

زیست پالایی فنی خاک‌های آلوده به نفت

نسرين قرهی^{*۱}

na_gharahi@yahoo.co.uk

رسول زمانی احمدآبادی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۹

چکیده

زمینه و هدف: آلاینده‌های نفتی در خاک به‌عنوان یکی از مشکلات جدی در حوزه محیط زیست مطرح است. انتشار نفت به خاک می‌تواند باعث تخریب ساختار خاکی، کاهش بیولوژیکی، اختلال در فرآیندهای طبیعی مانند دگرگونی میکروبی و تخریب گیاهان شود. بنابراین، تلاش برای کاهش و حذف آلاینده‌های نفتی از خاک یک امر ضروری و اهمیت‌دار است. بیوپار به دلیل ساختار غنی از کربن و ارتباطات آلی-آلی داخلی خود، به عنوان یک جاذب طبیعی در حوزه حذف آلاینده‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین اهداف این پژوهش استفاده از تیمار اصلاح‌کننده‌ی بیوپار و ارزیابی اثربخشی آن بر روی حذف آلودگی نفتی در خاک بود.

روش بررسی: آزمایش با گلدان‌های پر شده با ۵۰۰ گرم خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی (TPH) انجام شد و اثر سطوح مختلف افزودن اصلاح‌کننده‌های بیوپار کاه و کلش گندم بر کاهش آلودگی نفتی خاک بررسی شد. سه تیمار خاک بدون افزودن بیوپار به عنوان شاهد، بیوپار با نسبت وزنی به وزن ۳ درصد و بیوپار با نسبت وزنی به وزن ۵ درصد در سه تکرار انجام شد و در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد مدت ۶۰ روز داخل انکاباسیون قرار گرفتند. آب دیونیزه شده هر دو روز یکبار اضافه شد تا رطوبت در ۷۰ درصد حداکثر ظرفیت نگهداری آب حفظ شود و تنفس میکروبی و TPHs، هر ۱۰ روز یکبار اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد مقادیر حذف TPHs پس از ۶۰ روز انکاباسیون ۱/۹، ۱۰/۵ و ۱۵/۵ (g/kg) به ترتیب در تیمارهای شاهد، سه درصد وزنی و پنج درصد وزنی بیوپار، بود. اسیدیته خاک در تیمار سه درصد وزنی و پنج درصد وزنی بیوپار پس از ۶۰ روز از آزمایش به ترتیب ۷/۰۲ و ۶/۸۳ بود که نسبت به نمونه قبل از آزمایش کاهش یافت. همچنین مقدار ماده آلی خاک با اضافه کردن پنج درصد بیوپار پس از ۶۰ روز آزمایش به کمترین مقدار ۷/۹۹ (g/kg) رسید. هدایت الکتریکی خاک برای هر دو تیمار نسبت به نمونه قبل از آزمایش افزایش اندک داشت. میزان تنفس میکروبی خاک در دو تیمار سه درصد وزنی و پنج درصد وزنی بیوپار نسبت به نمونه شاهد به تدریج افزایش یافت، و سپس پس از ۴۰ روز انکاباسیون کاهش یافت.

بحث و نتیجه‌گیری: افزایش تدریجی تنفس میکروبی خاک در تیمار پنج درصد وزنی بیوپار بیشتر از تیمار سه درصد وزنی بیوپار بود. مقدار مواد آلی، و تنفس میکروبی نشان داد که بیوپار نه تنها خاک را بارور می‌کند و خواص فیزیکی‌وشیمیایی خاک را تنظیم می‌کند، بلکه یک محیط بافر مفید برای باکتری‌ها می‌تواند فراهم می‌کند. اثر تحریک زیستی مطالعه حاضر پتانسیل بیوپار در کاهش TPHs را برجسته می‌کند تا پتانسیل آن را برای اثربخشی اصلاح بیشتر افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: خاک، هیدروکربن‌های نفتی، بیوپار، حذف آلودگی نفتی.

^۱ دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهر کرد، شهر کرد، ایران * (مسئول مکاتبات)

^۲ دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهر کرد، شهر کرد، ایران

Technical bioremediation of Oil-Contaminated Soil

Nasrin Gharahi^{1*}

na_gharahi@yahoo.co.uk

Rasool Zamani-Ahmadm Mahmoodi²

Accepted Date: April 12, 2025

Date Received: January 28, 2025

Abstract

Introduction: Oil pollutants in the soil are one of the serious problems in the environment. The release of oil into the soil can cause soil degradation, biological reduction, and disruption of natural processes such as microbial transformation and plant destruction. Therefore, trying to reduce and remove oil pollutants from the soil is a necessary and important matter. Biochar is used as a natural adsorbent in the field of removing petroleum pollutants due to its carbon enrichment and internal organic connections. The complex structure of biochar increases the surface area and absorption, which can be converted into efficiency in removing more oil pollutants from the soil. This organic material comes from the decomposition and separation of wood and grass residues of agricultural products using the pyrolysis method. According to the presented research and findings, the importance of this research was the treatment of biochar modifiers and the evaluation of its effectiveness in the removal of oil pollution in the soil.

Materials and methods: The experiment was carried out with pots produced with 500 grams of soil contaminated with petroleum hydrocarbons (TPH) and the effect of adding different levels of straw and wheat stubble biochar modifiers on the reduction of soil oil contamination was investigated. Three treatments were carried out by adding biochar as a control, biochar with a weight ratio of 3% and biochar with a weight ratio of 5% in three repetitions and at a weight of 30 degrees Celsius, with a relative ambient temperature of 6% and a duration of 60 days inside incubation. Deionized water is maintained at 70% water storage capacity every two days, and microbial and TPHs are measured every 10 days.

Results and discussion: The results showed that the removal of TPHs after 60 days of incubation was 1.9, 10.5, and 15.5 g/kg) in control treatments, three percent by weight and five percent by weight of biochar, respectively. The acidity of the soil in the treatment of three-weight percent and five-weight percent biochar after 60 days of the experiment was 7.02 and 6.83, respectively, which decreased compared to the sample before the experiment. Also, the amount of soil organic matter reached the lowest value of 7.99 (g/kg) after 60 days of experiment by adding five percent biochar. The electrical conductivity of the soil for both treatments was slightly increased compared to the sample before the test. The microbial content of the soil increased more in two treatments of three percent by weight and five percent by weight compared to the control sample and then decreased after 40 days of incubation. The increase in soil microbial growth in the treatment of five percent by weight of biochar was higher than in the treatment of three percent by weight of biochar. The amount of organic and microbial matter showed that biochar not only fertilizes the soil and regulates the physicochemical properties of the soil, but also can be a useful buffer medium for drugs. The biomobility effect of the present study highlights the potential of biochar in reducing TPHs to increase its potential for remediation effectiveness.

Keywords: Soil, petroleum hydrocarbons, biochar, petroleum removal.

¹ Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran*(*Corresponding Author*)

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

مقدمه

آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) به عنوان یک نگرانی جدی زیست‌محیطی و سلامت انسان مطرح شده است، زیرا درصد زیادی از مواد نفتی مصرف‌شده بدون هیچ‌گونه تصفیه به اکوسیستم تخلیه می‌شود (۱).

هیدروکربن‌های نفتی از کربن، اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد تشکیل شده‌اند. هیدروکربن‌های اشباع، هیدروکربن‌های معطر، کلئید و آسفالتین چهار بخش بزرگ هیدروکربن‌های نفتی هستند که سمی هستند و نمی‌توانند به سرعت توسط میکروارگانیسم‌های خاک تجزیه شوند (۲). علاوه بر این، هوازگی می‌تواند جذب سطحی آلاینده‌ها را در منافذ خاک افزایش دهد و منجر به مشکلات تکاملی خاک و کاهش فراهمی زیستی و تجزیه‌پذیری زیستی موجودات زنده به آلاینده‌ها شود. خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی یک مشکل زیست‌محیطی بزرگ است و نیاز فوری به یافتن روش‌های موثر برای پالایش خاک وجود دارد.

فناوری‌های زیست‌پالایی در مقایسه با روش‌های پالایش فیزیکی و شیمیایی به دلیل کارایی بالا، هزینه کم و محصولات بی‌ضرر (عمدتاً CO₂ و آب) کاربردهای گسترده‌تری پیدا می‌کنند (۳).

با افزایش جمعیت جهانی و نیاز بیشتر به مصرف غذا، مقدار زیادی از باقیمانده‌های محصولات کشاورزی ناشی از برداشت محصولات تولید می‌شود (۴). در سال‌های اخیر، استفاده از باقیمانده‌های محصولات کشاورزی برای حاصلخیزی بیشتر خاک و کاهش آلودگی خاک افزایش یافته است.

بیوچار (Biochar)، به عنوان یک ماده‌ی شناخته‌شده و اکشنگر در حوزه حذف آلاینده‌های خاک، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (شکل ۱). این ماده‌ی آلی تولیدی از تجزیه و تفکیک باقیمانده‌های چوبی و علفی محصولات کشاورزی با استفاده از فرآیند پیرولیز (فرآیند تبدیل مواد آلی به وجود آمده از گیاهان به زغال نیمسوز تحت دمای بالا و در شرایط بدون اکسیژن) بدست می‌آید (شکل ۲). در طول این فرآیند، مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده‌شده و تبدیل به ماده جامد سیاه‌رنگ غنی از کربن به نام بیوچار می‌شود (۵ و ۶). تقریباً تمام ترکیب‌ها و پسماندهای آلی از قبیل مواد چوبی، بقایای گیاهان زراعی (کاه و کلش، پوشال برنج، و غیره)، شاخ و برگ درختان، انواع کودهای آلی (دامی، مرغی و غیره)، اجساد و لاشه حیوانات، لجن فاضلاب و پسماندهای آلی صنعتی و شهری قابلیت تبدیل شدن به بیوچار را دارند (۷).

خصوصیات ویژه این ماده به عنوان یک جاذب واکنشگر واکنش‌پذیر، آن را به ابزاری قدرتمند در حذف آلاینده‌های خاک، به ویژه هیدروکربن‌های نفتی، تبدیل کرده است.

تعدادی از لیگنین و بیوچار سلولز نیز می‌توانند به عنوان بستری برای رشد و تولید مثل میکروارگانیسم‌ها عمل می‌کنند. بیوچار از نظر ساختاری دارای سطح ویژه بالایی است که امکان ذخیره‌سازی مواد و جذب آلاینده‌ها را در سطح خود دارد. این خصوصیات منجر به افزایش سطح تماس با آلاینده‌ها و کاهش غلظت آن‌ها در خاک می‌شود. همچنین، بیوچار به واسطه خصوصیات بیوشیمیایی خود، امکان تعامل با آلاینده‌ها را فراهم می‌کند و باعث تجزیه و تفکیک آن‌ها می‌شود.

یکی از مزایای بزرگ بیوچار این است که علاوه بر حذف آلاینده‌ها، تأثیرات مثبتی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. اثرات افزایش توانایی تبادل یونی، بهبود تهویه‌پذیری خاک و کمک به تثبیت مواد آلی و مغذی در خاک از جمله این تأثیرات می‌باشد. از این رو، بیوچار ممکن است یک رویکرد عالی برای حذف TPHها و بهبود شرایط خاک آلوده باشد. با توجه به مزایای بیوچار در حذف آلاینده‌های خاک و افزایش کیفیت خاک، این فناوری به عنوان یک گزینه پایدار در مدیریت مشکلات آلودگی خاک و بهبود محیط زیست به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است.

تحقیقات اخیر در این حوزه به تأثیر بیوچار بر پاکسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی می‌پردازند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از این تیمار منجر به از بین بردن هیدروکربن‌های نفتی از ساختار خاک می‌شود و در عین حال تغییرات مثبتی در خواص آن ایجاد می‌کند. با توجه به تحقیقات و یافته‌های ارائه شده، مهمترین اهداف این پژوهش عبارتند از استفاده از تیمار اصلاح‌کننده بیوچار و ارزیابی اثربخشی آن بر روی حذف آلودگی نفتی در خاک. مطالعات اندکی تأثیر مقدار متفاوت بیوچار بر اثر زیست‌پالایی خاک آلوده با TPHs گزارش کرده‌اند. استفاده از تیمار اصلاح‌کننده بیوچار، به دلیل تأثیر مثبتی که بر ویژگی‌های خاک دارند، می‌تواند به بهبود کیفیت و کاهش آلودگی TPHs در خاک کمک کند. با توجه به اهمیت محیط زیست و حفاظت از منابع طبیعی، این پژوهش به عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار در کاهش آلودگی نفتی خاک‌ها و بهبود کیفیت آنها تلقی می‌شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک و بیوچار

خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی مورد استفاده در این مطالعه از عمق حدود ۲۰ سانتی‌متری میدان نفتی مارون، هفتاد

(۳) بیوپچار با نسبت وزنی به وزن ۵ درصد به خاک اضافه شد تا اثر افزایش زیستی بیوپچار ۵ درصد (B5) ارزیابی شود. سه تیمار در سه تکرار انجام شد و در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد (RH) به مدت ۶۰ روز داخل انکاباسیون قرار گرفتند. آب دیونیزه شده هر دو روز یکبار اضافه شد تا رطوبت در ۷۰ درصد حداکثر ظرفیت نگهداری آب حفظ شود و تنفس میکروبی و TPHs، هر ۱۰ روز یکبار اندازه‌گیری شد.

هیدروکربن های نفتی خاک

پس از آزمایش انکوباسیون، نمونه های خاک منجمد، استخراج و آنالیز شدند. TPH های استخراج شده از خاک با استفاده از روش وزن سنجی تعیین شدند. به طور خلاصه، ۵ گرم خاک پیچیده شده در کاغذ صافی با استفاده از ۳۰ میلی لیتر متیلن کلراید به مدت ۱۵ دقیقه به روش اولتراسونیک استخراج شد و سپس کاغذ به مدت ۱۲ ساعت به استخراج کننده سوکسله در حمام آب ۵۴ درجه سانتیگراد منتقل شد. پس از آن، عصاره ها بر روی یک روتار اوپراتور متمرکز شدند و سپس برای اندازه‌گیری به حجم ثابت ۵۰ میلی لیتر رسیدند. مقدار TPH باقیمانده بر اساس وزن سنجی اندازه‌گیری شد و غلظت n-آلکان ها (C12-18) توسط طیف‌سنج جرمی کروماتوگرافی گازی (GC-MS، مدل C۵۹۷۵-۷۸۹۰، Agilent Technologies، USA) اندازه‌گیری شد. حذف (%) TPHs با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{TPHs removal (\%)} = \{(w_0 - w_t) / w_0\} * 100$$

جایی که w_0 غلظت اولیه TPH خاک است (گرم بر کیلوگرم)، w_t غلظت باقیمانده TPH ها در زمان t است و t زمان اصلاح (روز) است.

میزان تنفس میکروبی خاک

تیمارهای نمونه خاک بالا در سه تکرار به طور جداگانه در آزمایشگاه در لوله های (PVC) به قطر ۲/۶ سانتی متر، ارتفاع ۹ سانتی متر و حجم ۴۷/۷۸ سانتی متر مکعب قرار خواهند گرفت. به منظور اندازه‌گیری تنفس میکروبی خاک از روش بطری بسته استفاده شد (۱۴). تیمارهای آماده شده داخل ظروف شیشه ای بسته شده با حجم ۱۲۰۰ میلی لیتر قرار گرفت و تجزیه و

تحلیل گازهای دی‌اکسید کربن (CO_2) در روزهای ۴، ۸، ۱۲، ... و ۶۰ پس از شروع آزمایش انجام شد. اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسید کربن برای هر نمونه (داخل ظروف شیشه‌ای) چهار

کیلومتری اهواز جمع آوری شد و با هماهنگی با منطقه نفتی مارون، خاک آلوده به دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد منتقل شد. نمونه‌های خاک هموژنیزه شدند، در دمای اتاق در هوا خشک شدند و با الک ۲ میلی‌متری الک شدند تا ناخالصی‌های بزرگ حذف شود و سپس در دمای ۴۰- درجه سانتیگراد در تاریکی برای استفاده بعدی نگهداری شد.

بیوپچار توسط یک کوره لوله تحت اکسیژن محدود در یک کوره اتمسفر کنترل شده تولید شد. کاه و کلش گندم به عنوان ماده خام مورد استفاده قرار گرفت کاه و کلش گندم با آب دیونیزه شسته شد و در فر با دمای ۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. پس از آن، مواد به قطعات ۱-۲ سانتی متری خرد شد و در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت با سرعت حرارت ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه حرارت داده شد. در نهایت، نمونه پیرولیز شده برای استفاده بیشتر از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد.

به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (۹،۸ و ۱۰)، واکنش عصاره اشباع خاک (pH) به روش پتانسیومتری، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC) با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (۱۱)، گنجایش تبادل کاتیونی خاک (CEC) به روش جانشینی با استات سدیم (۱۲)، مقدار کربن آلی خاک (OC) به روش اکسیداسیون تر (۱۳) و نیتروژن کل خاک (TN) به روش کج‌لدال (۴) اندازه‌گیری شد. خواص فیزیکوشیمیایی اولیه خاک و بیوپچار در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات خاک و بیوپچار مورد استفاده

Table 1 - Some characteristics of soil and biochar used

بیوپچار	خاک	ویژگی
۱۱/۳	۷/۳۹	اسیدیته (pH)
۳۳/۵	۹/۸۵	مواد آلی (g/kg)
۱۵/۷	۰/۰۴۷	نیتروژن کل (g/kg) (TN)
۶/۱۳	۱/۴۵	هدایت الکتریکی mS/cm (EC)
-	۴/۷۷	(%) TPHs

پالایش خاک آلوده به TPHs

تمامی تیمارها در گلدان پر شده با ۵۰۰ گرم خاک آلوده غیراستریل شده انجام شد. تیمارها به شرح زیر بودند:

(۱) خاک بدون افزودن بیوپچار به عنوان شاهد (C) استفاده شد. (۲) بیوپچار با نسبت وزنی به وزن ۳ درصد به خاک اضافه شد تا اثر افزایش زیستی بیوپچار ۳ درصد (B3) ارزیابی شود.

مطابق شکل ۱ بیشترین مقدار حذف TPHs مربوط به تیمار B5 با افزودن ۵ درصد وزنی بیوچار به خاک است که در تمام روزهای انکاباسیون نشان‌دهنده افزون‌ترین مقدار حذف TPHs است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در طول زمان آزمایش مقدار حذف TPHs از خاک در تیمارهای سه گرم بیوچار و پنج گرم بیوچار نسبت به نمونه شاهد به‌طور قابل توجهی افزایش داشته است. همچنین با افزایش درصد بیوچار از سه درصد به پنج درصد، مقدار مقدار حذف TPHs افزایش داشته است.

pH خاک، هدایت الکتریکی و مواد آلی

تغییرات pH خاک، هدایت الکتریکی و مواد آلی قبل و بعد از انجام آزمایش تحت بررسی قرار گرفت (جدول ۲).
pH خاک در تیمار B3 و B5 پس از ۶۰ روز از آزمایش به ترتیب ۷/۰۲ و ۶/۸۳ بود که نسبت به نمونه قبل از آزمایش کاهش یافته است. همچنین مقادیر ماده آلی خاک با اضافه کردن پنج درصد بیوچار پس از ۶۰ روز آزمایش به کمترین مقدار ۷/۹۹ (g/kg) رسید. هدایت الکتریکی خاک برای هر دوتیمار نسبت به نمونه قبل از آزمایش افزایش اندک داشت.

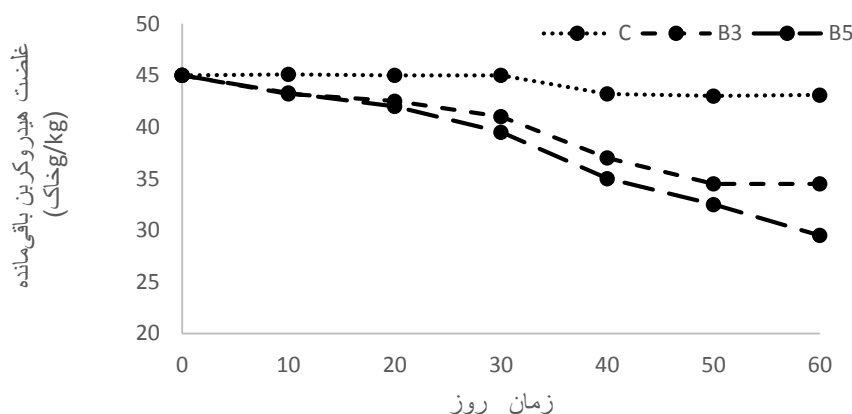
بار (۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ دقیقه پس از بستن ظروف شیشه‌ای) در هر روز آنالیز تکرار شد. در نهایت با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) غلظت CO₂ در هر نمونه اندازه‌گیری شد.

نتایج

خواص خاک (جدول ۱) نشان داد که غلظت TPH ها ۴/۷۷ (g/kg)، با ۴۹/۸۷ درصد هیدروکربن‌های اشباع، ۲۶/۰۲ درصد هیدروکربن‌های معطر، ۱۷/۸۸ درصد کل‌وئید و ۵/۶۳ درصد آسفالت بود. خاک آلوده دارای pH تقریباً خنثی (۷/۳۹) بود و غلظت مواد آلی و نیتروژن به ترتیب به ۹/۸۵ و ۰/۰۴۷ (g/kg) بود. فراوانی مواد آلی، نیتروژن کل در بیوچار ۳۳/۵ و ۱۵/۷ (g/kg) بود که بیشتر از مقدار مواد آلی و نیتروژن خاک بود.

تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی

TPH در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از سه تیمار پس از ۶۰ روز شناسایی شد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقادیر حذف TPHs ۱/۹، ۱۰/۵ و ۱۵/۵ (g/kg) در تیمارهای شاهد، B3 و B5، به طور جداگانه بود.



شکل ۱- مقدار هیدروکربن‌های نفتی خاک (TPHs) در ۶۰ روز زیست‌پالایی با بیوچار.

Figure 1- Amount of soil petroleum hydrocarbons (TPHs) in 60 days of bioremediation with biochar.

جدول ۲- تغییرات اسیدیته، هدایت الکتریکی و ماده آلی خاک

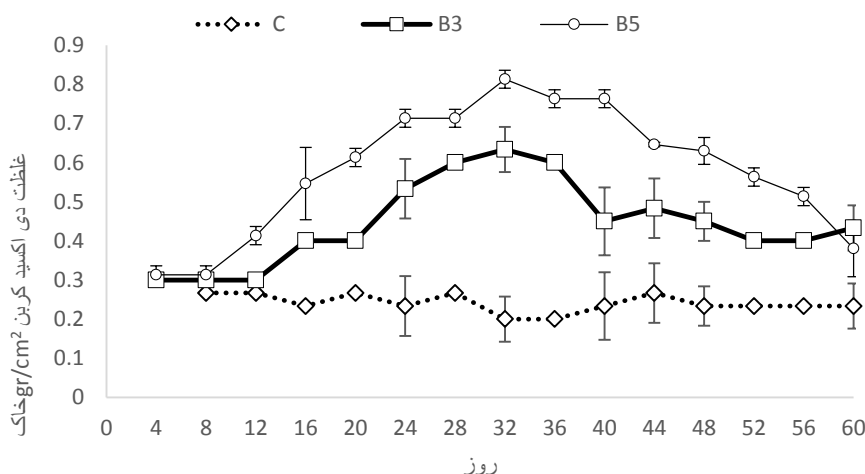
Table 2- Changes in acidity, electrical conductivity and soil organic matter

تیمار	pH	هدایت الکتریکی (mS/cm(Ec)	مواد آلی (g/kg)
قبل از آزمایش	۷/۳۹	۱/۴۵	۹/۸۵
شاهد (C)	۷/۲۸	۱/۳۶	۹/۴۳
بیوچار ۳ درصد (B3)	۷/۰۲	۱/۵۳	۸/۴۷
بیوچار ۵ درصد (B5)	۶/۸۳	۱/۵۵	۷/۹۹

تنفس میکروبی خاک

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، میزان تنفس میکروبی خاک در دو تیمار B3 و B5 نسبت به نمونه شاهد به تدریج افزایش یافت، و سپس پس از ۴۰ روز انکابسیون کاهش

یافت. افزایش تدریجی تنفس میکروبی خاک در تیمار B5 بیشتر از تیمار B3 بود. مطابق شکل ۲ میزان تنفس میکروبی خاک در دو تیمار B3 و B5 نسبت به نمونه شاهد پس از ۴۰ روز انکابسیون همچنان افزایش داشته است.



شکل ۲- تنفس میکروبی خاک، خاک بدون افزودن بیوچار به عنوان شاهد (C)، بیوچار با نسبت وزنی ۳ درصد (B3)، بیوچار با نسبت وزنی ۵ درصد (B5).

Figure 2- Soil microbial respiration, soil without biochar addition as control (C), biochar with a weight ratio of 3% (B3), biochar with a weight ratio of 5% (B5).

بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصله نشان می‌دهد که اثر سطوح مختلف افزودن اصلاح کننده‌های آلی بر کاهش آلودگی نفتی خاک معنی دار بوده است. کاربرد بیوچار کاه و کلش گندم به نسبت پنج درصد وزنی به بیشترین کاهش TPH و به دنبال آن بیوچار کاه و کلش گندم به نسبت سه درصد وزنی شد. دلیل اصلی چنین کارایی بالا ممکن است به دلیل این واقعیت باشد که بیوچار می‌تواند تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی را در الگوهای تحریک زیستی بهبود بخشد. محمدی و همکاران (۱۵) بیان کردند که تیمارهای آلی و آلی-معدنی منجر به بهبود ویژگی‌های ساختمانی و مکانیکی خاک شد و راهکاری مدیریتی برای احیای خاک‌های آلوده به مواد نفتی محسوب می‌شود. در تحقیق انجام شده توسط ابراهیمی زاده (۱۶)، تأثیر بیوچار حاصل از دو گیاه راش و ذرت بر خواص آبریزی خاک‌های آلوده به نفت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار به طور قابل توجهی منجر به کاهش خواص آبریزی خاک می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که بیوچار به طور معنی‌داری تأثیری در تغییر ویژگی‌های آبریزی خاک دارد. این تغییرات ممکن است به افزایش انتشار و نفوذ آب در خاک،

بهبود زیست‌سازگاری گیاهان، و بهره‌وری بهتر از منابع آب منجر شود. تحقیقات انجام شده توسط Weng و همکاران (۱۷) به تأثیر کاه گندم بر هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌های آلوده می‌پردازد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از کاه گندم تأثیرات مثبتی بر اصلاح خاک‌های آلوده به نفت دارد. این تحقیقات نشان می‌دهد که کاه گندم باعث بهبود وضعیت خاک‌های آلوده به نفت می‌شود. احتمالاً کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک، افزایش تخلخل خاک، و اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله تأثیرات مثبتی است که به دنبال استفاده از کاه گندم در این تحقیق مشاهده شده است. Zhang و همکاران (۱۸) نیز تأثیرات مثبت افزودن بیوچار را جهت بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی تأیید نمودند. تحقیقات انجام شده توسط Adams و همکاران (۱۹) نشان می‌دهد که اضافه کردن پسماندهای کشاورزی به خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی منجر به افزایش تخلخل و بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود. این نتایج تأکید می‌کنند که اضافه کردن تیمارهای آلی به خاک می‌تواند به طور موثری در بهبود ویژگی‌های ساختمانی آنها تأثیرگذار باشد. Wei و همکاران (۲۰) بیان کردند که استفاده از بیوچارهای

آلوده به TPH استفاده شد. پس از ۶۰ روز انکاباسیون، کاربرد پنج درصد وزنی بیوچار منجر به بیشترین کاهش TPH شد. مواد آلی، و تنفس میکروبی نشان داد که بیوچار نه تنها خاک را بارور می‌کند و خواص فیزیکی‌شیمیایی خاک را تنظیم می‌کند، بلکه یک محیط بافر مفید برای باکتری‌ها می‌تواند فراهم می‌کند. اثر تحریک زیستی مطالعه حاضر پتانسیل بیوچار در کاهش TPHs را برجسته می‌کند تا پتانسیل آن را برای اثربخشی اصلاح بیشتر افزایش دهد. با این حال، تاثیر طولانی مدت افزودن بیوچار و اثر هم افزایی تقویت زیستی با دیگر اصلاح‌کننده‌ها نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

منابع

1. Gaskin, S.E. and Bentham, R.H., 2010. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. *Science of the Total Environment*, Vol. 408, pp. 3683–3688.
2. Hussain, F., Hussain, I., Khan, A. H. A., Muhammad, Y. S., Iqbal, Mazhar, S., Gerhard, R., Thomas Gerhard, Z. and Yousaf, S., 2018. Combined application of biochar, compost & bacterial consortia with Italian Ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 153, pp. 80–88.
3. Weir, E. and Doty, S., 2016. Social acceptability of phytoremediation: The role of risk and values. *International Journal of Phytoremediation*, Vol. 18, pp.1029–1036.
4. Jafari Vafa, H., Pourbabaee, A.A., Alikhani, H.A., Yazdanfar, N. and Khanali, M., 2023. The potential of organic wastes in eliminating old-aged petroleum pollution in saline soils: A case study in Khuzestan province. *Pollution*, Vol. 9(3), pp.1190-1207.
5. Mania, J. A., 2012. Optimisation of N application for a maize crop grow in a shallow, irrigated soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol. 4(4), pp. 373-380.
6. Brik, K. and Liautz, D., 2010. Nitrogen fertilizer thecnologies. *Western Nutrient Management Conference*. Vol 6, Salt Lake City, UT.
7. Chiang, J.M., 2011. Steam distillation methods for determination of ammonium nitrite and nitrate. *Analytica Chimica Acta*, Vol. 32, pp. 485-495.
8. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, Vol. 54(5), pp. 464-465.
9. Hazelton, P. and Murphy, B., 2007. Interpreting soil test results. *CSIRO publishing*. p. 169

دست نخورده و اصلاح شده در محیط‌های مختلف با آلودگی نفتی در تحریک تجزیه زیستی تاثیرگذار بودند.

اسیدیته خاک در تیمار B3 و B5 پس از ۶۰ روز از آزمایش نسبت به نمونه قبل از آزمایش کاهش یافته است. همچنین مقدار ماده آلی خاک با اضافه کردن پنج درصد بیوچار پس از ۶۰ روز آزمایش به کمترین مقدار رسید. هدایت الکتریکی خاک برای هر دو تیمار نسبت به نمونه قبل از آزمایش افزایش اندک نشان داد. در حالی که شاخص اسیدیته و مواد آلی خاک با اضافه کردن بیوچار در تیمار B5 بیشترین کاهش را داشتند. این به دلیل تجمع اسیدهای آلی تولید شده در طی تجزیه هیدروکربن‌ها و تجزیه مواد درشت مولکولی موجود در آلاینده‌های خاک توسط میکروارگانیسم‌ها به مواد مولکولی کوچک (مانند CO_2 و H_2O) است که منجر به کاهش مقدار pH خاک می‌شود. مصرف مداوم مواد مغذی توسط متابولیسم میکروبی باعث شد که محتوای مواد آلی در مراحل بعدی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. با این حال، هیچ تغییر قابل توجهی در pH خاک و محتوای مواد آلی در تیمار شاهد در تمام دوره آزمایش مشاهده نشد. به طور کلی برای تغییرات محیطی، بیوچار سرشار از کربن آلی، تخلخل و CEC است که نه تنها می‌تواند هیدروکربن‌ها را جذب کند، بلکه تعادل اکوسیستم خاک را برای میکروارگانیسم‌ها حفظ می‌کند، که می‌تواند عامل مهمی در حذف TPH باشد. علاوه بر این، اکوسیستم خاک می‌تواند منعکس‌کننده استفاده از TPH توسط میکروارگانیسم‌ها باشد. مطالعات قبلی گزارش کرده اند که تولید CO_2 یک پارامتر مهم برای رشد، متابولیسم و تولید مثل میکروب‌ها در خاک‌های آلوده است.

با توجه به نتایج، میزان تنفس میکروبی خاک در دو تیمار B3 و B5 نسبت به نمونه شاهد به تدریج افزایش یافت، و سپس پس از ۴۰ روز انکاباسیون کاهش یافت. این ممکن است در پاسخ به مواد مغذی فراوان در خاک و محیط زندگی مناسب در بازسازی اولیه رخ دهد. پس از یک دوره سازگاری کوتاه، تعداد باکتری‌های تجزیه‌کننده به سرعت در عرض ۱۰ تا ۳۰ روز افزایش یافت. به همین ترتیب، متابولیسم رشد و شدت تنفس به طور قابل توجهی افزایش یافت. پس از ۴۰ روز به دلیل بدتر شدن محیط زندگی میکروارگانیسم‌ها با کاهش مواد مغذی مانند C، N، P و رقابت میکروارگانیسم‌ها، شدت تنفس میکروبی به وضوح کاهش یافت. با این حال، به طور کلی، افزودن بیوچار می‌تواند به طور قابل توجهی تعداد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها را در خاک آلوده به نفت افزایش دهد.

بر اساس مطالعه حاضر، بیوچار کاه و کلش گندم برای سرعت بخشیدن به تجزیه هیدروکربن‌های نفتی برای اصلاح خاک‌های

10. Ghazan Shahi, c., 2006. Soil and plant analysis. Aizh Publications. P. 272
11. Zarinkafsh, M., 1993. Applied soil science. Tehran University Press. P. 247
12. Summer, M.E. and Miller, W.P., 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: D.L. Sparks et al. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 3, 3rd Ed, pp. 1201-1229.
13. Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, Vol. 37, pp. 29-38.
14. Andreasen, J.K, O'Neill, R. V., Noss, R. and Slosser, N. C., 2001. Considerations for the development of a terrestrial index of ecological integrity. Ecological Indicators, Vol. 1, pp. 21-35.
15. Mohammadi, N., and Khademalrasoul, A., 2020. Investigation of Biochar and Zeopant Application on Mechanical Properties of Soils Contaminated with Total Petroleum. Iranian Journal of Soil Research, Vol. 34(3), pp. 407-418. doi: 10.22092/ijsr.2020.343410.536 (In Persian)
16. Ebrahimzadeh Omran, S. 2014. Improving the hydrophobicity of oil-contaminated soils using biochar. Master's thesis. University of Tehran, Faculty of Agriculture. (In Persian)
17. Weng, Z. H., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Kimber, S., Morris, S. and Cowie, A., 2015. Plant biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system. Soil Biology and Biochemistry, Vol. 90, pp. 111-121.
18. Zhang, B., Zhang, L. and Zhang, X., 2019. Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. RSC Advances, Vol. 9, 35304.
19. Adams, F. V., Niyomugabo, A. and Silvester, O. P., 2017. Bioremediation of crude oil-contaminated soils using agricultural waste. Procedia manufacturing, Vol. 7, pp. 459-464.
20. Wei, Zh., Wei, Y., Liu, Y., Niu, sh., Xu. Y., Park, J. H. and Wang, J. J. 2014. Biochar-based materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: Performances, mechanisms, and environmental impact. Journal of Environmental Sciences, Vol. 138, pp. 350-372.