

بررسی اثرات هم‌افزای کاربرد تلفیقی گیاه وتیور و بیوچار بر پالایش خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی

نسرین قرهی^{۱*}، الهام قهساره اردستانی^۲، محسن بهمنی^۳

چکیده

آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های نفتی است که به دلیل پایداری و سمیت این ترکیبات، نیازمند روش‌های کارآمد و پایدار برای پالایش خاک‌های آلوده است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات منفرد و تلفیقی گیاه وتیور (*Vetiveria zizanioides*) و بیوچار حاصل از کاه گندم بر حذف کل هیدروکربن‌های نفتی از خاک آلوده انجام شد. آزمایش در قالب تیمارهای شامل وتیور، بیوچار در دو سطح ۲ و ۵ درصد وزنی و ترکیب آن‌ها در شرایط گلدانی اجرا گردید. خاک با ۶ درصد وزنی نفت خام آلوده شد و نمونه‌ها به مدت شش ماه در شرایط کنترل‌شده نگهداری شدند. میزان کل هیدروکربن‌های نفتی در ابتدای آزمایش، پس از یک ماه و در پایان دوره با روش وزن سنجی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کاربرد هم‌زمان وتیور و ۲ درصد بیوچار موجب حذف ۹۹/۹ درصدی کل هیدروکربن‌های نفتی شد که به‌طور محسوسی بیشتر از کاربرد منفرد وتیور (۱۱/۱۸ درصد) و بیوچار ۲ درصد (۸/۸۸ درصد) بود و بیانگر اثر هم‌افزای این دو روش است. با این حال، بیشترین راندمان حذف مربوط به تیمار ۵ درصد بیوچار به‌تنهایی (۲۱/۴ درصد) بود که از تیمار ترکیبی وتیور و ۵ درصد بیوچار (۱۴/۷ درصد) عملکرد بهتری نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که کارایی تلفیق گیاه‌پالایی و بیوچار به مقدار مصرف بیوچار وابسته بوده و در مقادیر بالاتر، جذب فیزیکی آلاینده‌ها توسط بیوچار ممکن است بر فرآیندهای زیستی ریزوسفر غلبه کند. به‌طور کلی، استفاده هم‌زمان از وتیور و بیوچار، به‌ویژه در مقدار ۲ درصد، راهبردی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای پالایش خاک‌های آلوده به نفت خام محسوب می‌شود. انجام مطالعات مزرعه‌ای و بررسی تغییرات جوامع میکروبی برای بهینه‌سازی این فناوری در مقیاس عملی پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی:

گیاه‌پالایی، بیوچار، وتیور، هیدروکربن‌های نفتی، پالایش خاک.

مقاله پژوهشی

۱. دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

* نویسنده مسئول

۲. دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

elham.ghesareh@nres.sku.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی صنایع میلان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

mohsen.bahmani@sku.ac.ir

شناسه مقاله: ۲۶۰۷-۱۱۸۸

شماره صفحه پایایی: ۱۴۱۱-۱۴۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰

انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۰۷

زمان پذیرش: ۵۴ روز

استناددهی:

قرهی، ن.، قهساره اردستانی، ا.، و بهمنی، م. (۱۴۰۵). بررسی اثرات هم‌افزای کاربرد تلفیقی گیاه وتیور و بیوچار بر پالایش خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۶(۳)، ۱۴-۲۱.

۱- مقدمه

آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی که اغلب در اثر نشت‌های تصادفی هنگام استخراج، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل یا عملیات نظامی رخ می‌دهد، یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود. این موضوع عمدتاً به‌دلیل وجود هیدروکربن‌های کل نفتی (TPH)، از جمله آلکان‌های سمی است (Lovindeer et al., 2023؛ Lv et al., 2022؛ Sui et al., 2021؛ Lim et al., 2016). تکنیک‌های مختلفی برای پالایش این آلودگی‌ها توسعه یافته‌اند که از روش‌های فیزیکی و شیمیایی تا روش‌های زیستی را شامل می‌شوند. در میان آن‌ها، زیست‌پالایی گیاهی به‌عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه، کم‌مصرف و سازگار با محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است (Fedeli et al., 2024؛ Kumari et al., 2020).

زیست‌پالایی گیاهی به‌عنوان رویکردی دوستدار محیط زیست و امیدوار کننده در حذف آلاینده‌های آلی از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند گیاه‌پالایی، گیاه‌کافت، گیاه‌تراوشی و زیست‌پالایی در ناحیه ریشه مطرح شده است (Fedeli et al., 2024). در گیاه‌پالایی، گیاهان آلاینده‌ها را همراه با آب و مواد مغذی جذب می‌کنند؛ گیاه‌کافت شامل تجزیه متابولیکی آلاینده‌ها درون بافت‌های گیاه است؛ و گیاه‌تراوشی به آزادسازی ترکیبات فرار از طریق تعلق اشاره دارد. علاوه بر این، ترشحات ریشه‌ای فعالیت میکروبی و تجزیه شیمیایی را در ناحیه ریزوسفر افزایش می‌دهند؛ فرآیندی که به‌عنوان تحریک زیستی گیاهی یا زیست‌پالایی با کمک گیاه شناخته می‌شود (Basim et al., 2022؛ Fondi et al., 2016). عالیوند و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به ارزیابی فرآیند گیاه‌پالایی با استفاده از درخت کهور در حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (پایرن) و کادمیم از خاک‌های آلوده پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که گیاه کهور (*Prosopis spp*) دارای توانایی قابل توجهی در تحمل شرایط آلودگی ترکیبی بوده و می‌تواند در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی به رشد خود ادامه دهد. Selim et al. (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای درباره کاهش آلودگی فلزات سنگین با استفاده از بیوجار گزارش کردند که این مواد از طریق جذب سطحی، تبادل یونی و افزایش pH خاک می‌توانند تحرک فلزات سنگین را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند. Sarong et al. (۲۰۲۶) در مطالعه‌ای به بررسی اثر بیوجارهای نانوکامپوزیتی بر رشد گیاه وتیور (*Vetiveria zizanioides*) و جذب نیکل در خاک‌های اوتلرامافیک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از بیوجارهای نانوکامپوزیتی موجب بهبود قابل توجه شرایط رشد گیاه، از جمله افزایش ارتفاع، توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش تولید زیست‌توده گردید. این بهبود رشد به افزایش دسترسی عناصر غذایی و کاهش اثرات منفی ناشی از تنش فلزات سنگین نسبت داده شد.

زیست‌پالایی گیاهی دارای مزایای فراوانی از جمله هزینه عملیاتی پایین، مصرف انرژی کم، حفظ کیفیت خاک و بهبود جلوه‌های زیست‌محیطی است. همچنین این روش با اهداف توسعه پایدار جهانی، از جمله دستیابی به خالص صفر کربن تا سال ۲۰۵۰، سازگار بوده و به‌دلیل ردپای کربن پایین، در این زمینه مؤثر است (Dorafshan et al., 2023).

در میان گونه‌های مقاوم و مقرون‌به‌صرفه گیاهی، گیاه وتیور پتانسیل قابل توجهی در پالایش خاک‌های آلوده به نفت نشان داده است. وتیور گیاهی دائمی، مقاوم و سریع‌الرشد است که توانایی رشد در شرایط بسیار سخت از جمله خاک‌های اسیدی، شور، قلیایی، شنی و سنگلاخی را دارد و دامنه دمایی وسیعی از ۱۵- تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کند. سیستم ریشه‌ای گسترده، رشد سریع و توانایی سازگاری در محیط‌های خشک و غرقابی، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربرد در زیست‌پالایی تبدیل کرده است (Sarong et al., 2026).

کاربرد ترکیبی بیوجار و روش‌های زیست‌پالایی، در بسیاری موارد، نتایج بهتری نسبت به استفاده جداگانه از این روش‌ها در خاک‌های آلوده نفتی نشان داده است. زیست‌پالایی علاوه بر تجزیه هیدروکربن‌ها، به استقرار و رشد گیاهان نیز کمک می‌کند. هم‌زمان، بیوجار از طریق ترشحات ریشه‌ای، ساختار و تنوع میکروبی ریزوسفر را تغییر داده و با ایجاد اثر هم‌افزا، روند تجزیه آلاینده‌ها را تسریع می‌کنند. از این‌رو، پالایش مؤثر خاک‌های آلوده به نفت خام نیازمند راهبردی جامع است که پیشگیری، کاهش آلودگی و بازسازی را از طریق تجزیه میکروبی، استفاده از گیاهان انباشت‌گر و مداخلات مکانیکی نظیر حفاری و انتقال خاک آلوده برای تیمار در مکانی دیگر شامل شود.

در این میان، بیوجار که از پیرولیز زیست‌توده در دماهای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود، به‌دلیل توانایی‌اش در بهبود حاصلخیزی خاک از طریق افزایش نگهداشت آب، دسترسی به مواد مغذی و بهبود ساختار خاک، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Grewal؛ Saeed et al., 2021؛ Grewal et al., 2018؛ et al., 2021؛ Das et al., 2021؛ Gharahi and Zamani, 2025). این بهبودها باعث افزایش عملکرد محصولات کشاورزی و ترویج کشاورزی پایدار می‌شوند (Kapoor et al., 2022؛ Diatta et al., 2020). همچنین، پیرولیز منجر به تولید روغن چوب که محرک رشد گیاه است (Celletti et al., 2023؛ Fedeli et al., 2024) و گاز سنتز به‌عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر می‌شود (Zahed et al., 2021).

علاوه بر این، بیوجار در زیست‌پالایی نیز پتانسیل خوبی نشان داده است، چراکه توانایی افزایش رشد گیاه در خاک‌های آلوده به هیدروکربن را دارد و با تحریک فعالیت میکروبی که منجر به تجزیه آلاینده‌ها می‌شود، در پالایش آن‌ها نقش دارد (Fedeli et al., 2024؛ Saeed et al., 2021). همچنین، بیوجار با بهبود ساختار خاک و کاهش فرسایش، از طریق حمایت از سیستم‌های ریشه‌ای گسترده، در کشاورزی پایدار نیز مؤثر است (Blanco-Canqui et al., 2012).

با توجه به خلأ تحقیقاتی موجود در این زمینه، هدف این پژوهش بررسی اثرات هم‌افزایی ترکیب این دو روش در افزایش تجزیه هیدروکربن‌ها، بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ارتقاء بازسازی پایدار محیط‌های آلوده است.

۲- مواد و روش

به‌منظور بررسی اثر متقابل بیوپار و گیاه و تیور بر کاهش آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی، پژوهش حاضر با استفاده از ترکیبی از روش‌های آزمایشگاهی، تجربی و میدانی انجام شد. در مرحله نخست، خاک مورد مطالعه از محل موردنظر جمع‌آوری، پس از حذف بقایای گیاهی و ذرات درشت، در شرایط آزمایشگاهی آماده‌سازی و برای انجام تیمارهای آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ایجاد آلودگی مصنوعی، نفت خام پس از رقیق‌سازی با استون با نسبت حجمی ۱:۱، به خاک افزوده شد. تیمارهای آلودگی شامل خاک بدون آلودگی به‌عنوان شاهد (صفر درصد) و خاک آلوده‌شده با ۶ درصد وزنی نفت خام بود. پس از افزودن نفت خام، خاک به‌طور کامل مخلوط شد تا توزیع نسبتاً یکنواخت آلاینده در توده خاک حاصل شود. بیوپار مورد استفاده در این پژوهش از کاه و کلش گندم و از طریق فرآیند پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شد. پس از تولید، بیوپار برای دستیابی به اندازه ذرات یکنواخت آماده و در تیمارهای موردنظر به خاک اضافه شد. سطوح کاربرد بیوپار شامل صفر، ۲ و ۵ درصد وزنی خاک بود. بدین ترتیب، امکان مقایسه وضعیت خاک آلوده در غیاب بیوپار با خاک دریافت‌کننده مقادیر مختلف بیوپار فراهم شد و نقش احتمالی افزایش میزان بیوپار در کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در ادامه، خاک آلوده و بیوپار با نسبت‌های تعیین‌شده به‌صورت یکنواخت با یکدیگر مخلوط شده و مخلوط حاصل در گلدان‌های پلاستیکی با حجم یکسان منتقل شد. به‌منظور بررسی نقش گیاه در فرآیند پالایش زیستی خاک، نهال‌های گیاه و تیور در ابتدای دوره آزمایش در گلدان‌ها کشت شدند. تیمارهای آزمایشی در شرایط کنترل‌شده نگهداری شده و رطوبت خاک در حدود ۲۵ درصد حجمی، معادل رطوبت مزرعه، حفظ شد. همچنین، دمای محیط آزمایش در حدود ۲۴ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید تا شرایط نسبتاً مناسب برای فعالیت ریشه گیاه، رشد جمعیت میکروبی و فرآیندهای زیستی مؤثر بر تجزیه هیدروکربن‌ها فراهم شود. دوره انکوباسیون آزمایش به مدت شش ماه ادامه یافت. در طول این مدت، میزان رطوبت خاک به‌صورت دوره‌ای کنترل و در صورت نیاز با افزودن آب مقطر یا آب مناسب آزمایش به مقدار اولیه بازگردانده شد. حفظ رطوبت در محدوده مشخص، از آن جهت اهمیت داشت که تغییرات شدید رطوبت می‌تواند بر فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، رشد ریشه و در نتیجه بر فرآیند زیست‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی تأثیرگذار باشد. پس از پایان دوره شش‌ماهه، از هر تیمار نمونه‌های خاک تهیه و برای تعیین میزان باقی‌مانده هیدروکربن‌های نفتی مورد تجزیه قرار گرفتند. بیوپار حاصل از پیرولیز از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد تا برای استفاده بعدی آماده شود. ویژگی‌های بیوپار تهیه‌شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های بیوپار مورد استفاده در مطالعه

ویژگی	مقدار
هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)	۱۷۰
pH	۹/۵
مواد آلی (درصد)	۵۵/۸
نیترات (میلی‌گرم بر لیتر)	۰/۷

در این پژوهش، خاک با بافت متوسط انتخاب شد. پیش از انجام تجزیه و تحلیل‌ها، نمونه‌های خاک در هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر طبق روش Bouyoucos (۱۹۶۲) و Murphy و Hazelton (۲۰۰۷) شناسایی گردید. سطح pH عصاره اشباع خاک با روش پتانسیومتری تعیین شد، در حالی که رسانایی الکتریکی (EC) با استفاده از هدایت‌سنج اندازه‌گیری گردید. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با بهره‌گیری از روش جابه‌جایی استات سدیم طبق روش Miller and Sumner (۱۹۹۶) ارزیابی شد. محتوای کربن آلی (OC) با روش Walkley-Black (۱۹۳۴) اندازه‌گیری گردید و محتوای نیتروژن کل (N) از طریق روش Lynch and Barbano (۱۹۹۹) کمی‌سازی شد. ویژگی‌های خاک مورد استفاده در مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): ویژگی‌های خاک مورد استفاده در مطالعه

ظرفیت تبادل کاتیونی	هدایت الکتریکی	pH	کربن آلی	نیتروژن	وزن مخصوص	شن	سیلت	رس
cmol+/kg	میکروزیمنس بر سانتی‌متر		درصد	درصد	گرم بر سانتی‌متر مکعب	درصد	درصد	درصد
۶/۱۵	۶/۲	۱/۸	۸۳/۰	۰۶/۰	۳۵/۱	۳۸	۴۶	۱۶

شش تیمار با سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفتند:

نمونه شاهد، صفر درصد نفت خام و صفر درصد بیوپار (T1)،

۶ درصد نفت خام + گیاه و تیور (T2)،

۶ درصد نفت خام + گیاه و تیور + ۲ درصد بیوپار (T3)،

۶۰ درصد نفت خام + ۲ درصد بیوپار (T4)،

۶۰ درصد نفت خام + گیاه وتیور + ۵ درصد بیوپار (T5)،

۶۰ درصد نفت خام + ۵ درصد بیوپار (T6).

اندازه‌گیری TPHs خاک در ابتدای آزمایش، بعد از یک ماه و پس از شش ماه انجام شد. هیدروکربن‌های نفتی استخراج شده از خاک به روش وزن‌سنجی تعیین شدند. به‌طور خلاصه، ۵ گرم خاک که در کاغذ صافی پیچیده شده بود، با استفاده از ۳۰ میلی‌لیتر متیلن کلراید به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسوند استخراج شد، سپس کاغذ به مدت ۱۲ ساعت در استخراج‌کننده سوکسل در حمام آب با دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. عصاره‌ها با استفاده از روتاری اوپراتور متمرکز شده و به حجم ثابت ۵۰ میلی‌لیتر رسیدند. مقدار باقی‌مانده TPH به روش وزن‌سنجی (Moopam, 2010) تعیین شد و غلظت-n آلکان‌ها (C12-C18) با استفاده از کروماتوگرافی گازی-جرمی (GC-MS) تحلیل شد.

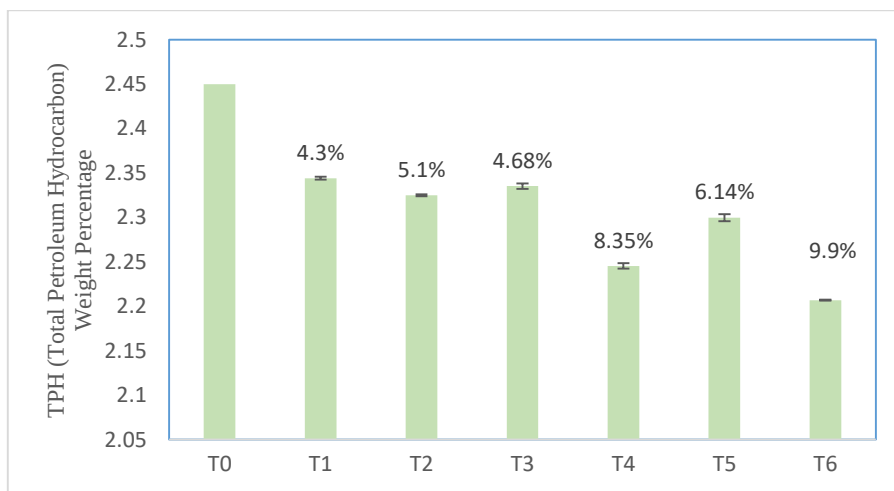
درصد حذف TPH ها با فرمول (رابطه ۱) زیر محاسبه شد:

$$TPHs\ removal\ (\%) = \frac{(w_0 - wt)}{w_0} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن w_0 غلظت اولیه TPH خاک (گرم بر کیلوگرم)، wt غلظت باقی‌مانده TPH در زمان t و t زمان اصلاح (روز) است. در نهایت نتایج با استفاده از تجزیه واریانس^۱ مورد بررسی قرار گرفت. در مواردی که اختلاف معنی‌داری بین تیمارها مشاهده شد، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن^۲ و در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) در نرم افزار SPSS انجام شد. به‌منظور نمایش نتایج، جداول و نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel 2021 ترسیم شدند.

۳- نتایج

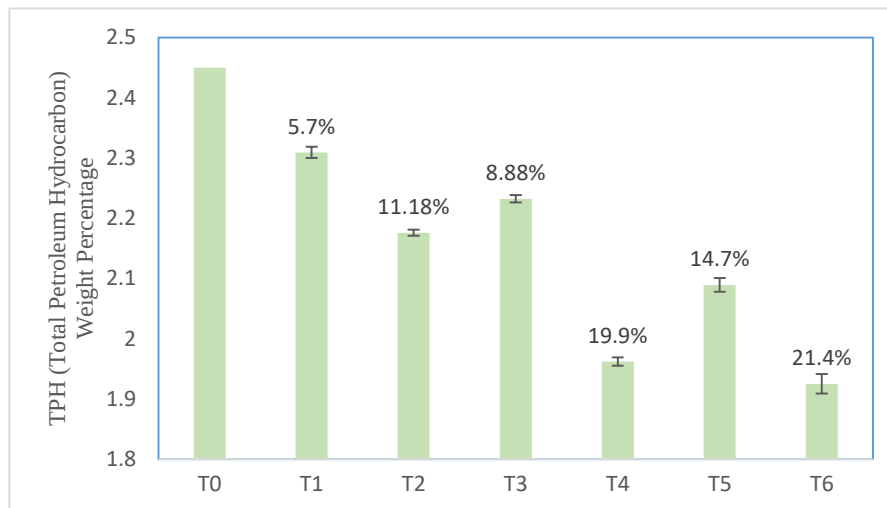
شکل‌های (۱) و (۲) درصد وزنی TPH در نمونه‌های خاک تحت شرایط تیماری مختلف را در طول دوره اصلاح نشان می‌دهند. شکل (۱) مجموعه‌ای از تیمارهای اولیه با کارایی کمتر حذف را نشان می‌دهد (بعد از یک ماه)، در حالی که شکل (۲) نتایج بهبود یافته با طول دوره درمان بیشتر (شش ماه) یا شرایط بهینه شده را ارائه می‌کند.



شکل (۱): درصد حذف هیدروکربن‌های کل نفتی (TPH) در پایان ماه اول. (نوارهای خطا انحراف معیار را نشان می‌دهند. آغاز آزمایش (T0)، نمونه کنترل (% نفت خام))

غلظت اولیه TPH در ابتدای آزمایش تقریباً ۲/۴۵ درصد وزنی بود. در طول دوره اصلاح، تیمارهای مختلف بازده متفاوتی در کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک نشان دادند. نمونه شاهد (بدون آلودگی و تیمار) کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) معادل ۴/۳ درصد در TPH را داشت که احتمالاً ناشی از فرآیندهای طبیعی تجزیه بود. خاک تیمار شده با گیاه وتیور به تنهایی ۵/۱ درصد کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) در TPH را نشان داد، در حالی که افزودن ۲ درصد بیوپار به تنهایی باعث کاهش ۴/۶۸ درصدی شد، که نشان‌دهنده نقش مستقل هر یک از اصلاحات گیاه پالایی و بیوپار در تخریب هیدروکربن‌هاست. به‌طور قابل توجهی، تیمارهای ترکیبی وتیور با بیوپار عملکرد بهتری در اصلاح داشتند؛ خاک تیمار شده با وتیور به همراه ۲ درصد بیوپار کاهش قابل توجه (۸/۳۵ درصدی TPH) را نشان داد که این مقدار در تیمارهای وتیور به‌همراه ۵ درصد بیوپار و ۵ درصد بیوپار به تنهایی به ترتیب به ۶/۱۴ و ۹/۹ درصد رسید.

این نتایج بیانگر اثر هم‌افزایی بیوچار و وتیور در تسریع زیست پالایی یا جذب هیدروکربن‌های نفتی است. داده‌ها نشان می‌دهند که *Vetiveria zizanioides* به‌عنوان یک گیاه پالایی شناخته شده، می‌تواند آلودگی هیدروکربنی نفتی در خاک را کاهش دهد، احتمالاً از طریق تجزیه ریشه‌ای و تحریک جوامع میکروبی. بیوچار تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه از کاه و کلش گندم نیز قابلیت جذب هیدروکربن‌ها و بهبود خواص خاک برای فعالیت میکروبی را نشان داد. بیشترین نرخ حذف TPH در تیمارهای ترکیبی وتیور و بیوچار (خصوصاً با ۵ درصد بیوچار) مشاهده شد که به مکانیزم‌های مکمل جذب فیزیکی توسط بیوچار اشاره دارد.



شکل (۲): درصد حذف هیدروکربن‌های کل نفتی (TPH) در پایان شش ماه. (نوارهای خطا انحراف معیار را نشان می‌دهند).

ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای بیوچار می‌تواند محل مناسبی برای میکروب‌های تخریب‌کننده هیدروکربن فراهم کند (Li et al., 2023)، در حالی که ریشه‌های وتیور می‌توانند جمعیت‌های میکروبی را افزایش داده و جذب و تجزیه آلاینده‌ها را تسهیل کنند. نتایج این مطالعه با مطالعات پیشین همخوانی دارد که بر استفاده از استراتژی‌های زیستی گیاه و اصلاح‌کننده‌های خاک برای کاهش مؤثر آلودگی‌های هیدروکربنی تأکید دارند. تحقیقات بیشتر می‌تواند به بهینه‌سازی اندازه ذرات بیوچار، میزان مصرف و ترکیب گونه‌های گیاهی کمک کند تا کارایی اصلاح افزایش یابد (Wu et al., 2017).

شکل (۲) نشان داد که در ابتدای آزمایش، غلظت TPH خاک تقریباً ۲/۴۵ درصد وزنی بود. نمونه شاهد کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) ۵/۷ درصدی TPH را داشت که احتمالاً به دلیل فرآیندهای طبیعی تجزیه بود. تیمار وتیور به تنهایی کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) ۱۱/۱۸ درصدی و افزودن ۲ درصد بیوچار به تنهایی کاهش ۸/۸۸ درصدی در TPH ایجاد کردند، که نشان‌دهنده بهبود تجزیه هیدروکربن‌ها توسط هر دو روش فیتورمدیاسیون و بیوچار است. ترکیب وتیور با بیوچار عملکرد اصلاحی بسیار بهتری نشان داد؛ ترکیب وتیور با ۲ درصد بیوچار حذف ۱۹/۹ درصدی TPH را به‌همراه داشت و ترکیب وتیور با ۵ درصد بیوچار حذف ۱۴/۷ درصدی، در حالی که بیشترین حذف (۲۱/۴ درصد، $p < 0.05$) در خاک تیمار شده با ۵ درصد بیوچار به تنهایی مشاهده شد، که نشان‌دهنده نقش مهم بیوچار در جذب و تسهیل تجزیه هیدروکربن‌هاست.

۴- بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد هم‌زمان گیاه وتیور و بیوچار کاه گندم، در مقایسه با استفاده‌ی مجزای هر یک، موجب تسریع قابل توجه تجزیه‌ی هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH) شد. به‌گونه‌ای که تیمار وتیور همراه با ۲ درصد بیوچار پس از شش ماه به حذف ۱۹/۹ درصد از TPH منجر شد، در حالی که هیچ‌یک از تیمارهای منفرد، شامل وتیور (۱۱/۱۸ درصد) یا بیوچار ۲ درصد (۸/۸۸ درصد)، به چنین کارایی دست نیافتند. این نتیجه با شواهد رو به گسترش درباره اثر بخشی راهبردهای تلفیقی گیاه‌پالایی و بیوچار همخوانی دارد. در همین راستا، Fang et al. (۲۰۲۵) نشان داد که بیوچار از طریق سه سازوکار مکمل، شامل افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های ناشی از آلودگی، بهبود جذب آلاینده‌ها توسط گیاه و تقویت ظرفیت تجزیه‌ای میکروارگانیسم‌های ریزوسفری، اثر هم‌افزایی قابل توجهی با گیاه‌پالایی ایجاد می‌کند. این سازوکارها با افزایش کارایی مشاهده‌شده در تیمارهای ترکیبی این پژوهش سازگار است (Fang et al., 2025).

یکی از نتایج قابل توجه این پژوهش، برتری تیمار ۵ درصد بیوچار به‌تنهایی (۲۱/۴۱ درصد حذف) TPH نسبت به ترکیب وتیور با ۵ درصد بیوچار (۱۴/۷ درصد حذف) بود؛ الگویی که در نگاه نخست با فرضیه هم‌افزایی مطلق میان گیاه و بیوچار همخوانی ندارد. این مشاهده را می‌توان با استناد به نتایج Hu et al. (۲۰۲۵) تبیین کرد. آنان نشان دادند که کارایی بیوچار در حذف TPH به ویژگی‌هایی نظیر دمای پیرولیز، نوع زیست‌توده اولیه و میزان مصرف بیوچار وابسته است. در غلظت‌های بالاتر، جذب فیزیکی آلاینده‌ها توسط بیوچار ممکن است بر فرآیندهای زیستی ریزوسفری غلبه کند، در

حالی که حضور هم‌زمان ریشه‌های گیاه می‌تواند از طریق رقابت برای فضای منفذی بیوجار یا ایجاد تغییر در شرایط اکسیژن و رطوبت ریزوسفر، از کارایی این سازوکار بکاهد. بنابراین، به نظر می‌رسد در مقدار ۵ درصد، نقش جذب فیزیکی-شیمیایی بیوجار نسبت به اثرات هم‌افزایی گیاه‌پالایی غالب بوده است. این تفسیر با نتایج Li et al. (۲۰۲۵) نیز همخوانی دارد که نشان می‌دهد اثر بیوجار بر تجزیه زیستی TPH ماهیتی غیرخطی داشته و به آستانه مصرف وابسته است؛ به گونه‌ای که افزایش بیش از حد مقدار بیوجار می‌تواند موجب کاهش یا حتی معکوس شدن اثرات مثبت آن شود.

از منظر مقایسه با مطالعات پیشین، بیشترین میزان حذف TPH در این پژوهش (۲۱/۴ درصد طی شش ماه در شرایط گلدانی) با نتایج Cheng et al. (۲۰۲۵) قابل مقایسه است. این پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد هم‌زمان وتیور و ۲/۵ درصد بیوجار در شرایط مزرعه‌ای پس از شش ماه به حذف نزدیک به ۵۰ درصد TPH انجامید. اختلاف قابل توجه میان این دو مقدار را می‌توان به تفاوت در مقیاس آزمایش (گلدانی در برابر مزرعه‌ای)، غلظت اولیه آلاینده، ویژگی‌های خاک و شرایط تهویه و زهکشی نسبت داد. این تفاوت، ضرورت انجام مطالعات مزرعه‌ای تکمیلی را برای ارزیابی قابلیت تعمیم نتایج گلخانه‌ای این پژوهش برجسته می‌کند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد بیوجار و گیاه وتیور باید به عنوان یک سامانه تعاملی و وابسته به مقدار مصرف مورد ارزیابی قرار گیرد، نه به عنوان دو عامل که اثر آن‌ها صرفاً به صورت افزایشی یا یکدیگر جمع می‌شود. در سطح ۲ درصد بیوجار، ترکیب وتیور و بیوجار بیشترین شواهد را برای یک اثر هم‌افزایانه نشان داد، در حالی که در سطح ۵ درصد، کاربرد بیوجار به تنهایی کارایی بیشتری نسبت به تیمار ترکیبی داشت. این یافته اهمیت تعیین مقدار بهینه بیوجار را در طراحی راهبردهای زیست‌پالایی برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که افزایش مقدار اصلاح‌کننده الزاماً به معنای افزایش کارایی پالایش نیست.

از نظر کاربردی، استفاده از بیوجار حاصل از کاه و کلش گندم می‌تواند از دو جنبه حائز اهمیت باشد: نخست، استفاده مجدد از بقایای کشاورزی و تبدیل آن‌ها به یک ماده اصلاح‌کننده خاک و دوم، امکان کاهش آلودگی خاک‌های نفتی بدون اتکا به روش‌های پرهزینه و مخرب فیزیکی و شیمیایی. با این حال، ارزیابی پایداری این روش نیازمند بررسی هم‌زمان کاهش آلاینده، سلامت گیاه، ویژگی‌های خاک و سرنوشت بلندمدت هیدروکربن‌های جذب‌شده در بیوجار است. به‌ویژه باید مشخص شود که آیا هیدروکربن‌های جذب‌شده در طول زمان پایدار باقی می‌مانند یا در اثر تغییرات محیطی مجدداً به فاز خاک بازمی‌گردند.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از دامنه گسترده‌تری از سطوح بیوجار، از جمله مقادیر بین ۲ و ۵ درصد، انجام شوند تا مقدار بهینه کاربرد بیوجار با دقت بیشتری تعیین شود. همچنین، اندازه‌گیری شاخص‌های میکروبی و زیستی مانند زیست‌توده میکروبی، فعالیت آنزیمی، تنوع و ساختار جوامع میکروبی ریزوسفر و در صورت امکان ردیابی محصولات تجزیه هیدروکربن‌ها می‌تواند به تفکیک نقش جذب، تثبیت و تجزیه زیستی در کاهش TPH کمک کند. اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای بلندمدت نیز برای بررسی پایداری اثر تیمار، تغییرات فصلی رطوبت و دما و پاسخ گیاه و جامعه میکروبی ضروری است. چنین مطالعاتی می‌توانند درک دقیق‌تری از سازوکارهای کنترل‌کننده تعامل بیوجار-گیاه-خاک و تعیین شرایط بهینه برای استفاده از این رویکرد در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت خام فراهم کنند (Hu et al., 2025; Fang et al., 2025; Fedeli et al., 2024; Li et al., 2025).

۵- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که *Vetiveria zizanioides* می‌تواند به‌طور قابل توجهی در اصلاح خاک‌های آلوده به نفت نقش داشته باشد، احتمالاً از طریق ترشحات ریشه‌ای که فعالیت میکروبی تخریب‌کننده هیدروکربن را تحریک می‌کند. همچنین بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم در دمای ۳۵۰ درجه، به دلیل سطح ویژه بالا و ساختار متخلخل، به‌طور قابل توجهی اصلاح را افزایش داد و محیط مناسبی برای جوامع میکروبی فراهم کرد. کاربرد ترکیبی وتیور و بیوجار اثرات هم‌افزایی داشت و حذف TPH بسیار بیشتری نسبت به تیمارهای منفرد ایجاد کرد. این هم‌افزایی می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های ترکیبی جذب بیوجار و تحریک فعالیت میکروبی در منطقه ریشه وتیور باشد که منجر به تسریع تجزیه آلاینده‌ها می‌شود. جالب توجه است که تیمار ۵ درصد بیوجار به تنهایی عملکرد بهتری نسبت به ترکیب وتیور با ۵ درصد بیوجار داشت، که ممکن است نشان دهد جذب فیزیکی بیوجار در مقادیر بالاتر نقش غالب دارد یا اثرات ریشه گیاه پس از یک میزان مشخص از بیوجار به حد اشباع می‌رسد.

منابع

- عالیوند، ا.، هاشمی، س. ع.، عبیدی، غ. ر.، نصرزاده، ف.، حیدری، م. و بهروزی، م. (۱۴۰۳). ارزیابی فرآیند گیاه‌پالایی با درخت کهور در حذف پیرین و کادمیوم از خاک‌های آلوده: یک مطالعه آزمایشگاهی. دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان، ۲۳ (۳)، ۲۲۲-۲۳۶.
- Basim, Y., Mohebbi, G., Jorfi, S., Nabizadeh, R., Moghadam, M.A., Ghadiri, A., and Jaafarzadeh Haghighi Fard, N. (2022). Bacterial strains diversity in contaminated soils and their potential for bioremediation of total petroleum hydrocarbons in south west of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20(2), 601-608.
- Blanco-Canqui, H., Claassen, M.M., and Presley, D.R. (2012). Summer cover crops fix nitrogen, increase crop yield and improve soil-crop relationships. *Agronomy Journal*, 104(1), 137-147.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Celletti, S., Fedeli, R., Ghorbani, M., Aseka, J.M., and Loppi, S. (2023). Exploring sustainable alternatives: Wood distillate alleviates the impact of bioplastic in basil plants. *Science of the Total Environment*, 900(2), 166484.

- Cheng, P.C., Lin, M.S., Huang, C.Y., Cheng, S.F., and Lin, Y.C. (2025). Adaptation and carbon reduction for petroleum contaminated soil remediation in response to climate change: A case study of phytoremediation combined with biochar. *Journal of Environmental Management*, 393, 126956.
- Das, S., Mohanty, S., Sahu, G., Rana, M., and Pilli, K. (2021). Biochar: a sustainable approach for improving soil health and environment. *Soil Eros. -Curr. Chall. Future Perspect. Chang. World*, 7, 121-138.
- Diatta, A.A., Fike, J. H., Battaglia, M.L., Galbraith, J.M., and Baig, M.B. (2020). Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), 595.
- Dorafshan, M.M., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., and Amiri, M.J. (2023). Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.): A hyper-accumulator crop for bioremediation of unconventional water. *Sustainability*, 15(4), 1-16.
- Fang, H., Zhou, C., Guan, D. X., Azeem, M., and Li, G. (2025). Synergistic approaches for sustainable remediation of organic contaminated soils: integrating biochar and phytoremediation. *Agriculture*, 15(8), 905.
- Fedeli, R., Celletti, S., Alexandrov, D., Nafikova, E., and Loppi, S. (2024). Biochar-mediated bioremediation: A sustainable strategy to increase *Avena sativa* L. tolerance to crude oil soil contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(40), 52774–52783.
- Fondi, M., Maida, I., Perrin, E., Orlandini, V., La Torre, L., Bosi, E., Negroni, A., Zanaroli, G., Fava, F., Decorosi, F., Giovannetti, L., Vanechoutte, M., Dijkshoorn, L., and Fani, R. (2016). Genomic and phenotypic characterization of the species *Acinetobacter venetianus*. *Scientific Reports*, 6, 21985.
- Gharahi, N., and Zamani-Ahmadmahmoodi, R. (2025). Sustainable practices for diminishing nitrate leaching. *Environmental Quality Management*, 34(3), e70032.
- Grewal, A., Abbey, L., and Gunupuru, L.R. (2018). Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 135, 152–159.
- Murphy, B., and Hazelton, P. (2007). Interpreting soil test results. In *What Do All the Numbers Mean*. CSIRO Publishing Victoria, Australia.
- Hu, S., Zhang, X., Wu, M., Liu, Z., Tang, S., and Ke, S. (2025). Bioremediation of petroleum-contaminated soils with pyrolysis biochar: TPH removal, multifunctionality, and microecological restoration. *CLEAN- Soil, Air, Water*, 53(8), e70018.
- Kapoor, A., Sharma, R., Kumar, A., and Sepehya, S. (2022). Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 45(15), 2380–2388.
- Kumari, B., Kriti, Singh, G., Sinam, G., and Singh, D.P. (2020). Microbial remediation of crude oil-contaminated sites. In V. Shukla and N. Kumar (Eds.), *Environmental Concerns and Sustainable Development* (pp. 333–351). Springer.
- Li, J., Li, H., Shang, J., Liu, K., He, Y., and Shao, X. (2023). The synergistic effect of biochar and microorganisms greatly improves vegetation and microbial structure of degraded alpine grassland on Qinghai–Tibet Plateau. *Agronomy*, 13, 2203.
- Li, Y., Yang, J., Song, Y., and Wei, M. (2025). Progress in biostimulation-based remediation of TPH-contaminated soils: A comprehensive review. *PeerJ*, 13(9), e19991.
- Lim, M.W., Von Lau, E., and Poh, P.E. (2016). A comprehensive guide of remediation technologies for oil-contaminated soil-Present works and future directions. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1), 14–45.
- Lovindeer, R., Mynott, S., Porobic, J., Fulton, E.A., Hook, S.E., Pethybridge, H., and Melbourne-Thomas, J. (2023). Ecosystem-level impacts of oil spills: A review of available data with confidence metrics for application to ecosystem models. *Environmental Modelling & Assessment*, 28(6), 939–960.
- Lv, Y., Bao, J., and Zhu, L. (2022). A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Reports*, 8, 7976–7989.
- Lynch, J.M., and Barbano, D.M. (1999). Kjeldahl nitrogen analysis as a reference method for protein determination in dairy products. *Journal of AOAC International*, 82(6), 1389-98.
- Moopam, P. (2010). *Manual of oceanographic observation and pollutant analyses methods*. 3th ed., Kuwait, 321p.
- Saeed, M., Ilyas, N., Jayachandran, K., Gaffar, S., Arshad, M., Ahmad, M. S., Bibi, F., Jeddi, K., and Hessini, K. (2021). Biostimulation potential of biochar for remediating the crude oil contaminated soil and plant growth. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), 2667–2676.
- Sarong, M.M., Eugenio, P.J.G., Hernandez, G.G.A., Garcia, F.M.N., Mactal, A.G., Fiegalan, F.T., Mason, M.L.T., and Monserate, J.J. (2025). Engineered biochar–nanocomposites enhanced vetiver growth and nickel uptake in Ni-elevated ultramafic soils. *Biology and Life Sciences Forum*, 54(1), 26.
- Selim, E., Soliman, M., Elatar, M.E.A., and Radwan, R.A. (2025). Reducing heavy metal contamination in soil with biochar and zeolite. *Damietta Journal of Agricultural Sciences*, 4(1), 17–34.
- Miller, W.P., and Sumner, M.E. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 1201–1230). Soil Science Society of America.
- Sui, X., Wang, X., Li, Y., and Ji, H. (2021). Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges. *Sustainability*, 13(16), 9267.
- Walkley, A., and Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.
- Wu, M., Ye, X., Chen, K., Li, W., Yuan, J., and Jiang, X. (2017). Bacterial community shift and hydrocarbon transformation during bioremediation of short-term petroleum-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 223, 657–664.
- Zahed, M.A., Salehi, S., Madadi, R., and Hejabi, F. (2021). Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100055.

Investigation of the synergistic effects of the combined application of *Vetiveria zizanioides* and biochar on the remediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons

Nasrin Gharahi^{1*}, Elham Ghehsareh Ardestani², Mohsen Bahmani³



Research Article

1. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

* Corresponding author

2. Associate Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

elham.ghehsareh@nres.sku.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Wood and Furniture Industry Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

mohsen.bahmani@sku.ac.ir

Article Code: 2607-1188

Countinus Pagnation: 1411-1418

Received: 20 July 2026

Accepted: 11 September 2026

Online: 29 September 2026

Review speed: 54 days

Citation:

Gharahi, N., Ghehsareh Ardestani, E., and Bahmani, M. (2026). Investigation of the synergistic effects of the combined application of *Vetiveria zizanioides* and biochar on the remediation of soil contaminated with total petroleum hydrocarbons. *Management of Natural Ecosystems*, 6(3), 14-21.

Abstract

Petroleum hydrocarbon contamination is one of the most important environmental challenges arising from petroleum activities and, due to the persistence and toxicity of these compounds, requires efficient and sustainable methods for the remediation of contaminated soils. This study investigated the individual and combined effects of *Vetiveria zizanioides* and wheat straw-derived biochar on the removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil. The experiment was conducted under pot conditions using treatments consisting of vetiver, biochar at two rates of 2% and 5% (w/w), and their combination. The soil was contaminated with 6% (w/w) crude oil, and the samples were maintained under controlled conditions for six months. Total petroleum hydrocarbon concentrations were determined gravimetrically at the beginning of the experiment, after one month, and at the end of the experimental period. The results showed that the combined application of vetiver and 2% biochar resulted in 19.9% removal of total petroleum hydrocarbons, which was significantly higher than that achieved by the individual application of vetiver (11.18%) and 2% biochar (8.88%), indicating a synergistic effect of these two methods. However, the highest removal efficiency (21.4%) was observed for the treatment with 5% biochar alone, which showed better performance than the combined treatment of vetiver and 5% biochar (14.7%). These findings indicate that the efficiency of combining phytoremediation and biochar depends on the amount of biochar applied, and that at higher amounts, the physical adsorption of pollutants by biochar may prevail over biological processes in the rhizosphere. Overall, the simultaneous use of vetiver and biochar, particularly at 2%, is considered an effective, economical, and environmentally friendly strategy for the remediation of crude oil-contaminated soils. Field studies and investigations of changes in microbial communities are recommended to optimize this technology at a practical scale.

Key Words:

Phytoremediation; Biochar; *Vetiveria zizanioides*; Petroleum Hydrocarbons; Soil Remediation.