., et al. Strategy of nitrate-enhanced natural attenuation for remediation of PAHs-contaminated subsoil. *Journal of Environmental Management*, 373, 123587, 2025.
- [50] Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), pp. 28-39, 2015.
- [51] Tyagi, M., da Fonseca, M. M. R., & de Carvalho, C. C. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 22(2), pp. 231-241, 2011.
- [52] Wang, G., Zhang, K., Yu, M., Xia, Y., Tian, J., Yang, X., Xie, W., & Li, H. Genetically engineered microbes: A novel bidirectional regulator for biofilm in combatting aquatic nitrogen pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 488, 137898, 2025.
- [53] Russo, L., Rizzo, L., & Belgiorno, V. Ozone oxidation and aerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil. *Chemosphere*, 87(4), pp. 376-381, 2012.
- [54] Kulik, N., Goi, A., Trapido, M., & Tuhkanen, T. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combined chemical pre-oxidation and bioremediation in creosote contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 78(4), pp. 382-391, 2006.
- [55] Javed, F., & Hashmi, I. Vermiremediation – Remediation of Soil Contaminated with Oil Using Earthworm (*Eisenia fetida*). *Soil & Sediment Contamination*, 30(6), pp. 639-662, 2021.

- [56] Gomez-Eyles, J. L., Sizmur, T., Collins, C. D., & Hodson, M. E. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Pollution*, 159(2), pp. 616-622, 2011.
- [57] Contreras-Ramos, S. M., Álvarez-Bernal, D., & Dendooven, L. *Eisenia fetida* increased removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil. *Environmental Pollution*, 143(3), pp. 396-403, 2006.
- [58] Gill, R. T., Harbottle, M. J., Smith, J. W. N., & Thornton, S. F. (2014). Electrokinetic-enhanced bioremediation of organic contaminants: A review. *Chemosphere*, 107, pp. 31-39, 2014.
- [59] Cameselle, C., & Gouveia, S. Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, pp. 41-47, 2018.
- [60] Barati Fardin, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Darban, A. K. A comprehensive review of soil remediation contaminated by persistent organic pollutants using electrokinetic. *Journal of Environmental Management*, 373, 123587, 2025.
- [61] Keshyagol, K., Prabhu, U. S., Hiremath, P., Gurumurthy, B. M., Shivaprakash, Y. M., Deepak, G. D., & Kowshik, S. Advances in Sustainable Soil Health Restoration through Chemical Biological Physical Integrated and Nano Remediation Techniques. *Journal of Sustainability Research*, 7(3), e250056, 2025.
- [62] Mikkonen, A., et al. Changes in hydrocarbon groups, soil ecotoxicity and microbiology along contamination gradients in an old landfarming field. *Environmental Pollution*, 162, pp. 374-380, 2012.
- [63] Silva, I. S., et al. Bioremediation of a tropical clay soil contaminated with diesel oil. *Journal of Environmental Management*, 113, pp. 510-516, 2012.
- [64] Moreira, I. S., et al. Bioremediation of a clay soil contaminated with diesel oil. *Journal of Soils and Sediments*, 13, pp. 1234-1243, 2013.
- [65] Adams, R. H., & Guzmán-Osorio, F. J. (2008). Evaluation of land farming and chemico-biological stabilization for treatment of heavily contaminated sediments in a tropical environment. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5 (2), 169-178.
- [66] Asquith, E. A., Geary, P., Nolan, A. L., & Evans, C. Comparative bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by biostimulation, bioaugmentation and surfactant addition. University of Newcastle, 2025.
- [67] Martínez-Rabelo, F., Gómez-Guzmán, L. A., García-Segura, D. R., Villegas-García, E., Rodriguez-Campos, J., Velázquez-Fernández, J. B., Hernández-Castellanos, B., Barois, I., & Contreras-Ramos, S. M. Hydrocarbon bioremediation in a pilot-scale: A combination of bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103210, 2023.
- [68] Bhuyan, B., Kotoky, R., & Pandey, P. Impacts of rhizoremediation and biostimulation on soil microbial community, for enhanced degradation of petroleum hydrocarbons in crude oil-contaminated agricultural soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (42), 94649–94668, 2023.
- [69] Crognale, S., Cocarta, D. M., Streche, C., & D'Annibale, A. Development of laboratory-scale sequential electrokinetic and biological treatment of chronically hydrocarbon-impacted soils. *New Biotechnology*, 58, pp. 38-44, 2020.
- [70] Silva, D. R., & Vilar, V. J. P. Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated. *Separation and Purification Technology*, 20, pp. 194-200, 2018.
- [71] Lim, M. W., Von Lau, E., & Poh, P. E. A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil Present works and future directions. *Marine pollution bulletin*, 109(1), pp. 14-45, 2016.



- [72] Lv, Y., Bao, J., & Zhu, L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Reports*, 8, pp. 7976-7988, 2022.
- [73] Michael-Igolima, U., Abbey, S. J., & Ifelebuegu, A. O. A systematic review on the effectiveness of remediation methods for oil contaminated soils. *Environmental Advances*, 9, 100319, 2022.
- [74] Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1354422, 2024.
- [75] Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C., & Naidu, R. A review of electrokinetically enhanced bioremediation technologies for PHs. *Journal of Environmental Sciences*, 88, pp. 31-45, 2020.