

**کاربرد روش‌های زیست‌پالایی در بازیافت خاک‌های آلوده به مواد نفتی****بهنام نظری علمدارلو**

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست منابع طبیعی-آلودگی‌های محیط زیست

\* نویسنده رابط: b.nazari372@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

**واژگان کلیدی**

خاک

آلودگی

مواد نفتی

بیولوژی

زیست‌پالایی

**چکیده**

آلودگی خاک یک خطر شدید و گسترده محیط‌زیستی بوده و هست که توجه عمومی و علمی قابل توجهی را به خود جلب کرده است. بیشتر این آلودگی ناشی از افزایش فعالیت‌های مرتبط با اکتشاف، حمل و نقل و فرآوری نفت است. بطوریکه آلاینده‌های نفتی، عمدتاً هیدروکربنی، به عنوان آلاینده‌های اولویت‌دار طبقه‌بندی می‌شوند که نیاز فوری به حذف موثر آلاینده‌های هیدروکربنی نفتی از خاک آلوده را برجسته می‌کند. در طول سال‌های متمادی روش‌های مختلفی برای پاکسازی خاک آلوده به نفت ابداع شده است. در بین روش‌های مختلف، زیست‌پالایی یک روش ساده و مقرون به صرفه است که در دهه‌های اخیر در سراسر جهان مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این تکنیک عنوان یک روش معقول و قابل اجرا و ایمن از نظر محیط زیستی درک شده و در سطح جهانی پذیرفته شده است و یک راه حل امیدوارکننده برای اصلاح محیط زیست می‌باشد.

در طول سه دهه گذشته، کار قابل توجهی با هدف استفاده از میکروارگانیسم‌ها به عنوان عوامل زیست‌پالایی برای تصفیه خاک‌های آلوده به نفت انجام شده است. در این پژوهش زیست‌پالایی و برخی تکنیک‌های رایج آن جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به این نوع از آلاینده‌ها تشریح خواهد شد.

## ۱. مقدمه

خاک نقش اصلی در حمایت از حیات زمین ایفا میکند چراکه فرایندهای اتمسفری و هیدرولوژی با بیوسفر و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی مرتبط به خاک میشوند [۲۲]. به همین دلیل جزء ضروری اکوسیستم زمینی و عنصر اساسی محیط زیست برای سکونت انسان است [۵۴]. از اینرو تغییر کیفیت خاک به دلیل آلودگی خاک به طور قابل توجهی بر اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. خاک نیز محیطی است که سطح آلودگی را به بهترین نحو منعکس می‌کند [۱۲]. آلودگی خاک در واقع به وضعیتی اطلاق می‌شود که در آن مواد شیمیایی یا عناصر مضر در خاک در سطوح بالاتر از حد معمول وجود داشته باشد و بر خصوصیات شیمیایی بیولوژیکی و فیزیکی آن تأثیر منفی بگذارد [۵۰].

به طور خاص، آلودگی خاک یک خطر شدید و گسترده محیط‌زیستی بوده و هست که توجه عمومی و علمی قابل توجهی را به خود جلب کرده است. بیشتر این آلودگی ناشی از افزایش فعالیت‌های مرتبط با اکتشاف، حمل و نقل و فرآوری نفت است [۶۷]. نفت منبع اصلی انرژی برای صنایع مختلف و زندگی روزمره است. انتشار نفت در محیط زیست چه به صورت تصادفی و چه در اثر فعالیت‌های انسانی یکی از عوامل اصلی آلودگی خاک است [۸۰]. فرآورده‌های نفتی مختلف مانند بنزین، گازوئیل یا روغن‌های سنگین می‌توانند باعث آلودگی خاک شوند [۵۱]. به طوریکه وابستگی به سوخت‌های فسیلی منجر به مسائل محیط‌زیستی جدی در دهه‌های اخیر شده است [۳۸]. آلاینده‌های نفتی، عمدتاً هیدروکربنی، به عنوان آلاینده‌های اولویت‌دار طبقه بندی می‌شوند [۸۰]. که نیاز فوری به حذف موثر آلاینده‌های هیدروکربنی نفتی از خاک آلوده را برجسته می‌کند [۷۳]. بنابراین بررسی منابع، سرنوشت و وقوع آلودگی خاک و خطرات ناشی از سلامت انسان، یک حوزه مهم تحقیقاتی بوده است. بطوری که حجم فزاینده ای از تحقیقات به یافتن راه حل‌های نوآورانه و پایدار برای اصلاح زمین‌های آلوده اختصاص یافته است [۴۸].

به همین جهت، در طول سالیان متمادی روش‌های مختلفی برای پاکسازی خاک آلوده به نفت ابداع شده است. فن آوری‌های تصفیه خاک‌های آلوده به نفت را می‌توان به روش‌های بیولوژیکی، شیمیایی، حرارتی و فیزیکوشیمیایی طبقه بندی کرد [۲۰]. این روش‌ها راه‌حل‌های فنی بالقوه را برای اکثر آلودگی‌های خاک ارائه می‌کنند. با این حال انتخاب مناسب‌ترین رویکرد نیاز به اطلاعات دقیق در مورد نحوه تعامل آلاینده‌ها با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک دارد [۶۰]. روش‌های مرسوم فیزیکوشیمیایی موجود برای اصلاح خاک‌های آلوده به نفت خام از محدودیت‌های شدیدی مانند راندمان پایین، هزینه عملیاتی بالا و مقدار زیادی تولید لجن و پسماند برخوردارند [۷۳] [۷۳]. در حالی که تصفیه بیولوژیکی به عنوان یک گزینه کارآمد و مؤثر در حال ظهور است [۵۷]. و به دلیل هزینه کم و سادگی به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای آلاینده‌های آلی خاک ظاهر شده است [۴۳]. بنابراین پاک سازی بیولوژیکی (زیست‌پالایی) بعنوان یک روش اصولی و مهم از سه جنبه اقتصادی، اکولوژیکی و اجتماعی می‌تواند در طرح‌های کاربردی و صنعتی مطرح باشد [۸۳].

در طول سه دهه گذشته، کار قابل توجهی با هدف استفاده از میکروارگانیسم‌ها به عنوان عوامل زیست‌پالایی برای تصفیه خاک‌های آلوده به نفت انجام شده است [۷۳]. در ادامه زیست‌پالایی و برخی روش‌های آن جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به این نوع از آلاینده‌ها تشریح خواهد شد.

## ۲. زیست‌پالایی

لیست تجهیزات و مواد اولیه برای انجام آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشند:

زیست‌پالایی یک روش ساده و مقرون به صرفه است که در دهه‌های اخیر در سراسر جهان مورد توجه ویژه قرار گرفته است. اصطلاح کلی "زیست‌پالایی" به استفاده از موجودات زنده (به عنوان مثال باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها و گیاهان) در سم زدایی خاک‌ها و فاضلاب‌های آلوده اشاره دارد. در فرآیند زیست‌پالایی، مواد خطرناک آلی و معدنی ممکن است تجزیه، تجمع یا بی حرکت شوند و در نتیجه سطح آلودگی به میزان قابل توجهی کاهش یابد [۱۰]. زیست‌پالایی از سال ۱۹۴۰ برای هیدروکربن‌های نفتی مورد استفاده قرار گرفته است، اما پس از نشت نفت اکسون والدز در سال ۱۹۸۰ توجه زیادی را به خود جلب کرد [۲۹] این تکنیک عنوان یک روش معقول و قابل اجرا و ایمن از نظر محیط زیستی درک شده و در سطح جهانی پذیرفته شده است [۲۶] و یک راه حل امیدوارکننده برای بهسازی محیط زیست میباشد [۴۳].

زیست‌پالایی ممکن است به استفاده از سیستم‌های بیولوژیکی (ریز ارگانیسم‌ها، گیاهان یا آنزیم‌ها) برای تخریب یا حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آلوده تعریف شود [۱۵].

### ۳. انواع روش‌های زیست پالایی

تکنیک‌های زیست پالایی را می‌توان به دو نوع درجا و خارج از محل تقسیم کرد [۷، ۳۱، ۳۷ و ۷۲]. تکنیک‌های درجا به عنوان تکنیک‌هایی تعریف می‌شوند که برای خاک و آب‌های زیرزمینی در سایت اعمال می‌شوند با حداقل اختلال، در حالی که تکنیک‌های خارج از محل آن مدل‌هایی هستند که در خاکی که حفاری شده یا آبی که پمپاژ شده و به خارج از سایت انتقال داده شده، اعمال می‌شوند [۷۲].

تکنیک‌های زیست پالایی خارج از محل به دلیل هزینه‌های اضافی مربوط به حفاری و حمل و نقل، گران‌تر هستند. با این وجود، می‌توان از آنها برای تصفیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها به صورت کنترل شده استفاده کرد. در مقابل، تکنیک‌های درجا هیچ هزینه اضافی نسبت به حفاری ندارند. با این حال، هزینه نصب تجهیزات در محل، همراه با ناتوانی در تجسم و کنترل موثر سایت آلوده ممکن است برخی از تکنیک‌های زیست پالایی در محل را ناکارآمد کند. در نتیجه، ظاهراً هزینه بهسازی عامل اصلی نیست که باید روش زیست پالایی را برای استفاده در هر مکان آلوده تعیین کند [۷].

#### ۱.۳ زیست پالایی درجا

با توجه به مطالعات صورت گرفته، به طور کلی دو دسته روش درجا وجود دارد: زیست پالایی ذاتی<sup>۱</sup> و بیولوژیکی پیشرفته (مهندسی) درجا<sup>۲</sup> [۳، ۷، ۱۳، ۵۸].

**زیست پالایی ذاتی:** به عنوان زیست پالایی طبیعی یا غیر فعال نیز شناخته می‌شود. در این فرآیند از میکروب‌های موجود در محیط برای تبدیل آلاینده‌ها از حالت س‌می به غیرس‌می استفاده می‌شود [۳، ۱۳ و ۶۵]. به طوریکه جمعیت میکروبی محلی تحریک می‌شود و فعالیت متابولیکی آن با تامین مواد مغذی و اکسیژن افزایش می‌یابد [۳]. در این روش موفقیت فرآیند کاملاً به توانایی‌های درونی جمعیت میکروبی که قبلاً در محل حضور دارند بستگی دارد و نیازی به مراحل مهندسی برای بهبود فرآیند ندارد. از آنجایی که هیچ مداخله انسانی در کار نیست، بنابراین فرآیندی کم‌هزینه و متداول در نظر گرفته می‌شود. با این وجود توانایی ذاتی میکروب‌های بومی برای متابولیسم آلاینده باید در آزمایشات مشخص شود [۱۳].

**زیست پالایی مهندسی شده:** در این روش، فعالیت‌های متابولیکی با استفاده از فرآیندهای اصلاح، مهندسی می‌شود، مانند سیستم نصب شده برای جریان دادن مواد مغذی. این روش زمانی به کار می‌رود که نیاز فوری به حذف سریع آلاینده وجود داشته باشد یا زمانی که تهدید هشداردهنده‌ای برای سلامت انسان یا اکوسیستم ناشی از آلاینده‌ها وجود دارد [۱۳]. در این روش یک میکروارگانیسم به منطقه آلوده معرفی می‌شود. سرعت تخریب و تصفیه آلاینده‌ها، با بهبود شرایط فیزیکیوشیمیایی برای تقویت رشد میکروارگانیسم‌ها، افزایش می‌یابد [۳] از جمله تکنیک‌های مهندسی شده می‌توان به تقویت یا افزایش زیستی<sup>۳</sup>، گیاه پالایی<sup>۴</sup> و تهویه زیستی<sup>۵</sup> و مکش زیستی<sup>۶</sup> و افشانه زیستی<sup>۷</sup> اشاره کرد [۱، ۳، ۷ و ۶۵].

تکنیک‌های درجا معمولاً ارزان هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری کمی دارند در مقایسه با نمونه‌های خارج از محل که برای تصفیه نیاز به حفاری نمونه‌های آلوده دارند [۲۱] این تکنیک‌ها به دلیل هزینه و مزاحمت کمتر، به طور کلی مطلوب‌ترین گزینه‌ها هستند، زیرا آنها تصفیه را در محل انجام می‌دهند و از حفاری و انتقال آلاینده‌ها جلوگیری می‌کنند [۳۷].

<sup>1</sup> Intrinsic Bioremediation

<sup>2</sup> Enhanced (Engineered) In Situ Bioremediation

<sup>3</sup> Bioaugmentation

<sup>4</sup> Phytoremediation

<sup>5</sup> Bio-venting

<sup>6</sup> Bioslurping

<sup>7</sup> Biosparging

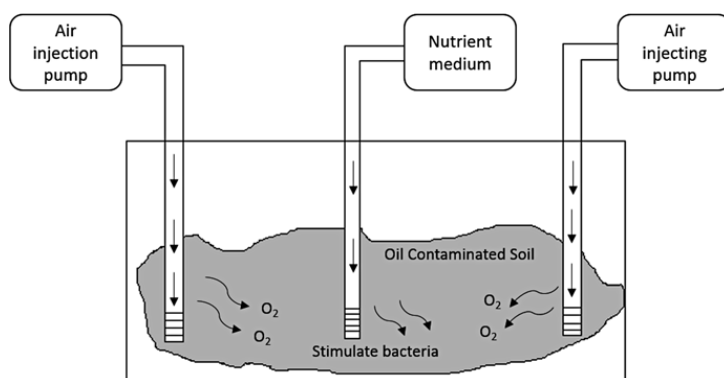
برای موفقیت کامل استراتژی زیست پالایی درجا، چند پارامتر از جمله درصد رطوبت، نوع گیرنده الکترون، دما، pH و در دسترس بودن مواد مغذی باید به طور مناسب حفظ شوند. بر خلاف تکنیک‌های زیست پالایی بیرون از محل، تخلخل خاک همچنین بر میزان موفقیت پاکسازی زیستی درجا تأثیر می‌گذارد [۴۵].

### روش تهویه زیستی:

فرایند تهویه زیستی اکسیژن کافی برای سیستم تصفیه مهیا میکند که باعث القا و تنظیم محیط هوازی برای تقویت فعالیت‌های میکروبی و حذف موثر هیدروکربن‌های نفتی میشود [۵]. تهویه خاک، اجزای فرارتر سوخت را از خاک غیراشباع حذف می‌کند و با هدایت حجم زیادی از هوا به زیر سطح، تجزیه زیستی هوازی را تقویت می‌کند.

از نظر تئوری، هوا چندین هزار برابر آب در نفوذ و هوادهی به افق خاک اشباع شده از سوخت و نفوذپذیری پایین موثرتر است. تخریب میکروبی هوازی می‌تواند غلظت هیدروکربن‌های باقیمانده و فاز بخار را کاهش دهد. در این روش بایستی حداقل سطوح هوادهی خاک (که نرخ تخریب بالایی را فراهم می‌کند) در شرایط مختلف خاک تعیین شود [۲۸].

این استراتژی به طور خاص در پاکسازی نشت مواد نفتی مانند گازوئیل، نفت سفید، بنزین و سوخت جت بسیار موفق بوده است [۵۹] و عمدتاً زمانی استفاده میشود که امکان تامین اکسیژن و مواد مغذی به میکروبیوم برای تسریع رشد و متابولیسم آنها وجود داشته باشد [۴۵].

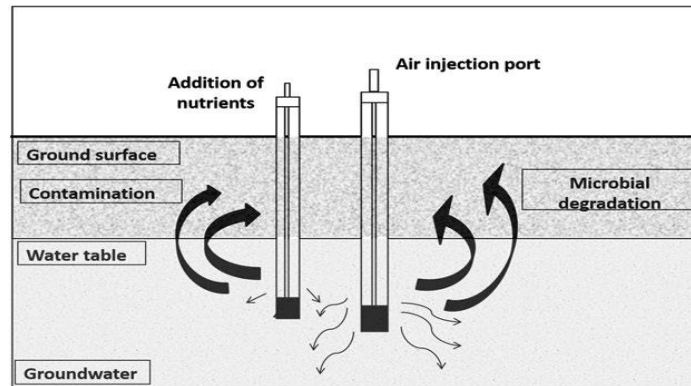


شکل ۱: زیست پالایی درجا به روش تهویه زیستی [۴۶]

### روش افشانه زیستی:

این تکنیک کاملاً شبیه تهویه زیستی است به طوری که هوا جهت تحریک فعالیت میکروبی به زیر خاک تزریق میشود با این تفاوت که در ناحیه اشباع تزریق میشود [۴۵]. در واقع این روش، شامل ورود هوا به داخل آبخوان در منطقه آلوده است [۳۵ و ۴۵]. تزریق هوا در ناحیه اشباع باعث می‌شود که ترکیبات آلی فرار رو به بالا حرکت کرده و به سمت ناحیه غیراشباع وارد شود تا تجزیه زیستی را تقویت کند [۷]. کارایی افشانه زیستی عمدتاً به دو عامل مهم متکی است که عبارتند از تجزیه پذیری زیستی آلاینده‌ها و نفوذپذیری خاک که باعث افزایش فراهمی زیستی آلاینده‌ها برای میکروبیوم می‌شود. افشانه زیستی اغلب برای تصفیه سفره‌های زیرزمینی آلوده به محصولات نفتی عمدتاً گازوئیل و نفت سفید استفاده می‌شود [۴۵]. همچنین ثابت شده است که تهویه زیستی و پارگی زیستی برای از بین بردن آلودگی PH و PAH موثر است [۱۹].

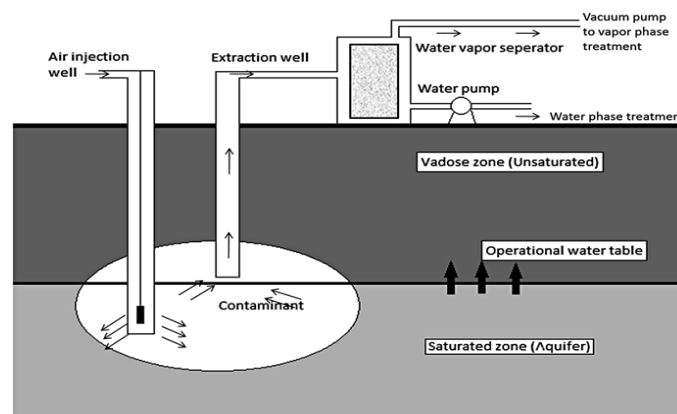
<http://science-journals.ir>



شکل ۲: زیست پالایی درجا به روش افشانه زیستی [۴۶]

### روش مکش زیستی:

این روش به طور همزمان از استخراج / بازیابی با خلاء برای حذف ترکیبات نفتی سبک از سطح آب و حاشیه مویرگی و استخراج بخار برای حذف بخارات با فراریت بالا از ناحیه غیراشباع استفاده می‌کند. همچنین تهویه زیستی برای تحریک تجزیه زیستی هیدروکربن‌های کمتر فرار در مناطق غیر اشباع و مویرگی را تامین میکند [۳۶]. این روش مایعات (محصولات آزاد و گاز خاک) را از این لایه بیرون می‌کشد (به روشی شبیه به روشی که نی سیال را از هر طرفی می‌کشد). و با خلا ایجاد شده میتوان محصول آزاد و مقداری آب زیرزمینی را می‌توان از لایه LNAPL استخراج کرد. منطقه فشار منفی ناشی از خلا، جریان LNAPL را به چاه افزایش می‌دهد و LNAPL محبوس شده در فضاهای منافذ ریز بالای سطح آب را جذب می‌کند [۳].



شکل ۳: زیست پالایی درجا به روش مکش زیستی [۴۶]

### روش گیاه پالایی:

گیاه پالایی یکی دیگر از روش‌های بسیار موفق زیست پالایی است و شامل استفاده از گیاهان و میکروبیوم‌های مرتبط با آنها برای تجزیه، جداسازی یا تجمع زیستی آلاینده‌ها از خاک و آب آلوده است [۲۴]. این تکنیک روشی پالایشی است که شامل جذب، تغییر شکل، تجمع و یا تصعید آلاینده‌ها با کمک گیاهان می‌باشد [۸۴]. گیاهان تصفیه خاک‌های آلوده به نفت را از طریق فرایندهای مختلف از جمله، حذف، تخریب یا جداسازی مواد خطرناک را در محیط تصفیه میکنند [۷۷].

طی ۱۵ سال اخیر این روش به یک فناوری قابل قبول تر برای تصفیه خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی آلوده به غلظت‌های باقیمانده از هیدروکربن‌های نفتی تبدیل شده است. با این حال هنوز درمورد کارایی، پیش‌بینی پذیری و کاربردهای این تکنیک با احتیاط عمل می‌شود. که در این زمینه نیاز فوری به ادله و شواهد قوی می‌باشد که نشانگر پتانسیل گیاه‌پالایی در حفاظت از انسان و گیرنده‌های اکولوژیکی در برابر این نوع آلاینده‌ها باشد. با این‌وجود گیاه‌پالایی یک رویکرد عملی و مقرون به صرفه با مزایای جانبی زیباشناختی و ترسیب کربن در جو است که به ویژه برای مناطق روستایی با آلودگی‌های باقیمانده در عمق کم جذابیت دارد [۳۴].

برخی محققان پتانسیل احتمالی تعدادی از گیاهان را در اصلاح خاک‌ها و رسوبات آلوده به هیدروکربن‌های نفتی بررسی کرده اند، مانند شیردم و همکاران (۲۰۰۸) که در مطالعه خود روی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، به کارایی امیدوارکننده دو گونه گیاهی کتان (*Linum usitatissimum*) و سورگوم (*Sorghum bicolor*) اشاره کرده‌اند [۶۳]. همچنین برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که تعدادی از گیاهان بومی همراه با میکروارگانیسم‌های زنده، می‌توانند بطور موثر آلاینده‌های آلی از جمله هیدروکربن‌های نفتی را تجزیه کنند [۴۹] که در پژوهش‌های مختلفی به این مهم اشاره شده است [۲، ۵۳، ۸۵، ۸۶، ۸۷]. بنابراین گیاه‌پالایی در کنار تجزیه میکروبی می‌تواند روشی کاربردی برای پالایش خاک‌های آلوده به نفت و ترکیب حاصل از آن باشد [۸۲].

### ۳.۲. تکنیک‌های زیست‌پالایی خارج از محل

این رویکرد شامل انتقال آلاینده‌ها از محل آلوده آنها به محل‌های مختلف تصفیه است. خاک آلوده حفاری می‌شود و به یک محیط کنترل شده منتقل می‌شود که در آن زیست‌پالایی می‌تواند انجام شود. این تکنیک زمانی به موفقیت می‌رسد که با توجه به غلظت و نوع آلاینده، عمق آلودگی، هزینه تصفیه و مکان سایت آلوده مورد توجه قرار گیرد [۱۳].

دو دسته تکنیک خارج از محل وجود دارد شامل فاز دوغاب یا نیمه جامد<sup>۸</sup> و فاز جامد<sup>۹</sup> [۵۸،۳] و [۶۲].

در فاز جامد، خاک‌ها با استفاده از عملیات فاز جامد در یک منطقه عملیات زمینی تصفیه می‌شوند. در فاز دوغ آب این فرآیند شامل مخلوط کردن آب، خاک و سایر مواد افزودنی آلوده در یک بیوراکتور برای حفظ تماس بین میکروارگانیسم‌ها و آلاینده‌ها است [۳]. در این زمینه می‌توان به تکنیک‌های زیر اشاره کرد [۵۸،۳۷،۷] و [۶۲].

فاز جامد: کمپوست<sup>۱۰</sup>، بایوپایل<sup>۱۱</sup> و لندفارمینگ<sup>۱۲</sup>

فاز نیمه جامد: بیوراکتور<sup>۱۳</sup>

### روش بیوراکتور:

بیوراکتور یک سیستم بیوشیمیایی در فاز دوغابی (slurry) می‌باشد [۱۴] و همانطور که از نام بیوراکتورهای دوغابی پیداست، آلاینده‌هایی که در فاز دوغابی وجود دارد را تصفیه می‌کند. نام‌های جاگزین این فناوری راکتورهای زیستی دوغاب<sup>۱۴</sup> و تصفیه بیولوژیکی فاز دوغاب<sup>۱۵</sup> است [۶۹]. این تکنیک مهندسی شده‌ترین سیستم‌های زیست‌پالایی و یکی از کارآمدترین فناوری‌های خارج از محل است که در تصفیه خاک‌های آلوده شده به آلاینده‌های مقاوم استفاده می‌شود. برای تشکیل دوغاب، خاک آلوده با یک مقدار معینی آب مخلوط می‌گردد که این نسبت به غلظت آلاینده‌ها، سرعت تجزیه زیستی و نوع خاک بستگی دارد [۱۴]. این کار باعث افزایش تماس بین میکروارگانیسم‌ها، آلاینده‌ها، اکسیژن شده و در نهایت با حل شدن آلاینده‌ها دسترسی زیستی آنها جهت زیست‌پالایی بیشتر می‌شود [۶۹].

بیوراکتورهای دوغابی را از نظر نوع عملیات به صورت دسته‌ای، نیمه پیوسته و پیوسته طبقه بندی می‌شوند که رایج‌ترین حالت عملیات دسته‌ای (batch) است. همچنین طبقه بندی دیگر براساس گیرنده اصلی الکترون بوده که شامل ۱- هوازی (اکسیژن مولکولی) ۲- آنوکسیک (نیترات و کاتیون‌های فلزی) ۳- بی‌هوازی (کاهش دهنده سولفات، متانوزن، تخمیر) ۴- گیرنده‌های الکترون مخلوط یا ترکیبی [۵۶]. از مزیت‌های این فناوری نسبت به روش‌های فاز جامد می‌توان به زمان و فضای کمتر جهت پالایش آلاینده خاک اشاره کرد [۱۴]. که

<sup>8</sup> Slurry Phase

<sup>9</sup> Solid Phase

<sup>10</sup> Composting

<sup>11</sup> Biopiles

<sup>12</sup> landfarming

<sup>13</sup> Bioreactors

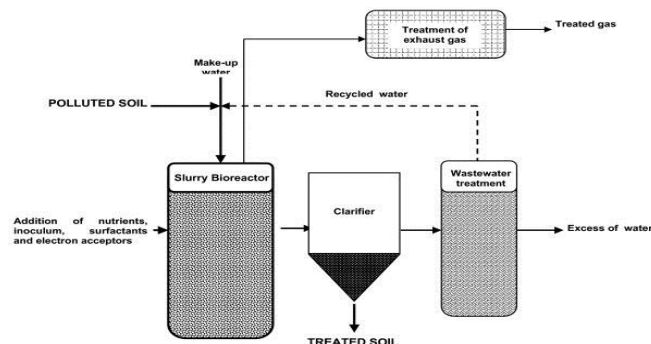
<sup>14</sup> Bio-slurry reactors

<sup>15</sup> Slurry phase biological treatment

<http://science-journals.ir>

با اصول نظارت محیط زیستی معاصر همخوانی دارد و تحقیقات فراوان در مورد فناوری دوغاب زیستی برای اصلاح خاک به نتیجه رسیده است [۷۶].

این تکنیک برای پاکسازی خاک‌ها و روسبات آلوده به هیدروکربن‌های پتروشیمی و ... مناسب می‌باشد [۶۹].

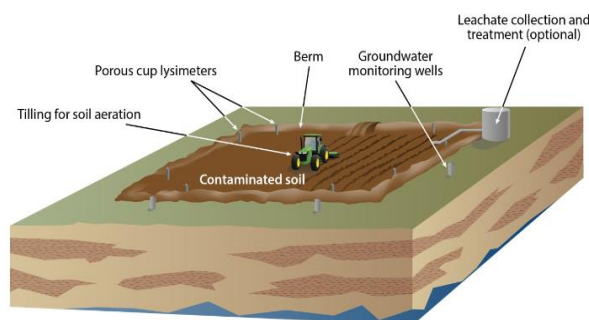


شکل ۴: زیست پالایی خارج از محل به روش بیوراکتور [۵۶]

#### روش لندفارمینگ (تصفیه زمین یا زمین مزرع):

یکی از کاربردی‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها برای تصفیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی، تصفیه زمین است [۶]. این تکنیک از میکروارگانیسم‌های خاک و روش‌های کشاورزی در یک محیط هوایی استفاده می‌کند به طوری که از طریق فرایندهای تبدیل، ثابت و غیر متحرک‌سازی و سم‌زدایی از سلامت عمومی و محیط زیست حفاظت می‌کند [۶۴]. و به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن از دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. زمین داری یک تکنیک ساده است که در آن خاک آلوده حفاری می‌شود و روی بستر آماده پخش می‌شود و تا زمانی که آلاینده‌ها تجزیه شوند، به طور دوره‌ای و منظم خاک ورزی می‌شود [۳۷ و ۷۹]. این تکنیک همچنین شامل فرایندهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی در خاک برای تجزیه زیستی می‌باشد [۴]. در واقع هدف این روش، تحریک میکروارگانیسم‌های تخریب‌گر بومی و تسهیل تجزیه هوازی آلاینده‌ها است [۳۷].

طبق گزارش اپول و همکاران این روش برای کاهش آلودگی هیدروکربنی از خاک استفاده شده است [۶] و در تخریب تعدادی از ترکیبات هیدروکربنی موفق بوده است زیرا اکثر میکروب‌های اولئوفیل (میکروب‌های نفت خوار) <sup>۱۶</sup> به لایه سطحی خاک، به عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی متر محدود می‌شوند [۸۱]. فراورده‌های نفتی خاک نیز در طول لندفارمینگ از طریق تجزیه زیستی تبخیر یا جذب، حذف می‌شوند [۲۷].



شکل ۵: زیست پالایی خارج از محل به روش لندفارمینگ [۱۸]

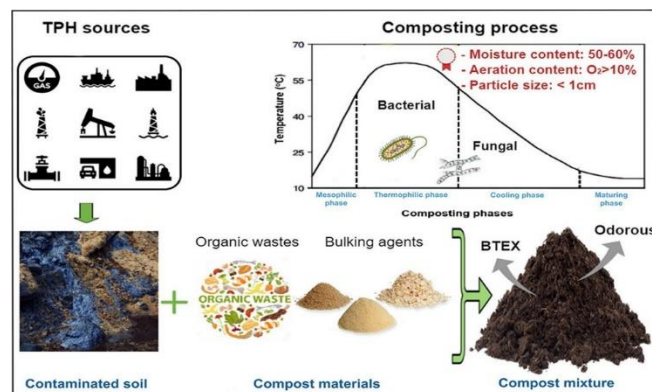


## روش کمپوست‌سازی:

کمپوست‌ها منابع غنی میکروارگانیسم‌های تجزیه کننده از جمله باکتری‌ها، اکتینومیسیت‌ها و قارچ‌های لیگنولیتیک هستند که می‌توانند آلاینده‌ها را به ترکیبات بی ضرری مانند دی اکسید کربن و آب تجزیه کنند [۶۱].

فعالیت میکروبی موفقیت کمپوست سازی را تعیین می‌کند. در طول فرآیند کمپوست، باکتری‌ها از هیدروکربن‌های نفتی به عنوان منابع کربن و انرژی استفاده می‌کنند، در حالی که قارچ‌ها آنزیم‌هایی تولید می‌کنند که می‌توانند واکنش‌های اکسیداسیون هیدروکربن‌های نفتی را کاتالیز کند. اعتقاد بر این است که فعل و انفعالات متقابل و رقابتی بین باکتری‌ها و قارچ‌ها، یک سیستم تجزیه‌زیستی قوی را حفظ می‌کند. در رابطه با پارامتر دما، بیشترین میزان تجزیه‌زیستی در مرحله ترموفیلیک مشاهده می‌شود.

با این حال، حضور یک جامعه میکروبی متنوع و پویا تضمین می‌کند که تخریب هیدروکربن‌های نفتی در کل فرآیند کمپوست رخ می‌دهد. غلظت اولیه، نوع خاک، نسبت خاک به کمپوست، سرعت هوادهی، میزان رطوبت، نسبت pH، C/N و دما بر فرآیند کمپوست سازی تأثیر می‌گذارد و باید برای اطمینان از تخریب موفقیت آمیز کنترل شود. همچنین، انتشار گازهای سمی و بدبو در حین تخریب هیدروکربن‌های نفتی، که معمولاً نامشخص است، می‌تواند منابع بالقوه آلودگی هوا باشد و نیاز به شناسایی دقیق تر و انجام تحقیقات موردنیاز جهت کاهش یا کنترل آن می‌باشد. مطالعات بررسی شده نشان داده‌اند که فناوری کمپوست‌سازی را می‌توان برای تصفیه هیدروکربن‌های نفتی (تا ۳۸۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم در خاک‌های رسی، سیلتی و شنی با موفقیت به کار برد [۷۰]. کمپوست از نظر فنی قوی [۷۰] و مقرون به صرفه است [۵۵ و ۷۰]. زیرا از یک طرف، کمپوست موجود در خاک آلوده قادر به افزایش محتوای مواد آلی است که باعث بهبود محیط خاک و تحریک فعالیت متابولیکی جامعه میکروبی می‌شود. از سوی دیگر، جذب آلاینده‌های آلی را افزایش داده و بر فراهمی زیستی آنها تأثیر می‌گذارد [۵۵].



شکل ۶: زیست پالایی خارج از محل به روش کمپوست سازی [۷۰]

## روش بیوپالینگ:

یک فناوری زیست پالایی خارج از محل است که به طور گسترده برای پاکسازی طیف گسترده ای از آلاینده‌های پتروشیمی در خاک استفاده شده است [۲۴]. بیوپالینگ‌ها که به عنوان سلول‌های زیستی<sup>۱۷</sup>، بیوهپ (تپه‌های زیست)<sup>۱۸</sup>، توده‌های زیستی<sup>۱۹</sup> و توده‌های کمپوست<sup>۲۰</sup> نیز شناخته می‌شوند، یک سیستم قابل اعتماد برای کاهش غلظت ترکیبات نفتی در خاک‌های حفاری شده از طریق تجزیه‌زیستی هستند [۲۳]. بیوپالینگ شامل جمع آوری خاک‌های آلوده در توده‌ها و تحریک فعالیت تخریب زیستی جمعیت‌های میکروبی با ایجاد شرایط رشد تقریباً بهینه است [۲۴]. برای تحریک فعالیت‌های تجزیه بیولوژیکی هوازی از طریق هوادهی و یا افزودن مواد مغذی، رطوبت، و عوامل حجیم کننده مانند کاه، خاک اره، پوست یا خرده چوب استفاده میشود [۳۳]. در واقع ترکیبی از واحد کمپوست و تهویه‌زیستی است که در شرایط وجود یا عدم وجود اکسیژن می‌تواند به فرآیندهای هوازی و بی‌هوازی تقسیم شود [۸]. برخی از معایب استفاده از سیستم‌های بیوپالینگ شامل هزینه‌های عملیاتی و نگهداری، مهندسی قوی و در دسترس نبودن منبع تغذیه در برخی مناطق دورافتاده برای تامین هوای یکنواخت اشاره

<sup>17</sup> biocells

<sup>18</sup> bioheaps

<sup>19</sup> biomounds

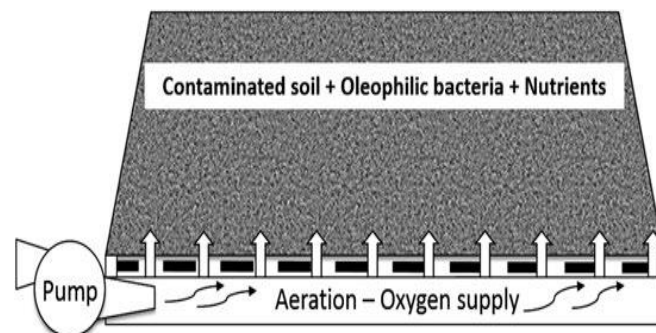
<sup>20</sup> compost piles



<http://science-journals.ir>

کرد. علاوه بر این، استفاده از هوای بیش از حد گرم ممکن است منجر به خشک شدن خاک شود، که در آن تصفیه زیستی انجام می‌شود، در نتیجه میکروب‌ها را غیرفعال می‌کند و به جای تجزیه زیستی، تبخیر را ترویج می‌کند [۴۵].

مطالعاتی در زمینه استفاده از بیوپایل در تصفیه خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی وجود دارد که میتوان به مطالعات جابر و همکاران [۳۲] و گومز و سارتاج [۲۵] اشاره کرد. به عنوان مثال طبق مطالعات وانگ و همکاران سیستم بیوپیلینگ ۶۶ درصد بنزو [a]پیرن را ظرف ۷ روز حذف کرد [۷۸].



شکل ۷: زیست پالایی خارج از محل به روش بیوپایل [۴۶]

### ۳.۳. فناوری‌های در حال ظهور

#### الکتروبیومی

یک تکنیک نسبتاً جدید به نام الکترو زیست‌پالایی از میکروب‌های الکترواکتیو برای کنترل فرآیند اکسیداسیون و کاهش در ارتباط با الکترودها استفاده می‌کند. این میکروارگانیسم‌ها قادر به انتقال یا پذیرش الکترون هستند [۱۱] و از فرایندهای الکتروکینتیکی برای اصلاح خاک استفاده می‌کند [۷۵]. تکنیک‌های ترکیبی، مانند زیست‌پالایی الکتروکینتیک، پتانسیل کاهش اثرات منفی اصلاح الکتروکینتیک را دارند. به عنوان مثال، استفاده از ولتاژهای پایین تر و اعمال جریان‌های پالسی می‌تواند به دستیابی به این هدف کمک کند و در عین حال رشد درجا جوامع میکروبی درگیر در تصفیه زیست‌پالایی را تحریک کند. درک دقیق تری از اثرات اصلی جریان (شدت و مدت) بر جوامع میکروبی، هم برای بهینه سازی شرایط رشد آنها و هم برای به حداقل رساندن عوارض جانبی ناشی از متابولیسم ناقص در طول فعالیت‌های میکروبی، مورد نیاز است [۵۲]. این روش به طور گسترده برای اصلاح در محل و خارج از محل خاک غنی از رس کم نفوذپذیر یا رسوبات ریزدانه پذیرفته شده است [۹].

لان و همکاران دو روش اصلاح بیوالکتروکینتیک و بیوالکتروشیمیایی را برای اصلاح خاک‌های آلوده به مواد نفتی بررسی کرده‌اند. مطابق این پژوهش، این دو روش فناوری‌های امیدوارکننده‌ای برای خاک‌های آلوده به نفت هستند. اصلاح بیوالکتروکینتیک پتانسیل کاربرد زیادی در خاک‌هایی با نفوذپذیری کم دارد، جایی که به کارگیری فن آوری‌های بیولوژیکی مرسوم دشوار است، اگرچه عوارض جانبی متعددی مانند pH شدید و افزایش دما دارد. در مقابل، اصلاح بیوالکتروشیمیایی برای خاک‌های شنی با رسانایی و نفوذپذیری بالا مناسب است که اثرات جانبی کمتری بر میکروب‌ها و خواص خاک نشان می‌دهد. با این حال، زمان درمان معمولاً طولانی‌تر از اصلاح بیوالکتروکینتیک است که توسط فرآیند انتقال الکترون میکروبی محدود شده است. به منظور بهینه‌سازی بیشتر فناوری‌های اصلاح بیوالکتروکینتیک و بیوالکتروشیمیایی نیازمند تحقیقات بین‌رشته‌ای در زیست‌شناسی، الکتروشیمی و مهندسی محیط‌زیست است. برای افزایش مقیاس این دو فناوری، مطالعات جامعی باید بر روی خاک‌های خاص آلوده به نفت انجام شود تا پارامترها و دستگاه‌های فرآیند بهینه‌سازی شوند. طراحی خاص سایت بر اساس ویژگی‌های خاک‌های آلوده به نفت قبل از اصلاح مورد نیاز است [۴۰].

#### نانو پالایش

نانوتکنولوژی یک حوزه نوظهور با کاربردهای گسترده است [۶۸] که تمامی حوزه‌های زندگی را در بر گرفته است. استفاده از فناوری نانو در پاکسازی زیستی آلاینده‌های محیطی گامی به سوی یک انقلاب است [۳۱]. این روش در واقع یک استراتژی قوی برای مبارزه با آلودگی آلی در خاک است. استفاده از نانو گیاه پالایی، که در آن نانومواد به گیاهان در استخراج و سم‌زدایی آلاینده‌ها کمک می‌کنند، یک رویکرد پیشرفته و سازگار با محیط زیست برای مقابله با آلودگی خاک است [۱۶].

محققان توجه زیادی به تکنیک جدید نانو زیست‌پالایی برای حذف آلاینده‌ها از مکان‌های مختلف آلوده دارند. این رویکرد مزایای زیست‌پالایی و نانوتکنولوژی را برای ایجاد یک فرآیند اصلاحی که سریع‌تر، مولدتر و کمتر از هر یک از رویکردها به طور جداگانه برای محیط زیست مضر است، ترکیب می‌کند [۴۷]. یک روش موثر، مقرون به صرفه و بی‌خطر برای محیط زیست برای کاهش سموم نفتی توسط ایده پیشرفته زیست‌پالایی ارائه شده است که به نانوزیست‌پالایی تکامل یافته است. از نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

فعل و انفعالات میکروبی با گیاهان و نانوذرات می‌تواند زیست‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی را افزایش دهد. تخریب سریع آلاینده‌های نفتی در شرایط هواری اتفاق می‌افتد. توسعه نانوزیست‌پالایی در سال‌های اخیر در پاکسازی PHC نویدبخش بوده است [۷۱]. مطابق پژوهش موسس و همکاران (۲۰۲۴) نانوپالایش به سرعت خاک را بی‌خطر می‌کند. از طرفی مانع از جوانه زنی و رشد گیاهان نمی‌شود. به دلیل حضور بیش از حد هیدروکربن‌های نفتی ناشی از نشت نفت خام، مانع جوانه زنی نهال‌ها در خاک می‌شود. این آلودگی نه تنها محیط را آلوده می‌کند، بلکه آن را برای سکونت نامناسب می‌کند، از چرای حیوانات جلوگیری می‌کند و منجر به تخریب زیبایی طبیعی و جذابیت‌های زیبایی می‌شود. طبق نتایج این پژوهش هیدروکربن‌های نفتی از خاک آلوده به نفت خام با استفاده از نانوموادهای جاذب حذف شدند [۴۴].

توجه به این نکته نیز ضروری است که همکاری موثر بین دانشمندان، سیاست‌گذاران و ذینفعان صنعت برای ادغام موفقیت‌آمیز فناوری نانو در فرآیندهای اصلاح خاک حیاتی بوده و با دیدگاه آینده‌نگری، مستلزم ادغام شیوه‌های پایدار با فناوری نانو برای حفاظت و بازیابی سلامت خاک برای نسل‌های آینده است [۱۶].

### ۴.۳. مزایا و معایب زیست‌پالایی

از مزایا و معایب زیست‌پالایی میتوان به موارد زیر اشاره کرد [۳۹]:

جدول ۱: مزایا و معایب زیست‌پالایی

ردیف	مزایا	معایب
۱	زیست‌پالایی از توانایی طبیعی میکروارگانیسم‌ها برای استخراج مواد شیمیایی از آب، خاک و رسوب با استفاده از انرژی نور خورشید بهره می‌برد.	فرآیند زیست‌پالایی کند است. زمان درمان معمولاً طولانی‌تر از سایر فناوری‌های اصلاحی است
۲	این روش مقرون به صرفه در مقایسه با سایر روش‌های درمان فیزیکی شیمیایی است	تمام مقادیر آلاینده‌ها را از سایت آلوده پاک نمی‌کند.
۳	انرژی کمتری در مقایسه با سایر فناوری‌ها مورد نیاز است	زیست‌پالایی برای تصفیه آلاینده‌های معدنی یا هر ترکیب آلی مفید نیست
۴	غالباً نیاز به عملیات کمی یا بدون نیاز به درمان (treatment) باقیمانده است، در حالی که در تصفیه فیزیکی/شیمیایی، آلاینده‌ها اغلب فقط جدا می‌شوند.	برای زیست‌پالایی درجا سایت باید دارای خاک با نفوذپذیری بالا باشد
۵	به طور معمول هزینه کمتر برای پیاده‌سازی	ارزیابی عملکرد دشوار است زیرا سطح مشخصی از سایت "تمیز" وجود ندارد. و بنابراین مقررات معیارهای عملکرد نامشخص هستند. تعیین اینکه آیا آلاینده‌ها از بین رفته‌اند یا خیر، دشوار است.
۶	پاکسازی زیستی را می‌توان در محل انجام داد و اغلب هزینه کمتری دارد و اختلال در سایت در مقایسه با روش‌های مرسوم اصلاحی حداقل است.	در برخی موارد، برخی از ترکیبات ممکن است از طریق متابولیسم میکروبی به متابولیت‌ها / محصولات جانبی سمی (مانند TCE به وینیل کلرید) یا PAH ها به PAH های کمتر تجزیه پذیر (سرطان زا) تجزیه شوند. و اینها در صورت عدم کنترل ممکن است به آبهای زیرزمینی منتقل شوند
۷	افزایش پذیرش نظارتی و عمومی (Enhanced regulatory and public acceptance)	اگر از یک فرآیند خارج از محل استفاده شود، کنترل ترکیبات آلی فرار ممکن است دشوار باشد
۸	تثبیت خاک و کاهش آبشویی و انتقال ترکیبات آلی در خاک	برخی از مواد شیمیایی در معرض تجزیه زیستی نیستند، به عنوان مثال، فلزات سنگین، رادیونوکلیدها و برخی از ترکیبات کلردار.

<http://science-journals.ir>

### ۳.۵. ملاحظات در استفاده از زیست پالایی

قبل از اتخاذ زیست پالایی، ارزیابی تمام عناصر محدود کننده ای که می‌توانند بر اثربخشی فرآیند اصلاح تاثیر بگذارند بسیار مهم است [۴۲]. بدیهی است که انتخاب یک فناوری به الزامات خاص سایت بستگی دارد، مانند در دسترس بودن میکروارگانیسم‌ها، در دسترس بودن مواد مغذی و همچنین پارامترهای محیطی مانند دما و مدت زمان در معرض قرار گرفتن [۱]. مناسب بودن گونه‌های میکروبی برای نوع خاصی از آلاینده باید قبل از کاربرد مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین باید قبل از استفاده از زیست پالایی، حداکثر سطح غلظتی که توسط این تکنیک انجام می‌شود در مقیاس بزرگ مطالعه شود. عمق نفوذ گونه‌های میکروبی، بقای آنها در آن عمق، تامین مواد مغذی، شرایط بهینه در یک نوع خاک مشخص باید قبل از انجام تصفیه و اصلاح محیط تجزیه و تحلیل شود [۶۵].

آگاهی از آلاینده‌ها و شرایط محل، انتخاب و طراحی تکنیک مناسب موفقیت اصلاح و تصفیه را تعیین می‌کند [۱۷ و ۴۱]. بنابراین پاکسازی زیستی موفقیت آمیز آلاینده‌های نفتی در خاک به پارامترهای محیط‌زیستی و عوامل عملیاتی متعددی بستگی دارد که همه آنها باید به منظور دستیابی به حداکثر تصفیه آلاینده بهینه شوند. حتی در شرایط بهینه نیز بعید است که تمام اجزای هیدروکربنی از خاک حذف شوند. این تجزیه‌زیستی ناقص ممکن است قابل قبول باشد در صورتی که نشان داده شود هیدروکربن‌های باقیمانده تأثیر قابل توجهی بر گیرنده‌های اکولوژیکی ندارند و خطری برای منابع آب زیرزمینی ایجاد نمی‌کنند [۳۰].

به طور کلی ویژگی‌های زمین‌شناسی سایت آلوده شامل نوع خاک، عمق و نوع آلاینده، موقعیت سایت نسبت به سکونت انسان و ویژگی‌های عملکردی هر تکنیک تصفیه زیستی باید در تصمیم‌گیری مناسب‌ترین و کارآمدترین روش برای پالایش سایت‌های آلوده در نظر گرفته شود [۷]. با این وجود، توجه به این نکته حائز اهمیت است که هیچ فناوری اصلاحی به تنهایی بهترین راه حل برای اصلاح خاک‌های آلوده به نفت در نظر گرفته نمی‌شود [۱۴ و ۴۱].

### ۴. نتیجه‌گیری کلی

مطالعه زیست‌پالایی نفت و کاربردهای عملی آن، جهت‌گیری‌های کلیدی در اکولوژی کاربردی (علوم محیطی) است [۶۶] و پیشرفت‌های اخیر در مهندسی ژنتیک، ارتقای فن‌آوری و استفاده از فناوری نانو این امید را ایجاد کرده است که پاکسازی زیستی میکروبی می‌تواند به طور موثر مسائل مربوط به آلودگی نفتی را در مقیاس وسیع در آینده نزدیک حل کند [۱۷]. از طرفی تکنیک‌های مدرن زیست‌پالایی نیاز به سرمایه‌هنگفت و کارگران ماهر دارد، دانشمندان در تلاش هستند تا ابزارها و روش‌های ارزان تری را توسعه دهند که بتواند آلاینده‌ها را از خاک حذف کند تا سلامت خاک را به روشی پایدار بهبود بخشد [۷۴].

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مطالعات موجود، این موضوع استنتاج می‌شود که زیست‌پالایی روشی مقرون به صرفه اقتصادی و دوستدار محیط زیست جهت پاکسازی آلاینده‌های نفتی از خاک و گاه آب‌های زیرزمینی است. با این وجود توجه به این نکته حائز اهمیت می‌باشد که این روش با وجود مزایای متعدد، محدودیت‌هایی نیز دارد و در به کارگیری از این روش‌ها فرآیند اصلاح خاک بایستی به ملاحظات مرتبط آن توجه گردد. در واقع زیست‌پالایی تنها گزینه در زمینه تصفیه نیست و نیاز می‌باشد که این روش بمنظور ارتقا و افزایش راندمان و همچنین بمنظور کاهش هزینه‌ها، مطالعه شود. از طرفی لازم است که کاربرد این روش در ترکیب با سایر روش‌ها فیزیکی و شیمیایی نیز بررسی گردد.

## منابع و مراجع

- 1) Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), 28-39.
- 2) Ahmad, J., Marsidi, N., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Othman, A. R., Izzati 'Ismail, N., & Kurniawan, S. B. (2023). Integrating phytoremediation and mycoremediation with biosurfactant-producing fungi for hydrocarbon removal and the potential production of secondary resources. *Chemosphere*, 140881
- 3) Akpasi, S.O.; Anekwe, I.M.S.; Tetteh, E.K.; Amune, U.O.; Shoyiga, H.O.; Mahlangu, T.P.; Kiambi, S.L. Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—A Review. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4978. <https://doi.org/10.3390/app13084978>
- 4) American Petroleum Institute. Land treatment practice in the petroleum industry. Report prepared by Environmental Research and Technology, Washington DC., United States, 1983.
- 5) Anekwe, I. M. S., & Isa, Y. (2024). Application of biostimulation and bioventing system as bioremediation strategy for the treatment of crude oil contaminated soils. *Soil & Water Research*, 19(2).
- 6) Apul, O. G., Arrowsmith, S., Hall, C. A., Miranda, E. M., Alam, F., Dahlen, P., & Delgado, A. G. (2022). Biodegradation of petroleum hydrocarbons in a weathered, unsaturated soil is inhibited by peroxide oxidants. *Journal of Hazardous Materials*, 433, 128770.
- 7) Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32, 1-18.
- 8) B. Ravindran, D.D. Nguyen, D.K. Chaudhary, S.W. Chang, J. Kim, J.J. Lee Influence of biochar on physico-chemical and microbial community during swine manure composting process *J. Environ. Manag.*, 232 (2019), pp. 592-599, 10.1016/j.jenvman.2018.11.119
- 9) Benamar, A.; Ammami, M.T.; Song, Y.; Portet-Koltalo, F. Scale-up of Electrokinetic Process for Dredged Sediments Remediation. *Electrochim. Acta* 2020, 352, 136488.
- 10) Bosco, F., & Mollea, C. (2019). Mycoremediation in soil. *Environmental chemistry and recent pollution control approaches*, 173.
- 11) Ceballos-Escalera A, Pous N, Chiluiza- Ramos P, Korth B, Harnisch F, Bañeras L, Balaguer MD, Puig S. Electro-bioremediation of nitrate and arsenite polluted groundwater. *Water Research (Oxford)*. 2021; 190:116748. Available:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116748>.
- 12) Cetin, M., Aljama, A. M. O., Alrabiti, O. B. M., Adiguzel, F., Sevik, H., & Zeren Cetin, I. (2022). Using topsoil analysis to determine and map changes in Ni Co pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 293.
- 13) COMBAT, B. A. A. S. T. (2024). BIOREMEDIATION AS A STRATEGY TO COMBAT SOIL POLLUTION.
- 14) Cristorean, C., Micle, V., & Sur, I. M. (2016). A critical analysis of ex-situ bioremediation technologies of hydrocarbon polluted soils. *ECOTERRA J. Environ. Res. Prot*, 13, 17-29.
- 15) Das, S., and Dash, H. R. (2014). *Microbial Biodegradation and Bioremediation: A Potential Tool for Restoration of Contaminated Areas*, Chap. 1. London: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- 16) Dhanapal, A. R., Thiruvengadam, M., Vairavanathan, J., Venkidasamy, B., Easwaran, M., & Ghorbanpour, M. (2024). Nanotechnology approaches for the remediation of agricultural polluted soils. *ACS omega*, 9(12), 13522-13533.
- 17) Elshafei, A.M., Mansour, R. Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discov. Soil* 1, 9 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00004-5>.
- 18) EPA 2014. Best Practice Note: Landfarming. Environment Protection Authority, April 2014, ISBN 978-1-74359-607-4 ID EPA20140323
- 19) Erdogan, E., & Karaca, A. (2011). Bioremediation of crude oil polluted soils. *Asian Journal of Biotechnology*, 3(3):206–213, 2011.
- 20) Ezeji, U., Anyadoh, S. O., & Ibeke, V. I. (2007). Clean up of crude oil-contaminated soil. *Terrestrial and Aquatic Environmental Toxicology*, 1(2), 54-59.
- 21) F. I. Khan, T. Husain, and R. Hejazi. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of environmental management*, 71:95–122, 2004.
- 22) Fatichi, S., Or, D., Walko, R., Vereecken, H., Young, M. H., Ghezzehei, T. A., ... & Avissar, R. (2020). Soil structure is an important omission in Earth System Models. *Nature communications*, 11(1), 522
- 23) Genovese, M., Denaro, R., Cappello, S., Di Marco, G., La Spada, G., Giuliano, L., Genovese, L., Yakimov, M., 2008. Bioremediation of benzene, toluene, ethyl-benzene, xylenes-contaminated soil: a biopile pilot experiment. *J. Appl. Microbiol.* 105, 1694e1702.
- 24) Germaine, K. J., Byrne, J., Liu, X., Keohane, J., Culhane, J., Lally, R. D., ... & Dowling, D. N. (2015). Ecopiling: a combined phytoremediation and passive biopiling system for remediating hydrocarbon impacted soils at field scale. *Frontiers in Plant Science*, 5, 756.
- 25) Gomez, F., & Sartaj, M. (2014). Optimization of field scale biopiles for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil at low temperature conditions by response surface methodology (RSM). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 89, 103-109.
- 26) Goswami, M., Baruah, N. P., & Devi, A. (2024) Bioremediation: A Prospective Tool for the Refurbishment of the Petroleum-Contaminated Areas. In *Recalcitrant Pollutants Removal from Wastewater* (pp. 84-103). CRC Press.
- 27) Hejazi, R.F, Husain T., and Khan F.I., (2003). Land farming Operation of oily sludge in arid region - human risk assessment. *J. Hazard material* -[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00062](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00062).
- 28) Hoepfel, R. E., Hincee, R. E., & Arthur, M. F. (1991). Bioventing soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*, 8(3), 141-146.
- 29) Hoff, R.Z. Bioremediation: An overview of its development and use for oil spill cleanup. *Mar. Pollut. Bull.* 1993, 26, 476–481.
- 30) Huesemann, M. H. (2004). Biodegradation and bioremediation of petroleum pollutants in soil. In *Applied Bioremediation and Phytoremediation* (pp. 13-34). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 31) Hussain, A., Rehman, F., Rafeeq, H., Waqas, M., Asghar, A., Afsheen, N., & Iqbal, H. M. (2022). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air—A review. *Chemosphere*, 289, 133252.

<http://science-journals.ir>

- 32) Jabbar, N. M., Mohammed, A. K., & Kadhim, E. H. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil using bio piles system. *Baghdad Science Journal*, 16(1 Supplement).
- 33) Jørgensen, K. S., Puustinen, J., & Suortti, A. M. (2000). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental pollution*, 107(2), 245-254.
- 34) Kamath, R., Rentz, J. A., Schnoor, J. L., & Alvarez, P. J. J. (2004). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and applications. In *Studies in surface science and catalysis* (Vol. 151, pp. 447-478). Elsevier.
- 35) Kao, C. M., Chen, C. Y., Chen, S. C., Chien, H. Y., & Chen, Y. L. (2008). Application of in situ biosparging to remediate a petroleum-hydrocarbon spill site: Field and microbial evaluation. *Chemosphere*, 70(8), 1492-1499.
- 36) Keet, Ben A., 1995, "Bioslurping State of the Art," In *Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons*, Robert E. Hinchee, Jeffrey A. Kittel, and H. James Reisinger, Eds., Battelle Press, Columbus, OH.
- 37) Kensa, V. M. (2011). Bioremediation-an overview. *Journal of Industrial Pollution Control*, 27(2), 161-168.
- 38) Koshlaf, E., & Ball, A. S. (2017). Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS microbiology*, 3(1), 25.
- 39) Kumar, V., Shahi, S. K., & Singh, S. (2018). Bioremediation: an eco-sustainable approach for restoration of contaminated sites. *Microbial bioprospecting for sustainable development*, 115-136.
- 40) Lan, J., Wen, F., Ren, Y., Liu, G., Jiang, Y., Wang, Z., & Zhu, X. (2023). An overview of bioelectrokinetic and bioelectrochemical remediation of petroleum-contaminated soils. *Environmental science and ecotechnology*, 16, 100278.
- 41) Lim, M. W., Von Lau, E., & Poh, P. E. (2016). A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil—present works and future directions. *Marine pollution bulletin*, 109(1), 14-45.
- 42) Maletić, S.P.; Dalmacija, B.D.; Rončević, S.D.; Agbaba, J.R.; Perović, S.D.U. Impact of hydrocarbon type, concentration and weathering on its biodegradability in soil. *J. Environ. Sci. Health Part A* 2011, 46, 1042–1049.
- 43) Mokrani, S., Houali, K., Yadav, K. K., Arabi, A. I. A., Eltayeb, L. B., AwjanAlreshidi, M., ... & Nabti, E. H. (2024). Bioremediation techniques for soil organic pollution: Mechanisms, microorganisms, and technologies-A comprehensive review. *Ecological Engineering*, 207, 107338.
- 44) Moses, H., Odigure, J. O., & Otaru, A. J. (2024). Ecotoxicological assessment of nano-remediated crude oil contaminated soil using *Zea mays*. *Results in Engineering*, 23, 102612.
- 45) Nag, M., Lahiri, D., Ghosh, S., Sarkar, T., Pati, S., Das, A. P., ... & Ray, R. R. (2024). Application of microorganisms in biotransformation and bioremediation of environmental contaminant: a review. *Geomicrobiology Journal*, 41(4), 374-391.
- 46) Nagkirti, P., Shaikh, A., Vasudevan, G., Paliwal, V., & Dhakephalkar, P. (2017). Bioremediation of terrestrial oil spills: Feasibility Assessment. Optimization and applicability of bioprocesses, 141-173.
- 47) Nanda, M., Agrawal, S., & Shahi, S. K. (2024). Application of Green Synthesized Nanomaterials for Environmental Waste Remediation: A Nano-Bioremediation Strategy. In *Green Solutions for Degradation of Pollutants* (pp. 151-181). Bentham Science Publishers.
- 48) Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., Méndez, A., & Reichman, S. M. (2018). Soil pollution and remediation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1657.
- 49) Peng, S., Zhou, Q., Cai, Z., & Zhang, Z. (2009). Phytoremediation of petroleum contaminated soils by *Mirabilis Jalapa* L. in a greenhouse plot experiment. *Journal of hazardous materials*, 168(2-3), 1490-1496.
- 50) Phiri, R., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2023). Agro-waste for renewable and sustainable green production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 139989.
- 51) Pinedo, J., Ibáñez, R., Lijzen, J. P. A., & Irabien, A. (2013). Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances. *Journal of environmental management*, 130, 72-79.
- 52) Porcino, N., Crisafi, F., Catalfamo, M., Denaro, R., & Smedile, F. (2024). Electrokinetic Remediation in Marine Sediment: A Review and a Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 16(11), 4616.
- 53) Ptaszek, N., Pacwa-Płociniczak, M., Noszczyńska, M., & Płociniczak, T. (2020). Comparative Study on Multiway Enhanced Bio- and Phytoremediation of Aged Petroleum-Contaminated Soil. *Agronomy*, 10(7), 947. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070947>.
- 54) Qi, Z., Han, Y., Afrane, S., Liu, X., Zhang, M., Crittenden, J., & Mao, G. (2023). Patent mining on soil pollution remediation technology from the perspective of technological trajectory. *Environmental Pollution*, 316, 120661.
- 55) Ren, X., Zeng, G., Tang, L., Wang, J., Wan, J., Wang, J., & Peng, B. (2018). The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation. *Waste management*, 72, 138-149.
- 56) Robles-González, I. V., Fava, F., & Poggi-Valardo, H. M. (2008). A review on slurry bioreactors for bioremediation of soils and sediments. *Microbial Cell Factories*, 7, 1-16.
- 57) Sakshi, Singh, S. K., & Haritash, A. K. (2019). Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 6489-6512.
- 58) Sales da Silva, I. G., Gomes de Almeida, F. C., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Casazza, A. A., Converti, A., & Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13(18), 4664.
- 59) Samanth, M. (2024). An inclusive evaluation of soil pollution and its remediation by chemical, physical and biological methods. *IJCS*, 12(4), 05-17.
- 60) Scullion, J. (2006). Remediating polluted soils. *Naturwissenschaften*, 93(2), 51-65.
- 61) Semple, K. T., Reid, B. J., & Fermor, T. R. (2001). Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental pollution*, 112(2), 269-283.
- 62) Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects. In *Trace metals in the environment-new approaches and recent advances*. IntechOpen.



- 63) Shirdam, R., Zand, A. D., Bidhendi, G. N., & Mehrdadi, N. (2008). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils with emphasis on the effect of petroleum hydrocarbons on the growth of plant species. *Phytoprotection*, 89(1), 21-29.
- 64) Sims, R. C., & Sims, J. L. (2003). Landfarming Framework for Sustainable Soil Bioremediation. In *The Utilization of Bioremediation to Reduce Soil Contamination: Problems and Solutions* (pp. 319-334). Dordrecht: Springer Netherlands.
- 65) Sravya, K., & Sangeetha, S. (2022). Feasibility study on bioremediation techniques to contaminated soils. *Materials Today: Proceedings*, 51, 2556-2560.
- 66) Stepanova, A.Y.; Gladkov, E.A.; Osipova, E.S.; Gladkova, O.V.; Tereshonok, D.V. Bioremediation of Soil from Petroleum Contamination. *Processes* 2022, 10, 1224. <https://doi.org/10.3390/pr10061224>.
- 67) Stroud, J. L., Paton, G. I., & Semple, K. T. (2007). Microbe- aliphatic hydrocarbon interactions in soil: implications for biodegradation and bioremediation. *Journal of applied microbiology*, 102(5), 1239-1253.
- 68) Suresh, J. I., & Judith, A. (2024). Comparison between Traditional and Nanoremediation Technology with a Special Reference to Soil and Heavy Metal Contamination. In *Nano-phytoremediation and Environmental Pollution* (pp. 97-109). CRC Press.
- 69) Tekere, M., Jacob-Lopes, E., & Zepka, L. Q. (2019). Microbial bioremediation and different bioreactors designs applied. *Biotechnology and bioengineering*, 1-19.
- 70) Tran, H. T., Lin, C., Bui, X. T., Ngo, H. H., Cheruiyot, N. K., Hoang, H. G., & Vu, C. T. (2021). Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 753, 142250.
- 71) Unimke, A., Okezie, O., Mohammed, S. A. E., Mmuogbulam, A. O., Abdulahi, S., Ofon, U. A., ... & Ayanda, O. S. (2024). Microbe-plant-nanoparticle interactions: role in bioremediation of petroleum hydrocarbons. *Water Science & Technology*, wst2024362.
- 72) Usman, S. (2024). Bioremediation techniques for the management of agricultural soils contamination by oil spilling. *Bulgarian Journal of Soil Science Agrochemistry and Ecology*, 58(2), 25-36.
- 73) Varjani, S. J. (2017). Remediation processes for petroleum oil polluted soil. *Indian Journal of Biotechnology*, 16(2), 157-163.
- 74) Verma, S., Verma, P., Bag, A. G., & Changade, N. M. (2024). Reviewing Soil Contaminant Remediation Techniques. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(5), 115-134.
- 75) Wang S, Guo S. Effects of soil organic carbon metabolism on electro- bioremediation of petroleum-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials (Print)*. 2023; 459:132180. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132180>.
- 76) Wang, F., Sun, J., Pang, R., Xiao, X., Wang, X., & Lou, H. (2024). Bio-slurry-based biodegradation technology for organically contaminated soils: current work and future directions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 112033.
- 77) Wang, J., Zhang, Z., Su, Y., He, W., He, F., & Song, H. (2008). Phytoremediation of petroleum polluted soil. *Petroleum science*, 5, 167-171.
- 78) Wang, L., Chen, G., Du, X., Li, M., Zhang, Z., Liang, H., & GAO, D. (2024). Bioremediation of PAHs-contaminated site in a full-scale biopiling system with immobilized enzymes: Removal efficiency and microbial communities. *Environmental Research*, 262, 119763.
- 79) Yadav, R., Yadav, S., & Devi, G. (2024). Bioremediation: A Pathway to Restoring Our Water and Soil. *Just Agriculture*, Vol. 5 Issue- 2, October 2024, (e-ISSN: 2582-8223).
- 80) Yuniati, M. D. (2018, February). Bioremediation of petroleum-contaminated soil: A Review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, p. 012063). IOP Publishing.
- 81) Zouboulis, A. I., Moussas, P. A., & Nriagu, E. C. J. O. (2011). Groundwater and Soil Pollution: Bioremediation. *Encyclopedia of Environmental Health* pp. 1037-1044.

۸۲) س. رجایی، ف. رئیس، و س. سیدی. (۱۳۹۱). زیست پالایی خاک آلوده به نفت خام مسن به روش‌های افزایش بیولوژیک و گیاه پالایی. آب و خاک، ۲۶(۴).  
doi: 10.22067/jsw.v0i0.15295.۹۰۸-۹۲۱

۸۳) خ. صدیق بیان، م. مظاهری اسدی، ع. فرازمنند، ع. منادی سفیدان و ن. علی اصغر زاد. (۱۳۹۵). بررسی زیست پالایی ترکیبات آروماتیک نفتی با میکروارگانیسم‌های خاک در شهر تبریز. نشریه محیط زیست طبیعی ۳(۳)۶۹. ۷۵۷-۷۷۱.  
doi: 10.22059/jne.2016.61878.۷۵۷-۷۷۱

۸۴) ا. کمبری، و م. فرشادفر. (۱۳۹۱). فناوری نوین گیاه پالایی برای ایجاد محیط زیست پایدار. فصل نامه علمی-پژوهشی زیستی، ۵(۲)، ۱۲۱-۱۰۷.

۸۵) ه. کوهکن، ا. گلچین، م. مرتضوی، ر. همتی و ف. شهریاری. (۱۳۹۸). کاهش آلودگی نفتی در خاک به روش‌های گیاه پالایی، زیست پالایی و گیاه پالایی زیست‌افزونی شده. تحقیقات آب و خاک ایران ۵۰(۱۰)، ۲۶۶۰-۲۶۴۵.  
doi: 10.22059/ijswr.2019.278721.668157

۸۶) ا. نعمتی، ا. گلچین و ا. قویدل. (۱۳۹۸). بررسی اثرات کاربرد توام گیاه پالایی و زیست پالایی در یک خاک آلوده به نفت خام. آب و خاک، ۳۳(۴)، ۵۷۹-۵۹۰.  
doi: 10.22067/jsw.v0i0.76812

۸۷) ا. نعمتی، ا. گلچین و ا. قویدل. (۱۴۰۰). اثرات گیاه پالایی و زیست پالایی بر حذف و انتقال هیدروکربن‌های نفتی در یک خاک آلوده به نفت خام. تحقیقات آب و خاک ایران ۵۲(۱)، ۲۷۱-۲۶۱.  
doi: 10.22059/ijswr.2020.308482.668708