دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۲۸-۱

"مقاله مروری"

فناوری زیست پالایی: یک راهکار قابل اعتماد و سازگار با محیط زیست برای احیای محیط‌های آلوده

محمد صفری[۱]، نسیم موسی خانی[۲]، احمد اصل هاشمی[۳]، غلامحسین صفری[۳،۴*]

۱. دانشکده پزشکی، واحدکرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران
۲. کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۳. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
۴. مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hsafari13@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵)

چکیده

آلودگی محیط‌زیست در چندین دهه اخیر به دلیل گسترش فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است. صنعتی‌شدن جهانی و روش‌های کشاورزی مدرن، به بروز آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین منجر شده است. فناوری زیست‌پالایی یک استراتژی کلیدی برای مواجهه با چالش‌های متنوع ناشی از آلودگی محیطی است که از توان میکروارگانیسم‌ها برای پاک‌سازی و حفاظت از اکوسیستم‌ها و حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آلوده بهره می‌برد. زیست‌پالایی فرآیندی است که شامل کاهش، حذف، تغییر و تبدیل آلاینده‌ها در محیط‌های طبیعی نظیر خاک، رسوبات، هوا و آب با استفاده از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، گیاهان یا آنزیم‌های آن‌ها به منظور بازگرداندن محیط آسیب‌دیده به شرایط اولیه است. فناوری‌های زیست‌پالایی را می‌توان به دو دسته اصلی درجا و دگرجا تقسیم‌بندی کرد. زیست‌پالایی درجا به تصفیه آلاینده‌ها در محل آلوده اختصاص دارد، در حالی که زیست‌پالایی دگرجا شامل جمع‌آوری و انتقال مواد آلوده به محل دیگری برای تصفیه است. روش‌های زیست‌پالایی درجا شامل تزریق زیستی، تهویه زیستی، تحریک زیستی، مکش زیستی، تقویت زیستی و گیاه‌پالایی هستند. از طرفی، روش‌های دگرجا شامل تصفیه به کمک زمین، کمپوست‌سازی، توده‌های بیولوژیکی، فیلترهای زیستی، راکتورهای زیستی و روش ویندرو می‌باشند. با وجود مزایای فراوان این فناوری نظیر پایداری، هزینه کم و سازگاری با محیط‌زیست، زیست‌پالایی با چالش‌های مهمی مانند ویژگی‌های بیولوژیکی، تنوع زیست‌محیطی، ناهمگونی سایت‌ها، مشکلات مقیاس‌پذیری و موانع نظارتی روبرو است. برای مواجهه با این چالش‌ها، تحقیق، توسعه و مدیریت چندرشته‌ای ضروری است. این مقاله یک مرور جامع از زیست‌پالایی، اهداف، اصول، روش‌ها، عوامل مؤثر، مزایا و چالش‌های پیش روی آن و همچنین چشم‌اندازهای آتی این فناوری را ارائه می‌دهد و بر نیاز به تحقیقات مستمر برای بهینه‌سازی و گسترش کاربرد آن تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیط زیست، میکروارگانیسم‌ها، تجزیه زیستی، زیست پالایی درجا، زیست پالایی دگرجا

مقدمه

افزایش صنعتی شدن جهانی و شیوه‌های کشاورزی مدرن منجر به افزایش بروز آلاینده‌های خاک مانند هیدروکربن‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین شده است که همه آن‌ها با مشکلات بهداشتی نامطلوب مرتبط هستند. اصلاح خاک‌های آلوده نه‌تنها برای احیای اکوسیستم بلکه برای توسعه شهری نیز ضروری است. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای اصلاح خاک استفاده شده است. زیست پالایی یا فرآیندهای شامل فرآیندهای بیولوژیکی به‌سرعت به‌عنوان فناوری‌های تصفیه مؤثر نه‌تنها به دلیل کارایی بلکه به دلیل سازگاری با محیط زیست و مقرون‌به‌صرفه بودن در حال استفاده هستند. این فرآیند قادر به تخریب انواع مختلفی از آلاینده‌ها ازجمله هیدروکربن‌های معطر پایدار است. ازاین‌رو، زیست پالایی یک فناوری مناسب و مؤثر برای کاهش آلاینده‌های خاک است (۲و۱).

فرایندهای تصفیه بیولوژیکی و استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مقایسه با سایر فرایندهای تصفیه، به‌عنوان روشی مهم در حذف آلاینده‌های مقاوم در خاک، آب و رسوبات عمل می‌کنند. اصطلاحات زیست پالایی و تجزیه زیستی واژه‌های قابل تفویض‌تری هستند. فرایندهای تصفیه بیولوژیکی و استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مقایسه با سایر فرایندهای تصفیه، به‌عنوان روشی مهم در حذف آلاینده‌های مقاوم در خاک، آب و رسوبات عمل می‌کنند. میکروارگانیسم‌ها در حال بازسازی محیط طبیعی اولیه و جلوگیری از آلودگی بیش‌تر هستند (۳).

میکروارگانیسم‌ها به‌طور گسترده در بیوسفر توزیع می‌شوند زیرا توانایی متابولیک آن‌ها بسیار چشم‌گیر است و می‌توانند به‌راحتی در طیفی از شرایط محیطی رشد کنند. تطبیق‌پذیری تغذیه‌ای میکروارگانیسم‌ها نیز می‌تواند برای تجزیه زیستی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این نوع فرآیند به‌عنوان زیست پالایی نامیده می‌شود. در این فرایند از توانایی میکروارگانیسم‌های خاص برای تبدیل، اصلاح و استفاده از آلاینده‌های سمی به‌منظور به دست آوردن انرژی و تولید زیست‌توده استفاده می‌شود. به‌جای جمع‌آوری ساده آلاینده و ذخیره آن، زیست پالایی یک فعالیت سازمان‌یافته میکروبیولوژیکی است که برای تجزیه یا تبدیل آلاینده‌ها به اشکال عنصری و ترکیبی کم‌تر سمی یا غیرسمی به کار می‌رود. اصلاح‌کننده‌های زیستی[1] عوامل بیولوژیکی هستند که برای زیست پالایی و تمیز سازی مکان‌های آلوده استفاده می‌شوند. باکتری‌ها، باستانیان (آرکی‌ها)[2] و قارچ‌ها پاک‌کننده‌های زیستی اولیه هستند (۴).

فناوری زیست پالایی فرآیند کاهش، حذف، تغییر و تبدیل آلاینده‌های موجود در محیط طبیعی مانند خاک، رسوبات، هوا و آب از طریق استفاده از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، گیاهان سبز یا آنزیم‌های آن‌ها برای بازگرداندن محیط طبیعی تغییر یافته توسط آلاینده‌ها به شرایط اولیه است. زیست پالایی، یک فناوری پیشرفته و سازگار با محیط زیست در مدیریت مواد زائد است که از میکروارگانیسم‌های بیولوژیکی طبیعی برای تجزیه مواد خطرناک به اشکال کمتر سمی یا غیر سمی استفاده می‌کند (۲و۱). زیست پالایی

[1] Bioremediators
[2] Archaea

مؤثرترین ابزار مدیریتی برای مدیریت محیط‌های آلوده و بازیابی خاک‌آلوده است. این رویکرد قابل‌اعتماد و سازگار با محیط زیست به‌سرعت در تحقیقات زیست‌محیطی محبوبیت پیدا کرده است. دانشمندان در توسعه فناوری‌های مختلف زیست پالایی برای بازیابی مکان‌های آلوده موفق بوده‌اند. فناوری‌های زیست پالایی را می‌توان در پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی، خاک‌ها و تالاب‌های آلوده و همچنین تصفیه جریان‌های پسماند و لجن به کار برد. با استفاده مناسب از میکروب‌های طبیعی و اصلاح‌شده و فرآیندهای آن‌ها و همچنین مدل‌ها یا طرح‌های مهندسی مناسب برای ایجاد یک محیط رشد مطلوب، می‌توان فناوری‌های زیست پالایی را با موفقیت در سایت‌های آلوده به‌کار برد (۵-۲).

هدف اصلی این مقاله مروری، برجسته کردن ویژگی‌های زیست پالایی و اصول آن، روش‌های مختلف زیست پالایی، یعنی مقوله‌های اصلاح در محل و خارج از محل، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها، چشم اندازهای آتی و فعلی فناوری زیست پالایی است که به خوانندگان در انتخاب فناوری مناسب در پاک‌سازی و احیای محیط زیست کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک مطالعه توصیفی- مروری است که داده‌های آن از طریق مطالعات کتابخانه‌ای به دست آمده و از منابع مختلف به منظور پردازش مطالب استفاده شده است. با توجه به اهمیت زیست پالایی به عنوان یک فناوری نوآورانه و سازگار با محیط زیست سعی گردید تا حد امکان از مرتبط‌ترین و به‌روزترین منابع حاوی نکات ارزنده در رابطه با انواع روش‌های زیست پالایی و کاربرد آن‌ها در پاکسازی محیط زیست استفاده شود. در این مطالعه مروری، اهداف، اصول و عوامل موثر بر زیست پالایی، استراتژی‌ها، انواع روش‌ها، نظارت بر زیست پالایی، مزایا و چالش‌های پیش روی آن و جنبه‌های آتی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

اهداف زیست پالایی

تصفیه بیولوژیکی، زیست پالایی، رویکرد مشابهی است که برای تصفیه پسماندها از جمله فاضلاب، پسماندهای صنعتی و مواد زائد جامد استفاده می‌شود. هدف از زیست پالایی این است که غلظت آلاینده را حداقل به سطوح زیر حد تشخیص، غیر سمی یا قابل قبول یعنی در محدوده تعیین شده توسط سازمان‌های نظارتی کاهش دهد یا در حالت ایده‌آل آلاینده‌های آلی را به دی‌اکسید کربن معدنی‌سازی[1] نماید (۶). به‌طور کلی اهداف کلیدی زیست پالایی عبارتند از:

- **بازیافت مواد زائد:** زیست پالایی در بازیافت فاضلاب، پساب‌های صنعتی، تصفیه خاک‌های آلوده استفاده می‌شود (۶).
- **سم‌زدایی آلاینده‌ها:** زیست پالایی از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان برای تبدیل مواد مضر به ترکیباتی با سمیت کم‌تر یا غیر سمی استفاده می‌کند. این فرآیند سم‌زدایی خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از مکان‌های آلوده را کاهش می‌دهد (۱).
- **معدنی‌سازی آلاینده‌های آلی:** هدف نهایی زیست پالایی، کانی‌سازی کامل آلاینده‌های آلی است. معدنی‌سازی شامل تجزیه مولکول‌های آلی پیچیده به اشکال عنصری مانند کربن، هیدروژن و چندین عنصر

[1] Mineralization

دیگر همراه با دی‌اکسید کربن، آب و زیست‌توده میکروبی است که درنتیجه آلاینده‌ها را به‌طور کامل از محیط حذف می‌کند (۶-۱)

- **احیای اکوسیستم‌ها:** با حذف آلاینده‌هایی که تعادل اکولوژیکی را مختل می‌کنند، زیست پالایی به بازیابی اکوسیستم‌های طبیعی می‌پردازد. این فرآیند شرایط لازم برای بقا و رشد موجودات مختلف، ارتقای تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم را دوباره برقرار می‌کند (۶-۱).

- **رویکرد پایدار و سازگار محیط‌زیست:** زیست پالایی ذاتاً پایدار و سازگار با محیط‌زیست است، زیرا از فرآیندهای بیولوژیکی طبیعی استفاده می‌کند، نیاز به مواد شیمیایی مضر را کاهش می‌دهد و اختلالات محیطی را در مقایسه با روش‌های اصلاح شیمیایی و فیزیکی سنتی به حداقل می‌رساند (۶-۱).

- **انطباق با استانداردهای نظارتی:** زیست پالایی تضمین می‌کند که سطوح آلاینده برای برآورده کردن محدودیت‌های نظارتی کاهش می‌یابد و از سلامت انسان و محیط‌زیست محافظت می‌کند. رعایت مقررات و استانداردها به‌منظور استفاده مجدد ایمن از سایت‌ها اصلاح‌شده برای مقاصد مسکونی، کشاورزی یا صنعتی ضروری است (۶-۱).

- **مقرون‌به‌صرفه بودن:** زیست پالایی اغلب ثابت می‌کند که مقرون به‌صرفه‌تر از روش‌های اصلاحی مرسوم است و معمولاً به منابع و انرژی کم‌تری نیاز دارد و ازنظر اقتصادی گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های پاک‌سازی محیطی در مقیاس بزرگ است (۶-۱).

اصول زیست پالایی

زیست پالایی به‌عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که در آن مواد زاید آلی از نظر بیولوژیکی تحت شرایط کنترل شده به محصولات بی‌ضرر یا به سطوحی کم‌تر از حد غلظت تعیین شده توسط مقامات نظارتی تجزیه می‌شوند. میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌ها مناسب هستند زیرا آنزیم‌هایی دارند که به آن‌ها اجازه می‌دهد از آلاینده‌های محیطی به‌عنوان غذا استفاده کنند. هدف از زیست پالایی ترغیب فعالیت میکروارگانیسم ها با تامین سطوح بهینه مواد مغذی و سایر مواد شیمیایی ضروری برای متابولیسم آن‌ها به‌منظور تجزیه یا سم‌زدایی ترکیباتی است که برای محیط زیست و موجودات زنده خطرناک هستند. تمام واکنش‌های متابولیک توسط آنزیم‌ها انجام می‌شود (۸و۷). این آنزیم‌ها به گروه اکسیدوردوکتازها، هیدرولازها، لیازها، ترانسفرازها، ایزومرازها و لیگازها تعلق دارند. بسیاری از آنزیم‌ها به دلیل میل ترکیبی سوبسترای غیراختصاصی و اختصاصی، ظرفیت تجزیه بسیار وسیعی دارند. برای اینکه زیست پالایی مؤثر باشد، میکروارگانیسم‌ها باید به‌طور آنزیمی به آلاینده‌ها حمله کرده و آن‌ها را به محصولات بی‌ضرر تبدیل کنند. از آنجایی‌که زیست پالایی تنها زمانی می‌تواند مؤثر باشد که شرایط محیطی اجازه رشد و فعالیت میکروبی را بدهد، کاربرد آن اغلب شامل دست‌کاری پارامترهای محیطی است تا رشد و تجزیه میکروبی با سرعت بیشتری انجام گردد (۱۰-۸).

زیست پالایی به‌طور طبیعی اتفاق می‌افتد و با اضافه کردن موجودات زنده و اصلاح‌کننده‌ها تقویت می‌شود. فناوری زیست پالایی اساساً مبتنی بر تجزیه زیستی است. منظور از این فناوری حذف کامل آلاینده‌های آلی سمی به ترکیبات بی‌ضرر یا ترکیبات طبیعی مانند دی‌اکسید کربن، آب و ترکیبات معدنی که برای زندگی انسان، حیوان، گیاه و آبزیان بی‌خطر هستند. مکانیسم‌ها

و مسیرهای متعددی برای تجزیه زیستی طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی مشخص‌شده است. به‌عنوان مثال، تجزیه زیستی در حضور و غیاب اکسیژن کامل می‌شود (۱۰).

شکل (۱): تصویری از اصول زیست پالایی

عوامل مؤثر بر زیست پالایی

- غلظت آلاینده

غلظت‌های آلاینده به‌طور مستقیم بر فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد. هنگامی‌که غلظت‌ها بیش از حد بالا باشد، آلاینده‌ها ممکن است اثرات سمی بر روی باکتری‌های موجود داشته باشند. در مقابل، غلظت کم آلاینده ممکن است از القای آنزیم‌های تجزیه‌کننده باکتری جلوگیری کند. سرعت تجزیه آنزیم‌های کاتابولیک را می‌توان با برهمکنش‌های هم افزایی بین اجزای مختلف آلاینده‌ها افزایش داد (۱۲و۱۱).

- فراهمی زیستی آلاینده

کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم نیاز اساسی برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند، غلظت مواد مغذی موجود به‌طور مستقیم بر تجزیه آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد. حضور بیش از حد نیتروژن، پتاسیم و فسفر تأثیر منفی بر تجزیه هیدروکربن‌ها دارد. سرعت پاک‌سازی زیستی را نیز می‌توان با آگاهی از دسترسی مواد آلی به میکروارگانیسم‌ها تعیین کرد؛ که به‌عنوان فراهمی زیستی شناخته می‌شود (۱۳و۱۲).

فراهمی زیستی آلاینده به میزان جذب آن‌ها به جامدات یا جدا شدن توسط مولکول‌ها در محیط‌های آلوده، انتشار در حفره‌های بزرگ خاک یا رسوب و عوامل دیگری مانند وجود آلاینده‌ها به شکل مایع فاز غیر آبی (NAPL[1]) بستگی دارد. فراهمی زیستی برای واکنش‌های میکروبی، برای آلاینده‌هایی که به شدت جذب مواد جامد می‌شوند، محصور در ماتریس‌های مولکول‌ها در محیط‌های آلوده می‌شوند، و به‌طور گسترده‌تر در منافذ بزرگ خاک و رسوبات منتشر می‌شوند و یا به شکل NAPL وجود دارند، کم‌تر است (۱۴و۱۳).

- تقویت فراهمی زیستی

عمدتاً از سورفکتانت‌های شیمیایی و با درجه غذایی در زیست پالایی برای افزایش آلاینده‌های آلی آب‌گریز استفاده می‌شود. علاوه بر این سورفکتانت‌های تولید شده توسط میکروب‌ها نیز برای کاهش آلاینده‌های محیطی استفاده می‌شوند (۱۴).

- ویژگی‌های مکان مورد نظر (سایت)[2]

ویژگی‌های سایت تأثیر قابل‌توجهی بر اثربخشی هر استراتژی زیست پالایی دارد. شرایط محیطی سایت که برای کاربردهای زیست پالایی مهم است شامل pH، دما، محتوای آب، در دسترس بودن مواد مغذی و

[1] Non-Aqueous Phase Liquids
[2] Site characterization

پتانسیل ردوکس است. شرایط محیطی موثر بر تجزیه آلاینده‌ها در جدول (۱) ارائه شده است (۱۶و۱۵).

- pH

pH بر حلالیت و در دسترس بودن بیولوژیکی مواد مغذی، فلزات و سایر اجزای تشکیل‌دهنده تأثیر می‌گذارد. برای رشد بهینه باکتری، pH باید در محدوده تحمل میکروارگانیسم‌های هدف باقی بماند. pH بهینه مورد نیاز برای فرآیند زیست پالایی بین ۶ تا ۸ متغیر است. pH خنثی برای تجزیه هیدروکربن‌های نفتی مناسب است در حالی که برخی از قارچ‌ها و میکروب‌های اسید دوست آلاینده‌ها را در محیط اسیدی تجزیه می‌کند (۱۶و۱۵).

- پتانسیل ردوکس و میزان اکسیژن

پتانسیل ردوکس و میزان اکسیژن شرایط اکسید کننده یا کاهش دهنده را مشخص می‌کند. پتانسیل ردوکس تحت تأثیر حضور گیرنده‌های الکترون مانند نیترات، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن و سولفات است. اکسیژن عامل بسیار مهمی برای تعیین میزان و سرعت تجزیه زیستی آلاینده‌ها است. تجزیه زیستی هوازی بسیار سریع‌تر از تجزیه زیستی بی‌هوازی است. برای تجزیه هوازی آلاینده‌های آلی، در دسترس بودن اکسیژن نقش مهمی ایفا می‌کند. در اکثر موارد، از افزودن پراکسید هیدروژن برای وارد کردن اکسیژن استفاده می‌شود. پراکسید هیدروژن حدود هفت برابر بیش‌تر از اکسیژن در آب حل می‌شود (۱۶و۱۵).

- مواد مغذی

مواد مغذی برای رشد و تقسیم سلول‌های میکروبی مورد نیاز است. مقادیر مناسبی از مواد مغذی نادر برای رشد میکروبی معمولاً وجود دارد، اما مواد مغذی را می‌توان به شکل قابل استفاده یا از طریق اصلاح و ترمیم سوبسترای آلی که به‌عنوان دهنده الکترون نیز عمل می‌کند، برای تحریک زیست پالایی اضافه کرد (۱۶و۱۵).

- دما

دما به‌طور مستقیم بر میزان متابولیسم میکروبی و در نتیجه فعالیت میکروبی در محیط تأثیر می‌گذارد. سرعت تجزیه زیستی با افزایش دما تا حدی افزایش می‌یابد و با کاهش دما کاهش می‌یابد. مشخص شده است که دمای بالاتر از ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس باعث افزایش زیست پالایی در خاک و همچنین در محیط‌های دریایی می‌شوند (۱۶و۱۵).

جدول (۱): شرایط محیطی موثر بر تجزیه آلاینده‌ها (۱۶)

پارامترها	شرایط مورد نیاز برای فعالیت میکروبی	مقدار بهینه برای تجزیه ترکیبات نفتی
رطوبت خاک	۲۸-۲۵ درصد ظرفیت نگهداری آب	۹۰-۳۰ درصد
pH خاک	۸/۸ - ۵/۵	۸ - ۶/۵
میزان اکسیژن	هوازی، حداقل هوا پرشده فضای منافذ ۱۰ درصد	۴۰-۱۰ درصد
میزان مواد مغذی	N و P برای رشد میکروبی	C:N:P = ۱۰۰:۱۰:۱
دما (°C)	۴۵ -۱۵	۲۰-۳۰
آلاینده‌ها	خیلی سمی نباشند	هیدروکربن ۱۰ - ۵ درصد وزن خشک خاک
فلزات سنگین	مقدار کل ۲۰۰۰ ppm	۷۰۰ ppm
نوع خاک	خاک با محتوای رس یا سیلت کم	-

مزایای زیست پالایی

– یک فرآیند تصفیه طبیعی است که برای تصفیه مواد زائد و پاک‌سازی محل‌های آلوده مانند خاک، به زمان کمی نیاز دارد. میکروب‌ها قادر به تجزیه آلاینده و افزایش تعداد آن‌ها در صورت وجود آلاینده هستند. هنگامی‌که آلاینده تجزیه می‌شود، جمعیت زیست تجزیه‌پذیر کاهش می‌یابد. بقایای تصفیه معمولاً محصولی بی‌ضرر از جمله دی‌اکسید کربن، آب و زیست‌توده سلولی هستند (۱۷).

– به تلاش بسیار کم‌تری نیاز دارد و اغلب می‌تواند در محل، بدون ایجاد اختلال عمده در فعالیت‌های عادی انجام شود. همچنین نیاز به حمل‌ونقل مواد زائد به خارج از محل و تهدیدات بالقوه ناشی از حمل‌ونقل برای سلامتی انسان و محیط زیست را از بین می‌برد (۱۷).

– در یک فرآیند مقرون‌به‌صرفه به کار می‌رود زیرا کم-تر از سایر روش‌های متداول (فناوری) که برای پاک‌سازی پسماندهای خطرناک استفاده می‌شود، هزینه کم‌تری دارد. روش مهمی برای تصفیه مکان‌های کوچک آلوده به نفت هست (۱۷).

– همچنین به از بین بردن کامل آلاینده‌ها کمک می‌کند. بسیاری از ترکیبات خطرناک را می‌توان به محصولات بی‌ضرر تبدیل کرد و این ویژگی همچنین احتمال مسئولیت آتی مرتبط با تصفیه و دفع مواد آلوده را از بین می‌برد (۱۸).

– از هیچ‌گونه مواد شیمیایی خطرناک استفاده نمی‌کند. مواد مغذی به‌ویژه اصلاح‌کننده‌هایی که برای رشد فعال و سریع میکروبی اضافه می‌شوند، معمولاً در چمن‌ها و باغ‌ها استفاده می‌شود. به دلیل تغییر ماهیت مواد شیمیایی مضر به آب و گازهای بی‌ضرر، مواد شیمیایی مضر به‌طور کامل از بین می‌روند (۱۸).

– ساده، کم‌کار و سهولت نسبی اجرا به دلیل نقش طبیعی آن‌ها در محیط زیست (۱۸و۱۰).

– مقرون‌به‌صرفه بودن، زیرا هزینه نصب و نگهداری بسیار پایین است (۱۹).

– سازگار با محیط زیست و پایدار بوده و از مقبولیت عمومی بیش‌تری برخوردار است (۱۹).

– آلاینده‌ها از بین می‌روند، نه اینکه به‌سادگی به محیط‌های مختلف منتقل شوند (۱۷).

– غیر مزاحم، به‌طور بالقوه امکان استفاده مداوم از سایت را فراهم می‌کند (۱۸و۱۷).

– روشی مؤثر برای پاک‌سازی اکوسیستم طبیعی از تعدادی آلودگی و عمل به‌عنوان گزینه‌های دوست‌دار محیط زیست (۲۰).

معایب زیست پالایی

– محدود به آن دسته از ترکیباتی است که زیست تجزیه‌پذیر هستند. همه ترکیبات مستعد تجزیه میکروبی سریع و کامل نیستند، مانند فلزات، آلاینده‌های آلی کلردار و رادیونوکلئیدها.

– برخی نگرانی‌ها وجود دارد که محصولات حاصل از تجزیه زیستی ممکن است پایدارتر یا سمی‌تر از ترکیب اصلی باشند. گاهی اوقات میکروب‌ها در طی متابولیسم آلاینده‌ها محصولات جانبی یا متابولیک‌های سمی تولید می‌کنند.

– فرآیندهای بیولوژیکی اغلب بسیار خاص هستند. عوامل مهمی از سایت، مانند وجود جمعیت‌های میکروبی متابولیکی با قابلیت متابولیسم، شرایط رشد

محیطی مناسب و سطوح مناسب مواد مغذی و آلاینده برای موفقیت زیست پالایی مورد نیاز هستند.

– زیست پالایی باید متناسب با شرایط مکان خاص باشد، یعنی قبل از اعمال این فناوری به منظور تصفیه سایت آلوده[1] واقعی، یک مطالعه قابل تصفیه باید در مقیاس کوچک انجام شود.

– تعمیم نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و آزمونه‌ای (نیمه‌صنعتی) به عملیات میدانی در مقیاس کامل دشوار است.

– برای توسعه و مهندسی فناوری‌های زیست پالایی مناسب برای مکان‌هایی با ترکیب‌های پیچیده از آلاینده‌ها که به‌طور یکنواخت در محیط پراکنده نشده‌اند، تحقیقات جامعی لازم است. آلاینده‌ها ممکن است به‌صورت جامد، مایع و گاز وجود داشته باشند.

– اغلب بیش‌تر از سایر گزینه‌های تصفیه از قبیل حفاری و حذف خاک یا سوزاندن، زمان می‌برد.

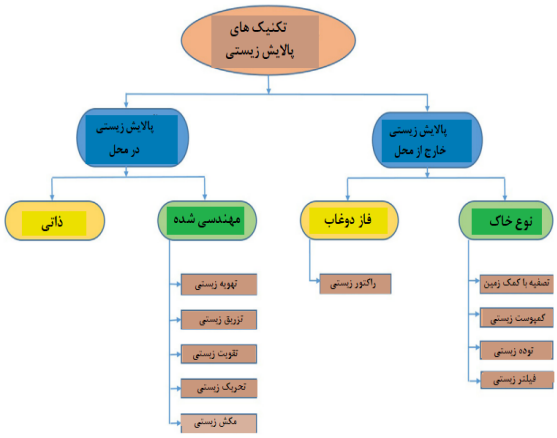
– عدم قطعیت نظارتی در مورد معیارهای عملکردی قابل‌قبول برای پاک‌سازی زیستی همچنان وجود دارد. هیچ تعریف قابل قبولی از پاک بودن وجود ندارد، ارزیابی عملکرد زیست پالایی دشوار است (۲۳–۲۱). خلاصه‌ای از انواع فناوری‌های زیست پالایی، به همراه مکانیسم، مزایا و معایب آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

طبقه‌بندی و انواع زیست پالایی

فرآیند زیست پالایی بر اساس منشأ، انتقال و حذف آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، به‌طورکلی به فرایندهای زیست پالایی درجا و زیست پالایی دگرجا طبقه‌بندی می‌شوند.

روش‌های اصلی برای توسعه زیست پالایی عبارتند از: تحریک زیستی[2]، تضعیف زیستی[3]، تقویت زیستی[4]، تهویه زیستی[5] و توده‌های بیولوژیکی[6] که عوامل محیطی را برای تکمیل فرایند زیست پالایی فراهم می‌نمایند.

ایده اصلی انواع زیست پالایی، مکانیسم‌ها، مزایا و معایب آن‌ها را می‌توان در جدول (۳) مشاهده کرد (۲۴–۲۱).



شکل (۲): انواع فناوری‌های پالایش زیستی (۲۱)

[1] Contaminanted site

[2] Biostimulation
[3] Bioattenuation
[4] Bioaugmentation
[5] Bioventing
[6] Biopiles

جدول (۲): خلاصه‌ای از مزایا و معایب زیست پالایی درجا و دگرجا (۲۴)

فناوری	مثال	مزایا	محدودیت‌ها	فاکتورهای مهم
درجا	تزریق زیستی تهویه زیستی تحریک زیستی تقویت زیستی	مقرون به صرفه‌ترین غیر تهاجمی نسبتاً منفعل فرآیند تضعیف طبیعی تصفیه خاک و آب	محدودیت‌های زیست محیطی طولانی شدن زمان تصفیه مشکلات نظارتی	توانایی‌های زیست تخریب پذیر میکروارگانیسم‌های بومی وجود فلزات و سایر مواد معدنی پارامترهای زیست محیطی زیست تخریب‌پذیری آلاینده‌ها حلالیت شیمیایی عوامل زمین‌شناسی توزیع آلاینده‌ها
دگرجا	تصفیه به کمک زمین کمپوست‌سازی توده‌های بیولوژیکی	مقرون به صرفه هزینه کم قابل انجام در محل	فضای مورد نیاز طولانی شدن زمان تصفیه نیاز به کنترل تلفات غیر زیستی مشکل انتقال انبوه محدودیت فراهمی زیستی	
بیورآکتورها	بیوراکتور دوغابی بیوراکتور آبی	سینتیک تجزیه سریع افزایش انتقال جرم استفاده مؤثر از تلقیح‌ها و سورفکتانت‌ها	نیاز به حفاری خاک هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا هزینه عملیاتی نسبتاً بالا	تقویت زیستی سمیت اصلاح‌کننده‌ها غلظت‌های سمی آلاینده‌ها

جدول (۳): خلاصه‌ای از انواع فناوری‌های زیست پالایی، مکانیسم، مزایا و معایب آن‌ها (۲۴-۲۱)

زیست پالایی	انواع	جزئیات فناوری	مزایا	معایب
درجا	تهویه زیستی	هوا و مواد مغذی از طریق چاه تأمین می‌شوند.	هزینه کم عملیات	زیست‌محیطی
	تزریق زیستی	هوا تحت فشار برای افزایش فعالیت میکروبی تزریق می‌شود.	نسبتاً منفعل	دوره طولانی تصفیه
	تقویت زیستی	میکروب‌های تخصصی و اصلاح‌شده ژنتیکی برای هدف قرار دادن آلاینده‌های خاص عرضه می‌شوند.	غیرتهاجمی	مشکلات در پایش و نظارت
دگرجا	تحریک زیستی	مواد مغذی برای بهینه‌سازی رشد و فعالیت جمعیت میکروبی طبیعی عرضه می‌شود.	فرایند تضعیف طبیعی قابلیت تصفیه خاک و آب آلوده	فضای مورد نیاز
	تصفیه به کمک زمین	خاک سطحی کشت می‌شود و آب و مواد غذایی به آن اضافه می‌شود	هزینه کم عملیات	
	کمپوست زیستی	تجزیه ضایعات آلی در حضور میکروب‌ها در شرایط هوازی و مواد مغذی بالا	سرعت واکنش سریع	نیاز به کنترل تلفات غیر زیستی
	توده‌های زیستی	ترکیبی از کمپوست‌سازی و تصفیه به کمک زمین است.	آلودگی کم آب‌های زیرزمینی	محدودیت فراهمی زیستی
	راکتورهای زیستی	در یک تانک، میکروارگانیسم‌ها واکنش بیولوژیکی را انجام می‌دهند.	محیط مساعدی را برای میکروب‌های بومی فراهم می‌کند. سرعت تجزیه بهتر میزان تجزیه بهتر افزایش نرخ انتقال جرم	نیاز به حفاری خاک هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا هزینه عملیاتی نسبتاً بالا

- زیست پالایی درجا

زیست پالایی درجا به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه در نظر گرفته می‌شود زیرا تصفیه آلاینده‌ها در مکان‌های آلوده واقعی بدون هیچ‌گونه حفاری یا مزاحمتی انجام می‌شود (۲۵). این فرایند به زیست پالایی ذاتی درجا[1] (بدون هیچ‌گونه اقدامی برای بهبود) یا زیست پالایی تقویت‌شده درجا (تهویه زیستی، تزریق زیستی و گیاه‌پالایی[2]) تقسیم می‌شوند (۲۶). اگر چه روش درجا از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، زیرا هیچ‌گونه هزینه اضافی برای فرآیندهای حفاری و انتقال مورد نیاز نیست (فقط هزینه طراحی و نصب تجهیزات مورد استفاده برای افزایش فعالیت میکروبی مورد نیاز است)، با این‌حال، این روش نسبت به روش‌های زیست پالایی دگرجا کمتر قابل‌کنترل و مؤثر است. این روش برای تصفیه مؤثر مکان‌های آلوده به رنگ‌ها، حلال‌های کلرینه، فلزات سنگین و هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود (۲۷). تصفیه درجا توسط عمق خاکی که می‌تواند به طور مؤثر تصفیه شود محدود می‌شود. در بسیاری از خاک‌ها، انتشار مؤثر اکسیژن برای سرعت‌های مطلوب زیست پالایی تنها از چند سانتی‌متر تا حدود ۳۰ سانتی‌متر در خاک گسترش می‌یابد، اگرچه اعماق ۶۰ سانتی‌متر و بیش‌تر در برخی موارد به طور مؤثر تصفیه شده است (۲۴).

- زیست پالایی ذاتی درجا

این فناوری زیست پالایی به‌عنوان تضعیف/ پراکندگی طبیعی نیز شناخته می‌شود و یکی از روش‌های شناخته‌شده زیست پالایی درجا هست. این روش شامل اصلاح بدون کمک و غیرفعال سایت‌های آلوده بدون هیچ‌گونه دخالت انسانی است. اصطلاح "تضعیف/پراکندگی طبیعی" به کاهش غلظت آلاینده در حجم معینی از محیط زیست در طول زمان در نتیجه رقیق شدن، پراکندگی یا جذب غیرقابل برگشت آلاینده در محیط اشاره دارد. این فناوری شامل فرآیندهای میکروبی هوازی و بی‌هوازی برای تصفیه آلاینده‌های زیست‌تخریب‌پذیر و مقاوم است. برای ایجاد یک فرآیند موفق و پایدار، علیرغم عدم وجود نیروهای خارجی در این فرآیند، نظارت منظم مورد نیاز است، بنابراین به‌عنوان تضعیف طبیعی نظارت‌شده نیز نامیده می‌شود (۲۶).

- تضعیف زیستی (طبیعی)

تضعیف زیستی یا طبیعی، ریشه‌کن کردن آلاینده‌ها از محیط اطراف است. این فناوری با استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی از قبیل تجزیه زیستی هوازی و بی‌هوازی، جذب گیاهان و حیوانات، پدیده‌های فیزیکی مانند جابجایی افقی[3]، پراکندگی، رقیق‌سازی، انتشار، تبخیر، جذب/ واجذب و واکنش‌های شیمیایی از قبیل تبادل یون، کمپلکس‌سازی، تغییر شکل غیر زیستی[4] انجام می‌شود. اصطلاحاتی مانند پاک‌سازی ذاتی[5] یا تبدیل زیستی[6] در تعریف کلی‌تر تضعیف طبیعی گنجانده شده است (۲۸).

زیست پالایی ذاتی[7] دنبال کردن فرآیند طبیعی تجزیه زیستی است و از طریق آن میکروارگانیسم‌های طبیعی موجود در محیط در همان شرایط طبیعی حذف آلودگی‌ها را تا سطح قابل قبولی انجام می‌دهند. به‌طور

[1] Intrinsic in situ bioremediation
[2] Phytoremediation
[3] Advection
[4] Abiotic transformation
[5] Intrinsic remediation
[6] Biotransformation
[7] Intrinsic bioremediation

کلی این اولین انتخاب برای حذف آلودگی به روش زیستی است به این دلیل که هیچ مداخله‌ای در آن صورت نمی‌گیرد و فقط روند طبیعی کار دنبال می‌شود.

هنگامی‌که محیط با مواد شیمیایی آلوده می‌شود، طبیعت می‌تواند به چهار روش آن را پاک‌سازی نماید (۲۸):

۱- حشرات کوچک یا میکروب‌هایی که در خاک و آب‌های زیرزمینی زندگی می‌کنند از برخی مواد شیمیایی برای غذا استفاده می‌کنند. هنگامی‌که آن‌ها مواد شیمیایی را به‌طور کامل هضم می‌کنند، می‌توانند آن‌ها را به آب و گازهای بی‌ضرر تبدیل کنند.

۲- مواد شیمیایی می‌توانند به خاک چسبیده و یا جذب آن شده و تحرک خود را از دست دهند. در این حالت مواد شیمیایی حذف نمی‌شود، اما می‌تواند از آلودگی آب‌های زیرزمینی و خروج مواد شیمیایی از محل جلوگیری کند.

۳- همان‌طور که آلودگی در خاک و آب‌های زیرزمینی حرکت می‌کند، می‌تواند با آب تمیز مخلوط شود. این امر منجر به کاهش یا رقیق شدن آلودگی می‌شود.

۴- برخی از مواد شیمیایی مانند نفت و حلال‌ها می‌توانند تبخیر شوند، به این معنی که در داخل خاک از حالت مایع به گاز تبدیل می‌شوند. اگر این گازها در سطح زمین به هوا انتقال یابد، نور خورشید ممکن است آن‌ها را از بین ببرد. اگر تضعیف طبیعی به اندازه کافی سریع یا کامل نباشد، زیست پالایی با تحریک زیستی یا تقویت زیستی افزایش می‌یابد.

- زیست پالایی تقویت‌شده درجا

این نوع زیست پالایی درجا شامل تقویت مکان‌های آلوده با حفاری یا افزودن مواد مغذی، هوا و میکروب‌ها به‌منظور افزایش رشد میکروبی برای فرآیند تجزیه زیستی است. فناوری‌هایی مانند تقویت زیستی، تحریک زیستی، مکش زیستی، تزریق زیستی و تهویه زیستی نمونه‌هایی از روش زیست پالایی بهبودیافته درجا هستند (۲۹).

- تقویت زیستی

یکی از مکانیسم‌های تجزیه زیستی، تقویت زیستی است. افزودن میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده آلاینده (طبیعی/غیربومی/مهندسی‌شده) به منظور افزایش ظرفیت تجزیه زیستی جمعیت‌های میکروبی بومی در منطقه آلوده تحت عنوان فرآیند تقویت زیستی شناخته می‌شود. به‌منظور افزایش سریع رشد جمعیت میکروارگانیسم‌های طبیعی و افزایش نرخ تجزیه که ترجیحاً از محل آلاینده‌ها تغذیه می‌کند، میکروب‌ها از محل پاک‌سازی[1] جمع‌آوری شده، به طور جداگانه کشت و اصلاح ژنتیکی می‌شوند و در نهایت به محل بازگردانده می‌شوند. برای اطمینان، همه میکروارگانیسم‌های ضروری در مکان‌هایی یافت می‌شوند که خاک و آب‌های زیرزمینی با اتن‌های کلردار از قبیل تتراکلرواتیلن و تری‌کلرواتیلن آلوده شده‌اند. این فرایند برای اطمینان از اینکه میکروارگانیسم‌های درجا[2] می‌توانند این آلاینده‌ها را کاملاً حذف کرده و به اتیلن و کلرید غیرسمی تبدیل کنند، استفاده می‌شود (۳۰).

[1] Remediation site
[2] In situ

تقویت زیستی فرآیند افزودن میکروب‌های مهندسی‌شده در سیستمی است که به‌عنوان پاک‌کننده‌های زیست‌محیطی به‌منظور حذف سریع و کامل آلاینده‌های پیچیده عمل می‌کنند. علاوه بر این، ثابت‌شده است که میکروارگانیسم‌های اصلاح‌شده ژنتیکی، به دلیل داشتن پروفایل‌های متابولیکی متنوع، دارای راندمان بالایی در تجزیه و تبدیل طیف وسیعی از آلاینده‌های محیطی به محصولات نهایی ساده و بی‌ضرر هستند (۳۲و۳۱). میکروارگانیسم‌های طبیعی به‌اندازه کافی سریع نیستند تا ترکیبات خاصی را تجزیه کنند، بنابراین برای تسهیل باید از طریق دست‌کاری[1] DNA اصلاح ژنتیکی شوند. میکروب‌های دست‌کاری شده ژنتیکی آلاینده‌ها را بسیار سریع‌تر از گونه‌های طبیعی تجزیه می‌کنند و به‌شدت با گونه‌های بومی، شکارچیان و همچنین عوامل مختلف غیرزنده رقابت می‌کنند (۳۳و۳۲). میکروارگانیسم‌های دست‌کاری شده ژنتیکی پتانسیل پاک‌سازی زیستی خاک، آب‌های زیرزمینی و لجن فعال را نشان داده‌اند و توانایی آن‌ها در تجزیه طیف وسیعی از آلاینده‌های شیمیایی و فیزیکی به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است (۳۴–۳۲).

از فرایند تقویت زیستی زمانی استفاده می‌شود که میکروارگانیسم‌های خود محیط قادر به تجزیه نباشند یا اینکه ماده آلوده‌کننده محیط ساختاری پیچیده داشته و از طیف وسیعی از ترکیبات تشکیل‌شده باشد. درواقع از این فرایند هنگامی‌که روش‌های تحریک زیستی و زیست پالایی ذاتی به دلایلی مانند کم بودن جمعیت میکروارگانیسم یا دیرتجزیه‌پذیر و سرسخت بودن ماده شیمیایی هدف منجر به کسب نتایج قابل قبولی نشوند، استفاده می‌شود. به همین منظور باکتری‌هایی را که توانایی انجام فعالیت مورد نظر را به‌طور طبیعی یا با استفاده از فناوری‌های مهندسی ژنتیک داشته باشند مستقیماً وارد منطقه آلوده می‌کنند. در این روش اگر نیاز باشد مواد غذایی هم وارد می‌شود (۳۵و۳۴).

- تحریک زیستی

این نوع استراتژی از طریق تزریق مواد مغذی خاص در محل (خاک/آب زیرزمینی) برای تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی صورت می‌گیرد. تمرکز آن بر تحریک باکتری‌ها و قارچ‌های بومی یا طبیعی موجود است. اولاً با تأمین اصلاح‌کننده‌ها، مکمل‌های رشد و مواد معدنی کمیاب. ثانیاً با فراهم نمودن سایر الزامات محیطی مانند pH، دما و اکسیژن برای سرعت بخشیدن به‌سرعت متابولیسم و مسیر آن‌ها (۳۶–۱۰). وجود مقادیر کمی از آلاینده می‌تواند با روشن کردن اپرون‌ها[2] برای آنزیم‌های زیست پالایی به‌عنوان محرک عمل کند. این نوع مسیر استراتژیک بیشتر اوقات با افزودن مواد مغذی و اکسیژن برای کمک به میکروارگانیسم‌های بومی ادامه می‌یابد. این مواد مغذی بلوک‌های اساسی زندگی هستند و به میکروب‌ها اجازه می‌دهند تا نیازهای اساسی مانند انرژی، زیست‌توده سلولی و آنزیم‌ها را برای تجزیه آلاینده ایجاد کنند. همه آن‌ها به نیتروژن، فسفر و کربن نیاز دارند (۳۶). در واقع بهبود شرایط محیطی نظیر

[1] Manipulation

[2] Operon: گروهی از ژن‌های مجاور یکدیگر روی کروموزوم که به شکل یکپارچه روشن و خاموش می‌شوند. معمولاً آنزیم‌هایی تولید می‌کنند که مراحل متفاوت یک مسیر زیست‌شیمیایی را با یک ژن واحد کنترل می‌کنند.

اضافه کردن مواد غذایی یا هوادهی است. این روش هنگامی صورت می‌گیرد که سرعت تجزیه زیستی در محیط آلوده، به‌طور طبیعی کم باشد و به همین دلیل میکروارگانیسم‌های موجود در محیط تحریک‌شده تا مواد شیمیایی هدف را تجزیه کنند. در این موارد معمولاً جمعیت تجزیه‌کننده به‌اندازه کافی حضور دارد ولی شرایط محیطی برای فعالیت آن‌ها مساعد نیست. این شرایط نامساعد می‌تواند، نبودن اکسیژن، pH نامناسب، کمبود مواد مغذی به شکل معدنی، کمبود رطوبت و دمای نامناسب، باشد یا اینکه میزان در دسترس بودن ماده شیمیایی موردنظر مطلوب نباشد. با مساعد کردن شرایط محیطی می‌توان سرعت تجزیه زیستی را توسط میکروارگانیسم‌های خود محیط، افزایش داد (۳۷و۳۶). در یک پژوهش کارایی فرایند زیست پالایی در ترکیب با الکتروکینتیک (EK[1]) در اصلاح خاک های رسی آلوده به ۲،۴-دی کلروفنوکسی استیک اسید در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب فرایند الکتروکنتیک با تحریک زیستی و تقویت زیستی به ترتیب منجر به حذف ۱۰۰ درصد و ۸۵-۷۵ درصد آلاینده بعد از ۱۰ روز شدند (۱۹).

- تهویه زیستی

در این روش با تزریق هوا یا اکسیژن در ناحیه غیراشباع خاک، میکروارگانیسم‌های بومی خاک تحریک گردیده و آلاینده‌های آلی موجود در خاک را مورد تجزیه قرار می‌دهند. تهویه زیستی از طریق تأمین اکسیژن برای میکروارگانیسم‌های موجود خاک و تحریک رشد باکتری‌ها و قارچ‌های طبیعی یا وارد شده در خاک انجام می‌شود. در واقع، این روش بیش‌تر برای تجزیه آلاینده‌ها و ترکیبات تجزیه‌پذیر به‌صورت هوازی نظیر هیدروکربن‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOCs[2]) کاربرد دارد. تهویه بیولوژیکی از نرخ جریان هوای کم استفاده می‌کند تا فقط اکسیژن کافی برای حفظ فعالیت میکروبی را فراهم کند (۳۸). اکسیژن بیشتر از طریق تزریق مستقیم هوا به آلودگی باقی‌مانده در خاک توسط چاه‌ها تأمین می‌شود. بقایای سوخت جذب‌شده به‌صورت زیستی تجزیه می‌شوند و ترکیبات فرار نیز با حرکت آهسته بخار در خاک فعال بیولوژیکی، تجزیه زیستی می‌شوند. زیست پالایی مؤثر خاک‌آلوده به نفت با استفاده از تهویه زیستی توسط بسیاری از محققین ثابت شده است. کارایی فرایند تهویه زیستی در اصلاح خاک‌های آلوده به فنانترن با حذف آلودگی بیش از ۹۳ درصد پس از ۷ ماه گزارش شده است (۳۹و۳۸).

- مکش زیستی[3]

فناوری مکش زیستی که به عنوان استخراج دو فاز نیز شناخته می‌شود، بسیاری از فرآیندها مانند پمپاژ افزایش‌یافته خلأ، تهویه زیستی و استخراج بخار خاک (SVE[4]) را برای حذف آلاینده‌های خاک و آب‌های زیرزمینی با استفاده از تأمین غیرمستقیم اکسیژن و تحریک تجزیه زیستی میکروبی، همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده‌شده است، ترکیب می‌کند (۴۰-۲۱).

[1] Electrokinetics

[2] Volatile Organic Compounds
[3] Bioslurping
[4] Soil Vapour Extraction

محدودیت این روش نفوذپذیری کم خاک است که باعث کاهش سرعت انتقال اکسیژن و کاهش بیشتر فعالیت میکروبی می‌شود. این فناوری‌ها به‌طورکلی برای حذف آلاینده‌های آلی فرار و نیمه فرار از خاک و مایع استفاده می‌شوند. این روش می‌تواند برای بازیابی مناطق غیر اشباع و اشباع و همچنین مایعات فاز غیرآبی سبک[1] (LNAPL) استفاده شود. این فناوری می‌تواند برای اصلاح خاک‌های آلوده به مواد آلی قابل اشتعال و نسبتاً قابل اشتعال استفاده شود (۴۱).

برای کاهش فعالیت میکروبی، در این فرایند از رطوبت خاک به منظور کاهش نفوذپذیری هوا و سرعت انتقال اکسیژن استفاده می‌شود. استفاده از این روش حتی در خاک‌هایی با نفوذپذیری کم، به دلیل استفاده کم‌تر از آب زیرزمینی باعث صرفه‌جویی در هزینه ذخیره‌سازی، دفع و تصفیه می‌شود (۴۰).

تزریق زیستی[2]

برخلاف فرآیند تهویه زیستی، در فرآیند تزریق زیستی، هوا به زیر سطح خاک (منطقه اشباع) وارد می‌شود که می‌تواند باعث حرکت رو به بالا آلاینده‌های آلی فرار به سطح منطقه، برای فرآیند تجزیه زیستی شود و همچنین حذف آلاینده‌ها از محل آلوده توسط تحریک فعالیت میکروبی همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است افزایش می‌دهد. این فرآیند توسط دو عامل اصلی، یعنی نفوذپذیری خاک و زیست‌تخریب‌پذیری آلاینده تسهیل می‌شود (۲۵).

فرآیند تزریق زیستی به‌طور گسترده‌ای برای تصفیه آبخوان‌های آلوده به BTEX[3] (بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن) و فرآورده‌های نفتی مورد استفاده قرار گرفته است. کاهش کلی بیش از ۷۰ درصد BTEX نشان می‌دهد که می‌توان از تزریق زیستی برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده به BTEX استفاده کرد. با این حال، محدودیت اصلی، پیش‌بینی جهت جریان هوا است (۴۲).

شکل (۳): تصویری از فناوری‌های زیست پالایی درجا: (الف) تهویه زیستی، (ب) مکش زیستی و (ج) تزریق زیستی (۲۵)

[1] Light Noneaqueous Phase Liquids
[2] Biosparging
[3] Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylenes

- سد واکنشی نفوذپذیر (PRB) [1]

این روش به دلیل طراحی و مکانیسم حذف آلاینده‌ها بیش‌تر به عنوان یک روش فیزیکی برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده تلقی می‌شود. با این وجود، محققان گزارش دادند که واکنش بیولوژیکی یکی از چندین مکانیسم (تجزیه، ترسیب و جذب) حذف آلاینده در تکنیک PRB است. اگرچه عبارات جایگزینی مانند PRB بیولوژیکی، سد بیوراکتیو غیرفعال، PRB تقویت‌شده زیستی نیز برای تطبیق جنبه‌های زیست‌پالایی یا بیوتکنولوژی این فرایند پیشنهاد شده‌اند. نقش میکروارگانیسم‌ها در این فرایند بیشتر به‌جای یک بیوتکنولوژی مستقل، تقویت‌کننده گزارش شده است (۴۳). به طور کلی، PRB یک زیست پالایی درجا است که برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده به انواع مختلف آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین و ترکیبات کلردار استفاده می‌شود. در این فناوری، یک سد واکنشی دائمی یا نیمه دائمی (متوسط) که عمدتاً از آهن صفر ظرفیتی تشکیل شده است، در مسیر آب‌های زیرزمینی آلوده غوطه ور می‌شود. همانطور که آب آلوده از طریق سد تحت گرادیان طبیعی خود جریان می‌یابد، آلاینده‌ها به دام می‌افتند و تحت مجموعه‌ای از واکنش‌ها قرار می‌گیرند که منجر به آب تمیز می‌شود. در حالت ایده‌آل، موانع معمولاً برای به دام انداختن آلاینده‌ها به اندازه کافی واکنش‌پذیر بوده و برای عبور جریان آب به اندازه کافی نفوذپذیر هستند، ولی برای عبور آلاینده‌ها نفوذپذیر نیستند. از سایر ویژگی‌های موانع می‌توان به مواردی نظیر، غیرفعال با ورودی انرژی کم، ارزان، به‌راحتی در دسترس و قابل دستیابی اشاره نمود. اثربخشی این فرایند بیشتر به نوع محیط مورد استفاده بستگی دارد که تحت تأثیر نوع آلاینده، شرایط بیوژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی، تأثیر محیطی و بهداشتی، پایداری مکانیکی و هزینه می‌باشد (۴۴و۴۳).

اخیراً، محققان بر ترکیب کردن PRB و روش‌های دیگر مانند الکتروکینتیک برای تصفیه کلاس‌های مختلف آلاینده‌ها تمرکز کرده‌اند. حذف ۹۰ درصد نیترات از خاک رسی خوشه‌ای با استفاده از فناوری هیبریدی الکتروکینتیک و PRB در مدت زمان یک هفته گزارش شده است. تصفیه خاک‌های رسی آلوده به گازوئیل با استفاده از فرایند ترکیبی الکتروکینتیک و Bio-PRB[2] پس از ۲ هفته عملیات، منجر به حذف ۳۰-۳۹ درصد بخش های زیست تخریب پذیر دیزل گردید. ظاهراً این تکنیک‌های ترکیبی به خاک آلوده اجازه می‌دهد تا شرایط محیطی مناسب (pH، دما، مواد مغذی) مورد نیاز برای رشد میکروبی را حفظ کند و منجر به توزیع زیست توده سورفاکتانت در چنین خاک‌های آلوده شود (۲۶).

- زیست پالایی دگرجا

همان‌طور که از نام آن پیداست، روش زیست پالایی دگرجا (خارج از محل) شامل حفاری و انتقال آلاینده‌ها از محل آلوده واقعی به مکان دیگری و سپس حذف آلاینده‌ها با استفاده از چندین فناوری زیست پالایی است. فناوری‌های زیست پالایی دگرجا بر اساس انواع آلاینده، عمق و درجه آلودگی، هزینه تصفیه و ویژگی‌های جغرافیایی و زمین‌شناسی سایت آلوده به دسته‌های مختلفی از جمله تصفیه به کمک زمین، کمپوست‌سازی، توده بیولوژیکی، راکتورهای زیستی و پالایه‌های زیستی طبقه‌بندی می‌شوند. پس از

[1] Permeable Reactive Barrier

[2] Biological-Permeable Reactive Barrier

تصفیه با فناوری‌های اصلاح خارج از محل، خاک‌های پاک‌سازی شده می‌توانند برای اهداف محوطه‌سازی استفاده شوند (۲۱).

- توده‌های بیولوژیکی (بیوپیل‌ها)

توده‌های بیولوژیکی روشی از خاک حفاری‌شده آلوده به هیدروکربن‌های قابل اصلاح به‌صورت هوازی است که می‌تواند در توده‌های بیولوژیکی تصفیه شود. توده‌های بیولوژیکی (همچنین به‌عنوان سلول‌های بیولوژیکی، کپه‌های بیولوژیکی[1]، تپه‌های بیولوژیکی[2] و پیل‌های کمپوست نیز شناخته می‌شوند) برای کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی در خاک‌های حفاری‌شده در طول زمان تجزیه زیستی استفاده می‌شوند. در این فرآیند، هوا طی یک سیستم لوله‌کشی و پمپ‌هایی که هوا را تحت فشار مثبت وارد توده می‌کند و یا تحت فشار منفی هوا را از داخل توده می‌کشد، برای سیستم توده‌های بیولوژیکی تأمین می‌شود. فعالیت میکروبی از طریق تنفس میکروبی افزایش می‌یابد و متعاقب آن تجزیه آلاینده‌های نفتی افزایش می یابد. از این روش در صورت محدود بودن فضای پاک‌سازی استفاده می‌شود. در این روش توده‌ها و تل‌هایی از خاک آلوده وجود دارد که اکسیژن تحت فشار وارد آن‌ها می‌شود و برای تأمین رطوبت آب به‌صورت قطره‌ای بر روی توده اسپری می‌شود و مواد غذایی به‌صورت محلول یا جامد به توده اضافه می‌شوند (۴۵).

روش توده‌های بیولوژیکی ترکیبی از روش‌های تصفیه به کمک زمین و کمپوست‌سازی است. این فرآیند شامل آزمودن آزمایشگاهی نمونه خاک آلوده برای بررسی پتانسیل تجزیه، جداسازی مکانیکی نمونه خاک برای همگن شدن خاک، انباشته شدن خاک آلوده حفاری‌شده، اصلاحات بیش‌تر خاک با مواد مغذی و هوادهی اجباری برای افزایش تجزیه میکروبی هست. همچنین، میکروب‌های قوی را می‌توان برای پاک‌سازی مؤثر آلاینده به توده بیولوژیک اضافه کرد (۴۶ و ۲۱). همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، کل آرایش این سیستم شامل بستر تصفیه و مواد مغذی، سیستم هوادهی، سیستم آبیاری مدفون در زیر خاک و سیستم جمع‌آوری شیرابه است (۴۹).

توده‌های بیولوژیکی عمدتا برای تصفیه خاک‌های آلوده به آلاینده‌های با وزن مولکولی پایین و هیدروکربن‌های نفتی مانند BTEX، PAHs[3] و ترکیبات فنلی [4] استفاده می‌شود و می‌تواند به‌طور مؤثر در اصلاح یک محیط بسیار آلوده مانند مناطق سرد استفاده شود (۴۷). این فناوری به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن به‌طور فزاینده‌ای برای زیست پالایی استفاده می‌شود و دما، pH و شرایط مواد مغذی را می‌توان برای زیست پالایی کنترل کرد. استفاده از توده‌های بیولوژیکی در مکان‌های آلوده می‌تواند به محدود کردن تبخیر آلاینده‌های با وزن مولکولی کم (LMW)[5] کمک کند (۵۰-۴۸). در همین راستا، محققین تأثیر نرخ‌های مختلف کاربرد (۳ و ۶ میلی‌لیتر بر متر مکعب) کنسرسیوم‌های میکروبی و کمپوست بالغ (۵ و ۱۰ درصد) را بر کاهش کل هیدروکربن‌های نفتی (TPH) در توده‌های بیولوژیکی در مقیاس زراعی و شرایط دمای پایین مورد مطالعه قرار دادند. در پایان دوره

[1] Bioheaps
[2] Biomounds
[3] Polyaromatic Hydrocarbones
[4] Phenols
[5] Low Moleqular Weight

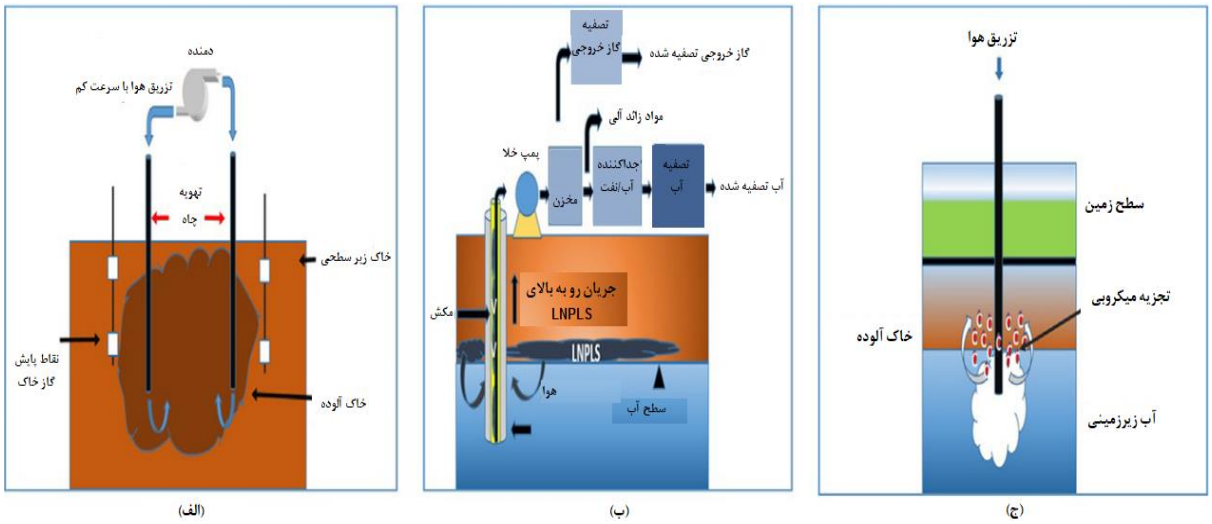
مطالعه (۹۴ روز)، ۹۰/۷ درصد کاهش TPH در شرایط زیست پالایی تقویت‌شده و تحریک‌شده زیستی در مقایسه با شرایط کنترل با میانگین حذف ۴۸ درصد به دست آمد (۴۹). گزارش شده است که غلظت نهایی هیدروکربن‌های نفتی کل[1] (TPH) در توده‌های بیولوژیکی مرطوب حاوی رطوبت بهینه و آلاینده‌های با حداقل تبخیر و قابلیت تجزیه کمتر، در مقایسه با توده‌های بیولوژیکی حرارت دیده و غیرفعال، بسیار پایین است (۵۱). علاوه بر این، گزارش شده است که از توده‌های بیولوژیکی می‌توان برای تصفیه حجم زیادی از خاک آلوده در یک فضای محدود استفاده کرد. راه‌اندازی توده‌های بیولوژیکی را می‌توان به راحتی تا حد یک سیستم آزمایشی برای دستیابی به عملکرد مشابه به‌دست‌آمده در طول مطالعات آزمایشگاهی مقیاس‌بندی کرد (۵۲). برای کارایی توده‌های بیولوژیکی، الک کردن و هوادهی خاک آلوده قبل از فرآوری مهم است. عوامل حجیم کننده مانند کاه، گرد و غبار اره، پوست یا تراشه‌های چوب و سایر مواد آلی برای بهبود فرآیند اصلاح در ساختار توده‌های بیولوژیکی اضافه شده‌اند (۵۳-۵۰). برای پر کردن هوا به خاک انباشته شده آلوده در توده‌های بیولوژیکی، می‌توان از تکنیک‌های زیست پالایی خارج از محل مانند تصفیه به کمک زمین، مکش زیستی و تهویه زیستی استفاده کرد. با این حال، پیاده‌سازی این تکنیک‌ها پرهزینه است و به منبع تغذیه در مکان‌های دور نیاز دارد (۵۴).

اگرچه توده‌های بیولوژیکی در مقایسه با سایر فناوری‌های زیست پالایی دگرجا، ازجمله روش تصفیه به کمک زمین، به فضای کم‌تری نیاز دارند. با این حال، نیاز به تجهیزات مهندسی پیشرفته، هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری بالا، کمبود منبع تغذیه به‌ویژه در مکان‌های دور دست برخی از محدودیت‌های توده‌های بیولوژیکی‌ها هستند. علاوه بر این، گرمای بیش از حد هوا می‌تواند با خشک نمودن خاک تحت تصفیه با فناوری زیست پالایی، منجر به مهار فعالیت‌های میکروبی و متعاقب آن افزایش میزان تبخیر خاک به‌جای تجزیه زیستی آن توسط موجودات زنده باشد (۵۵-۵۱). همچنین وسعت هوازدگی می‌تواند با آب‌گریزتر کردن مواد، ترکیب شیمیایی را تغییر داده و در نتیجه پتانسیل روش توده‌های بیولوژیکی برای تجزیه زیستی محدود می‌شود (۵۶).

کربن آلی زیستی در دسترس (BOC[2]) نقش مهمی در فناوری زیست پالایی با استفاده از توده‌های بیولوژیکی ایفا می‌کند. زیست پالایی خاک‌های آلوده به نفت به منظور حذف کل هیدروکربن نفتی (TPH) با استفاده از آلفا، بتا و پروتئوباکتری‌های گاما، تحت شرایط دمایی مزوفیلیک (۳۰-۴۰°C) و میزان هوادهی کم صورت گرفته است (۵۷). سیستم‌های توده بیولوژیکی همچنین برای تصفیه خاک های آلوده به گازوئیل در منطقه زیر قطب جنوب استفاده شده است. در مجموع ۹۳ درصد از TPH با استفاده از سیستم توده بیولوژیکی ظرف مدت یک سال حذف شده است (۵۸).

[1] Total Petroleum Hydrocarbon

[2] Bio-available Organic Carbon



شکل (۴): تصویری از فناوری‌های زیست پالایی در محل: (الف) تصفیه به کمک زمین، (ب) توده بیولوژیکی و (ج) بیوراکتور (۴۹)

- تصفیه به کمک زمین

در فناوری تصفیه به کمک زمین، خاک آلوده حفاری و پخش می‌شود و هرچند روز یکبار لایه خاک بالای سطح زمین زیرورو می‌شود تا امکان تجزیه بیولوژیکی هوازی آلاینده‌ها توسط میکروب‌های موجود در خاک فراهم شود (شکل (۴)). در این روش یک لایه خاک آلوده به روی سطح خاک تمیز اضافه می‌شود و در صورت نیاز مواد مغذی و هوا نیز در محیط تأمین می‌گردد تا میکروارگانیسم‌های موجود در خاک تمیز (با زیرورو کردن متناوب این دو لایه) باعث حذف آلاینده‌های خاک آلوده گردند. خاک‌ورزی[1]، هوادهی، مواد مغذی و آبیاری را برای افزایش فعالیت میکروبی در طول تصفیه به کمک زمین فراهم می‌کند (۵۹). مشاهده می‌شود که تصفیه به کمک زمین تنها برای تصفیه خاک سطحی به عمق ۱۰ الی ۳۵ سانتی‌متر قابل انجام است (۲۰). pH خنثی را می‌توان با استفاده از آهک کشاورزی حفظ کرد. اگرچه تصفیه به کمک زمین به‌عنوان یک روش زیست پالایی دگرجا در نظر گرفته می‌شود، اما در موارد معدودی می‌توان آن را یک روش زیست پالایی درجا در نظر گرفت. این روش بیش‌تر در تصفیه مکان‌های آلوده به هیدروکربن‌های آروماتیک آلیفاتیک و چند حلقه‌ای و PCBها استفاده می‌شود (۶۰). این فناوری به دلیل نیاز به تجهیزات کمتر، هزینه نگهداری و بهره‌برداری کم به‌عنوان ساده‌ترین و ارزان‌ترین گزینه محسوب می‌شود و به همین دلیل به‌عنوان یک روش جایگزین تلنبارسازی[2] بیش‌ترین توجه را به خود جلب کرده است (۶۱).

- بیوراکتورها (راکتورهای زیستی)

در این روش به‌طورکلی از یک راکتور یا مخزن برای تجزیه آلاینده تحت شرایط کنترل‌شده استفاده می‌شود. بیوراکتورها خاک‌های آلوده را در دو فاز جامد و مایع (دوغاب) تصفیه می‌کنند. فرآیند تصفیه فاز جامد به صورت مکانیکی خاک را با ساییدگی و مخلوط کردن در یک ظرف دربسته تجزیه می‌کند. هدف از اختلاط تضمین این است که آلاینده‌ها، آب، هوا، مواد مغذی و میکروارگانیسم‌ها در تماس دائمی

[1] Tillage

[2] Dumping

باشند. عواملی مانند تقویت زیستی کنترل‌شده، تکمیل مواد مغذی، انتقال جرم، فراهمی زیستی آلاینده‌ها و شرایط واکنش بهینه، فناوری زیست پالایی بیوراکتور محور را کارآمدتر می‌سازد (۶۲و۶۱). روش بیوراکتور برای تصفیه خاک یا آب آلوده به آلاینده‌های آلی فرار مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن استفاده می‌شود. استفاده از بیوراکتور برای فرآیند زیست پالایی بسیار سودمندتر از فناوری‌های دیگر است زیرا می‌تواند پارامترهای فرآیند مورد نیاز برای واکنش‌های بیولوژیکی مورد استفاده در تجزیه زیستی آلاینده‌ها را کنترل، مدیریت و دست‌کاری کند.

تقویت زیستی کنترل شده، افزودن مواد مغذی، افزایش فراهمی زیستی آلاینده، و انتقال جرم (تماس بین آلاینده و میکروب)، که از جمله عوامل محدود کننده فرآیند زیست پالایی هستند، می‌توانند به طور موثر در یک بیوراکتور ایجاد شوند، بنابراین زیست پالایی مبتنی بر بیوراکتور کارآمدتر می‌شود. کاربرد بیوراکتورهای مختلف برای فرایند زیست پالایی منجر به حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها از جمله هیدروکربن‌های نفتی کل و آروماتیک چند حلقه‌ای (۹۷-۸۲ درصد)، ۲،۴-دی کلروفنوکسی استیک اسید (۱۰۰-۹۷ درصد)، نیتروژن کل (۵۳-۴۷ درصد)، نفتالین و نیتروژن کل (۹۳-۴۸ درصد)، کربوفوران (۹۷-۸۲ درصد) و آلکیل بنزن سولفونات خطی (۹۲/۹ درصد) شده است (۲۶).

- بیوفیلترها (پالایه‌های زیستی)

روش بیوفیلتر بیش‌تر برای حذف آلاینده‌های گازی استفاده می‌شود. در این فناوری از ستون‌های تعبیه‌شده با میکروب‌ها برای حذف آلاینده‌های گازی استفاده می‌شود (۲۳).

- ویندرو[1]

به‌عنوان یکی از فناوری‌های زیست پالایی دگرجا، روش ویندرو به چرخش دوره‌ای خاک‌آلوده انباشته برای تقویت زیست پالایی با افزایش فعالیت‌های باکتری‌های بومی و یا غیربومی (موقتی)[2] تجزیه‌کننده پلاستیک‌های مبتنی بر هیدروکربن موجود در خاک آلوده تکیه می‌کنند. چرخش دوره‌ای خاک آلوده به همراه افزودن آب باعث افزایش هوادهی، توزیع یکنواخت آلاینده‌ها، مواد مغذی و فعالیت‌های تجزیه‌کننده میکروبی می‌شود و در نتیجه سرعت زیست پالایی را افزایش می‌دهد که می‌تواند از طریق جذب، تبدیل زیستی و معدنی‌سازی انجام شود. با این وجود، به دلیل چرخش دوره‌ای مرتبط با تصفیه ویندرو، ممکن است این روش بهترین گزینه برای اصلاح خاک آلوده به مواد فرار سمی نباشد. تصفیه ویندرو یکی از منابع تولید متان (گاز گلخانه‌ای) به دلیل ایجاد منطقه بی‌هوازی در خاک آلوده انباشته‌شده متعاقب کاهش هوادهی است (۴۷).

- زیست پالایی توسط گیاهان (گیاه‌پالایی)

گیاه‌پالایی یک روش نوظهور زیست پالایی است که از گیاهان و ریشه‌های آن‌ها برای اصلاح خاک و آب آلوده استفاده می‌کند. این تکنیک بر استفاده از فعل و انفعالات گیاهی (فیزیکی، بیوشیمیایی، بیولوژیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی) در مکان‌های آلوده برای کاهش اثرات سمی آلاینده‌ها متکی است. اکثر مطالعات تحقیقاتی گزارش کرده‌اند که در محل آلوده، مکانیسم حذف آلاینده‌ها توسط گیاهان شامل جذب آلاینده‌ها

[1] Windrow

[2] Transitory

توسط یک فرآیند غیرفعال، انتقال آلاینده از ریشه به شاخه با جریان آوند چوبی و تجمع در شاخه می‌شود (۶۳). روش‌های زیست پالایی مبتنی بر پوشش گیاهی پتانسیل زیادی برای تجزیه، تجمع، بی‌حرکت کردن و تبدیل آلاینده‌های پایدار با عمل به‌عنوان یک پالایه زیستی و متابولیزه کردن آلاینده دارند. این روش به‌عنوان یک روش جایگزین نوآورانه و مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه مکان‌های آلوده خطرناک در نظر گرفته می‌شود (۶۴). بسته به نوع آلاینده از قبیل آلاینده عنصری (فلزات سنگین سمی و رادیونوکلئیدها) و آلی (هیدروکربن‌ها و ترکیبات کلردار) مکانیسم‌های متعددی (تجمع یا استخراج، تجزیه، تثبیت، تبخیر، تبدیل، فیلتراسیون و ترکیبی از این مکانیسم‌ها) در گیاه‌پالایی دخیل هستند آلاینده‌های عنصری عمدتاً با استخراج، تبدیل و جداسازی حذف می‌شوند. از سوی دیگر، آلاینده‌های آلی عمدتاً با تجزیه، اصلاح ریزوسپری، تثبیت و تبخیر حذف می‌شوند (۶۵-۲۶). همچنین معدنی‌سازی آلاینده‌ها در صورت استفاده از گیاهانی مانند بید و یونجه امکان پذیر است (۶۵و۶۴). اطلاعات دقیق در مورد دسته‌های مختلف فناوری گیاه‌پالایی در جدول (۴) ارائه شده است.

گیاه‌پالایی، یک فناوری باصرفه اقتصادی، زیست‌محیطی و علمی است که برای کشورهای درحال‌توسعه مناسب است و تجارت باارزشی به‌حساب می‌آید. متأسفانه علی‌رغم این پتانسیل، هنوز در برخی از کشورها مانند کشور ما به‌عنوان یک فناوری استفاده تجاری ندارد. گیاه‌پالایی با استفاده از مهندسی گیاهان سبز شامل گونه‌های علفی و چوبی برای برداشت مواد آلاینده از آب و خاک یا کاهش خطرات آلاینده‌های محیط زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو، آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های نفتی و مشتقات آن‌ها به‌کار برده می‌شود. مهم‌ترین ترکیبات معدنی آلاینده، فلزات سنگین بوده و میکروارگانیسم‌های خاک قادر به تجزیه آلاینده‌های آلی هستند، اما برای تجزیه میکروبی فلزات نیاز به آلی شدن یا تغییرات فلزی آن‌ها وجود دارد که امروزه از گیاهان برای این بخش استفاده می‌شود. گیاهانی که این عمل را انجام می‌دهند تجمیع دهنده آلاینده[1] نام دارند مانند خردل هندی، آفتابگردان، تنباکو، ذرت، شاهی یا ترتیزک. مهم‌ترین مزیت این روش این است که یک فناوری تمیز و مقرون‌به‌صرفه بوده که به محیط آسیب وارد نمی‌کند. در مقابل عیب اصلی آن نیاز به زمان طولانی برای از بین رفتن کل آلودگی است و نیز تحت شرایط نامساعد جوی و محیطی امکان عدم کارایی آن وجود دارد. کارایی روش‌های زیست پالایی مبتنی بر پوشش گیاهی در حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها از جمله بنزین (۹۳/۵ درصد)، گازوئیل (۹۸-۹۰ درصد)، دی فنیل اترهای برومینه (۵۸/۲ درصد)، فلزات سنگین آهن، روی، کادمیوم، مس، بر و کروم (۹۹/۳ درصد)، PAHs (۵۸/۴۷ درصد)، بیس‌فنل‌های پلی‌کلرینه (۹۱/۵ درصد)، TPH (۸۷ درصد) و نانوذرات نقره و جیوه (۷۰-۲۰ درصد) گزارش شده است. (۷۰-۶۶).

استخراج گیاهی

این فناوری به‌عنوان روش انباشتگی گیاهی یا ریز انباشتگی گیاه‌پالایی نیز شناخته می‌شود. در این روش، گیاهان آلاینده‌ها را در ریشه، شاخه و برگ خود انباشت می‌کنند و توده‌ای از گیاهان حاوی آلاینده‌ها

[1] Hyperaccumulator Plants

(فلزات) تولید می‌کنند که بیش‌تر برای دفع و بازیافت حمل می‌شوند (۶۹).

- تجزیه گیاهی یا تجزیه ریزوسفری

در این روش، آلاینده‌ها با فعالیت آنزیم‌ها و پروتئین‌های تولیدشده توسط گیاهان و میکروب‌های خاک در ریزوسفر تجزیه می‌شوند. این فناوری شامل رابطه همزیستی بین گیاهان و میکروب‌ها می‌شود که در آن گیاهان مواد مغذی را برای فرآیند تجزیه زیستی در اختیار میکروب‌ها قرار می‌دهند و میکروب‌های خاک در ازای آن محیط مناسبی را برای فرآیند تجزیه فراهم می‌کنند (۷۱).

- تثبیت گیاهی

در این فناوری، به واسطه تشکیل توده گیاهی پایدار با آلاینده، تحرک آلاینده‌ها در خاک و آب توسط گیاهان کاهش می‌یابد و در نتیجه از حرکت بیش‌تر آلاینده به جو جلوگیری می‌شود (۶۹).

- ریزوفیلتراسیون

ریزوفیلتراسیون بسیار شبیه به روش استخراج گیاهی است اما شامل تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به‌جای خاک آلوده است. در این روش ابتدا ریشه گیاه آلاینده را جذب کرده و سپس یا در سطح ریشه جذب می‌شود و یا توسط ریشه جذب می‌شود. برای استفاده از گیاه در ریزوفیلتراسیون، ابتدا گیاه باید در حضور یک آلاینده سازگار شود و سپس گیاه سازگار شده برای اهداف زیست پالایی با کاشت آن در آب‌های زیرزمینی آلوده که ریشه‌های گیاه آلاینده را با آب آلوده جذب می‌کنند، استفاده می‌شود. هنگامی‌که ریشه‌های گیاه با آلاینده اشباع می‌شود، پس از برداشت به‌طور ایمن دفع می‌شوند و محل آلوده به‌طور مکرر برای حذف کامل آلاینده‌ها تصفیه می‌شود. این روش گیاه‌پالایی عموماً برای حذف فلزات سنگین از آب‌های زیرزمینی، تالاب‌های طبیعی و مصب‌های آلوده به فلزات استفاده می‌شود (۷۱ و۶۳).

جدول (۴): خلاصه‌ای از انواع فرایندهای گیاه‌پالایی (۲۱)

فرایند	مکانیسم گیاه	محیط سطحی
استخراج گیاهی	جذب و تغلیظ فلزات از طریق جذب مستقیم به بافت گیاهان و همراه با حذف متعاقب گیاهان	خاک‌ها
تبدیل گیاهی	جذب و تجزیه ترکیبات آلی توسط گیاه	آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی
تثبیت گیاهی	ترشحات ریشه باعث رسوب فلز و در دسترس شدن کم‌تر می‌شود	خاک، آب زیرزمینی، باطله معدن
تجزیه گیاهی	بهبود تجزیه میکروبی در ریزوسفر	خاک، آب زیرزمینی داخل ریزوسفر
ریزوفیلتراسیون	جذب فلزات به ریشه گیاه	آب سطحی و آب پمپاژ شده
تبخیر گیاهی	گیاهان سلنیوم، جیوه و هیدروکربن‌های فرار را تبخیر می‌کنند	خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی
پوشش گیاهی[1]	آب باران توسط گیاهان برای جلوگیری از شست‌شوی آلاینده‌ها از محل‌های دفع تبخیر می‌شود.	خاک‌ها

[1] Vegetative Cap

پایش و نظارت بر فناوری زیست پالایی

فرآیند تصفیه زیستی را می توان به طور غیرمستقیم با اندازه‌گیری پتانسیل اکسیداسیون – احیا یا ردوکس در خاک و آب‌های زیرزمینی، همراه با pH، دما، محتوای اکسیژن، غلظت گیرنده/ دهنده الکترون و غلظت محصولات تجزیه (به عنوان مثال دی اکسید کربن) پایش کرد (۱۶).

جنبه‌های آتی فناوری زیست پالایی

از بحث جامع بالا در مورد زیست پالایی، به‌راحتی می‌توان فهمید که فناوری‌های زیست پالایی درجا و دگرجا به‌طور گسترده برای به حداقل رساندن مواد زائد و پاک‌سازی خاک و آب آلوده استفاده می‌شود. پیشرفت‌های بیش‌تر در فناوری‌های ژنومی، مولکولی و بیوتکنولوژیکی ممکن است به گسترش رویکردهای زیست پالایی کمک کند. علیرغم استفاده از فناوری‌های زیست پالایی منفرد، استفاده از فناوری‌های مختلف زیست پالایی به‌طور هم‌زمان می‌تواند راه‌حلی کارآمدتر، امیدوارکننده و مقرون‌به‌صرفه برای مشکل آلودگی باشد. کاربرد زیست پالایی باواسطه بیوسورفکتانت برای تمیز کردن مکان‌های آلوده به هیدروکربن‌ها به‌منظور بهبود حلالیت و فراهمی زیستی آلاینده‌ها برای میکروب‌ها امروزه مورد توجه قرارگرفته است. این می‌تواند به دلیل هزینه پایین تولید بیوسورفکتانت با استفاده از میکروب‌های تکمیل‌شده با پسماندهای کشاورزی و طبیعت زیست‌تخریب‌پذیر امکان‌پذیر باشد. علاوه بر این، با کمک فناوری‌های تقویت زیستی و تحریک زیستی، پتانسیل تجزیه زیستی میکروب‌های بومی را می‌توان افزایش داد. از طرف دیگر، فناوری‌های مولکولی پیشرفته در حال ظهور (متاژنومیکس، ژنومیکس، متابولومیک، رونویسی و پروتئومیکس) مشکلات مربوط به کشت میکروبی را حل کرده است و دانش بهتری از تنوع میکروبی و عملکرد آن‌ها و مسیرهای متابولیک و کاتابولیک موجود در یک سایت‌های زیست‌محیطی آلوده ارائه کرده است که به کاهش بیش‌تر آلاینده‌های نوظهور و مشکلات مرتبط کمک می‌کند. فناوری نوظهور جدید، مانند سلول‌های سوختی میکروبی تلقیح شده با میکروب‌ها (گونه سودوموناس[1] و گونه شوانلا[2])، ممکن است به‌عنوان کاندیدهای بالقوه برای زیست پالایی پلی‌آروماتیک‌ها و مکان‌های آلوده به هیدروکربن‌ها (فناوریانترن[3]) در نظر گرفته شود. همچنین استفاده از میکروب‌های دست‌کاری شده ژنتیکی در زیست پالایی، یک فناوری امیدوارکننده و پیشرفته است که با استفاده از مسیرهای کاتابولیک جدید و کارآمد، تجزیه مؤثر یک آلاینده مقاوم را تسهیل می‌کند، دامنه بستر برای فرآیند تجزیه را افزایش می‌دهد و پایداری فعالیت تجزیه میکروب‌ها را افزایش می‌دهد. پیشرفت در علم و فناوری نانو منجر به تولید نانو مواد متعددی شده است که به‌عنوان کاتالیزور زیستی عمل می‌کنند و سطح را بهبود می‌بخشند و انرژی فعال‌سازی را برای فرآیند تجزیه زیستی کاهش می‌دهند (۷۳ و۷۲ و۲۱).

نتیجه‌گیری

این مقاله ایده‌ای از زیست پالایی، اهداف، اصول و عوامل مؤثر، استراتژی‌ها، انواع، نظارت و پایش، مزایا

[1] Pseudomonas
[2] Shewanella
[3] Phenanthrene

و چالش‌های پیش روی آن و جنبه‌های آتی فناوری زیست پالایی را ارائه می‌دهد. زیست پالایی گزینه بسیار کارآمد و جذابی برای اصلاح، پاک‌سازی، مدیریت و فناوری بازیابی برای تصفیه محیط‌های آلوده از طریق فعالیت میکروبی است. سرعت تجزیه مواد زائد و آلاینده‌ها در رقابت با عوامل بیولوژیکی، تأمین ناکافی مواد مغذی ضروری، شرایط محیطی نامطلوب (هوادهی، رطوبت، pH، دما) و پایین بودن فراهمی زیستی آلاینده تعیین می‌شود. با توجه به این عوامل، تجزیه زیستی در شرایط طبیعی موفقیت‌آمیز نبوده و منجر به کم‌تر شدن مطلوبیت می‌شود. زیست پالایی تنها زمانی می‌تواند مؤثر باشد که شرایط محیطی اجازه رشد و فعالیت میکروبی را بدهد. بدیهی است که فناوری زیست پالایی در مقایسه با سایر رویکردهای فیزیکی و شیمیایی یک رویکرد اصلاحی امیدوارکننده، سازگار، در حال رشد، کارآمد و دوستدار محیط زیست است و در حال هدایت مسیری به سمت مراتع سرسبزتر است. همچنین، مکانیسم، اصول و اثربخشی هر دو روش زیست پالایی، یعنی زیست پالایی درجا و دگرجا، در تصفیه بسیاری از مکان‌های آلوده موفقیت‌آمیز بوده است. زیست پالایی در سایت‌های مختلف در سطح جهان با درجات مختلف موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است و محبوبیت روزافزون آن در طول زمان مشهود بوده و به‌طورکلی دارای مزایای بیش‌تری است. بااین‌حال، مهم‌ترین گام برای یک زیست پالایی موفق، شناسایی ویژگی‌های مکان آلوده است که به ایجاد مناسب‌ترین و امکان‌پذیرترین فناوری زیست پالایی (درجا یا دگرجا) کمک می‌کند. فناوری‌های زیست پالایی دگرجا به دلیل هزینه‌های اضافی مربوط به حفاری و حمل‌ونقل، گران‌تر هستند. با این وجود، می‌توان از آن‌ها برای تصفیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها به‌صورت کنترل‌شده استفاده کرد. در مقابل، فناوری‌های در محل هیچ هزینه اضافی نسبت به حفاری ندارند. با این‌حال، هزینه نصب تجهیزات در محل، همراه با ناتوانی در تجسم و کنترل مؤثر سطح زیرسطحی سایت آلوده ممکن است برخی از فناوری‌های زیست پالایی در محل را ناکارآمد کند. در نتیجه، ظاهراً هزینه پاک‌سازی، عامل اصلی در تعیین و انتخاب روش زیست پالایی برای استفاده در هر مکان آلوده نیست. مشخصات زمین‌شناسی سایت (های) آلوده شامل نوع خاک، عمق و نوع آلاینده، موقعیت مکانی سایت آلوده نسبت به محل سکونت انسان و ویژگی‌های عملکردی هر فناوری زیست پالایی باید در تصمیم‌گیری مناسب‌ترین و کارآمدترین روش برای تصفیه مؤثر سایت‌های آلوده گنجانده شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافعی برای اعلام ندارند.

منابع

[1] Kuppan, N., Padman, M., Mahadeva, M., Srinivasan, S., Devarajan, R., 2024, A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco friendly solutions for waste and pollution management. Waste Management Bulletin, 2, 154.

[2] 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, pp. 221-236.

[3] Demnerová, K., Mackova, M., Speváková, V., Beranova, K., Kochánková, L., Lovecká, P., Ryslavá, E., Macek, T., 2005, Two approaches to biological decontamination of groundwater and soil polluted by aromatics-characterization of microbial populations, International Microbiology, 8, 205.

[4] Tang, C.Y., Fu, Q.S., Criddle, C.S., Leckie, J.O., 2007, Effect of flux (transmembrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nanofiltration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing wastewater, Environmental Science & Technology, 41, 2008.
[5] Chen, B.Y., Ma, C.-M., Han, K., Yueh, P.-L, Qin L.-J., Hsueh C.-C., 2016, Influence of textile dye and decolorized metabolites on microbial fuel cell-assisted bioremediation, Bioresource Technology, 200, 1033.
[6] Aryal, S., 2023, Introduction to bioremediation, Microbe Notes. (Available online: microbenotes.com/bioremediation).
[7] Malik, S., Dhasmana, A., Kishore, S., Kumari, M., 2022, Microbes and microbial enzymes for degradation of pesticides. In: Bioremediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management, Apple Academic Press, pp. 95-127.
[8] Patowary, R., Devi, A., Mukherjee, A.K., 2023, Advanced bioremediation by an amalgamation of nanotechnology and modern artificial intelligence for efficient restoration of crude petroleum oil-contaminated sites: a prospective study, Environmental Science and Pollution Research, 30, 74459.
[9] Ren, X., Zeng, G., Tang, L., Wang, J., Wan, J., Wang, J., Deng, Y., Liu, Y., Peng, B., 2018, The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation, Waste Management, 72, 138.
[10] Jain, P.K., Bajpai, V., 2012, Biotechnology of bioremediation-a review, International Journal of Environmental Sciences, 3, 535.
[11] Lutes, C., 2007, In-situ substrate addition to create reactive zones for treatment of chlorinated aliphatic hydrocarbons, ESTCP Cost and Performane Report. (Available online: https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA478051).
[12] International Centre for Soil and Contaminated Sites, 2006, Manual for Biological Remediation Techniques, pp. 9-18.
[13] Prasad, S., Kannojiya, S., Kumar, S., Yadav, K.K., Kundu, M., Rakshit, A., 2021, Integrative approaches for understanding and designing strategies of bioremediation, In: Bioremediation Science, 1st Edition, CRC Press, pp. 37-56.
[14] Smriti, K., 2023, Bioremediation: Factors, types, advantages, disadvantages, Microbe Notes, (Available online: microbenotes.com/bioremediation-types-factors).
[15] Mishra, M., Singh, S.K., Kumar, A., 2021, Environmental factors affecting the bioremediation potential of microbes, In: Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants, Woodhead Publishing, pp. 47-58.
[16] Kensa, V.M., 2011, Bioremediation-an overview, Journal of Industrial Pollution Control, 27, 161.
[17] Montagnolli, R.N., Lopes, P.R.M., Bidoia, E.D., 2015, Assessing Bacillus subtilis biosurfactant effects on the biodegradation of petroleum products, Environmental Monitoring and Assessment, 187, 4116.
[18] Sharma, S., 2012, Bioremediation: Features, strategies and applications, Asian Journal of Pharmacy and Life Science, 2, 202.
[19] Barba, S., Villaseñor, J., Rodrigo, M.A., Cañizares, P., 2021, Biostimulation versus bioaugmentation for the electro-bioremediation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid polluted soils, Journal of Environmental Management, 277, 111424.
[20] Singh, A., Kumar, V., Srivastava, J.N., 2013, Assessment of bioremediation of oil and phenol contents in refinery waste water via bacterial consortium, Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology, 4, 1000145.
[21] Tyagi, B., Kumar, N., 2021, Bioremediation: Principles and applications in environmental management, In: Bioremediation for Environmental Sustainability, Elsevier, pp. 3-28.
[22] Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., Wassie, M., 2017, The role of microorganisms in bioremediation-A review, Open Journal of Environmental Biology, 2, 038.
[23] Boopathy, R., 2000, Factors limiting bioremediation technologies, Bioresource Technology, 74, 63.
[24] Harekrushna, S., Kumar, D.C., 2012, A review on: Bioremediation, International Journal of Research in Chemistry and Environment, 2, 13.

[25] Kumar, V., Shahi, S.K., Singh, S., 2018, Bioremediation: An eco-sustainable approach for restoration of contaminated sites, In: Microbial Bioprospecting for Sustainable Development, Springer, pp. 115-136.
[26] 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, 180.
[27] Mulligan, C.N., Yong, R.N., 2004, Natural attenuation of contaminated soils, Environment International, 30, 587.
[28] Li, C.-H., Wong, Y.-S., Tam, N.F.-Y., 2010, Anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons with amendment of iron(III) in mangrove sediment slurry, Bioresource Technology, 101, 8083.
[29] Singh, S.P., Garima, T., 2015, Application of bioremediation on solid waste management: A review, Environmental Science: An Indian Journal, 10, 11.
[30] Niu, G.L., Zhang, J.J., Zhao, S., Liu, H., Boon, N., Zhou, N.Y., 2009, Bioaugmentation of a 4-chloronitrobenzene contaminated soil with *Pseudomonas putida ZWL73*, Environmental Pollution, 157, 763.
[31] Malik, Z.A., Ahmed, S., 2012, Degradation of petroleum hydrocarbons by oil field isolated bacterial consortium, African Journal of Biotechnology, 11, 650.
[32] Alwan, A.H., Fadil, S.M., Khadair, S.H., Haloub, A.A., Mohammed, D.B., Salah, M.F., Sabbar, S.S., Mousa, N.K., Salah, Z.A., 2013, Bioremediation of the water contaminated by waste of hydrocarbon by use *Ceratophyllaceae* and *Potamogetonaceae* plants, Journal of Genetic and Environmental Resources Conservation, 1, 106.
[33] 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.
[34] Sayler, G.S., Ripp, S., 2000, Field applications of genetically engineered microorganisms for bioremediation processes, Current Opinion in Biotechnology, 11, 286.
[35] Thapa, B., Kc, A., Ghimire, A., 2012, A review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil, Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology, 8, 164.
[36] Adams, G.O., Fufeyin, P.T., Okoro, S.E., Ehinomen, I., 2015, Bioremediation, biostimulation and bioaugmention: A review, International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 3, 28.
[37] Naik, M.G., Duraphe, M.D., 2012, Review paper on-parameters affecting bioremediation, International Journal of Life Science & Pharma Research, 2, 77.
[38] Frutos, F.J.G., Escolano, O., García, S., Babín, M., Fernández, M.D., 2010, Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil, Journal of Hazardous Materials, 183, 806.
[39] Agarry, S., Latinwo, G.K., 2015, Biodegradation of diesel oil in soil and its enhancement by application of bioventing and amendment with brewery waste effluents as biostimulation-bioaugmentation agents, Journal of Ecological Engineering, 16, 82.
[40] Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B.V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B.S., Tripathi, M., 2022, Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment, Toxics, 10, 484.
[41] Tong, W., 2018, Groundwater hydrology, soil and groundwater contamination assessment and monitoring, In: Fundamentals of Environmental Site Assessment and Remediation, 1st Edition, CRC Press, pp. 70–99
[42] 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, 1492.
[43] Atlas, R.M., Philp, J.C., 2005, Bioremediation. Applied microbial solutions for real-world environmental cleanup, 1st Edition, American Society of Microbiology.
[44] Maitra, S., 2019, Permeable reactive barrier: A technology for groundwater remediation - a mini review, Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences, 5, 203.
[45] Emami, S., Pourbabaee, A.A., Alikhani, H.A., 2012, Bioremediation principles and techniques on petroleum hydrocarbon contaminated soil, Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2, 320.

[46] Bewley, R.J.F., Hockin, S., 2011, Contaminated soils and bioremediation: Creation and maintenance of inner space, In: The Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space, 1st Edition, Wallingford UK: CABI, pp. 196-215.
[47] Dias, R.L., Ruberto, L., Calabró, A., Balbo, A.L., Del Panno, M.T., Mac Cormack, W.P., 2015, Hydrocarbon removal and bacterial community structure in on-site biostimulated biopile systems designed for bioremediation of diesel-contaminated Antarctic soil, Polar Biology, 38, 677.
[48] Whelan, M.J., Coulon, F., Hince, G., Rayner, J., McWatters, R., Spedding, T., Snape, I., 2015, Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions, Chemosphere, 131, 232.
[49] Garima, T., Singh, S.P., 2014, Application of bioremediation on solid waste management: A review, Journal of Bioremediation & Biodegradation, 5, 248.
[50] Rodríguez-Rodríguez, C.E., Marco-Urrea, E., Caminal, G., 2010, Degradation of naproxen and carbamazepine in spiked sludge by slurry and solid-phase *Trametes versicolor* systems, Bioresource Technology, 101, 2259.
[51] Sanscartier, D., Zeeb, B., Koch, I., Reimer, K., 2009, Bioremediation of diesel-contaminated soil by heated and humidified biopile system in cold climates, Cold Regions Science and Technology, 55, 167.
[52] Chemlal, R., Abdi, N., Lounici, H., Drouiche, N., Pauss, A., Mameri, N., 2013, Modeling and qualitative study of diesel biodegradation using biopile process in sandy soil, International Biodeterioration & Biodegradation, 78, 43.
[53] Delille, D., Duval, A., Pelletier, E., 2008, Highly efficient pilot biopiles for on-site fertilization treatment of diesel oil-contaminated sub-Antarctic soil, Cold Regions Science and Technology, 54, 7.
[54] Arora, S., Saxena, S., Sutaria, D., Sethi, J., 2022, Bioremediation: An ecofriendly approach for the treatment of oil spills, In: Advances in Oil-Water Separation, Elsevier, pp. 353-373.
[55] Ojha, N., Karn, R., Abbas, S., Bhugra, S., 2021, Bioremediation of industrial wastewater: A review, In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 796, 012012.
[56] Naeem, U., Qazi, M.A., 2020, Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons, Environmental Science and Pollution Research, 27, 27370.
[57] Jaain, R., Patel, A., 2019, Bioremediation of Gurugram–Faridabad dumpsite at Bandhwari, In: Waste Valorisation and Recycling, Springer, pp. 433-440.
[58] Oualha, M., Al-Kaabi, N., Al-Ghouti, M., Zouari, N., 2019, Identification and overcome of limitations of weathered oil hydrocarbons bioremediation by an adapted *Bacillus sorensis* strain, Journal of Environmental Management, 250, 109455.
[59] Volpe, A., D'Arpa, S., Del Moro, G., Rossetti, S., Tandoi, V., Uricchio, V.F., 2012, Fingerprinting hydrocarbons in a contaminated soil from an Italian natural reserve and assessment of the performance of a low-impact bioremediation approach, Water, Air, & Soil Pollution, 223, 1773.
[60] Silva-Castro, G.A., Uad, I., Gónzalez-López, J., Fandiño, C.G., Toledo, F.L., Calvo, C., 2012, Application of selected microbial consortia combined with inorganic and oleophilic fertilizers to recuperate oil-polluted soil using land farming technology, Clean Technologies and Environmental Policy, 14, 719.
[61] Williams, J., 2006, Bioremediation of contaminated soils: A comparison of in situ and ex situ techniques, Engineering Biology.
[62] Mohan, S.V., Sirisha, K., Rao, N.C., Sarma, P.N., Reddy, S.J., 2004, Degradation of chlorpyrifos contaminated soil by bioslurry reactor operated in sequencing batch mode: bioprocess monitoring, Journal of Hazardous Materials, 116, 39.
[63] San Miguel, A., Ravanel, P., Raveton, M., 2013, A comparative study on the uptake and translocation of organochlorines by *Phragmites australis*, Journal of Hazardous Materials, 244-245, 60.
[64] Meagher, R.B., 2000, Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants, Current Opinion in Plant Biology, 3, 153.
[65] Kuiper, I., Lagendijk, E.L., Bloemberg, G.V., Lugtenberg, B.J., 2004, Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction, Molecular Plant-Microbe Interactions, 17, 6.

[66] Moosavi, S.G., Seghatoleslami, M.J., 2013, Phytoremediation: A review, Advance in Agriculture and Biology, 1, 5.
[67] Etim, E.E., 2012, Phytoremediation and its mechanisms: A review, International Journal of Environment and Bioenergy, 2, 120.
[68] Vasavi, A., Usha, R., Swamy, P.M., 2010, Phytoremediation–an overview review, Journal of Industrial Pollution Control, 26, 83.
[69] Ekta, P., Modi, N.R., 2018, A review of phytoremediation, Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 7, 1485.
[70] Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L.M., Singh, N., Rezania, S., Khan, S.A., 2018, Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects, Ecological Engineering, 120, 274.
[71] Kristanti, R.A., Ngu, W.J., Yuniarto, A., Hadibarata, T., 2021, Rhizofiltration for removal of inorganic and organic pollutants in groundwater: A review, Biointerface Research in Applied Chemistry, 11, 12326.
[72] Paul, D., Pandey, G., Pandey, J., Jain, R.K., 2005, Accessing microbial diversity for bioremediation and environmental restoration, Trends in Biotechnology, 23, 135.
[73] Vishwakarma, G.S., Bhattacharjee, G., Gohil, N., Singh, V., 2020, Current status, challenges and future of bioremediation, In: Bioremediation of Pollutants: From Genetic Engineering to Genome Engineering, Elsevier, pp. 403-415.

Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, Autumn 2024, Vol. 1, Issue 3, Serial No. 3, pages 1-28

"Review article"

Bioremediation technology: A reliable and eco-friendly approach for the restoration of polluted environments

Mohammad Safari[1], Nasim Mosakhani[2], Ahmad Asl Hashemi[3], Gholamhossein Safari[3,4]*

[1]Faculty of Medicine, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran
[2]Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
[3]Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
[4]Health & Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
*Corresponding author: hsafari13@yahoo.com
(Received: 26 November 2024, Accepted: 25 December 2024)

Abstract

Environmental pollution has escalated over the past few decades due to the rise in anthropogenic activities. Global industrialization and modern agricultural practices have led to the emergence of pollutants such as hydrocarbons, pesticides, and heavy metals. Bioremediation technology is a key strategy for addressing the diverse challenges posed by environmental pollution, leveraging the capabilities of microorganisms to clean and protect ecosystems and remove contaminants from polluted environments. Bioremediation is a process that involves the reduction, removal, modification, and transformation of pollutants in natural environments such as soil, sediments, air, and water using microorganisms, fungi, plants, or their enzymes in order to restore the damaged environment to its original conditions. Bioremediation technologies are broadly categorized into in-situ and ex-situ methods. In-situ bioremediation is dedicated to the treatment of pollutants at the contaminated site, while ex-situ bioremediation involves the collection and transfer of contaminated materials to another location for treatment. In-situ bioremediation methods include biosparging, bioventing, biostimulation, bioslurping, bioaugmentation, and phytoremediation. On the other hand, ex-situ methods include land farming, composting, biopiles, biofilters, bioreactors, and windrow methods. Despite the numerous advantages of this technology, such as sustainability, low cost, and environmental compatibility, bioremediation faces significant challenges including biological specificity, environmental variability, site heterogeneity, scalability issues, and regulatory barriers. Overcoming these obstacles requires interdisciplinary research, development, and management. This paper provides a comprehensive overview of bioremediation, its goals, principles, methods, influencing factors, benefits, and the challenges it faces, as well as future prospects for this technology, emphasizing the need for ongoing research to optimize and expand its applications.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Environmental pollution, Microorganisms, Biodegradation, In-situ bioremediation, Ex-situ bioremediation