مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

کاربرد گیاهان در حذف آلاینده‌های نفتی

محدثه فریدونی گواسرائی[۱]، منا صراحی نوبر[۱*]، خدیجه کیارستمی[۱]

۱- گروه علوم گیاهی، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران*

نوع مقاله:
مروری

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
آلاینده‌های نفتی
گیاه‌پالایی
محیط زیست
هیدروکربن‌های نفتی

چکیده

پیشینه و هدف: صنعت نفت یک صنعت مهم، مادر و اشتغال‌زا است که به عنوان صنعت تغذیه‌کننده بسیاری از صنایع محسوب می‌شود. یکی از مشکلات مهم محیط‌زیستی مرتبط با این صنعت این است که در طی فرایندهای مختلف استخراج، انتقال، پالایش و فراوری آن امکان ورود نفت به محیط‌زیست وجود دارد. آلودگی نفتی محیط‌زیست، تهدیدی بزرگ برای سلامت اکوسیستم و انسان ایجاد می‌کند. از این رو حذف آلاینده‌های نفتی وارد شده به محیط‌زیست و به ویژه خاک برای سلامت آن، ضروری است. هدف از این مقاله، علاوه بر ارائه اطلاعات کلی در مورد گیاه‌پالایی، مرور آخرین پژوهش‌ها در مورد استفاده از گیاهان مختلف برای حذف آلاینده‌های نفتی از محیط‌زیست می‌باشد. هم‌چنین در این پژوهش تعدادی از گونه‌های گیاهی دارای قابلیت حذف آلاینده‌های نفتی معرفی شده است.

مواد و روش‌ها: برای انجام این مطالعه، کتابخانه‌های الکترونیکی الزویر، اشپرینگر و مرکز اطلاعات جهاد دانشگاهی (SID) با استفاده از کلیدواژه‌های Phytoremediation، Oil Contamination، گیاه‌پالایی، آلودگی نفتی و آلاینده نفتی مورد کاوش قرار گرفت. منابع پس از استخراج و دسته‌بندی موضوعی مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج: با انجام کاوش در منابع اطلاعات علمی ده مقاله مروری به عنوان هسته اصلی و در مجموع ۹۹ منبع استخراج شد و مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مطالعات صورت گرفته، استفاده از گیاهان برای حذف انواع آلاینده‌ها یکی از روش‌های مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست معرفی شده است. از جمله مزایای گیاه‌پالایی می‌توان به نیاز به سرمایه‌گذاری کم، امکان حذف آلاینده در محل، زیبایی‌شناسی مناسب، جلوگیری از فرسایش خاک، جلوگیری از انتشار مواد سمی و امکان استفاده به‌ویژه در مناطقی که غلظت آلاینده پایین است اشاره کرد. طبق مطالعات انجام شده، گیاهان از پنج مکانیسم مختلف شامل گیاه استخراجی، گیاه تثبیتی، گیاه تبدیلی، گیاه تبخیری و ریزوفیلتراسیون برای حذف آلاینده‌ها از محیط استفاده می‌کنند. در این مطالعه تعداد ۱۲ گیاه مؤثر در حذف فلزات سنگین و ۳۰ گیاه دارای قابلیت گیاه پالایی نفت و ترکیبات سمی مرتبط با آن یعنی هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای آروماتیک معرفی شدند.

بحث: گیاه‌پالایی یک روش دوستدار محیط‌زیست و مبتنی بر انرژی خورشید است که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است و امکان تجاری‌سازی آن نیز فراهم می‌باشد. در حال حاضر، فناوری گیاه‌پالایی در مراحل اولیه خود است و مشکلات فنی زیادی برای توسعه آن وجود دارد که باید برطرف شود. در میان گیاهان، گیاهان علفی با سطح ریشه بالا برای حذف هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای آروماتیک کارآمد

* پست الکترونیکی نویسنده مسؤول: m.sorahinobar@alzahra.ac.ir

هستند، زیرا سیستم ریشه فیبری آن‌ها سطح بسیار خوبی را برای میکروب‌ها و ریزوفیلتراسیون فراهم می‌کند. در حال حاضر و به‌ویژه در کشور ما نیاز مبرمی به کشف گونه‌های گیاهی جدید با توانمندی تحمل و حذف آلاینده‌های محیطی به‌ویژه آلودگی‌های نفتی وجود دارد. هم‌چنین انجام تحقیقات برای بهینه‌سازی فرآیندهای گیاه پالایی، درک فعل و انفعالات گیاهی، فعل و انفعالات میکروبی و تجهیزات مناسب برای انجام آن ضروری می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های مولکولی و توسعه گیاهان تراریخته برای افزایش کارامدی گیاه‌پالایی در حال گسترش است. بنابراین، انتظار می‌رود مهندسی ژنتیک نقش مهمی در افزایش کاربرد فن‌آوری‌های گیاه‌پالایی ایفا کند. مطالعات مربوط به این استراتژی‌ها در توسعه ابزارهای ساده‌تر و مقرون به صرفه برای گیاه‌پالایی بسیار مفید خواهد بود.

مقدمــه

صنعت نفت یک صنعت مهم، مادر و اشتغال‌زا است که به عنوان صنعت تغذیه‌کننده سایر صنایع نیز محسوب می‌شود. این صنعت نقش اساسی در حرکت پیش رونده اقتصادی کشور ایفا می‌کند. با توجه به روند رو به رشد اقتصاد جهانی و بالا رفتن تقاضای انرژی، نقش کلیدی صنعت نفت بیش از پیش مورد توجه بوده و منجر به توسعه چشمگیر آن در دهه‌های اخیر شده است. مطابق آمارهای وزارت نفت، ایران با دارا بودن بیش از ۱۶۰/۱۲ میلیارد بشکه نفت درجا به‌عنوان سومین دارنده ذخایر نفت خام در گروه اوپک و چهارمین دارنده ذخایر نفت جهان پس از ونزوئلا، عربستان سعودی و کانادا قرار دارد (Esrafili-dizaji & Harchegani, 2011). بر اساس موجود در سایت وزارت نفت در حال حاضر تعداد میادین نفتی فعال ایران ۷۴ میدان (۱۸ مورد در دریا و ۵۶ میدان در خشکی) است که توسط شرکت‌های زیر مجموعه وزارت نفت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

نفت از صدها یا هزاران هیدروکربن آلیفاتیک، هیدروکربن آروماتیک و سایر ترکیبات آلی مانند ترکیبات آلی فلزی تشکیل شده است (Wang *et al.*, 1998).

جدول ۱- اجزا تشکیل دهنده نفت خام (Innocent Chukwunonso Ossaia *et al.* 2019)

هیدروکربن‌ها	مثال
آلیفاتیک‌ها	
• آلکان‌ها	متان، پروپان، بوتان (گاز در دمای اتاق)؛
• آلکن‌ها	هگزان، اکتان هگزادکان (مایع در دمای اتاق)؛
• آلکین‌ها	ایکوزان، تریاکونتان، پنتاکانتان (جامد در دمای اتاق)
سیکلوآلیفاتیک‌ها	
• سیکلوآلکان‌ها	سیکلوهگزان، متیل سیکلوهگزان، متیل سیکلوپنتان، ۱،۲-دی متیل سیکلوپنتان
آروماتیک‌ها	
• مونوآروماتیک‌های BTEX	بنزن، اتیل بنزن، نفتالین، تولوئن، زایلن و فنانترن
ترکیبات دیگر	
• آسفالتن	فنل‌ها، اسیدهای چرب، کتون‌ها،
• موم و قیر	استرها، پورفیرین‌ها، پیریدین‌ها،
• رزین	کینولین‌ها، کارداکسول‌ها،
• ترکیبات غیر هیدروکربنی	سولفونات‌ها

اگرچه نفت و گاز طبیعی یک منبع اصلی انرژی هستند، اما در صورت انتشار تصادفی، تهدیدی بزرگ برای سلامت محیط‌زیست و انسان هستند. علاوه بر نشت نفت دریایی، نشت‌های نفتی در مناطق خشکی نیز بلایای محیط‌زیستی تأثیرگذاری هستند که ممکن است اثرات طولانی‌مدت بر اکوسیستم‌ها داشته باشند. هنگامی که نفت خام در محیط‌های خشکی رها می‌شود، خاک‌ها را آلوده می‌کند و بر گیاهان و جانوران تأثیر منفی می‌گذارد. نفت خام به راحتی به آب‌های زیرزمینی و دیگر منابع آب شیرین نفوذ می‌کند و بیشتر پخش می‌شود و باعث آسیب شدید به اکوسیستم‌های اطراف می‌شود. آلودگی خاک منجر به تغییرات اکولوژیک مختلفی مانند تکه تکه شدن زیستگاه می‌شود (Bi *et al.* 2011).

گزارش‌هایی از ایجاد آلودگی‌های نفتی در مناطق مختلف کشور توسط رسانه‌ها منتشر شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به وقوع آلودگی نفتی در منطقه حفاظت‌شده کرایی استان خوزستان (آذر ۱۴۰۰)، ترکیدگی لوله نفت در منطقه میانکوه شهرستان اردل استان چهارمحال و بختیاری (شهریور ۱۳۹۹)، وقوع آلودگی نفتی در حوالی جزیره خارک در خلیج فارس (فروردین ۱۳۹۸)، آلودگی نفت در سرخه حصار (۱۳۹۷)، آلودگی ناشی از نشت نفت از خط لوله انتقال نفت در دزفول (بهمن ۱۳۹۵)، حادثه برای تریلر نفت‌کش در استان لرستان (فروردین ۱۳۹۳)، ترک‌خوردگی تلمبه‌خانه انتقال نفت در پل‌دختر استان لرستان (مرداد ۱۳۹۰) به عنوان نمونه‌هایی از نشت نفت به محیط‌زیست در یک دهه اخیر اشاره کرد.

هنگامی که این آلاینده‌ها در خاک‌های سطحی رها می‌شوند، با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاص خود (Zahed *et al.*, 2010) شرایط نامطلوبی را برای رشد و فعالیت گیاهان ایجاد می‌کند (Gaskin & Bentham, 2010). وجود این آلاینده‌ها در خاک به طور قابل توجهی کیفیت خاک را کاهش می‌دهد (Tang *et al.*, 2010). بنابراین، اصلاح و حذف این مواد از خاک برای سلامت محیط‌زیست، ضروری است (Kang, 2014; Nichols *et al.*, 2014).

برای پاک‌سازی و حذف آلاینده‌ها می‌توان از فرآیندهای بیولوژیک، فیزیکی، حرارتی و شیمیایی استفاده کرد (Peng *et al.*, 2009). این روش‌ها می‌تواند به صورت واحد یا ترکیبی بر اساس نوع و کمیت آلاینده و شرایط آب و هوایی استفاده شود. به‌کارگیری هر روش دارای مزایا و معایبی است. بزرگ‌ترین محدودیت‌های این روش‌ها پیچیدگی فرآیندها و استفاده از تجهیزات پیچیده است (Walls, 2010). روش دیگر گیاه‌پالایی است. گیاه‌پالایی، استفاده از گیاهان برای اصلاح خاک، آب یا هوای آلوده است و از نظر محیط‌زیستی یک روش ایمن است که برای حذف آلاینده‌ها استفاده می‌شود (Tang *et al.*, 2015; Lotfinasabasl *et al.*, 2013) در مقایسه با روش‌های سنتی و گران‌قیمت (شستشو و حرارت دادن)، استفاده از گیاهان در تجزیه ترکیبات سمی یک جایگزین نسبتاً کم‌هزینه است. از گیاه‌پالایی برای اصلاح محیط‌های مختلف (خاک و آب)، آلوده به فلزات سنگین و/یا هیدروکربن‌های نفتی استفاده شده است (Semple *et al.*, 2003). با این حال، استفاده از تکنیک گیاه‌پالایی ممکن است به عمق معین خاک (تا ناحیه ریشه) و به غلظت نسبتاً کم آلاینده محدود شود. فرآیندهای اساسی گیاه‌پالایی عبارت‌اند از: تبدیل، تثبیت، جذب و سم‌زدایی مولکول‌های هیدروکربن. بازدهی گیاه‌پالایی، تا حد زیادی به عواملی مانند نوع خاک، وضعیت آب، مواد مغذی، دمای خاک، شوری خاک، سدیمی بودن خاک و pH بستگی دارد (Zhang *et al.*, 2010). هدف مطالعه حاضر، ارائه اطلاعات کلی در مورد گیاه‌پالایی و استفاده از گیاهان برای حذف آلاینده‌های نفتی از محیط است.

اثرات محیط‌زیستی نفت خام

منابع هیدروکربن‌های نفتی متعدد است. بسیاری از آلودگی‌های نفتی ناشی از انتشار غیرعمدی یا عمدی آلاینده‌های هیدروکربنی است که طی فرایند اکتشاف و استخراج نفت و گاز، حمل و نقل، نشت از مخازن، نشت تصادفی در بارگیری و تخلیه، ورود به محیط‌زیست به صورت پساب صنایع پتروشیمی، نشت بر اثر ترکیدگی در خطوط لوله زیرزمینی قدیمی و البته در زمان جنگ و بحران سیاسی رخ می‌دهد (Bejarano & Michel, 2010). هیدروکربن‌های نفتی بسته به ماهیت شیمیایی، ترکیب و نحوه قرار گرفتن در سطوح، معمولاً سمی و کشنده هستند. آلاینده‌ها می‌توانند طیف وسیعی از مشکلات

بهداشتی را برای انسان و جانوران ایجاد کنند، از جمله سمیت خون (تخریب گلبول‌های قرمز)، سرطان‌زایی، سمیت ژنتیکی (آسیب به DNA)، سمیت سلولی، آسیب به مغز و سیستم عصبی، قابلیت سرکوب سیستم ایمنی، آسیب به کلیه، توانایی ایجاد آسیب به کبد، ظرفیت ایجاد آسیب به عضلات قلب و توانایی ایجاد اختلالات بینایی (Azeez *et al.*, 2015; Lawal, 2017). هم‌چنین رشد گیاهان را متوقف می‌کند و باعث از بین رفتن فرآیندهای متابولیک و در نهایت کاهش محتوای کلروفیل و اختلال در جذب آب و مواد مغذی می‌شوند (Rusin *et al*., 2015, Moradi *et al*., 2018). بر کیفیت خاک‌های سطحی تأثیر می‌گذارد (شکل ۱).

شکل ۱- اثرات هیدروکربن‌های نفتی روی سلامتی

روش‌های حذف آلاینده‌های نفتی

آلاینده‌های نفتی در خاک، رسوبات، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی یک تهدید بزرگ برای سلامت انسان هستند. روش‌های حذف آلاینده‌ها در پاک‌سازی محیط آلوده نقش حیاتی دارند و برای هر محیط آلوده متفاوت است، ماهیت و ترکیب آلاینده‌ها، شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک محیط آسیب‌دیده برای حذف آلاینده‌ها باید در نظر گرفته شوند. علاوه بر این، مکانیسم‌ها، الزامات نظارتی، هزینه و محدودیت‌های زمانی در انتخاب هر روش باید در نظر گرفته شوند. محیط‌های تحت تأثیر عمدتاً خاک، آب‌های سطحی، رسوبات و آب‌های زیرزمینی هستند که معمولاً آلوده به ترکیبات هیدروکربنی نفتی با وزن مولکولی بالا و پایین، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، ترکیبات آلی نیمه فرار (SVOCs)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)، آلاینده‌های آلی (POPs)، بی فنیل‌های پلی کلره (PCBs)، آفت‌کش‌های آلی کلره (OCPs)، ترکیبات آلی آب‌گریز (HOCs) و فلزات سنگین می‌شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند به محیطی دور از محل اصلی گسترش پیدا کنند و جوامع جانوری و گیاهی را در منطقه آسیب‌دیده تهدید نمایند (Thavamani *et al.*, 2015). آلاینده‌ها را به سه روش فیزیکی (تصفیه حرارتی، استخراج بخارات آلاینده از خاک)، شیمیایی مانند (شستشوی خاک، تثبیت و جامد سازی) و زیستی تقسیم می‌شوند که گاهی می‌توان از ترکیب این سه روش استفاده کرد. روش‌های فیزیکی و شیمیایی برای مناطقی با وسعت نسبتاً کم کاربرد دارند و برای مساحت‌های زیاد بسیار پر هزینه‌اند و مخلّ شرایط طبیعی محیط‌زیست می‌باشند، هم‌چنین این روش برای تصفیه آلاینده‌های نفتی به دلیل پایین بودن حلالیت، غیر قطبی بودن و هیدروفوب بودن همواره با مشکلاتی مواجه بوده‌اند. از طرفی با توجه به این‌که ذرات رسی درصد بالایی از بافت خاک‌های آلوده را تشکیل می‌دهند و پاک‌سازی آن‌ها با روش‌های فیزیکی و شیمیایی به راحتی امکان‌پذیر نیست هزینه بالای حذف آلاینده‌ها از خاک و خطرات بهداشتی مربوط به آلودگی خاک موجب تلاش جهت ایجاد و توسعه فن‌آوری‌های جایگزین و ارزان‌تر برای پالایش زمین‌های آلوده گردیده است. بنابراین نقش فرایندهای زیست پالایی در حذف آلاینده‌های موجود در خاک‌های آلوده آشکار می‌شود (Daryabei *et al.*, 2009). استفاده از روش زیستی از دهه ۱۹۴۰ آغاز شد. از مزایای این روش، می‌توان به ساده بودن تکنولوژی، امکان استفاده هم زمان با سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی، پایین بودن هزینه‌های جاری اولیه، امکان تخریب کامل آلاینده‌ها و عدم نیاز به تجهیزات تخصصی را نام برد. از روش‌های زیستی می‌توان به زیست پالایی و گیاه‌پالایی اشاره کرد که در زیست‌پالایی از میکروارگانیسم‌ها برای حذف آلاینده‌های نفتی از خاک استفاده می‌شود و در گیاه‌پالایی از گیاهان برای حذف آلاینده‌های نفتی از خاک استفاده می‌شود (Dustaki *et al*., 2011).

گیاه‌پالایی

گیاه‌پالایی کلمه‌ای است که از پیشوند یونانی "phyto" به معنی گیاه و پسوند لاتین "remedium" به معنای تمیز

کردن یا بازیابی تشکیل شده است (Cunningham *et al*., 1997). یک فناوری سبز نو ظهور است که از گیاهان برای حذف، تجزیه و بی‌حرکت کردن آلاینده‌هایی مانند فلزات، هیدروکربن‌ها، رنگ‌ها و مواد سمی از خاک، آب یا هوا، استفاده می‌کند. این فرایند کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست است. ایده استفاده از گیاهان برای حذف آلاینده‌های نفتی، فلزات سنگین و سایر ترکیبات برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ مطرح شد، اما این روش در واقع در ۳۰۰ سال گذشته برای تصفیه فاضلاب اجرا شده است. گیاه‌پالایی برای حذف طیف وسیعی از مولکول‌ها از مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، و زایلن‌ها) و آلیفاتیک ساده در نفت خام سبک تا آلاینده‌های پیچیده‌تر و بسیار مقاوم‌تر، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای، مواد منفجره و آفت‌کش‌ها (Xiao *et al*., 2015) برای سایت‌های ذوب و معدن، مکان‌های تولید گاز، پالایشگاه‌ها، محل‌های دفن زباله‌های هسته‌ای، زباله‌های صنعتی و شهری (Singh & Jain, 2003) استفاده شده است. اولین گونه‌های گیاهی مورد استفاده برای حذف آلاینده‌ها، *Thlaspi caerulescens* و *Viola calaminaria* بودند (Nikolic, 2015). با کشف گونه‌های گیاهی جدید با پتانسیل گیاه‌پالایی و درک بهتر مسیرهای متابولیکی آن‌ها، گیاه‌پالایی می‌تواند راه حلی برای چالش‌های قرن بیست و یکم باشد. البته گیاهانی با سیستم ریشه گسترده، حداقل نیاز آبی، سازگار با انواع شرایط محیطی و سرعت رشد بالا برای این منظور مناسب هستند (Escobar Alvarado *et al*., 2018). تعدادی از این گیاهان در جدول ۲ معرفی شده‌اند. کارایی گیاه‌پالایی به انتخاب گونه گیاهی، شرایط محیطی و ریزوباکتری‌ها بستگی دارد (Farraji *et al*., 2016). مکانیسم‌های مختلفی توسط گیاهان برای حذف آلاینده‌ها وجود دارد که می‌توان به، تجمع گیاهی (جذب آلاینده‌ها در ریشه یا اندام هوایی)، تخریب گیاهی (تخریب آلاینده‌ها با استفاده از آنزیم‌های گیاهی مانند لاکاز، اکسیژناز و نیترو ردوکتاز) و تثبیت گیاهی (کاهش حرکت آلاینده‌ها) اشاره کرد (Nguemté *et al*., 2018).

جدول ۲- گونه‌های گیاهی مورد استفاده در گیاه‌پالایی

	گونه‌های گیاهی	آلاینده‌ها	رفرنس
۱	*Cernuella virgate*	روی، مس، منگنز، آهن	(Nikolic and Stevovic 2015)
۲	*Chromolaena odorata* (L.)	جیوه، آلاینده‌های رادیونوکلوئید	(Nikolic and Stevovic 2015)
۳	*Helianthus annuus* (L.)	روی، سرب، کادمیوم، نیکل، مس، آرسنیک، رادیونوکلوئتیدها	(Nikolic and Stevovic 2015)
۴	*Brassica juncea*	سرب، طلا	(Mahar *et al*. 2016)
۵	*Eleocharis acicularis*	مس، روی، کادمیوم، آرسنیک	(Mahar *et al*. 2016)
۶	*Spartina maritime*	نیکل، روی	(Khandare, 2015)
۷	*Jatropha curcas*	ترکیبات آلی پایدار، فلزات سنگین	(Tripathi *et al*. 2016)
۸	*Ricinus communis*	کادمیوم، دی کلرو دی فنیل تری کلرو اتان	(Tripathi *et al*. 2016)
۹	*Medicago sativa* (L.)	کل هیدروکربن‌های نفتی	(Ndimele 2010)
۱۰	Indian grass *Sorghastrum nutans*	کل هیدروکربن‌های نفتی	(Ndimele., 2010)
۱۱	آفتاب‌گردان	اندوسولفان	(Mitton *et al*. 2016)
۱۲	*Cynara cardunculus* L.	لجن فاضلاب	(Pandey and Bajpai 2016)

مزایا و معایب گیاه پالایی

گیاه‌پالایی علاوه بر مزایا، محدودیت‌هایی نیز دارد (جدول ۳) که از مزایای گیاه‌پالایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. کم هزینه است. این روش می‌تواند در محل انجام شود و نیازی به انتقال خاک‌های آلوده نیست.
۲. گیاهان را می‌توان به راحتی کنترل کرد.
۳. امکان بازیافت و استفاده مجدد از فلزاتی که توسط گیاهان جذب شده وجود دارد
۴. این روش کم ضررترین روش است زیرا از موجودات طبیعی استفاده می‌کند و محیط‌زیست را در حالت طبیعی خودش حفظ می‌کند.

۵. درختان را می‌توان در گیاه‌پالایی استفاده کرد، زیرا آن‌ها در زمین‌های با کیفیت رشد می‌کنند، طول عمر طولانی دارند و تحمل سیل بالایی دارند. بید و صنوبر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند حدود دو متر در سال رشد کنند. برای آلودگی عمیق، از صنوبرهای هیبریدی با ریشه هایی عمیق استفاده شده است.

۶. مهندسی ژنتیک ممکن است باعث بهبود گیاه‌پالایی شود، گیاهان با اصلاح ژنتیکی می‌توانند در خاک‌هایی رشد کنند که سطوح آلودگی در خاک برای گیاهان تیمار نشده کشنده است و غلظت بیشتری از آلاینده را جذب می‌کنند (Ramanjaneyulu & Giri, 2016).

و اما محدودیت‌های گیاه‌پالایی به شرح زیر می‌باشد:

۱- گیاه‌پالایی با سطح منطقه و عمق اشغال شده توسط ریشه گیاه محدود می‌شود.

۲- رشد آهسته و زیست‌توده کم است.

۳- با استفاده از گیاهان، نمی‌توان به طور کامل از ورود آلاینده‌ها به داخل آب‌های زیرزمینی جلوگیری کرد.

۴- بقای گیاهان تحت تأثیر سمیت زمین آلوده و وضعیت کلی خاک است.

۵- تجمع زیستی آلاینده‌ها، به ویژه فلزات در گیاهان (Ramanjaneyulu & Giri, 2016).

جدول ۳- مزایا و معایب گیاه‌پالایی (Filips, 2015)

	مزایای گیاه‌پالایی	معایب گیاه‌پالایی
۱	هزینه سرمایه‌گذاری کم و حداقل تجهیزات مورد نیاز	حذف ناقص آلاینده‌ها با عملکرد پایین در دراز مدت
۲	کاهش هزینه نیروی کار و کاهش هزینه در عملیات	کاربرد محدود برای انواع مختلف آلاینده، به ویژه در مورد آلاینده‌های با سمیت بالا
۳	می‌تواند در محل اعمال شود، یعنی حذف آلاینده‌ها در محل، چه در خاک، آب یا آب‌های زیرزمینی	عمدتاً برای لایه بالایی خاک کاربرد دارد
۴	از نظر زیبایی‌شناسی مناسب و به طور گسترده برای جامعه عمومی پذیرفته شده است	دفع صحیح مواد گیاهی با ارزیابی ریسک مناسب مورد نیاز است
۵	از نظر بیولوژیکی بسیار فعال	امکان معرفی و پراکندگی گونه‌های گیاهی مهاجم و نامطلوب
۶	فرسایش خاک‌ها به ویژه خاک‌های معدنی را کاهش می‌دهد	اثربخشی فرآیند گیاه‌پالایی تحت تأثیر عوامل فصلی است
۷	شسته شدن ذرات معلق و انتشار مواد سمی را کاهش می‌دهد	مرگ گیاهان ممکن است در مکان‌های بسیار سمی رخ دهد که می‌تواند هزینه این فرآیند را افزایش دهد
۸	آلاینده‌ها را می‌توان از بافت‌های گیاه بازیابی کرد و فرصتی برای تجاری‌سازی فراهم کرد	خطر تجمع زیستی آلاینده‌ها در زنجیره غذایی
۹	در مکان‌هایی که آلاینده‌های سمی/کم وجود دارد بسیار مؤثر است	به عملکرد خوب کشت و نگهداری لازم است
۱۰	می‌تواند برای گیاه‌پالایی خاک‌هایی که برای کشاورزی حاصلخیز نیستند استفاده شود	درک بهتر رفتار و تغییرات فیزیولوژیکی گیاهان در پاسخ به انواع مختلف زائدات مورد نیاز است

مکانیسم‌های گیاه‌پالایی

مکانیسم‌ها و کارایی گیاه‌پالایی به نوع آلاینده، دسترسی زیستی و خواص خاک بستگی دارد (Cunningham, *et al.*, 1996). روش‌های مختلفی وجود دارد که گیاهان از طریق آن‌ها مکان‌های آلوده را تمیز یا اصلاح می‌کنند. جذب آلاینده‌ها در گیاهان عمدتاً از طریق سیستم ریشه اتفاق می‌افتد. ریشه سطح وسیعی را فراهم می‌کند که آب و مواد مغذی ضروری برای رشد را همراه با سایر آلاینده‌های غیر ضروری جذب و انباشته می‌کند. این مطالعه پنج مکانیسم را شناسایی کرده است که به‌وسیله آن‌ها گیاهان می‌توانند بر آلاینده‌های خاک، رسوبات و آب تأثیر بگذارند. اگرچه همپوشانی یا شباهت‌هایی را می‌توان بین برخی از این مکانیسم‌ها مشاهده کرد (شکل ۲). این پنج تکنیک عبارت‌اند از:

۱- گیاه استخراجی (Phytoextraction)

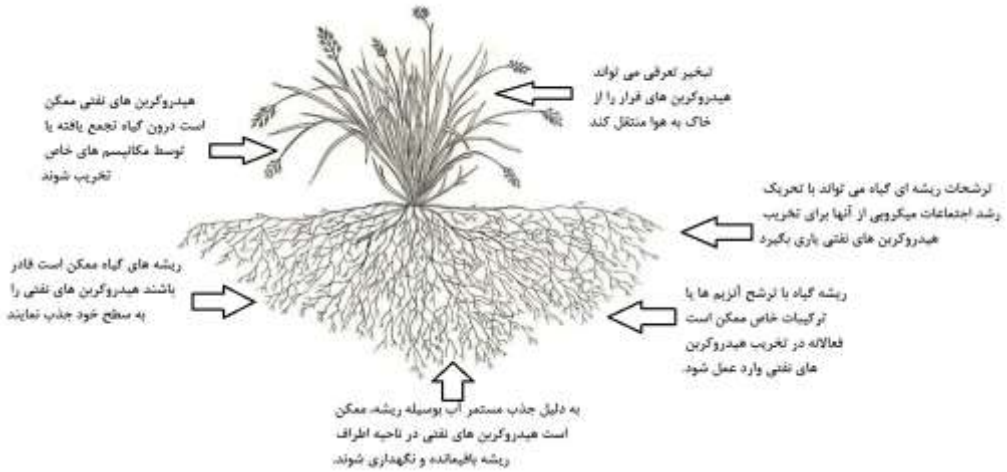
۲- گیاه تثبیتی (Phytostabilization)

۳- گیاه تبدیلی (Phytodegradation)

۴- گیاه تبخیری (Phytovolatilization)

۵- ریزوفیلتراسیون (Rhizofiltration).

هر کدام به تفصیل در زیر توضیح داده شده‌اند. هر یک از این مکانیسم‌ها بر حجم، تحرک یا سمیت آلاینده‌ها اثر خواهند داشت (Raskin & Ensley, 2000).



شکل ۲- روش‌های مختلفی که گیاهان می‌توانند برای حذف آلاینده‌های مختلف نفتی به کار ببرند.

گیاه استخراجی

گیاه استخراجی، شامل جذب فلزات و آلاینده‌های نفتی از ریشه گیاه و انتقال آن‌ها از طریق آوند چوبی به شاخه‌ها و برگ‌ها است که در نهایت برداشت می‌شوند و از محل خارج می‌شوند (Nikolic´ & Stevovic´, 2015). این فناوری شکل پیشرفته‌ای از گیاه‌پالایی است که در آن گیاهان با زیست‌توده بالا در مناطق آلوده رشد می‌کنند. این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم مزایای متعددی دارد، یعنی مقرون به صرفه است و فرسایش خاک را نیز کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، عوامل متعددی وجود دارد که پتانسیل گیاه استخراجی را محدود می‌کند، مانند دسترسی زیستی فلز در ریزوسفر که به pH خاک و محتوای رس و تحمل سلولی به فلزات سمی بستگی دارد. آفتابگردان (*Helianthus annuus*) به دلیل رشد سریع و بالا، زیست‌توده و پتانسیل بالا در حذف برخی از فلزات سنگین و سایر ترکیبات سمی مانند آلاینده‌های نفتی یکی از گونه‌های مورد بهره‌برداری برای گیاه استخراجی بوده است (Nikolic´ & Stevovic´ 2015).

گیاه تثبیتی

این رویکرد عمدتاً از ریشه‌های (ریزوسفر) گیاه برای بی‌حرکت کردن و محدود کردن آلاینده‌ها در خاک و آب‌های زیرزمینی استفاده می‌کند. گیاه تثبیتی از حرکت آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کند و از این رو دسترسی زیستی آن‌ها را در زنجیره غذایی کاهش می‌دهد؛ بنابراین، اثرات نامطلوب آلاینده‌ها در محیط اطراف را می‌توان با محدود کردن آن‌ها از ورود به آب‌های زیرزمینی یا پخش در هوا کنترل کرد. یک تکنیک ساده و مقرون به صرفه برای تثبیت و کاهش دسترسی زیستی آلاینده‌ها در محیط است. با این حال، عیب عمده این روش این است که آلاینده‌ها به طور کامل از خاک حذف نمی‌شوند و نیاز به نظارت منظم دارند. در مطالعات اخیر، *Lolium perenne* L. به عنوان گیاهی برای گیاه تثبیتی خاک آلوده استفاده شده است (Nikolic´ & Stevovic´, 2015).

گیاه تبدیلی

گیاه تبدیلی از گیاهان برای حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی مانند علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، حلال‌های کلردار، آلاینده‌های معدنی و آلاینده‌های نفتی استفاده می‌کند. در این روش، آلاینده‌ها توسط گیاهان جذب می‌شوند و بیشتر به مواد نامحلول و بی‌اثر تجزیه می‌شوند که در نهایت یا به صورت ماده آزاد می‌شوند یا در بافت‌های لیگنین ذخیره می‌شوند. هم‌چنین آلاینده‌ها می‌توانند در بافت‌های گیاهی با کمک آنزیم در سلول‌های ریشه و یا ساقه گیاه متابولیزه شوند. آنزیم‌های متابولیک، دهیدروژنازها، اکسیژنازها و ردوکتازها هستند که آلاینده‌ها را به مواد مغذی تبدیل می‌کنند و گیاهان می‌توانند از آن‌ها در متابولیسم خود استفاده کنند؛ بنابراین آلاینده‌ها تبدیل می‌شوند، از نظر بیوشیمیایی به بافت‌های گیاهی محدود می‌شوند و از نظر بیولوژیک کمتر برای محیط‌زیست مضر هستند (Nikolic´ & Stevovic´, 2015).

گیاه تبخیری

گیاه تبخیری از گیاهان سبز برای جذب آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده، تبدیل آن‌ها به ترکیبات فرار و انتقال آن‌ها از طریق اندام‌های هوایی استفاده می‌کند. گیاه تبخیری برای آلاینده‌هایی مانند جیوه (Hg)، مواد شیمیایی معدنی که دارای اشکال فرار هستند، مانند سلنیوم (Se)، آرسنیک (As) و هم‌چنین ترکیبات آلی فرار (VOCs)، به عنوان مثال، تری کلرواتن استفاده شده است. مزیت گیاه تبخیری این است که آلاینده سمی ممکن است به ماده‌ای که کمتر سمی است، تبدیل شود و سپس در جو منتشر شود. با این حال، احتمالاً ماده آزاد شده در جو با بارش بازیافت می‌شود و سپس دوباره در اکوسیستم آبی ذخیره می‌شود و تولید شکل سمی این ماده تکرار می‌شود. وجود گیاهان، فرسایش خاک و میزان آب مورد نیاز در سیستم را کاهش می‌دهد. با این حال، این فناوری پاک‌سازی چندین معایب عمده دارد از جمله: باقی ماندن آلاینده در خاک، اعمال کود دهی گسترده یا اصلاحات خاک، نظارت اجباری مورد نیاز است و تثبیت آلاینده‌ها ممکن است در درجه اول به دلیل اصلاح خاک باشد (Nikolic´ & Stevovic´, 2015).

ریزوفیلتراسیون

ریزوفیلتراسیون ترکیبی از گیاه استخراجی و گیاه تثبیتی است. این فرآیند شامل جذب، تغلیظ و رسوب آلاینده‌ها در فاضلاب، آب‌های سطحی یا آب‌های زیرزمینی آلوده توسط ریشه‌های گیاه است. آلاینده‌های جذب‌شده و تغلیظ شده به صورت کربنات و فسفات در داخل ریشه گیاه رسوب می‌کنند. اخیراً نشان داده شده است که گیاهان زمینی که به صورت هیدروپونیک رشد می‌کنند، مانند خردل و آفتابگردان، به طور مؤثر مس، کادمیوم، کروم، نیکل، سرب، روی و آهن را از محلول‌های آبی حذف می‌کنند. علاوه بر فلزات، هم‌چنین مشاهده شد که از ریزوفیلتراسیون می‌توان برای حذف ترکیبات آلی مانند تتراکلرواتان، تری کلرواتیلن (TCE)، متولاکلر، آترازین، نیتروتولوئنزانیلین‌ها، دیوکسین‌ها و هیدروکربن‌های مختلف نفتی استفاده کرد. گیاهان خشکی‌زی به دلیل سیستم‌های ریشه‌ای فیبری و طولانی‌تر برای فرآیند ریزوفیلتراسیون مناسب‌تر هستند. با این حال، گیاهان نیاز به دفع منظم و برداشت دوره‌ای دارند که دامنه فرآیند ریزوفیلتراسیون را محدود می‌کند (Nikolic´ & Stevovic´, 2015).

گیاه‌پالایی برای حذف هیدروکربن‌های نفتی

آلاینده‌های نفتی اثرات زیانباری بر روی جانوران، گیاهان و انسان‌ها دارند و حتی کیفت خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین حذف این آلاینده‌ها از خاک ضروری است. یکی از این روش‌ها که مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست است، گیاه‌پالایی است. اولین هدف در گیاه‌پالایی، یافتن گونه‌ای گیاهی است که به یک آلاینده خاص مقاوم باشد یا آن را تحمل کند تا پتانسیل آن برای گیاه‌پالایی به حداکثر برسد. گیاهان مقاوم معمولاً در مرز مکان‌های آلوده رشد می‌کنند. هنگامی‌که یک گونه گیاهی مقاوم انتخاب شد، از روش‌های اصلاحی سنتی برای بهینه‌سازی مقاومت یک گونه نسبت به یک آلاینده خاص استفاده می‌شود. روش‌های کشاورزی مانند کاربرد کودها و تنظیم‌کننده‌های pH را می‌توان برای بهبود بیشتر پتانسیل گیاه‌پالایی مورد استفاده قرار داد. برای گیاه‌پالایی موفق، هم گیاهان و هم میکروب‌ها باید در خاک آلوده به نفت خام که معمولاً از نظر مواد مغذی کم است، زنده بمانند و رشد کنند. میکروارگانیسم‌ها به نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریز مغذی‌ها برای تجزیه آلاینده‌های نفتی خاک نیاز دارند (Rangzan, 2006). از این میان، نیتروژن در بالاترین غلظت مورد نیاز است (Besalatpour *et al.*, 2010). کودهای نیتروژن به طور معمول برای تسهیل رشد گیاه در خاک‌های آلوده به نفت اضافه می‌شوند (Ahmadi afzadi, 2005). از روش‌های زراعی مناسب مانند خاک‌ورزی و افزودن آهک نیز می‌توان برای بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک برای افزایش رشد گیاهان و میکروب‌ها استفاده کرد.

گیاهانی که در نواحی دارای آلودگی نفتی رشد داده می‌شوند، اثرات تجمعی مواد سمی و کاهش رشد را نشان می‌دهند. هم‌چنین نفت سبب جلوگیری از هوادهی خاک می‌شود و منافذ خاک و سطح ریشه گیاه را می‌پوشاند؛ این موضوع ممکن است به خفگی ریشه گیاه بیانجامد (Pernar *et al.*, 2006) هوادهی ناکافی سبب تنش در ریشه گیاه و عدم دسترسی کافی به آب می‌شود (Ashraf, 1999) که به نوبه خود از رشد ممانعت به عمل می‌آورد. اثرات نفت خام بر گیاه تابع غلظت نفت، مدت زمان قرار گرفتن در معرض نفت و گونه گیاه است (Adam & Duncan, 2002; Baek

et al., 2004; Merkl *et al*., 2004) از جمله صفات فیزیولوژیک که تحت تأثیر تنش نفتی قرار می‌گیرد، مقدار رنگیزه‌ها و وضعیت تغذیه‌ای گیاه می‌باشد (Naidoo *et al*., 2010; Yong & Tam, 2007) با جذب آلاینده‌های نفتی از خاک، رشد و کروفیل گیاهان کاهش می‌یابد (Moradi *et al*., 2018) ولی با جذب آلاینده‌ها در اندام خود مانع از آلودگی نفتی خاک می‌شوند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که چندین گونه از گیاهان توانایی رشد در مکان‌های آلوده به نفت را دارند و در واقع آلاینده‌ها را از منطقه استخراج می‌کنند. گونه‌های مختلف گیاهی مورد استفاده در مطالعات گیاه‌پالایی قابلیت‌های متفاوتی را برای حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک نشان داده‌اند که در جدول ۴ ارائه شده است. در مطالعات مولکولی مربوط به بررسی اثر هیدروکربن‌های نفتی بر گیاه و جستجوی ژن‌های مؤثر در گیاه پالایی استفاده از ژن های خانه‌دار مناسب دارای اهمیت زیادی است (Moradi *et al*., 2019). طیفی از ژن‌های موثر در گیاه پالایی و اعطای مقاومت به گیاه در مواجهه با آلاینده‌های نفتی معرفی شده است که می‌توان به پلی فنل اکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گاوتاتیون s ترانسفراز اشاره کرد که در مواجهه با تنش‌های پاداکسایشی موثر می‌باشند (Moradi *et al*., 2020).

جدول ۴- برخی از گیاهان با قابلیت حذف آلاینده‌های نفتی

نام گونه گیاهی	منبع	نام گونه گیاهی	منبع
Agropyron smithii	Aprill & Sims (1990)	*Lolium multiflorum*	Lalande *et al*., (2003)
Bouteloua curtipendula		*Medicago sativa* L.	Fan *et al.* (2008), Afegbua & Batty (2018), Kaimi *et al.* , Liu *et al*., (2015)(2007)
Panicum virgatum		*Agropyron desertorum*	Ferro *et al.*, (1994)
Schizachyrium scoparius		*Buchloe dactyloides* var. Prairi	Qiu *et al*., (1997)
Andropogon gerardi		*Lemna gibba*	Duxbury *et al*., (1997)
Bouteloua gracilis		*Lolium perenne* L.	D'Orazio *et al*., (2013), Fu *et al.*, (2012), Kechavarzi *et al.*, (2007), Afegbua & Batty (2018)
Elymus canadensis		*Panicum coloratum var*. Verde	Qiu *et al.* (1997)
Sorghastrum nutans		*Phaseolus vulgaris* L.	Edwards (1998)
Panicum virgatum	Pradhan *et al*., (1998)	*Schizachyrium scoparium*	Pradhan *et al*., (1998)
Populus deltoides x nigra	Jordahl *et al*., (1997)	*Avena barbata*	Miya & Firestone (2000)
Buchloe dactyloides	Qiu *et al*. (1997)	*Echinacea purpurea*	Liu *et al*.(2015)
Daucus carota	Wild and Jones (1992)	*Cynodon dactylon*	Kaimi *et al*. (2007)
Festuca arundinacea Schreb	Epuri and Sorensen (1997), Banks *et al*. (1999), Ho and Banks (2006), Cheema *et al*.(2009), Lu *et al*. (2014), Liu *et al*.(2015), Afegbua and Batty (2018)	*Pueraria lobata*	
Glycine max	Edwards (1998)	*Bidens frondosa*	
Avicnnia marina	Moradi et al., 2020	*Hordeum vulgare* *Avena sativa*	Rajaei et al., 2012

هم‌چنین چند نمونه دیگر از این گیاهان عبارت‌اند از: *Agropyron smithii*، *Buchloe dactyloides var. Prairie*، *Glycine max* و غیره که دارای پتانسیل بالایی برای حذف هیدروکربن‌های نفتی هستند. سنبل آبی (*Eichornia crassipes*) نیز می‌تواند برای گیاه‌پالایی مناسب باشد زیرا دارای سیستم ریشه‌ای فیبری مانند

چمن دشتی است که روی سطح آب شناور است. از آن جایی‌که بیشتر نشت نفت در بدنه‌های آبی رخ می‌دهد، یک گیاه شناور آبزی مانند سنبل آبی بسیار مناسب است (Wang *et al.*, 2014). اویسنیا مارینا (Jia *et al.*, 2016) می‌توانند برخی از PAHها را در خاک‌های آلوده پاک کنند. از آن‌جایی که PAH ها از متداول‌ترین و پایدارترین آلاینده‌های سمی نفتی هستند، انتظار می‌رود تأثیر آن‌ها بر روی اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر و شکننده، مانند جنگل‌های حرا، بیشتر شود. آلودگی ناشی از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) به یک موضوع خطرناک محیط‌زیستی تبدیل شده است و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. فاضلاب و پسماندهای حاصل از صنایع نفت همه محیط‌زیست را آلوده می‌کند (Singer *et al.*, 2004). حذف PAHها از خاک می‌تواند از طریق مکانیسم‌های مختلفی انجام شود، از جمله: ۱- افزایش فعالیت میکروبی خاک، ۲- افزایش ارتباط میکروبی با ریشه و ترکیبات سمی و ۳- تغییرات در خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک آلوده. مطالعات زیادی وجود دارد که نقش گیاهان و میکروب‌ها را در تخریب PAH نشان می‌دهد (Alkorta & Garbisu, 2001). تخریب PAH در چندین کشت بافت سلولی گیاهی مشاهده شد. در میان گیاهان، گیاهان علفی با سطح ریشه بالا برای حذف PAH کارآمد هستند، زیرا سیستم ریشه فیبری آن‌ها سطح بسیار خوبی را برای میکروب‌ها و ریزوفیلتراسیون فراهم می‌کند. تحقیقات گیاه‌پالایی بر روی اندوفیت‌های گیاهی برای بهبود تجزیه زیستی آلاینده‌ها متمرکز شده است (Ijaz *et al.*, 2015). زمان تماس طولانی‌تر بین آلاینده و میکروارگانیسم‌های اندوفیت باعث تخریب آلاینده می‌شود و در نتیجه خطر سمیت کاهش می‌یابد و تبخیر و تعرق آلاینده‌های آلی فرار کاهش می‌یابد. در یک مطالعه، تجزیه هیدروکربن زمانی مؤثرتر بود که اندوفیت‌ها به جای سویه‌های ریزوسفری در علف چاودار ایتالیایی تلقیح شدند (Andria *et al.*, 2009). اندوفیت‌ها سطح بالاتری از کلونیزاسیون ریشه، برهمکنش پایدار با گیاه، بیان ژن را نشان دادند (Ijaz *et al.*, 2015). بیشتر مطالعات گیاه پالایی PAH بر روی گیاهان گلدانی و یا در شرایط گلخانه یا آزمایشگاه انجام می‌شود و مطالعات کمی در مورد حذف PAH توسط گیاه‌پالایی در شرایط طبیعی وجود دارد. در یک مطالعه میدانی، در مزرعه کشاورزی در شرق چین گونه گیاهی (*Lolium perenne L*) انتخاب شد. در این مزرعه غلظت PAHs (۳-۶ حلقه) در خاک حدود ۱۴۰۰ میکروگرم در کیلوگرم خاک بود. در اینجا دو مجموعه تیمار: شاهد کاشته نشده (CK) و خاک کاشته شده با چچم چند ساله در یک طرح کاملاً تصادفی از کرت‌های مزرعه با چهار تکرار از هر تیمار انجام شد. کل بوته‌ها ۸ ماه پس از کاشت برداشت شدند و بذرها مجدداً مانند قبل کاشته شدند. برداشت دوم بعد از ۱ سال انجام شد. نتایج نشان داد که فعالیت‌های دهیدروژناز و پراکسیداز خاک افزایش یافته است. در همان زمان، حضور میکروبی بالاتر نیز مشاهده شد. آنزیم‌ها نقش کلیدی در تجزیه زیستی PAH در طی گیاه‌پالایی دارند. دهالوژناز، نیترو ردوکتاز، پراکسیداز و لاکاز مهم‌ترین آنزیم‌های این دسته هستند. هم‌چنین در مطالعه‌ای که توسط مردای و همکاران برای بررسی اثر گیاه‌پالایی حرا برای حذف PAH انجام شد، گونه حرا در شرایط گلخانه‌ای کشت شد، از نظر بیومتری اندازه‌گیری شد و ویژگی‌های فیزیولوژیک در رابطه با تخریب PAHs مورد سنجش قرار گرفت. نتایج بیشترین میزان حذف PAH مربوط به آسنفتن، فلورانتین و آنتراسن و آسنفتن از خاک آلوده به نفت را نشان داد. این نتایج *Avicennia marina* را به عنوان یک گونه مناسب در گیاه‌پالایی برای حذف آلاینده‌های نفتی از خاک‌های آلوده معرفی کرد (Moradi *et al.*, 2021). اهمیت این مطالعه وقتی آشکار می‌شود که بدانیم گونه حرا جزو معدود گیاهانی است که در نوار ساحلی خلیج‌فارس در منطقه بین جزر و مدی زیست می‌کند و خلیج‌فارس به علت حجم بسیار بالای تردد تانکرهای نفتی و استخراج نفت و گاز جزو آلوده‌ترین مناطق دنیا محسوب می‌شود.

یونجه (*cv. Crioula*) نیز از جمله گیاهانی است که می‌توان از آن برای حذف آلاینده‌های نفتی از خاک‌های آلوده استفاده کرد. یک مطالعه نشان داده است که سویا (*Glycine max*) و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) می‌توانند نفت را در خاک‌آلوده تجزیه کنند (Ndimele, 2010). همچنین *M. sativa L*. برای گیاه‌پالایی محیط‌های آلوده به آلاینده‌های آلی پتانسیل بالایی از خود نشان داده است (Fan *et al*., 2008; Kirk *et al*., 2005; Wang *et al.*, 2012) این گیاه در خاک‌های بسیار آلوده (۳۰ تا ۵۰۰ پی پی ام) به PAH رشد می‌کند و می‌تواند در عرض چند هفته (به طور متوسط ۶۰ روز) تا ۸۰ درصد از آلاینده‌های

PAH از جمله پیرن، آنتراسن، فنل (Flocco *et al.*, 2002) و بنزن (Ferro *et al.*, 1997) را از خاک حذف کند.

CedriK و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که گونه گیاهی *Lolium perenne*، قادر است آلاینده‌های نفتی را در خاک آلوده به گازوئیل به میزان ۹۲ mg/kg حذف کنند و میزان حذف TPH در محدوده ۸۱-۸۴ درصد بود. Lin و همکاران (۲۰۰۲) گزارش نمودند که محدوده ریشه یعنی ریزوسفر دارای جمعیت میکروبی بیشتری نسبت به خاک بدون ریشه است. گیاهان قادرند از طریق رهاسازی عناصر غذایی و ترشحات خود در خاک و انتقال اکسیژن به ناحیه ریشه موجب تحریک و افزایش فعالیت جمعیت میکروبی تخریب کننده آلاینده‌های نفتی شوند. در اکثر تحقیقات Marsh grass و بقولات در کاهش آلودگی‌ها به ویژه آلاینده‌های نفتی بیش از دیگر گیاهان مورد توجه بوده‌اند. Marsh grass جزء گونه‌های گیاهی هستند که سیستم ریشه‌ای گسترده با سطح جذب آب و عناصر غذایی دارند. این ریشه گسترده سبب می‌شود که منطقه ریزوسفری در خاک افزایش یافته و در نتیجه جمعیت میکروبی در ناحیه ریزوسفری بیشتر شود. در نهایت ریشه‌ی Marsh grass و جمعیت میکروبی، بازدهی خوبی در حذف آلودگی نفتی خاک دارد. بقولات نیز به خاطر قابلیت تثبیت نیتروژن خاک، گونه‌های مناسبی برای گیاه‌پالایی می‌باشند. در این گیاهان رقابتی بین گیاه با جمعیت میکروبی برای به دست آوردن نیتروژن خاک صورت نگرفته که نتیجه آن همکاری مناسبی بین باکتری‌ها و گیاه جهت حذف و کاهش آلودگی‌ها نفتی از سطح خاک است.

Liao و همکاران (۲۰۱۵) ذرت (*Zea mays L*) را برای حذف آلاینده از خاک با غلظت‌های ۰، ۱۵۰۰، ۲۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک پیشنهاد کردند. هیدروکربن‌های نفتی خاک به میزان ۵۲/۲۱ درصد تا ۷۲/۸۴ درصد کاهش یافتند.

Razmjoo و Adavi (۲۰۱۲) پیشنهاد کردند که *Cynodon dactylon*، گونه‌ای کارآمد برای گیاه‌پالایی خاک‌آلوده به نفت با مقادیر مختلف لجن نفتی حاوی ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد TPH است.

Liu و همکاران (۲۰۱۰) اثربخشی پنج گونه گیاهی را مقایسه کردند. یونجه (Alfalfa)، یونجه (*Medicago sativa*)، فیسکوی بلند، علف بره نی (*Festuca arundinacea*) و سویا (soybean)، هر پنج گونه، آلاینده‌های نفتی را حذف کردند و سویا بیشترین میزان حذف را با میزان ۳۴/۲ درصد نشان داد.

بید سفید (Salix spp) نیز برای گیاه‌پالایی مناسب است زیرا می‌توانند تخریب آلاینده‌های آلی در خاک را بهبود بخشند و قادر به تحمل غلظت بالای آلاینده‌ها هستند زیرا سیستم‌های ریشه‌ای گسترده‌ای دارند و می‌توانند در بسیاری از مناطق آب و هوایی کشت شوند (Argus, 2007). Jia و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که گونه *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh قادر به حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH) مانند فنانترن (Phe) و پیرن (Py) از خاک است. هم‌چنین با افزایش غلظت PAH، افزایش قابل‌توجهی در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و سم‌زدایی در ریشه و برگ مشاهده شد که نشان می‌دهد *A. Marina* دارای ظرفیت مکانیزم دفاعی در برابر استرس غیر زیستی است. Page (۲۰۱۵) گزارش کرد که بیدقرمز (*Salix purpurea*) هیدروکربن‌ها را از حاک‌های آلوده حذف می‌کند. این گونه می‌تواند آلاینده‌های آلی مانند آلکان‌های C4-C16، فلورانتن (Fla)، آنتراسن، بنزو (a) پیرن، بی فنیل و بی فنیل‌های پلی کلره (PCB) را مورد هدف قرار دهند و مشخص شد که اعضای راسته باکتری‌های Actinomycetales، Rhodospirillales، Burkhold، Alteromonadales، Rhizobiales، Solirubrobacterales و Caulobacterales می‌توانند در گیاه‌پالایی نقش داشته باشند.

Wang و همکاران (۲۰۱۴) سه گونه گیاه مانگرویی *Kandelia obovata Sheue*، *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) *Poir* و *Avicennia marina* را بر روی رسوبات آلوده به PAHs (فلورن، Phe، آنتراسن، Fla، Py، کریسن، بنزو [a] پیرن و بنزو [k] فلورن) کاشتند. این سه گونه توانستند تمام آلاینده‌ها را از خاک حذف کنند. توس نقره‌ای (*Betula pendula*) و توت قرمز (*Morus rubra*) که به‌طور جداگانه یا همراه با چچم چندساله (*Lolium perenne*) در یک گلخانه در خاک آلوده به PAH کشت شده بودند. مشخص شد که پس از یک سال کشت، به طور کلی محتوای PAHs به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. بید

S. rubens و *S. triandra* کشت شده در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های مشتق شده از نفت قادر به کاهش غلظت کل هیدروکربن‌ها به ترتیب ۹۸/۵۶ درصد و ۹۸/۶۵ درصد بودند. محتوای PAHs نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافت و غلظت پایرن، کریسن، بنزو [k] فلورانتن و بنزو [a] پیرن به سطوح غیرقابل تشخیص کاهش یافت. اگرچه آلاینده‌ها بر *S.rubens* رشد یافته در خاک‌های آلوده به PAH بیشتر از *S. triandra* تأثیر گذاشتند، اما می‌توان آن را برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به هیدروکربن توصیه کرد زیرا یک گونه بومی است (da Cunha *et al.*, 2012).

انتظار می‌رود این نوع مطالعات پایه گیاه‌پالایی به یک فناوری کارآمد و رقابتی اقتصادی در آینده کمک کند و راه‌حل‌های اصلاحی برای محیط‌های آلوده به ترکیبات آلی مقاوم ارائه دهد (Harvey *et al.*, 2004).

عوامل مؤثر بر انتخاب روش‌های مناسب برای حذف آلاینده‌های نفتی

انتخاب روش‌های مناسب حذف آلاینده‌ها در درجه اول به عوامل مختلف بستگی دارد که از نظر فنی بر کارایی و مناسب بودن روش تأثیر می‌گذارد. شکل ۳ عوامل مختلف زیستی و غیرزیستی را نشان می‌دهد که بر روش تأثیر می‌گذارند. کمبود اطلاعات در مورد این عوامل می‌تواند کارایی روش را کاهش دهد؛ بنابراین، دانش عمیقی از خواص بیولوژیک، خواص محیطی و خواص آلاینده، خواص فیزیکوشیمیایی، نوع، ترکیب، غلظت، ناهمگونی، شرایط ژئوهیدرولوژیک، فضای مورد نیاز، مکان فرآیند (در محل، خارج از محل)، مشکلات نظارتی، زمان مورد نیاز برای انجام روش، استراتژی مدیریت ریسک، مناسب بودن و امکان‌سنجی روش، نسبت هزینه به سود، توانایی دستیابی به محدودیت‌ها، نیروی انسانی، عوامل اقتصادی، عوامل نظارتی و غیره مورد نیاز است (Kuppusamy *et al.*, 2016).

شکل ۳- عوامل مؤثر در انتخاب روش‌های حذف آلاینده‌های نفتی

چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

آلودگی محیط‌زیست یک نگرانی جهانی است و بنابراین روش‌های مؤثر و اقتصادی برای حذف آلاینده‌ها ضروری است. گیاه‌پالایی یک رویکرد مناسب برای حذف آلاینده‌های نفتی است. از زمان ظهور گیاه‌پالایی در دهه ۱۹۸۰ (Chaney, 1983)، هزاران مقاله تحقیقاتی در مورد آن نوشته شده است (Robinson *et al.*, 2015).

این مطالعات قابلیت گونه‌های مختلف گیاهی را در استخراج/تجزیه انواع فلزات و ترکیبات آلی بررسی کرده است. با این حال، اکثریت این کارها به جای انجام آزمایشات میدانی به مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای اکتفا کرده است. تجاری‌سازی این فناوری هنوز شروع نشده است. از بین ۱۸۸ پروژه، تنها در یک درصد از پروژه‌ها گیاه‌پالایی اعمال شده است (USEPA, 2017). از طرف دیگر گیاه‌پالایی یک روش دوستدار محیط‌زیست و مبتنی بر انرژی خورشیدی است که مقرون به صرفه است و فرصتی برای تجاری‌سازی آن نیز فراهم می‌کند. در حال حاضر، فناوری گیاه‌پالایی در مراحل اولیه خود است و مشکلات فنی زیادی برای توسعه آن وجود دارد که باید برطرف شود. با این حال، پیشرفت در مهندسی ژنتیک و توسعه شیوه‌های نوآورانه زراعی کمک زیادی به مناسب و مؤثر بودن این روش‌ها می‌کند. علاوه بر این، نیاز مبرمی به کشف گونه‌های گیاهی جدید برای مکانیسم گیاه‌پالایی وجود دارد. یک تحقیق کامل برای بهینه‌سازی فرآیندها، درک فعل و انفعالات گیاهی، فعل و انفعالات میکروبی و وسایل مناسب برای انجام روش لازم است. علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های مولکولی و توسعه گیاهان تراریخته

برای افزایش فعالیت گیاه‌پالایی هنوز در حال گسترش است. بنابراین، انتظار می‌رود مهندسی ژنتیک نقش مهمی در افزایش کاربرد فن‌آوری‌های گیاه‌پالایی ایفا کند. مطالعات مربوط به این استراتژی‌ها در توسعه ابزارهای ساده‌تر و مقرون به صرفه برای گیاه‌پالایی بسیار مفید خواهد بود.

منابع

1. **Adam, G. and Duncan, H., 2002.** "Influence of Diesel Fuel on Seed Germination." Environmental Pollution. 120(2): 363–70.
2. **Afegbua, S.L., Batty, L.C., 2018.** "Effect of Single and Mixed Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contamination on Plant Biomass Yield and PAH Dissipation during Phytoremediation." Environ. Sci. Pollut. R. 25: 18596–18603.
3. **Ahmadi afzadi, M. and Mousavi Bideli, A., 2005.** "'Phytoremediation, a Novel Method for Correcting the Contaminated Soil and Water'," International Center for Advanced Science, Technology and Environmental Sciences, 4th National Biotechnology Congress of Iran, Kerman.
4. **Alkorta, I. and Garbisu, C., 2001.** "Phytoremediation of Organic Contaminants in Soils." Bioresour. Technol. 79: 273–276.
5. **Andria, V., Reichenauer, T.G. and Sessitsch, A., 2009.** "Expression of Alkane Monooxygenase (AlkB) Genes by Plant-Associated Bacteria in the Rhizosphere and Endosphere of Italian Ryegrass (*Lolium Multiflorum* L.) Grown in Diesel Contaminated Soil." Environ. Pollut. 157: 3347– 3350.
6. **Aprill, W. and Sims, R.C., 1990.** "Evaluation of the Use of Prairie Grasses for Stimulating Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Treatment in Soil." Chemosphere 20(1): 253–265.
7. **Argus, G.W., 2007.** "Salix (Salicaceae) Distribution Maps and a Synopsis of Their Classification in North America, North of Mexico." Harvard Pap Bot 12: 335–368.
8. **Ashraf, M., 1999.** "Interactive Effects of Nitrate and Long-Term Waterlogging on Growth, Water Relations, and Gaseous Exchange Properties of Maize (*Zea Mays* L.)." Plant Science. 144(1): 35-43.
9. **Azeez, O.M., Anigbogu, C.N., Akhigbe, R.E. and Saka, W.A., 2015.** "Cardiotoxicity Induced by Inhalation of Petroleum Products." Journal of African Association of Physiological Sciences 3(1): 14–17.
10. **Baek, K.H., Kim, H.S., Oh, H.M., Yoon, B.D., Kim, J. and Lee, I.S., 2004.** "Effects of Crude Oil, Oil Components, and Bioremediation on Plant Growth." Journal of Environmental Science and Health. Part A. 39(9): 2465-2472.
11. **Banks, M.K., Lee, E. and Schwab, A.P., 1999.** "Evaluation of Dissipation Mechanisms for Benzo[a] Pyrene in the Rhizosphere of Tall Fescue." J Environ Qual 28(1): 294–98.
12. **Esrafili-Dizaji, B. and Kiani, F., 2011.** "Persia land of black gold." Geo Expro Magazine. 9.
13. **Bejarano, A.C. and Michel, J., 2010.** "Large-Scale Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Shoreline Sediments from Saudi Arabia: Environmental Legacy after Twelve Years of the Gulf War Oil Spill." Environmental Pollution 158(5): 1561–1569.
14. **Besalatpour, A., Hajabbasi, M., Dorostkar, W. and Torabi, G.H., 2010.** "'Amended Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbon by Landfarming-Phytoremediation Synthesis Method'," Science and Technology of Agriculture and Natural Resources magazine, Water and Soil Sciences, 14th year, 53.
15. **Butler, R. and Mason, J., 1997.** "Structure-Function Analysis of the Bacterial Aromatic Ringhydroxylating Dioxygenases." Adv. Microb. Physio 38: 47–84.
16. **Cedric, K., Karin, P., Peter, L.H., Laurie, R. and Stig, L., 2007.** "Root Establishment of Perennial Ryegrass [L. Perenne] in Diesel Contaminated Subsurface Soil Layers." Environmental Pollution, 145: 68–74.
17. **Chaney, R., 1983.** "Plant Uptake of Inorganic Waste Constituents. In J. F. Patt, P. B. Marsh, & J. M. Kla (Eds.), Land Treatment of Hazardous Wastes (Pp. 50–76). Park Ridge, NJ: Noyes Data Corporation".
18. **Cheema, S.A., Khan, M.I., Tang, X., Zhang, C., Shen, C., Malik, Z., Ali, S., Yang, J., Shen, K., Chen, X. and Chen, Y., 2009.** "Enhancement of Phenanthrene and Pyrene Degradation in Rhizosphere of Tall Fescue (*Festuca Arundinacea*)." J Hazard Mater 166((2–3)): 1226–1231.
19. **Costa, A.S., Romao, L.P., Araujo, B.R., Lucas, S.C., Maciel, S.T., Wisniewski Jr, A. and Alexandre, M.R., 2012.**

“Environmental Strategies to Remove Volatile Aromatic Fractions (BTEX) from Petroleum Industry Wastewater Using Biomass.” Bioresour. Technol 105: 31–39.

20. **Cunningham, S.D., Shann, J.R., Crowley, D.E. and Anderson, T.A., 1997.** “Phytoremediation of Contaminated Water and Soil. p. 2-19. In Kruger EL, Anderson TA, Coats JR (Ed.) Phytoremediation of Soil and Water Contaminants. ACS Symposium Series 664. American Chemical Society, Washington, DC”.
21. **Cunningham, S.D. and Ow, D.W., 1996.** “Promises and Prospect of Phytoremediation.” Plant Physiol 110: 715–19.
22. **da Cunha, A.C.B., Sabedot, S., Sampaio, C.H., Ramos, C.G. and da Silva, A.R., 2012.** “*Salix rubens* and Salix *triandra* Species as Phytoremediators of Soil Contaminated with Petroleum-Derived Hydrocarbons.” Water Air Soil Pollut 223: 4723–4731.
23. **Daryabeigizand, A., Nabi Bidhendi, G.H. and Mehrdadi, N., 2009.** “The Ability of Different Plant Species in Petroleum Hydrocarbon Removal of Soil and the Influence on the Growth of These Plant Species.” Environmental Science and Technology, 12(4): 41–57.
24. **Dustaki, M., Ebrahimi, S., Movahedi Naeini, A. and Ulama, M., 2011.** “Determine the Optimum Conditions for Biological Treatment of Hydrocarbon Pollutants in Soil,” Journal of humans and the environment 20: 57–65.
25. **Duxbury, C.L., 1997.** “Effects of Simulated Solar Radiation on the Bioaccumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by the Duckweed *Lemna Gibba*”.
26. **Edwards, A., 1998.** “Infl Uence of Sorption on the Biological Utilization of Two Simple Carbon Substrates.” Soil Biol Biochem 30(14): 1895–1902.
27. **Epuri, V. and Sorensen, D.L., 1997.** Benzo (a) Pyrene and Hexachlorobiphenyl Contaminated Soil: Phytoremediation Potential. In: Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, Chapter 15. American Chemical Society, Washington, DC.
28. **Fan, S., Li, P., Gong, Z., Ren, W. and He, N., 2008.** “Promotion of Pyrene Degradation in Rhizosphere of Alfalfa (*Medicago Sativa* L.).” Chemosphere. 71: 1593– 1598.
29. **Farraji, H., Zaman, N., Tajuddin, R. and Faraji, H., 2016.** “Advantages and Disadvantages of Phytoremediation A Concise Review.” International journal of environment and technology 2: 69–75.
30. **Ferro, A., Kennedy, J., Doucette, W., Nelson, S., Jauregui, G., Mc Farland, B. and Bugbee, B., 1997.** “Fate of Benzene in Soils Planted with Alfalfa: Uptake, Volatilization, and Degradation. In: Kruger EL, Anderson TA, Coats JR, Editors. Phytoremediation of Soil and Water Contaminants. Washington, D.C.: American Chemical Society. ACS Symposium Series 664.” 223–237.
31. **Ferro, A.M., Sims, R.C. and Bugbee, B., 1994.** “Hycrest Crested Wheatgrass Accelerates the Degradation of Pentachlorophenol in Soil.” J. Environ. Qual 23: 272–279.
32. **Filippis, L.F.D., 2015.** “Role of Phytoremediation in Radioactive Waste Treatment. In: Hakeem K, Sabir M, Ozturk M, Mermut AR (Eds) Soil Remediation and Plants: Prospects and Challenges. Academic Press, Elsevier, New York.”: pp274.
33. **Flocco, C.G., Lo Balbo, A., Carranza, M.P. and Giulietti, A.M., 2002.** “Removal of Phenol by Alfalfa Plants (Medicago Sativa L.) Grown in Hydroponics and Its Effect on Some.” physiological parameters. Acta Biotechnol. 22((1–2)): 43– 54.
34. **Fu, D., Teng, Y., Shen, Y., Sun, M., Tu, C., Luo, Y., Li, Z. and Christie, P., 2012.** “Dissipation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Microbial Activity in a Field Soil Planted with Perennial Ryegrass.” Front. Environ. Sci. Eng. 6: 330.
35. **Gaskin, S.E. and Bentham, R.H., 2010.** “Rhizoremediation of Hydrocarbon Contaminated Soil Using Australian Native Grasses.” Sci. Total Environ 408: 3683–88.
36. **Harvey, P.J., Campanella, B.F., Castro, P.M.L., Harms, H., Lichtfouse, E., Schaffner, A.R., Smrcek, S., Werck-Reichhart, D., 2004.** “Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons, Anilines and Phenols.” Environ Sci Pollut Res Int. 9: 29–47.
37. **Ho, C.h. and Banks, M., 2006.** “Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Rhizosphere of Festuca arundinacea and Associated Microbial Community Changes.” Bioremediat J 10(3): 93–104.
38. **Ijaz, A., Imran, A., Anwar, U.L., Haq, M., Khan, Q. and Afzal, M., 2015.** “Phytoremediation: Recent Advances in

Plant-Endophytic Synergistic Interactions." Plant. Soil: 1–17.

39. **Ossaia, I.C., Ahmeda, A., Hassan, A. and Hamid, F.S., 2019.** "Remediation of Soil and Water Contaminated with Petroleum Hydrocarbon: A Review." Journal Pre-proof Conflict: 1–79.
40. **Jia, H., Wang, H., Lu H., Jiang, S., Dai, M., Liu, J. and Yan, C., 2016.** "Rhizodegradation Potential and Tolerance of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh in Phenanthrene and Pyrene Contaminated Sediments." Mar Pollut Bull 110: 112–18.
41. **Kaimi, E., Mukaidani, T. and Tamaki, M., 2007.** "Screening of Twelve Plant Species for Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil." Plant Prod. Sci. 10(2): 211–218.
42. **Kang, J.W., 2014.** "Removing Environmental Organic Pollutants with Bioremediation and Phytoremediation." Biotechnol. Lett. 36: 1129–39.
43. **Kechavarzi, C., Pettersson, K., Leeds-Harrison, P., Ritchie, L. and Ledin, S., 2007.** "Root Establishment of *Perennial ryegrass* (L. Perenne) in Diesel Contaminated Subsurface Soil Layers." Environ. Pollut. 145: 68–74.
44. **Khandare, R.V. and Govindwar, S.P., 2015.** "Phytoremediation of Textile Dyes and Effluents: Current Scenario and Future Prospects." Biotechnol Adv 33: 1697–1714.
45. **Kirk, J.L., Klironomos, J.N., Lee, H. and Trevors, J.T., 2005.** "The Effects of Perennial Ryegrass and Alfalfa on Microbial Abundance and Diversity in Petroleum Contaminated Soil." Environ. Pollut. 133: 455–465.
46. **Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K. and Naidu, R., 2016.** "Exsitu Remediation Technologies for Environmental Pollutants: A Critical Perspective." Reviews of environmental contamination and toxicology. 236: 117-192.
47. **Lalande, T.L., Skipper, H.D., Wolf, D.C., Reynolds, C.M., Freedman, D.L., Pinkerton, B.W., Hartel, P.G. and Grimes, L.W., 2003.** "Phytoremediation of Pyrene in a Cecil Soil under Field Conditions." Int. J. Phytoremed. 5: 1–12.
48. **Lawal, A.T., 2017.** "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. A Review." Cogent Environmental Science 3.
49. **Liao, C., Xu, W., Lu, G., Liang, X., Guo, C., Yang, C. and Dang, Z., 2015.** "Accumulation of Hydrocarbons by Maize (*Zea Mays* L.) in Remediation of Soils Contaminated with Crude Oil." International Journal of Phytoremediation 17: 693-700.
50. **Lin, Q., Mendelssohn, I.A., Suidan, M.T, Lee, K. and Venosa, A.D., 2002.** "The Dose – Response Relationship between No. 2 Fuel Oil and the Growth of the Salt Marsh Grass, Spartina *Alterniflora marine* Pollution Bulletin,." 44: 897–902.
51. **Liu, W., Hou, J., Wang, Q., Yang, H., Luo, Y. and Christie, P., 2015.** "Collection and Analysis of Root Exudates of *Festuca arundinacea* L. and Their Role in Facilitating the Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soil." Plant Soil 389((1-2)): 109–119.
52. **Liu, W., Luo, Y., Teng, Y. and Li, Z., 2010.** "Phytoremediation of Oilfield Sludge after Prepared Bed Bioremediation Treatment." International Journal of Phytoremediation 12: 268–78.
53. **Lotfinasabasl, S.V., Gunale, R. and Rajurkar, N.S., 2013.** "Petroleum Hydrocarbons Pollution in Soil and Its Bioaccumulation in Mangrove Species, *Avicennia marina* from Alibaug Mangrove Ecosystem, Maharashtra, India." Int. J. Adv. Res. Technol 2(2): 1–7.
54. **Lvhnd, B., Zare Maivan, H., Sorahinobar, M. and Hashtroudi, M.S., 2019.** Determination of suitable housekeeping genes for normalization of quantitative real time PCR analysis of Avicennia marina under crude oil treatment. Journal of Marine Science and Technology, 17(4), 58-69.
55. **Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R. and Zhang, Z., 2016.** "Challenges and Opportunities in the Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soils: A Review." Ecotoxicol Environ Saf 126: 111–121.
56. **Merkl, N., Schultze-Kraft, R. and Infante, C., 2004.** "Phytoremediation in the Tropics—the Effect of Crude Oil on the Growth of Tropical Plants." Bioremediation Journal. 8((3-4)): 177-184.
57. **Mitton, F.M., Gonzalez, M., Monserrat, J.M., Miglioranza, K.S.B., 2016.** "Potential Use of Edible Crops in the Phytoremediation of Endosulfan Residues in Soil." Chemosphere 148: 300–306.

58. **Moradi, B., Kissen, R., Maivan, H.Z., Hashtroudi, M.S., Sorahinobar, M., Sparstad, T. and Bones, A.M., 2020.** Assessment of oxidative stress response genes in *Avicennia marina* exposed to oil contamination–Polyphenol oxidase (PPOA) as a biomarker. Biotechnology Reports, 28, e00565.
59. **Moradi, B., Zare Maivan, H., Seyed Hashtroudi, M. and Sorahinobar, M., 2018.** Effect of crude oil contamination on biomass and chlorophyll biosynthetic pathway pigments and elements content of *Avicennia marina* seedling. Journal of Aquatic Ecology, 7(4), 146-158.
60. **Moradi, B., Zare Maivan, H., Seyed Hashtroudi, M., Sorahinobar, M. and Rohloff, J., 2021.** Physiological Responses and Phytoremediation Capability of *Avicennia marina* to Oil Contamination. Acta Physiologiae Plantarum 43(2): 1–12. https://doi.org/10.1007/s11738-020-03177-y.
61. **Moubasher, H.A., Hegazy, A.K., Mohamed, N.H., Moustafa, Y.M., Kabiel, H.F. and Hamad, A.A. 2015.** "Phytoremediation of Soils Polluted with Crude Petroleum Oil Using *Bassia Scoparia* and Its Associated Rhizosphere Microorganisms." Int. Biodeterior. Biodegrad 98.(۱۲۰–۱۱۳)
62. **Naidoo, G., Naidoo, Y. and Achar, P., 2010.** "Responses of the Mangroves *Avicennia marina* and *Bruguiera gymnorrhiza* to Oil Contamination. Flora-Morphology, Distribution. Functional." Ecology of Plants. 205(5): 357-362.
63. **Ndimele, P.E., 2010.** "A Review on the Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbon." Pak J Biol Sci 13(15): 715–722.
64. **Nguemté, P.M., Wafo, G.D., Djocgoue, P., Noumsi, I.K. and Ngnien, A.W., 2018.** "Potentialities of Six Plant Species on Phytoremediation Attempts of Fuel Oil-Contaminated Soils." Water, Air, & Soil Pollution 229(3): 88.
65. **Nichols, E.G., Cook, R.L., Landmeyer, J.E., Atkinson, B., Malone, D.R., Shaw, G. and Woods, L., 2014.** "Phytoremediation of a Petroleum-Hydrocarbon Contaminated Shallow Aquifer in Elizabeth City, North Carolina, USA." Remediat. J. 24(2): 29–46.
66. **Nikolic´, M. and Stevovic´, S., 2015.** "Family Asteraceae as a Sustainable Planning Tool in Phytoremediation and Its Relevance in Urban Areas." Urban For Urban Green 14: 782–789.
67. **Page, A.P., Yergeau, E. and Greer, C.W., 2015.** "Salix purpurea stimulates the Expression of Specific Bacterial Xenobiotic Degradation Genes in a Soil Contaminated with Hydrocarbons." PLoS One 10:e0132062.
68. **Pandey, V.C., Bajpai, O. and Singh, N., 2016.** "Energy Crops in Sustainable Phytoremediation." Renew Sust Energ Rev 54: 58–73.
69. **Peng, S., Zhou, Q., Cai, Z. and Zhang, Z., 2009.** "Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils by *Mirabilis jalapa* L. in a Greenhouse Plot Experiment." Journal of Hazardous Materials 168(2): 1490–96.
70. **Pernar, N., Baksic, D., Antonic, O., Grubesic, M., Tikvic, I. and Trupcevic, M., 2006.** "Oil Residuals in Lowland Forest Soil after Pollution with Crude Oil." Water, Air, and Soil Pollution. 177(1–4): 284–87.
71. **Qiu, X., Leland, T.W., Shah, S.I., Sorensen, D.L. and Kendall, E.W., 1997.** Field Study: Grass Remediation for Clay Soil Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In: Kruger EL, Anderson TA, Coats JR (Eds) Phytoremediation of Soil and Water Contaminants.
72. **Rajaei, S., Raiesi, F. and Seyedi, S., 2012.** The Bioremediation of an Aged Petroleum-Contaminated Soil Using Bioaugmentation and Phytoremediation Thecniques. Water and Soil, 26(4), 908-921. doi: 10.22067/jsw.v0i0.15295
73. **Ramanjaneyulu, A.V. and Gajendra. G., 2016.** "Phytoremediation a Review." (June).
74. **Rangzan, N., 2006.** "'The Role of Plants in the Remediation of Gasoline-Contaminated Soils', M.Sc. Thesis, Department of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz".
75. **Raskin, I. and Ensley, B.D., 2000.** "Recent Developments for in Situ Treatment of Metal Contaminated Soils." In: Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment. John Wiley & Sons Inc., New York. Available at: http//clu-n.org/techfocus.
76. **Razmjoo, K. and Adavi, Z., 2012.** "Assessment of Bermudagrass Cultivars for Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils." International Journal of Phytoremediation 14: 14-23.
77. **Robinson, B.H., Anderson, C.W.N. and Dickinson, N.M., 2015.** "Phytoextraction: Where's the Action?" Journal of Geochemical Exploration 151: 34–40.

78. **Rusin, M., Gospodarek, J. and Nadgórska-Socha, A., 2015.** "The Effect of Petroleum- Derived Substances on the Growth and Chemical Composition of *Vicia Faba* L. Pol. J." Environ. Stud. 24(5): 2157–66.
79. **Semple, K.T., Morriss, A.W.J. and Paton, G.I. 2003.** "Bioavailability of Hydrophobic Organic Contaminants in Soils: Fundamental Concepts and Techniques for Analysis." Eur. J. Soil Sci 54(4): 809–18.
80. **Singer, A.C., Thompson, I.P. and Bailey, M.J., 2004.** "The Tritrophic Trinity: A Source of Pollutant Degradaing Enzymes and Its Implications for Phytoremediation." Curr. Opin. Microbiol. 72: 39–244.
81. **Singh, O. and Jain, R.K., 2003.** "Phytoremediation of Toxic Aromatic Pollutants from Soil." Appl. Microbiol. Biotechnol 63: 128–35.
82. **Speight, J.G., 2001.** "The Chemistry and Technology of Petroleum." CRC, Taylor and Francis, Boca Raton, Florida, U.S.A. 114.
83. **Tang, J., Wang, R., Niu, X., Wang, M. and Zhou, Q., 2010.** "Characterization on the Rhizoremediation of Petroleum Contaminated Soil as Affected by Different Influencing Factors." Biogeosci 7: 4665–88.
84. **Thavamani, P., Smith, E., Kavitha, R., Mathieson, G., Megharaj, M., Srivasta, P. and Naidu, R., 2015.** "Risk Based Land Management Requires Focus beyond the Target Contaminants – a Case Study Involving Weathered Hydrocarbon Contaminated Soils." Environmental Technology & Innovation 4: 98–109.
85. **Tripathi, V., Edrisi, S.A. and Abhilash, P.C., 2016.** "Towards the Coupling of Phytoremediation with Bioenergy Production." Renew Sust Energ Rev 57: 1386–1389.
86. **USEPA. 2017.** Superfund Remedy Report 15th Edition EPA-542-R-17-001. Washington DC: USEPA".
87. **Varjani, S.J. and Upasani, V.N., 2017.** "A New Look on Factor Affecting Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Pollutants." International Biodeterioration & Biodegradation 120: 71–83.
88. **Walls, W.D., 2010.** "Petroleum Refining Industry in China." Energy Policy 38(5): 2110–15.
89. **Wang, M.C., Chen, Y.T., Chen, S.H., Chang, C.S.W. and Sunkara, S.V., 2012.** "Phytoremediation of Pyrene Contaminated Soils Amended with Compost and Planted with Ryegrass and Alfalfa." Chemosphere. 87(3): 217–225.
90. **Wang, W., Zhang, X., Huang, J., Yan, C., Zhang, Q., Lu, H. and Liu, J., 2014.** "Interactive Effects of Cadmium and Pyrene on Contaminant Removal from Co-Contaminated Sediment Planted with Mangrove *Kandelia Obovata* (S., L.) Yong Seedlings." Mar Pollut Bull 84: 306–313.
91. **Wang, Y.Y., Fang, L., Lin, L., Luan, T.G. and Tam, N.F.Y., 2014.** "Effects of Low Molecular-Weight Organic Acids and Dehydrogenase Activity in Rhizosphere Sediments of Mangrove Plants on Phytoremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons." Chemosphere 99: 152–159.
92. **Wang, Z., Fingas, S., Blenkinsopp, S., Sergy, G., Landriault, M., Sigouin, L., Foght, J., Semple, K. and Westlake, D.W.S., 1998.** "Comparison of Oil Composition Changes Due to Biodegradation and Physical Weathering in Different Oils." J. Chromatogr. A. 809.(۱۰۷–۸۹)
93. **Wild, S.R. and Jones, K.C., 1992.** "Uptake of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by Carrots (*Daucus Carota*) Grown on Freshly Sewage Sludge Amended Agricultural Soils." Environmental Quality.
94. **Xiao, N., Liu, R., Jin, C. and Dai, Y., 2015.** "Efficiency of Five Ornamental Plant Species in the Phytoremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)-Contaminated Soil." Ecol. Eng. 75: 384–91.
95. **Yong, Y. and Tam, N., 2007.** "Effects of Used Lubricating Oil on Two Mangroves Aegiceras Corniculatum and *Avicennia marina*." Journal of Sciences Environmental 19(11): 1355-1360.
96. **Zahed, M.A., Aziz, H.A., Isa, M.H. and Mohajeri, L., 2010.** "Enhancement Biodegradation of N-Alkanes from Crude Oil Contaminated Seawater." Int. J. Environ. Res. 4(4): 1735–6865.
97. **Zhang, Z., Zhou, Q., Peng, S. and Cai, Z., 2010.** "Remediation of Petroleum Contaminated Soils by Joint Action of Pharbitis Nil L. and Its Microbial Community." Sci. Total Environ 408: 5600–5605.

Environment & Interdisciplinary Development
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

Application of Plants in the Removal of Oil Contaminants

Mohaddese Fereydooni Gavasaraei [1], Mona Sorahinoar [1*], Khadijeh Kiarostami [1]

1*- Department of Plant Sciences, Faculty of Biological Sciences, Al-Zahra University, Tehran, Iran

Original Article

Received:
2022.06.02

Accepted:
2022.09.22

Keywords:
Oil Contaminants, Phytoremediation, Environment

Abstract

Introduction: The oil industry is an important, job-creating, and feeder industry whose products are used as raw materials for other industries. One of the important environmental problems related to this industry is that oil can leak into the environment during extraction, transfer, refining, and processing. Environmental oil pollution poses a major threat to the ecosystem and human health. Therefore, the elimination of oil contaminants entering the environment, especially soil, is essential for environmental health. The current study aims to provide general information about phytoremediation and review the latest research on the use of different plants to remove oil pollutants from the environment. Additionally, several plant species with the ability to remove oil pollutants have been introduced.

Materials and Methods: To conduct this study, the electronic libraries of Elsevier, Springer, and Science Information Center (SID) were searched using the keywords Phytoremediation, Oil Contamination, Plant Remediation, Oil Pollution, and Oil Pollutant. The sources were analyzed after extraction and subject classification.

Results: By exploring the sources of scientific information, 10 review articles were extracted as the core and a total of 99 references were extracted and analyzed. Based on the findings, the use of plants to remove all kinds of pollutants has been introduced as one of the cost-effective and environmentally friendly methods. Among the advantages of phytoremediation, the following were mentioned: The need for small financial investment, the possibility of removing pollutants on site, proper aesthetics, preventing soil erosion, preventing the release of toxic substances, and the possibility of using this method in areas with low pollutant concentrations. According to studies, plants utilize various mechanisms, including phytoextraction, phytovolatilization, phytostabilization, phytodegradation, rhizodegradation, or rhizofiltration to remove pollutants from environments. In this study, 12 plants effective in removing heavy metals and 30 plants capable of phytoremediation of oil and related toxic compounds, i.e. polycyclic aromatic hydrocarbons, were introduced.

Discussion: Phytoremediation is an environmentally friendly method that is

* Corresponding Author's email: m.sorahinobar@alzahra.ac.ir

based on solar energy. It is economically reasonable and its commercialization is possible. Currently, phytoremediation technology is in its early stages and there are many technical problems to be overcome for its development. Among plants, herbaceous plants because of their high root surface area are efficient in the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons. Currently, especially in our country, there is an urgent need to discover new plant species with the ability to tolerate and remove environmental pollutants such as oil pollution. It is also necessary to carry out research to optimize plant treatment processes, understand plant–environment interactions, and microbial interactions and finding appropriate equipment to do it. In addition, the use of molecular techniques and the development of transgenic plants to increase the efficiency of the plant to remove toxic materials are expanding. Therefore, genetic engineering is expected to play an important role in increasing the application of plant breeding technologies. Studies on these strategies will be very useful in developing simpler and cost-effective tools for phytoremediation.