



Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil Using Compost Produced from Food Waste

Saeid Salehi^a, Alireza Asgari^b, Shahrzad Sadeghi Alvijeh^b, Zahra Sadat Razavi Dinani^{c*}

^aIranian Offshore Oil Company, Bushehr, Iran.

^bIranian Scientific Association of Waste Engineering and Management, Tehran, Iran.

^cIsfahan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Isfahan, Iran.

*Corresponding Author: z.razavidinani@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0046-795X>

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: 2026/08/22

Received in revised form:

2026/09/09

Accepted 2026/09/22

Available online: 2026/09/22

Keywords:

Bahregan,

Oil-contaminated soil,

Bioremediation,

Food-waste compost,

Total petroleum hydrocarbons.

This study evaluated the potential of food waste-derived compost for the bioremediation of crude oil-contaminated soil from the Bahregan oil field, Bushehr Province, southern Iran. The experiment was conducted for 180 days using four treatments: a control without aeration and moisture addition, a control with aeration and moisture addition, and treatments containing 30% and 50% compost. Total petroleum hydrocarbons (TPH) were measured using gas chromatography equipped with a flame ionization detector (GC-FID), and changes in TPH concentrations were monitored throughout the experimental period. In addition, some physicochemical characteristics affecting the bioremediation process, including pH, organic carbon, total Kjeldahl nitrogen, and total phosphorus, were monitored. The results showed that after 180 days, TPH removal efficiencies in the control without aeration and moisture addition, the control with aeration and moisture addition, and the 30% and 50% compost treatments were 8.6%, 78%, 94.45%, and 94.91%, respectively. Comparison of the control treatments showed that oxygen supply and maintenance of appropriate moisture substantially increased TPH removal, indicating the important role of suitable environmental conditions in the activity of indigenous microorganisms. Compost addition under the same aeration and moisture conditions also increased the removal efficiency compared with the aerated and moistened control. The 30% and 50% compost treatments showed 16.45 and 16.91 percentage points greater TPH removal, respectively, than the aerated and moistened control. However, the difference in final removal efficiency between the two compost levels was only 0.46 percentage points. Therefore, under the conditions of this study, the use of 30% compost may be a more suitable option in terms of the amount of amendment required and operational costs. Overall, the results showed that food waste-derived compost, together with appropriate moisture and aeration management, has high potential for the bioremediation of petroleum-contaminated soil and can simultaneously contribute to reducing hydrocarbon contamination and the beneficial reuse of organic waste.

Cite this article: Salehi, S., Asgari, A., Sadeghi Alvijeh, Sh. & Razavi Dinani, Z. (2026). Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil Using Compost Produced from Food Waste. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(2), 137-153.
<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598259.1034>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598259.1034>

Introduction

Crude oil is one of the world's most important energy resources and plays a major role in the economies of oil-producing countries, particularly those surrounding the Persian Gulf. However, oil exploration, drilling, extraction, transportation, storage, and processing can lead to significant environmental contamination. Oil spills, leakage from petroleum facilities, contaminated wastewater, and other petroleum-related activities are major sources of petroleum hydrocarbons in the environment. These contaminants can adversely affect soil properties, microbial communities, and surrounding ecosystems. Petroleum contamination is an important environmental concern because crude oil contains a complex mixture of hydrocarbons with different physical, chemical, and biological properties. Once introduced into soil, petroleum hydrocarbons may undergo volatilization, dissolution, adsorption, desorption, transport, and biodegradation. Their presence can also alter soil properties, nutrient availability, and microbial activity. Therefore, effective, environmentally compatible, and economically feasible remediation methods are particularly important in oil-producing regions. Bioremediation is a promising approach for treating petroleum-contaminated soils because microorganisms can transform and degrade petroleum hydrocarbons. Its efficiency depends on factors such as oxygen availability, moisture, nutrients, pH, temperature, and contaminant bioavailability. Compost can improve several of these conditions by supplying organic matter and nutrients, enhancing moisture retention, and improving soil properties. In addition, the use of food-waste compost can provide the combined benefits of organic waste management and contaminated-soil remediation. The Bahregan oil region in Bushehr Province, southern Iran, is located along the northern Persian Gulf and has a long history of petroleum exploration and production. Therefore, investigating suitable bioremediation approaches in this region is environmentally important. The present study evaluated the effectiveness of food-waste compost for the bioremediation of real crude-oil-contaminated soil collected from the Bahregan oil region. Specifically, the study investigated TPH reduction over 180 days, the effects of aeration and moisture management on TPH removal, and the effects of applying 30% and 50% compost on bioremediation efficiency.

Method

Petroleum-contaminated soil was collected from the Bahregan oil region in Bushehr Province, southern Iran. Food-waste compost containing 20% sheep manure was produced from food waste generated at a residential oil company camp and composted for five weeks in wooden boxes with regular turning and moisture control. The initial TPH concentration of the contaminated soil was 535,000 mg kg⁻¹, while TPH was not detected in the compost within the analytical detection limit. A 180-day bioremediation experiment was conducted using four treatments: (1) unaerated and unmoistened control, (2) aerated and moistened control without compost, (3) soil amended with 30% compost, and (4) soil amended with 50% compost. Compost-amended treatments were manually turned every four days, and moisture was maintained at 40–50% by adding water as needed. These treatments allowed the effects of aeration and moisture to be distinguished from the additional effect of compost amendment. TPH concentrations were measured at regular intervals. Before sampling, the mixtures were thoroughly homogenized, and samples were collected from different depths. TPH was extracted from dried samples using n-hexane and quantified by gas chromatography with a flame ionization detector (GC-FID) according to TNRCC Method 1005. Hydrocarbons in the C6–C35 range were considered TPH, and concentrations were reported on a dry-weight basis. pH, temperature, organic carbon, total Kjeldahl nitrogen (TKN), total phosphorus, and moisture were also monitored. TPH, organic carbon, TKN, and total phosphorus were measured weekly, while pH and temperature were monitored daily. Treatment performance was evaluated based

on changes in TPH concentration and percentage TPH removal over the 180-day experimental period.

Results

Initial characterization showed that the compost had substantially higher organic carbon, nutrients, and moisture than the contaminated soil, with organic carbon and moisture of 285.60 g kg⁻¹ and 48.20% compared with 18.50 g kg⁻¹ and 11.60%, respectively. TKN and total phosphorus were also higher in the compost, while pH values were 7.45 and 6.82 for compost and soil, respectively, indicating more favorable conditions for microbial activity and petroleum hydrocarbon degradation. After 180 days, the unaerated and unmoistened control showed only 8.6% TPH reduction, whereas the aerated and moistened control achieved 78.00%, highlighting the importance of adequate oxygen and moisture and the limited contribution of natural attenuation alone. Compost addition further increased TPH reduction, with 94.45% and 94.91% removal in the 30% and 50% compost treatments, respectively, corresponding to additional reductions of 16.45 and 16.91 percentage points compared with the aerated and moistened control. The improved performance may be related to the higher organic matter and nutrient content of compost and its ability to improve soil moisture and the physical environment for indigenous microorganisms. TPH reduction was not constant throughout the experiment. In the aerated and moistened control, reduction increased from 72.03% on day 80 to 78.00% on day 180, while the 30% and 50% compost treatments increased from 55.46% to 94.45% and from 77.87% to 94.91%, respectively. Although degradation continued throughout the experiment, a considerable proportion occurred during the earlier stages, followed by slower reduction later, likely due to the depletion of readily biodegradable hydrocarbon fractions and persistence of less accessible compounds. Increasing compost from 30% to 50% resulted in only a 0.46 percentage-point increase in final TPH removal; therefore, the 30% treatment achieved similarly high removal with a lower compost requirement and may be more practical for further pilot-scale and field investigations.

Conclusion

The findings demonstrated that food-waste compost has considerable potential for the biological remediation of crude-oil-contaminated soil. After 180 days, TPH reductions in the unaerated and unmoistened control, aerated and moistened control, 30% compost, and 50% compost treatments were 8.6%, 78.00%, 94.45%, and 94.91%, respectively. The comparison between the control treatments demonstrated the important role of adequate aeration and moisture in enhancing the activity of indigenous microorganisms. Compost addition further improved TPH removal, presumably by improving the physicochemical conditions and providing organic matter and nutrients required for microbial activity. Because the difference between the 30% and 50% compost treatments was only 0.46 percentage points, the 30% compost treatment can be considered a more practical option under the conditions investigated. The use of food-waste compost may therefore provide a dual environmental benefit by contributing to petroleum-contaminated soil remediation and the beneficial reuse of organic waste. However, the results were obtained under controlled experimental conditions, and further pilot-scale and field studies are required to evaluate the effectiveness, stability, operational requirements, and environmental implications of this approach under actual conditions in oil-producing regions.



تصفیه زیستی خاک های آلوده به نفت توسط کمپوست تولید شده از پسماند مواد غذایی

سعید صالحی^ا، علیرضا عسگری^ب، شهرزاد صادقی علویجه^ب، زهرا سادات رضوی دینانی^ج

^اشرکت ملی نفت فلات قاره ایران، بوشهر، ایران.

^بانجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران، تهران، ایران.

^جمرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول: z.razavidinani@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این پژوهش با هدف بررسی کارایی کمپوست حاصل از پسماند مواد غذایی در تصفیه زیستی خاک آلوده به نفت خام در منطقه نفتی بهرگان، استان بوشهر، صورت گرفت. آزمایش ها به مدت ۱۸۰ روز در چهار تیمار شامل شاهد بدون هوادهی و رطوبت دهی، شاهد با هوادهی و رطوبت دهی و تیمارهای حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست انجام شد. غلظت هیدروکربن های نفتی کل (TPH) با استفاده از کروماتوگرافی گازی مجهز به آشکارساز یونش شعله ای (GC-FID) اندازه گیری و روند تغییرات آن در طول دوره آزمایش بررسی شد. همچنین، برخی ویژگی های فیزیکوشیمیایی مؤثر بر فرایند زیست پالایی، از جمله pH، کربن آلی، نیتروژن کل کجداال و فسفر کل، پایش شدند. نتایج نشان داد که پس از ۱۸۰ روز، میزان کاهش TPH در تیمارهای شاهد بدون هوادهی و رطوبت دهی، شاهد با هوادهی و رطوبت دهی، ۳۰ درصد کمپوست و ۵۰ درصد کمپوست به ترتیب ۸/۶، ۷۸، ۹۴/۴۵ و ۹۴/۹۱ درصد بود. مقایسه تیمارهای شاهد نشان داد که تأمین اکسیژن و حفظ رطوبت مناسب، کاهش TPH را به طور چشمگیری افزایش داد که بیانگر نقش شرایط محیطی مناسب در فعالیت میکروارگانیسم های بومی است. افزودن کمپوست نیز در شرایط یکسان هوادهی و رطوبت دهی، راندمان حذف را نسبت به شاهد افزایش داد، به طوری که تیمارهای ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست به ترتیب ۱۶/۴۵ و ۱۶/۹۱ واحد درصد کاهش بیشتر TPH نسبت به شاهد هوادهی و رطوبت دهی شده نشان دادند. با این حال، اختلاف راندمان نهایی بین دو سطح کمپوست تنها ۰/۴۶ واحد درصد بود. بنابراین، در شرایط این پژوهش، استفاده از ۳۰ درصد کمپوست می تواند از نظر میزان مصرف ماده اصلاح کننده و هزینه های اجرایی گزینه مناسب تری باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که کمپوست حاصل از پسماند مواد غذایی، همراه با مدیریت مناسب رطوبت و هوادهی، ظرفیت بالایی برای زیست پالایی خاک آلوده به نفت دارد و می تواند هم زمان به کاهش آلودگی هیدروکربنی و استفاده مجدد از پسماندهای آلی کمک کند.

استناد به این مقاله: صالحی، سعید، عسگری، علیرضا، صادقی علویجه، شهرزاد و رضوی دینانی، زهرا السادات. (۱۴۰۵). تصفیه زیستی خاک های آلوده به نفت توسط کمپوست تولید شده از پسماند مواد غذایی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۲) ۱۳۷-۱۵۲.

<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598259.1034>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.598259.1034>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

نفت خام یکی از مهم‌ترین منابع انرژی جهان و از ارکان اصلی اقتصاد کشورهای تولیدکننده و صادرکننده نفت، به‌ویژه کشورهای حاشیه خلیج فارس، به شمار می‌رود. با این حال، فعالیت‌های گسترده مرتبط با اکتشاف، حفاری، استخراج، انتقال، ذخیره‌سازی و فرآورش نفت می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی داشته باشد. نشت و رهاسازی نفت و فرآورده‌های نفتی، تولید پسماند و پساب آلوده و حوادث مرتبط با تأسیسات نفتی از مهم‌ترین مسیرهای ورود هیدروکربن‌ها به محیط زیست هستند و می‌توانند خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی و اکوسیستم‌های مجاور را تحت تأثیر قرار دهند (Mekonnen et al., 2024).

این مسئله در منطقه خلیج فارس، به دلیل تمرکز فعالیت‌های نفت و گاز و حساسیت بالای اکوسیستم‌های منطقه، اهمیت بیشتری دارد. کشورهای حاشیه خلیج فارس سهم قابل‌توجهی در تولید و صادرات جهانی نفت دارند و بخش گسترده‌ای از فعالیت‌های اکتشاف، تولید، ذخیره‌سازی و انتقال نفت در این منطقه انجام می‌شود (OPEC, 2026). برآورد شده است حدود ۰/۰۸ تا ۰/۴ درصد نفت تولیدی وارد محیط دریایی شود (Edeghagba et al., 2021). افزون بر حوادث بزرگ نفتی، فعالیت‌های صنعتی، بندری و کشتیرانی نیز در ایجاد آلودگی مزمن هیدروکربنی در خلیج فارس نقش دارند. از این‌رو، مدیریت و کاهش آلودگی‌های نفتی در مناطق نفت‌خیز این منطقه، از اولویت‌های مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Uddin et al., 2021).

خاک یکی از مهم‌ترین محیط‌های دریافت‌کننده آلاینده‌های نفتی است و آلودگی آن می‌تواند در مراحل مختلف صنعت نفت، از استخراج و انتقال تا ذخیره‌سازی و فرآورش، ایجاد شود. نفت خام مخلوط پیچیده‌ای از صدها ترکیب هیدروکربنی با ویژگی‌های متفاوت است. پس از ورود نفت به خاک، ترکیبات مختلف آن تحت تأثیر فرآیندهایی مانند تبخیر، انحلال، جذب و واجذب، انتقال و تجزیه زیستی قرار می‌گیرند (Khan et al., 2018). آلودگی نفتی همچنین می‌تواند با تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، موجب افزایش آب‌گریزی، تغییر تخلخل و نفوذپذیری، اختلال در حرکت آب و هوا و کاهش دسترسی گیاهان به آب و عناصر غذایی شود. علاوه بر این، هیدروکربن‌ها می‌توانند ساختار و فعالیت جامعه میکروبی خاک را تغییر دهند و بر فرآیندهای زیستی و چرخه عناصر غذایی اثر بگذارند. برخی ترکیبات، به‌ویژه هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، نیز به دلیل سمیت و پایداری نسبی، از اهمیت ویژه‌ای برای سلامت انسان و محیط زیست برخوردارند (Mekonnen et al., 2024; Khan et al., 2018). برای ارزیابی میزان آلودگی خاک‌های نفتی، کل هیدروکربن‌های نفتی^۱ (TPH) به‌طور گسترده به‌عنوان یک شاخص کلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. TPH یک ترکیب شیمیایی منفرد نیست، بلکه بیانگر مجموعه‌ای از هیدروکربن‌های موجود در نفت خام و فرآورده‌های نفتی است و به دلیل پیچیدگی ترکیب نفت، اندازه‌گیری آن در بسیاری از مطالعات عملی‌تر از تعیین تک‌تک ترکیبات است (Mekonnen et al., 2024). با این حال، ترکیبات موجود در TPH از نظر ساختار، زیست‌فراهمی و قابلیت تجزیه متفاوت‌اند؛ بنابراین، کاهش TPH الزاماً به معنای کاهش یکسان همه اجزای نفت نیست و نتایج باید با توجه به روش اندازه‌گیری و ماهیت آلاینده تفسیر شوند (Zhang et al., 2021).

روش‌های مختلفی برای تصفیه خاک‌های آلوده به نفت، از جمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی، توسعه یافته است. اگرچه روش‌های فیزیکی و شیمیایی می‌توانند در کاهش سریع‌تر آلاینده مؤثر باشند، اما در بسیاری از موارد به انرژی، تجهیزات تخصصی و هزینه‌های اجرایی قابل‌توجه نیاز دارند. در مقابل، زیست‌پالایی^۲ با استفاده از توانایی میکروارگانیسم‌ها برای تبدیل و تجزیه آلاینده‌ها، می‌تواند روشی کم‌هزینه‌تر و سازگارتر با محیط زیست باشد (Elshafei & Mansour, 2024). در این فرآیند، میکروارگانیسم‌های بومی خاک نقش مهمی دارند و فعالیت آنها را می‌توان از طریق تأمین اکسیژن، رطوبت و مواد غذایی افزایش

¹ Total Petroleum Hydrocarbons

² Bioremediation

داد؛ رویکردی که به‌عنوان زیست‌تحریکی^۱ شناخته می‌شود. در مقابل، افزودن میکروارگانیسم‌های منتخب برای افزایش توان تجزیه، زیست‌افزایی^۲ نام دارد (Mekonnen et al., 2024).

در میان روش‌های زیست‌پالایی، کمپوست‌سازی به دلیل امکان استفاده هم‌زمان از مواد آلی و بهبود شرایط رشد میکروبی، مورد توجه قرار گرفته است. افزودن کمپوست می‌تواند با تأمین کربن آلی و برخی عناصر غذایی، بهبود ساختار و هوادهی خاک و حفظ رطوبت، شرایط مناسب‌تری برای فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن فراهم کند (Jørgensen et al., 2021; Namkoong et al., 2002; Tran et al., 2000). بنابراین، کمپوست را می‌توان علاوه بر یک ماده آلی، به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و عامل تحریک فعالیت میکروبی در فرآیند زیست‌پالایی در نظر گرفت.

یورگنسن و همکاران (۲۰۰۰) در زیست‌پالایی خاک آلوده به روغن روان‌کننده و دیزل، پس از پنج ماه حدود ۷۰ درصد کاهش روغن معدنی را گزارش کردند. **نام‌کونگ و همکاران (۲۰۰۲)** نیز نشان دادند که افزودن کمپوست و لجن فاضلاب موجب افزایش تجزیه دیزل در خاک و بهبود شاخص‌های فعالیت میکروبی شد. در ایران، **عسگری و همکاران (۲۰۱۷)** با استفاده از کمپوست شهری در زیست‌پالایی لجن اسیدی حاصل از صنایع بازپالایش روغن‌های مصرف‌شده، حداکثر کاهش ۷۱/۵۶ درصدی TPH را گزارش کردند. همچنین، مرور مطالعات انجام‌شده توسط **تران و همکاران (۲۰۲۱)** نشان داد که کمپوست‌سازی هوازی در بسیاری از خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی می‌تواند موجب کاهش قابل توجه TPH شود؛ هرچند عواملی مانند نوع و مقدار کمپوست، رطوبت، هوادهی، دما، pH، مواد غذایی و ویژگی آلاینده بر عملکرد آن اثرگذارند.

یکی از مزایای مهم استفاده از کمپوست، امکان بهره‌گیری از پسماندهای آلی به‌عنوان ماده اصلاح‌کننده است. تبدیل پسماندهای غذایی به کمپوست می‌تواند ضمن کاهش مشکلات ناشی از دفع نامناسب پسماندهای آلی، ماده‌ای قابل استفاده برای بهبود شرایط خاک و تحریک فعالیت میکروبی فراهم کند. از این منظر، استفاده از کمپوست پسماند غذایی می‌تواند به‌طور هم‌زمان به مدیریت پسماندهای آلی و کاهش آلودگی خاک‌های نفتی کمک کند و رویکردی در راستای استفاده مجدد از منابع و کاهش هزینه‌های تصفیه باشد (Palansooriya et al., 2023).

با وجود نتایج امیدوارکننده مطالعات پیشین، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها در شرایط آزمایشگاهی یا با استفاده از خاک‌های مصنوعی آلوده، دیزل، روغن روان‌کننده و سایر پسماندهای نفتی انجام شده‌اند. در مقابل، مطالعات مربوط به کاربرد کمپوست در خاک واقعی آلوده به نفت خام در مناطق نفت‌خیز جنوب ایران محدود است. از آنجا که ویژگی خاک، ترکیب نفت خام، شرایط اقلیمی و جامعه میکروبی بومی می‌تواند بر عملکرد زیست‌پالایی اثر بگذارد، بررسی این روش در شرایط واقعی هر منطقه اهمیت دارد (Mekonnen et al., 2024; Tran et al., 2021).

منطقه نفتی بهرگان در استان بوشهر، به دلیل فعالیت‌های گسترده نفتی و موقعیت آن در مجاورت خلیج فارس، یکی از مناطق مناسب برای بررسی روش‌های زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت محسوب می‌شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر کارایی کمپوست حاصل از پسماند مواد غذایی در زیست‌پالایی خاک واقعی آلوده به نفت خام منطقه بهرگان بررسی شد. در این مطالعه، اثر سطوح مختلف کمپوست در شرایط کنترل‌شده هوادهی و رطوبت‌دهی بر کاهش TPH ارزیابی گردید و نقش شرایط محیطی در بهبود فرآیند زیست‌پالایی مورد توجه قرار گرفت. هدف نهایی، تعیین میزان مناسب کمپوست و ارزیابی ظرفیت این روش به‌عنوان رویکردی ساده، کم‌هزینه و قابل کاربرد در مدیریت خاک‌های آلوده به نفت بود.

¹ Biostimulation

² Bioaugmentation

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب ایران، در استان بوشهر و در محدوده منطقه نفتی بهرگان واقع شده است. منطقه بهرگان در بخش شمالی خلیج فارس و در نزدیکی بندر امام حسن قرار دارد. بر اساس اطلاعات شرکت ملی نفت ایران، بندر امام حسن (بهرگان) در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری شمال‌غربی بندر گناوه و ۲۸ کیلومتری بندر دیلم واقع شده و فعالیت‌های اکتشاف و تولید نفت در این منطقه از دهه ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده است (NIOC, 2014). در مطالعه حاضر، محدوده نمونه‌برداری در مختصات جغرافیایی $29^{\circ}49'48''$ طول شرقی و $29^{\circ}48'48''$ عرض شمالی قرار داشت (Hatami et al., 2009).

مواد مورد استفاده و نحوه آماده‌سازی آن

کمپوست مورد استفاده در این مطالعه از پسماند مواد غذایی تولیدشده در کمپ مسکونی شرکت نفت تهیه شد. کمپوست تولیدشده شامل پسماند مواد غذایی به همراه ۲۰ درصد کود حیوانی گوسفندی بود. به‌منظور تولید کمپوست، از باکس‌های چوبی با ابعاد 1×1 متر استفاده شد. با توجه به شرایط آب‌وهوایی منطقه مورد مطالعه، فرآیند تولید کمپوست طی ۵ هفته تکمیل شد. به‌منظور تأمین هوادهی و یکنواخت شدن توده کمپوست، اختلاط توده دو بار در هفته انجام گرفت. خاک مورد استفاده در این مطالعه از خاک آلوده‌شده با نفت خام تهیه شد. به‌منظور بررسی عملکرد فرآیند تصفیه زیستی، دو نمونه شاهد نیز در نظر گرفته شد. در نمونه شاهد اول، هیچ‌گونه کمپوست، رطوبت‌دهی و هوادهی اعمال نشد. در نمونه شاهد دوم، بدون افزودن کمپوست، عملیات رطوبت‌دهی و هوادهی مشابه نمونه‌های آزمایشی انجام گرفت تا تأثیر رطوبت‌دهی و هوادهی بر کاهش آلودگی نفتی مورد بررسی قرار گیرد. به‌منظور بررسی تأثیر کمپوست بر فرآیند تصفیه زیستی خاک آلوده به نفت، دو سطح اختلاط کمپوست با خاک در نظر گرفته شد. در یکی از نمونه‌ها، ۳۰ درصد کمپوست و در نمونه دیگر ۵۰ درصد کمپوست به خاک آلوده به نفت اضافه شد. نمونه خاک آلوده به نفت پس از سرند شدن و یکنواخت‌سازی، در ظروف فلزی با ابعاد 50×50 سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر قرار گرفت. نمونه حاوی ۳۰ درصد کمپوست شامل ۸/۵ کیلوگرم کمپوست و ۲۰ کیلوگرم خاک آلوده به نفت بود. نمونه حاوی ۵۰ درصد کمپوست نیز از ۱۳ کیلوگرم کمپوست و ۱۳ کیلوگرم خاک آلوده به نفت تشکیل شد. در طول دوره آزمایش، به‌منظور ایجاد شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها و یکنواخت شدن توده، مخلوط خاک و کمپوست با استفاده از بیلچه هر ۴ روز یک‌بار زیرورو و مخلوط شد. مدت زمان اجرای آزمایش ۱۸۰ روز در نظر گرفته شد.

روش آنالیز

تنظیم نسبت عناصر غذایی و رطوبت اولیه

نسبت عنصری کربن (C)، نیتروژن (N) و فسفر (P) در مخلوط نهایی به ترتیب ۱۰۰، ۵ و ۱ در نظر گرفته شد. این نسبت بر اساس کربن آلی موجود در مواد اولیه و با افزودن NH_4Cl (خلوص ۹۹/۹۹٪، Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) به‌عنوان منبع نیتروژن و KH_2PO_4 (خلوص ۹۹/۵۵٪، Sigma-Aldrich) به‌عنوان منبع فسفر تعیین شد. بر این اساس، نسبت C/N هدف برابر با ۲۰ بود. میزان رطوبت مخلوط با افزودن آب در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درصد حفظ شد.

اندازه‌گیری TPH

به‌منظور ارزیابی روند کاهش آلودگی نفتی در طی فرآیند تصفیه زیستی، TPH در نمونه‌های خاک در فواصل زمانی تعیین‌شده اندازه‌گیری شد. پیش از نمونه‌برداری، محتویات توده خاک و کمپوست به‌طور کامل مخلوط شد تا نمونه کاملاً یکنواخت شود؛ سپس نمونه‌ها از اعماق مختلف توده برداشت شدند.

برای استخراج هیدروکربن‌های نفتی، ۱ گرم از نمونه خشک‌شده با ۴ میلی‌لیتر نرمال هگزان با خلوص ۹۹/۹۵ درصد (Merck, Darmstadt, Germany) مخلوط شد. مخلوط به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. پس از ته‌نشینی ذرات، عصاره استخراج‌شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آنالیز نگهداری شد. میزان TPH

با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی مجهز به آشکارساز یونش شعله‌ای (GC-FID)^۱ (Model CP-3800, Varian, Belrose, Australia) بر اساس اصول روش TNRCC Method 1005 تعیین شد؛ روشی که برای تعیین هیدروکربن‌های نفتی در نمونه‌های خاک، آب و پسماند طراحی شده است. در این روش، هیدروکربن‌های موجود در محدوده کربنی nC_6 تا nC_{35} اندازه‌گیری می‌شوند. مجموع غلظت هیدروکربن‌های اندازه‌گیری‌شده در این محدوده‌ها به‌عنوان غلظت TPH گزارش می‌شود (Asgari et al., 2017; Silva et al., 2005). این رویکرد در مطالعات تعیین هیدروکربن‌های نفتی در خاک نیز به کار گرفته شده است (Asgari et al., 2017; Silva et al., 2005).

برای انجام آنالیز، ۰/۶ میلی‌لیتر از عصاره استخراج‌شده به دستگاه GC-FID تزریق شد. جداسازی ترکیبات هیدروکربنی با استفاده از ستون موئینه CP-Sil8CB با طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۳۲ میلی‌متر و ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر انجام گرفت. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با فشار ورودی 11 psi، نسبت اسپلیت ۲۵ درصد و دبی عبوری از ستون ۲/۹ میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد. برنامه دمایی آون شامل دمای اولیه ۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه بود. سپس دما با نرخ ۱۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و به مدت ۵ دقیقه در این دما ثابت نگه داشته شد. در ادامه، دما با نرخ ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به ۳۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و به مدت ۳ دقیقه در این دما ثابت ماند. دمای محل تزریق و آشکارساز به ترتیب ۲۸۰ و ۳۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. دبی گازهای هیدروژن، هوا و گاز کمکی نیتروژن برای آشکارساز FID نیز به ترتیب ۴۰، ۴۵۰ و ۳۰ میلی‌لیتر در دقیقه تنظیم شد. زمان کل آنالیز برای هر نمونه ۲۹ دقیقه در نظر گرفته شد (Asgari et al., 2017).

کالیبراسیون دستگاه با استفاده از روش استاندارد خارجی انجام گرفت و منحنی کالیبراسیون در هر روز کاری بررسی و تأیید شد. در این روش، از استانداردهای آلکان‌های نرمال برای تعیین محدوده‌های کربنی و کنترل توزیع هیدروکربن‌ها در کروماتوگرام استفاده شد (TNRCC, 2001).

در مطالعه حاضر، غلظت TPH بر اساس وزن خشک نمونه محاسبه و به‌صورت میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک خاک (mg/kg dry weight) گزارش شد. نتایج اندازه‌گیری TPH در تیمارهای حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست با تیمار شاهد مقایسه شد تا اثر افزودن کمپوست تولیدشده از پسماند مواد غذایی بر کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک ارزیابی شود. کلیه تیمارهای آزمایشی در سه تکرار انجام شدند.

اندازه‌گیری پارامترهای مؤثر بر فرایند تصفیه زیستی

به‌منظور بررسی شرایط محیطی حاکم بر فرایند تصفیه زیستی و ارزیابی تغییرات پارامترهای مؤثر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، دما، رطوبت، pH، کربن آلی، نیتروژن کل کج‌دال (TKN)^۲ و فسفر کل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. دمای محیط و دمای توده خاک و کمپوست به‌صورت روزانه با استفاده از دماسنج جیوه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد. میزان رطوبت نمونه‌ها با استفاده از رطوبت‌سنج دیجیتال (Model pH Moisture Meter, China) و همچنین با روش خشک‌کردن در آون (Model tactical 308, Gallenkamp, Loughborough, UK) در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. برای تعیین pH در آزمایشگاه، ۱ گرم از نمونه خشک با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط و به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. پس از ته‌نشینی ذرات، pH محلول رویی اندازه‌گیری شد. استفاده از نسبت مشخص نمونه به آب برای اندازه‌گیری pH از روش‌های متداول ارزیابی ویژگی‌های کمپوست و مواد آلی است (USCC, 2002). ماده آلی^۳ (OM) خاک با استفاده از روش افت وزنی در اثر احتراق^۴ (LOI) تعیین شد. بدین

^۱ Gas chromatography coupled flame ionization detector

^۲ Total Kjeldahl Nitrogen

^۳ Organic Matter

^۴ Loss on Ignition

منظور، ۱ گرم از نمونه خشک در کوره در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. انتخاب دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بر اساس روش **فیت‌فول (۲۰۰۲)** انجام شد؛ زیرا در دماهای بالاتر، به‌ویژه در حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه کربنات کلسیم و آزاد شدن CO₂ می‌تواند موجب افزایش افت وزن و در نتیجه بیش‌برآورد مقدار ماده آلی شود. پس از اتمام حرارت‌دهی، نمونه‌ها در دسیکاتور سرد شده و مجدداً توزین شدند. کاهش وزن نمونه پس از احتراق به‌عنوان LOI محاسبه و مقدار حاصل به‌عنوان برآوردی از ماده آلی نمونه گزارش شد (Faithfull, 2002). برای برآورد کربن آلی^۱ (OC) از ضریب تبدیل کلاسیک ۱/۷۲۴، که بر فرض وجود ۵۸ درصد کربن در ماده آلی استوار است، استفاده شد:

$$OC(mg/kg) = \frac{OM(mg/kg)}{1.724} \quad (۱)$$

نیتروژن کل کج‌لدال (TKN) با استفاده از روش استاندارد 4500-Norg اندازه‌گیری شد. برای انجام آزمایش، مقدار ۱ گرم از نمونه خشک به همراه ۳ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۰/۱ مولار و ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. استفاده از اسید سولفوریک با هدف جلوگیری از خروج آمونیاک در طی فرآیند آماده‌سازی نمونه انجام گرفت و مقدار نیتروژن کل کج‌لدال مطابق روش استاندارد اندازه‌گیری شد. فسفر کل نیز با استفاده از روش استاندارد مربوط به تعیین فسفر اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای TPH، نیتروژن کل، فسفر کل و کربن آلی به‌صورت هفتگی ثبت شد؛ در مقابل، دمای محیط و توده خاک-کمپوست به‌صورت روزانه پایش و pH نیز در طول دوره آزمایش به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد (Clesceri et al., 2010).

یافته‌ها و بحث

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کمپوست و خاک

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اولیه خاک آلوده به نفت و کمپوست مورد استفاده در فرآیند تصفیه زیستی در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج اولیه، کمپوست دارای مقدار قابل‌توجهی کربن آلی و عناصر غذایی شامل نیتروژن و فسفر است. مقدار pH کمپوست در محدوده نزدیک به خنثی قرار دارد که می‌تواند شرایط مناسبی را برای فعالیت میکروارگانیسم‌های دخیل در فرآیند زیست‌پالایی فراهم کند.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک آلوده به نفت و کمپوست مورد استفاده

Table 1. Physicochemical properties of the oil-contaminated soil and the compost used.

پارامتر	واحد	خاک آلوده به نفت	کمپوست
مواد آلی (OM)	mg/kg	۱۸۵۰۰	۲۸۵۶۰۰
نیتروژن کل کج‌لدال (TKN)	mg/kg	۱۱۲۰	۱۲۸۵۰
فسفر کل (TP)	mg/kg	۳۸۰	۴۲۶۰
pH	-	۶/۸۲	۷/۴۵
رطوبت	%	۱۱/۶۰	۴۸/۲۰
هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH)	mg/kg	۵۳۵۰۰۰	N.D.
N.D. در محدوده تشخیص روش اندازه‌گیری مشاهده نشد.			

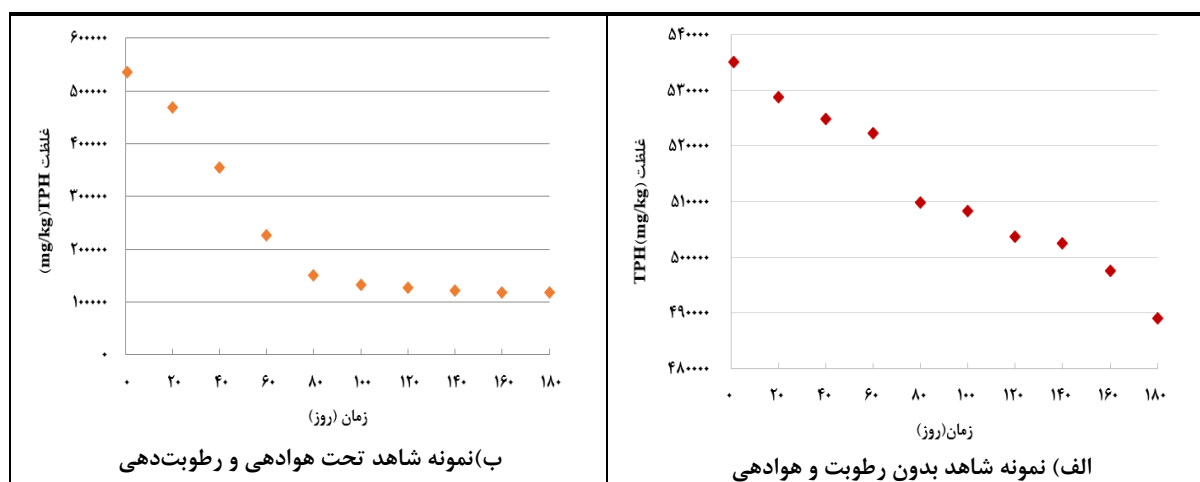
^۱ Organic Carbon

مقدار رطوبت بیشتر کمپوست و وجود مواد آلی و عناصر غذایی در آن می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای فعالیت میکروبی و تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی فراهم کند. با توجه به TPH قابل توجه در خاک آلوده و عدم تشخیص آن در کمپوست، انتظار می‌رود افزودن کمپوست با بهبود شرایط فیزیکیوشیمیایی و تأمین مواد مغذی، موجب افزایش فعالیت میکروبی و کاهش TPH خاک شود (Namkoong et al., 2002; Tran et al., 2021).

روند کلی تغییرات TPH در تیمارهای مختلف

نتایج بررسی تغییرات TPH نشان داد که نوع تیمار و مدت فرایند هر دو بر میزان کاهش TPH در خاک آلوده به نفت اثرگذار بودند (جدول ۲). کمترین کاهش TPH در نمونه شاهد (فاقد کمپوست، بدون هوادهی و رطوبت‌دهی) مشاهده شد، درحالی‌که تأمین اکسیژن و حفظ رطوبت مناسب، کاهش TPH را به‌طور چشمگیری افزایش داد. افزودن کمپوست نیز در شرایط یکسان هوادهی و رطوبت‌دهی، راندمان حذف را بیشتر کرد. پس از ۱۸۰ روز، میزان کاهش TPH در شاهد بدون هوادهی و رطوبت‌دهی، شاهد دارای هوادهی و رطوبت‌دهی، تیمار ۳۰ درصد کمپوست و تیمار ۵۰ درصد کمپوست به‌ترتیب ۸/۶، ۷۸، ۹۴/۴۵ و ۹۴/۹۱ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که ابتدا تأمین اکسیژن و رطوبت مناسب و سپس افزودن کمپوست، مهم‌ترین عوامل افزایش حذف TPH در شرایط این پژوهش بودند.

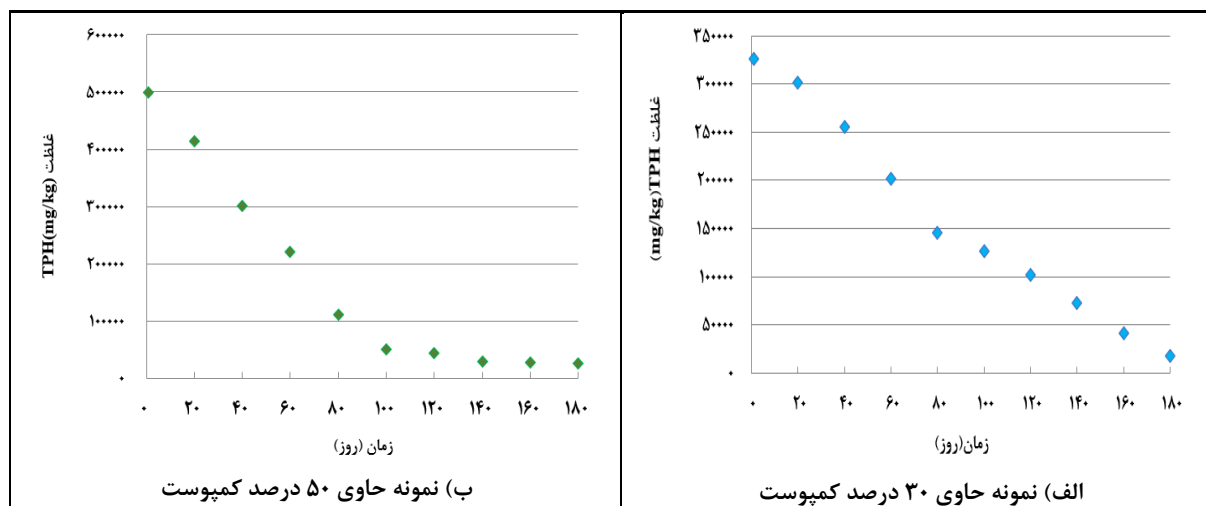
مکون و همکاران (۲۰۲۴) تأکید کردند که موفقیت زیست‌پالایی به عواملی مانند فعالیت میکروبی، اکسیژن، رطوبت، pH، دما، غلظت اولیه آلاینده و زیست‌فراهمی هیدروکربن‌ها وابسته است. بررسی روند زمانی نیز نشان داد که کاهش TPH در تیمارهای فعال با افزایش مدت فرایند ادامه یافت، هرچند سرعت کاهش در طول زمان ثابت نبود. در شاهد دارای هوادهی و رطوبت‌دهی، میزان کاهش TPH از ۷۲/۰۳ درصد در روز ۸۰ به ۷۸ درصد در روز ۱۸۰ رسید؛ بنابراین، بخش عمده کاهش در ۸۰ روز نخست رخ داد و پس از آن افزایش محدودی مشاهده شد (شکل ۱).



شکل ۱. روند تغییرات TPH در نمونه شاهد

Figure 1. Trend of pH changes in the control sample

روند تغییرات TPH در طول دوره آزمایش نیز نشان داد که پاسخ تیمارهای کمپوستی به زمان وابسته بوده است. در هر دو تیمار، کاهش TPH پس از روز ۸۰ نیز ادامه یافت، اگرچه شدت کاهش در مراحل پایانی کمتر از مراحل ابتدایی بود (شکل ۲). در تیمار ۳۰ درصد کمپوست، کاهش TPH از ۵۵/۴۶ درصد در روز ۸۰ به ۹۴/۴۵ درصد در روز ۱۸۰ و در تیمار ۵۰ درصد کمپوست از ۷۷/۸۷ درصد به ۹۴/۹۱ درصد افزایش یافت. در مجموع، بیشترین میزان کاهش TPH در تیمارهای کمپوستی و به‌ویژه در مراحل ابتدایی فرایند مشاهده شد.



شکل ۲. روند تغییرات TPH در خاک در اثر افزودن کمپوست

Figure 2. Trends in soil TPH levels resulting from compost addition

یورگنسن و همکاران (۲۰۰۰) در یک مطالعه میدانی نشان دادند که سرعت تخریب روغن معدنی در ماه‌های نخست بیشتر بوده و سپس کاهش آلاینده با روند کندتری ادامه یافته است؛ در این مطالعه، پس از پنج ماه حدود ۷۰ درصد روغن معدنی حذف شد. کاهش سرعت حذف در مراحل پایانی می‌تواند با کاهش بخش‌های زیست‌فراهم هیدروکربن، باقی‌ماندن ترکیبات مقاوم‌تر و محدود شدن دسترسی میکروارگانیسم‌ها به آلاینده مرتبط باشد. نام‌کونگ و همکاران (۲۰۰۲) نیز نشان دادند که کاهش TPH با گذشت زمان ادامه می‌یابد، اما ترکیب هیدروکربن‌های باقی‌مانده تغییر می‌کند و ترکیبات ساده‌تر سریع‌تر تجزیه می‌شوند. هارا و همکاران (۲۰۱۳) نیز کاهش قابل توجه TPH در طی ۷۴ روز در تیمار کمپوست را گزارش کردند. بنابراین، نتایج این پژوهش ضمن تأیید نقش هوادهی، رطوبت و کمپوست در افزایش حذف TPH، نشان می‌دهد که بخش عمده فرآیند زیست‌پالایی در مراحل ابتدایی رخ داده و ادامه فرایند در دوره‌های طولانی‌تر، افزایش محدودتری در حذف آلاینده ایجاد می‌کند.

جدول ۲. میزان کاهش TPH در نمونه‌های مختلف

Table 2. TPH reduction rates in various sample

نمونه برداری چند روز بعد از عملیات	شماره	نمونه شاهد بدون هوادهی / رطوبت دهی: TPH (mg/kg)	کاهش (%) TPH	نمونه شاهد هوادهی و رطوبت دهی شده: TPH (mg/kg)	کاهش (%) TPH	غلظت TPH نمونه با نسبت ۳۰/۷۰ (mg/kg)	کاهش (%) TPH	غلظت TPH نمونه با نسبت ۵۰/۵۰ (mg/kg)	کاهش (%) TPH
شروع	۱	۵۳۵۰۰±۴۲۰۰	-	۳۹۰۰±۵۳۵۰۰	-	۳۱۰۰±۳۲۶۰۰	-	۴۱۰۰±۴۹۹۰۰	-
روز ۲۰	۲	۳۹۰۰±۵۲۸۷۴۰	۱/±۱۷۰/۳۵	۲۲۰۰±۴۶۸۶۵۰	۱۲/±۴۰/۸	۲۶۰۰±۳۰۱۱۵۵	۷/±۶۲۰/۹	۳۵۰۰±۴۱۴۷۶۵	۱۶/±۸۸۰/۷۵
روز ۴۰	۳	۳۶۰۰±۵۲۴۸۳۵	۱/±۹۰۰/۳۰	۳۱۰۰±۳۵۵۴۰۰	۳۳/±۵۷۱/۰۵	۲۸۰۰±۲۵۵۹۴۰	۲۱/±۴۸۰/۸۵	۲۹۰۰±۳۰۱۱۵۳	۳۹/±۶۴۰/۹۵
روز ۶۰	۴	۳۵۰۰±۵۲۳۲۲۰	۲/±۳۷۰/۱۱	۲۹۰۰±۲۲۷۱۷۰	۵۷/±۵۳۰/۹	۲۴۰۰±۲۰۱۶۳۵	۳۸/±۱۵۰/۷۵	۲۶۰۰±۲۲۱۵۰۳	۵۵/±۶۱۰/۹
روز ۸۰	۵	۳۳۰۰±۵۰۹۸۵۵	۴/±۷۰/۵۵	۲۲۰۰±۱۴۹۶۰۰	۷۲/±۰۳۰/۸۵	۲۱۰۰±۱۴۵۲۰۰	۵۵/±۴۶۰/۸۰	۱۸۰۰±۱۱۰۴۰۰	۷۷/±۸۷۰/۶۶
روز ۱۰۰	۶	۳۲۰۰±۵۰۸۳۰۳	۴/±۹۹۰/۵	۱۹۰۰±۱۳۱۵۷۰	۷۵/±۴۰۰/۷۵	۱۸۰۰±۱۲۶۵۸۵	۶۱/±۱۷۰/۷۰	۱۱۰۰±۵۰۱۴۱	۸۹/±۵۱۰/۵۵
روز ۱۲۰	۷	۳۰۰۰±۵۰۳۷۵۶	۵/±۸۴۰/۴۰	۱۸۰۰±۱۲۷۴۲۰	۷۶/±۱۸۰/۷۰	۱۶۰۰±۱۰۲۱۵۵	۶۸/±۶۶۰/۷۵	۹۵۰±۴۳۷۲۲	۹۱/±۲۳۰/۷۵
روز ۱۴۰	۸	۲۸۰۰±۵۰۲۴۱۸	۶/±۰۹۰/۵	۱۶۰۰±۱۲۰۹۸۱	۷۷/±۳۸۰/۶۵	۱۳۰۰±۷۲۸۳۴	۷۷/±۶۵۰/۷۰	۷۵۰±۲۹۳۱۶	۹۴/±۱۲۰/۶۵
روز ۱۶۰	۹	۲۹۰۰±۴۹۷۵۵۰	۷/±۰۰۰/۵۵	۲۵۰۰±۱۱۸۶۴۵	۷۷/±۸۲۰/۴۰	۹۰۰±۴۰۹۹۴	۸۷/±۴۲۰/۶۵	۷۰۰±۲۶۹۴۵	۹۴/±۶۰۰/۷
روز ۱۸۰	۱۰	۲۷۰۰±۴۸۸۹۹۰	۸/±۶۰۰/۳۵	۱۵۰۰±۱۱۷۶۹۳	۷۸/±۰۰۰/۵۵	۵۰۰±۱۸۰۶۷	۹۴/±۴۵۰/۸۰	۶۵۰±۲۶۳۶۱	۹۴/±۹۱۰/۴۵

اثر رطوبت‌دهی و هوادهی بر کاهش TPH در نمونه شاهد

در نمونه شاهد بدون هوادهی و رطوبت‌دهی، غلظت اولیه TPH برابر با 535000 mg/kg بود و پس از ۱۸۰ روز به 488990 mg/kg کاهش یافت که معادل $8/6$ درصد کاهش است (جدول ۲). در مقابل، در نمونه شاهد تحت هوادهی و رطوبت‌دهی، غلظت TPH از 535000 mg/kg در ابتدای آزمایش به 117693 mg/kg در روز ۱۸۰ رسید که معادل ۷۸ درصد کاهش بود. بنابراین، در شرایط آزمایش حاضر، مدیریت هوادهی و رطوبت بستر نقش مهمی در افزایش کاهش TPH داشته است. کاهش محدود TPH در نمونه فاقد هوادهی و رطوبت‌دهی نشان می‌دهد که در نبود مداخله عملیاتی، کاهش آلاینده در طول دوره آزمایش محدود بوده است. با این حال، این کاهش را نمی‌توان به‌طور قطعی معادل زیست‌تخریب دانست، زیرا کاهش غلظت TPH می‌تواند علاوه بر فرایندهای زیستی، تحت تأثیر فرایندهای غیرزیستی نیز قرار گیرد (Khan et al., 2018).

تران و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی زیست‌پالایی هوازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، رطوبت و نرخ هوادهی را از جمله پارامترهای مهم عملیاتی مؤثر بر عملکرد فرایند معرفی کردند. همچنین، مطالعه آنها نشان داد که کارایی فرایند کمپوست‌سازی به شرایط عملیاتی و ویژگی‌های فیزیکی خاک وابسته است؛ در مطالعه آنان، پس از ۴۵ روز، میزان حذف TPH در دو کسر دانه‌بندی خاک ریزدانه (کوچک‌تر از $0/3$ سانتی‌متر) و درشت‌دانه (بزرگ‌تر از $1/3$ سانتی‌متر) به ترتیب ۸۲ و ۹۳ درصد گزارش شد.

در مجموع، اختلاف قابل توجه میان تیمار فاقد هوادهی و رطوبت‌دهی ($8/6$ درصد کاهش) و تیمار دارای هوادهی و رطوبت‌دهی (۷۸ درصد کاهش) نشان می‌دهد که کنترل شرایط فیزیکی بستر، به‌ویژه تأمین اکسیژن و حفظ رطوبت مناسب، در شرایط این آزمایش با افزایش میزان کاهش TPH همراه بوده است. از این رو، تیمار شاهد بدون هوادهی و رطوبت‌دهی می‌تواند به عنوان خط پایه مناسبی برای ارزیابی اثر مداخلات عملیاتی در تیمارهای بعدی در نظر گرفته شود. بنابراین، نبود هوادهی و رطوبت‌دهی کافی می‌تواند با محدود کردن فعالیت میکروارگانیسم‌های بومی، فرایند زیست‌تخریب هیدروکربن‌های نفتی را کاهش داده و به تداوم آلودگی در خاک منجر شود (Tran et al., 2021).

اثر افزودن کمپوست بر کاهش TPH

افزودن کمپوست در شرایط آزمایش حاضر موجب افزایش میزان کاهش TPH شد. میزان کاهش نهایی TPH در تیمارهای حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست به ترتیب $94/45$ و $94/91$ درصد بود، در حالی که این مقدار در تیمار شاهد دارای هوادهی و رطوبت‌دهی، بدون افزودن کمپوست، ۷۸ درصد به دست آمد (جدول ۲). به هر حال، افزودن کمپوست در شرایط یکسان رطوبت و هوادهی، کاهش TPH را به میزان قابل توجهی افزایش داد. این اثر را می‌توان به تأمین مواد آلی و عناصر غذایی، بهبود نگهداشت رطوبت و ویژگی‌های فیزیکی بستر و در نتیجه فراهم شدن شرایط مناسب‌تر برای فعالیت میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده هیدروکربن نسبت داد. مطالعه مکون و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان می‌دهد که اکسیژن، رطوبت، مواد مغذی، ویژگی‌های خاک و فعالیت جامعه میکروبی از عوامل اصلی کنترل‌کننده زیست‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی هستند. هارا و همکاران (۲۰۱۳) در یک مطالعه میدانی، کاربرد کمپوست حاصل از پسماند غذایی را برای خاک آلوده به نفت بررسی کردند و کاهش TPH از 8300 به 2300 ppm طی ۷۴ روز را گزارش کردند. همچنین، در تیمار کمپوست افزایش برخی باکتری‌های مرتبط با تجزیه هیدروکربن مشاهده شد. در مطالعه نام‌کونگ و همکاران (۲۰۰۲) نیز افزودن کمپوست یا لجن فاضلاب به خاک آلوده به دیزل، تجزیه TPH را نسبت به خاک بدون اصلاح‌کننده افزایش داد و بیشترین نرخ تجزیه در نسبت خاک به اصلاح‌کننده $1/5$ مشاهده شد. این مطالعه همچنین نشان داد که افزایش مقدار اصلاح‌کننده الزاماً موجب افزایش متناظر حذف TPH نمی‌شود. این یافته با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که اختلاف میانگین راندمان نهایی بین تیمارهای ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست تنها $0/46$

واحد درصد بود. بنابراین، افزایش مقدار کمپوست از ۳۰ به ۵۰ درصد در شرایط این آزمایش، مزیت قابل توجهی از نظر حذف نهایی TPH ایجاد نکرد و می‌تواند نشان‌دهنده وجود یک مقدار بهینه از اصلاح‌کننده باشد. هلمی و کاردنا (۲۰۲۴) در یک مطالعه میدانی، استفاده از بیوکمپوست به‌عنوان ماده حجیم‌کننده را در زیست‌پالایی خاک آلوده به نفت در میدان نفتی میناس اندونزی بررسی کردند. پس از ۱۵۰ روز، میانگین غلظت TPH از 64799 ± 9373 mg/kg به ۶۴۷۹۹ mg/kg ± 74 کاهش یافت (کاهش حدود ۹۹/۷۵ درصدی TPH).

برای ارزیابی عملکرد تیمارهای مورد بررسی، نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در زمینه زیست‌پالایی هوازی و استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی مقایسه شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که میزان حذف TPH در تیمارهای ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست پسماند غذایی، در بخش بالایی دامنه مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین قرار دارد. از این نظر، هر دو تیمار در مقایسه با مطالعات پیشین عملکرد مشابه و بالایی داشته‌اند و اختلاف میان دو سطح کمپوست در پژوهش حاضر نسبتاً محدود بوده است.

جدول ۳. مقایسه راندمان حذف TPH در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی

Table 3. Comparison of TPH removal efficiency in the bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons using organic amendments

مطالعه	نتیجه	مقیاس و مدت	نمونه و ماده اصلاح‌کننده
Jorgensen et al. (2000)	حدود ۷۰٪ کاهش نفت معدنی؛ بیشترین کاهش در ماه‌های نخست	میدانی، ۵ ماه	خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی؛ تراشه پوست درخت، مواد مغذی و هوادهی: (به ازای هر ۱ واحد خاک، ۳ واحد چیپس پوست درخت)
Namkoong et al. (2002)	حذف ۹۹/۶٪ TPH	آزمایش کمپوست‌سازی	خاک آلوده به دیزل؛ کمپوست و لجن فاضلاب: (به ازای هر ۱ واحد خاک، ۰/۵ واحد اصلاح‌کننده)
Hara et al. (2013)	حذف ۷۲٪ TPH	میدانی، ۷۴ روز	خاک آلوده به نفت؛ کمپوست پسماند غذایی: (به ازای هر ۲۶/۳ کیلوگرم خاک، ۱ کیلوگرم کمپوست)
Tran et al. (2021)	حذف ۷۰٪ تا ۹۹٪ TPH	مرور مطالعات	خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی؛ کمپوست‌سازی هوازی: (کمترین نسبت خاک به کمپوست: ۱ به ۱۲/۵؛ بیشترین نسبت خاک به کمپوست: ۳ به ۱)
Helmy & Kardena (2024)	حذف ۹۹/۷۵٪ TPH	میدانی، ۱۵۰ روز	خاک آلوده به نفت؛ بیوکمپوست به‌عنوان ماده حجیم‌کننده: (به ازای هر ۴۰ واحد خاک، ۱ واحد ماده حجیم‌کننده)
Curriel-Alegre et al. (2025)	حذف ۹۰/۳٪ TPH	پایلوت، ۹۰ روز	خاک آلوده به نفت؛ ورمی کمپوست: (به ازای هر ۱۰۰ واحد خاک آلوده، ۲ واحد ورمی کمپوست)
پژوهش حاضر	حذف ۹۴/۴۵٪ TPH	۱۸۰ روز	۷۰٪ خاک آلوده به نفت؛ ۳۰٪ کمپوست پسماند غذایی
	حذف ۹۴/۹۱٪ TPH		۵۰٪ خاک آلوده به نفت؛ ۵۰٪ کمپوست پسماند غذایی

اهمیت کاربردی نتایج در مناطق نفت‌خیز جنوب کشور

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کمپوست پسماند غذایی، به‌ویژه در تیمارهای حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست با حذف بیش از ۹۰ درصد TPH، می‌تواند گزینه‌ای امیدوارکننده برای زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت در مناطق نفت‌خیز جنوب کشور باشد. اهمیت این موضوع با توجه به گزارش آلودگی‌های هیدروکربنی در خلیج فارس و محدوده بهرگان و سواحل استان بوشهر، که با فعالیت‌های نفتی مرتبط دانسته شده‌اند، بیشتر می‌شود (Hatami et al., 2009; Mohebbi-Nozar et al., 2015; Dashtbozorg et al., 2019; Uddin et al., 2021). کاربرد کمپوست علاوه بر بهبود

شرایط فیزیکوشیمیایی و افزایش فعالیت میکروبی خاک، امکان بازیافت پسماند آلی و کاهش وابستگی به روش‌های شیمیایی و فیزیکی پرهزینه را فراهم می‌کند (Tran et al., 2021; Namkoong et al., 2002). با این حال، نتایج حاضر در شرایط آزمایشگاهی به‌دست آمده و برای استفاده در مناطق نفتی نیازمند مطالعات پایلوت و میدانی است. همچنین، ارزیابی موفقیت فرایند نباید تنها بر کاهش TPH متکی باشد و بررسی ترکیبات هیدروکربنی، سمیت و انتشار ترکیبات فرار مانند بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلین‌ها^۱ (BTEX) نیز ضروری است (Tran et al., 2018).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تصفیه زیستی خاک آلوده به نفت با استفاده از کمپوست تولیدشده از پسماند مواد غذایی و با تکیه بر ظرفیت میکروارگانیسم‌های بومی خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که فراهم‌کردن شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها، به‌ویژه از طریق تأمین رطوبت و هوادهی، نقش مهمی در کاهش هیدروکربن‌های نفتی دارد؛ به‌طوری‌که پس از ۱۸۰ روز، کاهش TPH در تیمار شاهد بدون هوادهی و رطوبت‌دهی تنها ۸/۶ درصد بود، درحالی‌که در شاهد تحت هوادهی و رطوبت‌دهی به ۷۸ درصد رسید. این یافته نشان می‌دهد که میکروارگانیسم‌های بومی موجود در خاک منطقه، در صورت فراهم‌بودن شرایط محیطی مناسب، ظرفیت قابل‌توجهی برای تجزیه زیستی هیدروکربن‌های نفتی دارند. افزودن کمپوست موجب افزایش بیشتر راندمان حذف TPH شد و میزان کاهش TPH در تیمارهای حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد کمپوست پس از ۱۸۰ روز به‌ترتیب ۹۴/۴۵ و ۹۴/۹۱ درصد رسید. با این حال، اختلاف راندمان دو تیمار تنها ۰/۴۶ واحد درصد بود؛ بنابراین، در شرایط این مطالعه، افزایش مقدار کمپوست از ۳۰ به ۵۰ درصد مزیت قابل‌توجهی از نظر حذف نهایی TPH ایجاد نکرد. از این رو، تیمار ۳۰ درصد کمپوست می‌تواند گزینه مناسب‌تری برای بررسی‌های پایلوت و میدانی باشد، زیرا امکان دستیابی به راندمان بالا با مصرف کمتر کمپوست و احتمالاً هزینه عملیاتی پایین‌تر را فراهم می‌کند.

استفاده از کمپوست پسماند غذایی، هم‌زمان مدیریت پسماندهای آلی و زیست‌پالایی خاک‌های نفتی را ممکن می‌سازد و با کاهش شیرابه و انتشار گازهای گلخانه‌ای، پسماند را به یک اصلاح‌کننده مفید خاک تبدیل می‌کند. با این حال، تأیید قابلیت کاربرد این روش در مقیاس میدانی مستلزم انجام مطالعات پایلوت و ارزیابی هم‌زمان کارایی حذف آلاینده، پایداری فرایند و پیامدهای محیط‌زیستی آن است. همچنین در مطالعات آینده می‌توان شناسایی و تعیین میکروارگانیسم‌های بومی مؤثر در تجزیه هیدروکربن‌ها را در اولویت قرار داد.

References

- Asgari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H., Nasser, S., Dehghani, M. H., Nazmara, S., & Yaghmaeian, K. (2017). Biodegradation of total petroleum hydrocarbons from acidic sludge produced by re-refinery industries of waste oil using in-vessel composting. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15, 3. <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0267-1>.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (2010). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation.
- Curriel-Alegre, S., Khan, A. H. A., Rad, C., Velasco-Arroyo, B., Rumbo, C., Rivilla, R., Durán, D., Redondo-Nieto, M., Borràs, E., Molognoni, D., Martín-Castellote, S., Juez, B., & Barros, R. (2025). Bioaugmentation and vermicompost facilitated the hydrocarbon bioremediation: Scaling up from lab to field for petroleum-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 16601–16616.

¹ Benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes

- Dashtbozorg, M., Riyahi Bakhtiari, A., Shushizadeh, M. R., & Taghavi, L. (2019). Quantitative evaluation of n-alkanes, PAHs, and petroleum biomarker accumulation in beach-stranded tar balls and coastal surface sediments in the Bushehr Province, Persian Gulf (Iran). *Marine Pollution Bulletin*, 146, 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.023>.
- Edeghagba, B. O., Adamu-Governor, O. L., Ogbonna, S. C., & Onyeaghasiri, F. U. (2021). Assessment of spent engine oil degrading potentials of bacteria isolated from the air. *Global Scientific Journal*, 9(10), 69–80.
- Elshafei, A. M., & Mansour, R. (2024). Microbial bioremediation of soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Discover Soil*, 1, 9. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00004-5>.
- Faithfull, N. T. (2002). *Methods in agricultural chemical analysis: A practical handbook*. CABI Publishing.
- Hara, E., Kurihara, M., Nomura, N., Nakajima, T., & Uchiyama, H. (2013). Bioremediation field trial of oil-contaminated soil with food-waste compost. *Journal of JSCE*, 1(1), 125–132. https://doi.org/10.2208/journalofjsce.1.1_125.
- Hatami, E., Sadati-Pour, S. M. T., & Shahabi, B. (2009). Assessment of total petroleum hydrocarbons (TPH) in Persian Gulf's water and sediment, Bahregan coastal area. *Journal of Marine Science and Technology Research*, 4(3), 84–93. [In Persian].
- Helmy, Q., & Kardena, E. (2024). Enhancing field-scale bioremediation of weathered petroleum oil-contaminated soil with biocompost as a bulking agent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100735. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100735>.
- Jørgensen, K. S., Puustinen, J., & Suortti, A. M. (2000). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution*, 107(2), 245–254. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00144-X).
- Khan, M. A. I., Biswas, B., Smith, E., Naidu, R., & Megharaj, M. (2018). Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil—A review. *Chemosphere*, 212, 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.094>.
- Mekonnen, B. A., Aragaw, T. A., & Genet, M. B. (2024). Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: A review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1354422. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1354422>.
- Mohebbi-Nozar, S. L., Zakaria, M. P., Ismail, W. R., Mortazawi, M. S., Salimizadeh, M., Momeni, M., & Akbarzadeh, G. (2015). Total petroleum hydrocarbons in sediments from the coastline and mangroves of the northern Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.03.037>.
- Namkoong, W., Hwang, E. Y., Park, J. S., & Choi, J. Y. (2002). Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting. *Environmental Pollution*, 119(1), 23–31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00328-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00328-1).
- National Iranian Oil Company (NIOC). (2014). Bahregan District. <https://www.niopc.ir>.
- Palansooriya, K. N., Dissanayake, P. D., Igalavithana, A. D., Tang, R., Cai, Y., & Chang, S. X. (2023). Converting food waste into soil amendments for improving soil sustainability and crop productivity: A review. *Science of the Total Environment*, 881, 163311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163311>.
- Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC). (2026). Annual statistical bulletin 2026. <https://www.opec.org>.
- Silva, A., Delerue-Matos, C., & Fiúza, A. (2005). Use of solvent extraction to remediate soils contaminated with hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, 124(1), 224–229.
- Texas Natural Resource Conservation Commission (TNRCC). (2001). TNRCC Method 1005: Total petroleum hydrocarbons. Texas Natural Resource Conservation Commission.
- Tran, H. T., Lin, C., Bui, X. T., Ngo, H. H., Cheruiyot, N. K., Hoang, H. G., & Vu, C. T. (2021). Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: Current and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 753, 142250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142250>.
- Tran, H.-T., Vu, C.-T., Lin, C., Bui, X.-T., Huang, W.-Y., Vo, T.-D.-H., Hoang, H.-G., & Liu, W.-Y. (2018). Remediation of highly fuel oil-contaminated soil by food waste composting and its volatile

- organic compound (VOC) emission. Bioresource Technology Reports, 4, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.10.010>.
- Uddin, S., Fowler, S. W., Saeed, T., Jupp, B., & Faizuddin, M. (2021). Petroleum hydrocarbon pollution in sediments from the Gulf and Omani waters: Status and review. Marine Pollution Bulletin, 173, 112913. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112913>.
- United States Composting Council. (2002). Test methods for the examination of composting and compost (TMECC). United States Composting Council Research and Education Foundation, Ronkonkoma, NY.
- Zhang, H., Huang, Y., Chen, S., & Wang, X. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. Journal of Hazardous Materials, 416, 125702. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>.