



Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate

E. Asrari^{1*}, H. Talebi²

Received: 04-05-2021

Revised: 11-11-2021

Accepted: 31-5-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Asrari E., and Talebi H. 2022. Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate. Journal of Water and Soil 36(2): 215-224. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.67423.1026](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.67423.1026)

Introduction

In the last few decades, due to process of shifting from traditional activities and based on manual activities to industrial ones, the need for using oil and coal and its derivatives has increased. Using these materials has caused some problems for environment as hydro carbon contamination. Soil is a major contributor to the various kinds of pollution, especially hydro carbon pollution. Due to the importance of soil in the life cycles and its vitally direct and indirect influence on all the organisms and human being, elimination of this pollutant is necessary. For this reason, some different methods have been developed. In this research, capability of soil washing by sodium dodecyl sulfate ionic detergent has been measured. In order to fulfill the existing necessity and solve this problem, a wide-ranging effort has been started from the past until now, which can be referred to the issue of washing contaminated soil as one of the issues raised. At the beginning of this technology, washing with pure water was considered and after a while, it was invalidated due to inefficiency in the tested cases. With advances in this emerging technology, the discussion of stronger solvents was explored, in which detergents became more attractive due to their lower potential toxicity and environmental degradability. Actually, the effect of major parameters on removing the hydrocarbons has been investigated and in this research has been afforded to purify polluted soil with creosote by considering actual conditions in industry.

Materials and Methods

The first sample has been taken from original soil of Razi industrial estate. It has coarse sandy loam texture with 31% clay, 11% silt and 57% of sand, pH equal 7, organic matter amount 2.3 % weight and density equal 1/8 gram per m³. Therefore, pure soil was extracted from 6 layers of soil to the depth of 0.5 m from Razi industrial area in Isfahan. Then, it was mixed by a concrete mixer specific to the block making. Afterwards, creosote was added evenly during stirring so the soil was contaminated deliberately. After storing in the laboratory for 3 weeks and homogeneity, the initial sample was chosen and its contamination was measured. This measurement was based on the amount of added oil to the certain volume of soil (about 30000 milligram in each kilogram). For avoiding error and having assurance from the amount of initial contamination, the sample was transferred to the laboratory and 25 gr of it was taken. Its hydrocarbon texture was extracted by solvent and its polar compositions were removed by passing on the silica gel absorbent. Then, a hydrocarbon was measured. The real pollutant amount of sample was 26776 milligram in each kilogram of soil. Secondary samples were chosen from basic sample, these chosen samples were washed under the different planned conditions. After finishing several complementary washing stages in different conditions, the soil samples remaining from washing were dried under different conditions. Then the amount of remained contamination in each sample was measured and recorded separately. At the next stage, the recorded results were analyzed. Stay time, temperature, pollutant concentration and washer concentration has been chosen as variable parameters.

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: e_asrari@pnu.ac.ir)

2- M.Sc, Department of Civil Engineering , Payame Noor University, Shiraz, Iran

Results and Discussion

According to the results, washing by pure water and temperature of 30°C would not be successful but by increasing temperature, the removing efficiency increased. Increasing temperature to 90°C increased the efficiency up to 18.5%. In addition, adding detergent to the environment increased the success of this method in reducing sample pollution. Increasing efficiency up to 4 g/L of detergent increased the efficiency up to 40% directly, but there was no significant change for increasing more than this amount. At this stage, the results showed that in the presence of detergent, increasing temperature caused to increase efficiency directly. The only difference was that increasing temperature (without detergent) increased efficiency directly, but in presence of detergent, increasing efficiency was significance up to 50% and after that it increased very slightly. The last studied parameter was time. These changes included increasing efficiency due to increasing time from 10 min to 20 min. Removing pollutant efficiency has been reduced by increasing time. Under all optimum conditions, in temperature of 90°C for 20 minutes and 4 g/L surfactant, Hydrocarbon removing efficiency was 61%. The economically optimum temperature is 50°C with regard to economical cases and the slight difference resulting from increase of temperature from 50 to 90°C.

Conclusion

Generally, the results revealed the suitability of ionic sodium dodecyl sulfate for cleaning soil under conditions of contamination. But 39 % of pollutant in polluted soil after washing by considering optimal conditions has been reminded. It must be mentioned that due to inefficiency of this amount of contamination reduction from contaminated soils for the discharge of these soils into the environment, this method can be introduced as a pollution reduction or a method for pretreatment of complementary methods.

Keywords: Contaminated soil, Creosote, Soil washing, Surfactant

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۲۴-۲۱۵

بررسی شست‌وشوی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات

الهام اسراری^{۱*} - حامد طالبی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

چکیده

از گذشته تا کنون جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها از روش‌های متفاوت استفاده گردیده است که هرکدام از این روش‌ها دارای محاسن و معایب خاص خود بوده و شامل قابلیت‌هایی ویژه می‌باشند. در این پژوهش قابلیت روش شست‌وشو با استفاده از شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات و همچنین شناسایی عوامل مؤثر بر راندمان آن جهت کاهش کل هیدروکربن‌های نفتی خاک آلوده به روغن قطران بررسی گردید. برای این امر خاک بکر از منطقه صنعتی شهرک رازی اصفهان تهیه و با استفاده از روغن قطران به صورت تعددی آلوده گردید. زمان ماند، دما، غلظت شوینده و غلظت آلاینده به عنوان متغیرهای این مطالعه در نظر گرفته شدند. بررسی نشان داد خاک منطقه دارای بافت شنی رسی لومی بود. پس از زمان ماند ۲۱ روز، میزان آلودگی آن ۲۶۷۷۶ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد. با استفاده از پایلوت صنعتی خاک‌شویی در شرایط متفاوت انجام گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌های شسته شده نشان داد، استفاده از محیط شست‌وشوی دارای آب خالص و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد از موفقیت‌چندانی برخوردار نمی‌باشد، ولی افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش راندمان ۱۸/۵ درصدی و همچنین افزودن میزان ۴ گرم بر لیتر ماده شست‌وشو دهنده موجب افزایش ۴۰ درصدی راندمان است. تغییرات زمان ماند هم بر راندمان حذف هیدروکربن تأثیر داشت. در کل بررسی نتایج، شرایط پهنه را دمای ۹۰ درجه، زمان ۲۰ دقیقه و میزان ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت با راندمان ۶۱ درصد مشخص نمود که این نتیجه حاکی از مناسب بودن روش جهت کاهش آلودگی این نوع از خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک آلوده، روغن قطران، شست‌وشوی خاک، شوینده یونی

مقدمه

شیمیایی و زیستی آن حاصل می‌گردد (Park and Son, 2017). در چند دهه اخیر افزایش سریع جمعیت نیاز به تأمین منابع را روز به روز گسترده‌تر نموده است و گسترش مصرف این منابع و عدم مدیریت صحیح آن منجر به آلودگی بیشتر محیط‌زیست شده و بشر را با بحران زیست محیطی روبرو کرده است (Kile and Chiou, 1989). امروزه به دلیل استفاده زیاد از ترکیبات نفتی به عنوان منبع تأمین مواد اولیه و انرژی در سراسر جهان، بیش از دو میلیون تن نفت در سال استخراج می‌شود و آلودگی ناشی از این ترکیبات در سطح جهان بسیار گسترده شده است (Hedayati, 2010). نشت ترکیبات نفتی تحت تأثیر نیروهای موینگی و ثقلی منجر به حرکت آلودگی به صورت عمودی در خاک‌های غیراشباع شده و موجب پر شدن خلل و فرج خاک می‌گردد و در صورت زیاد بودن مقدار نشتی، فاز مایع به سطح آب زیرین رسیده و از آنجا به همراه آب‌های زیرزمینی حرکت کرده و به دلیل وزن مخصوص کمتر نسبت به آب در سطح آب شناور باقی

خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند طبیعی است به گونه‌ای که ۹۵ درصد غذای انسان از خاک حاصل می‌شود و بدون داشتن خاک سالم حیات و زندگی بر روی زمین امکان‌پذیر نخواهد بود (Wang et al., 2018). خاک به عنوان پلایند طبیعی نیز محسوب می‌شود و علاوه بر این که تأمین کننده مواد غذایی است، خاصیت تصفیه‌کنندگی نیز دارد. این خاصیت خاک در اثر خواص فیزیکی،

۱- دانشیار گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: e_asrari@pnu.ac.ir)

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (مهندسی محیط زیست)، دانشگاه پیام نور، شیراز، ایران

شوینده‌ی ۸۰-۷۰ TWEEN80 درصد بود.

حسنانی و همکاران (Hosnani et al., 2019) در تحقیقی با موضوع حذف نفت خام از یک خاک آلوده با استفاده از سورفکتانت سدیم دودسل سولفات به روش خارج از محل، نتایج نشان داد که بهترین حالت جهت حذف نفت خام در غلظت ۰/۵ در صد وزنی سورفکتانت، ۵ درصد نفت خام، زمان ۱۵ دقیقه، سرعت همزنی ۲۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۴۵ درجه بدست آمد و کاهش ۹۶ درصدی آلاینده در این سطح مشاهده شد. در نتیجه‌گیری تحقیق بیان شد شست‌وشوی خاک آلوده با سورفکتانت‌ها روشی کارآمد و مناسب می‌باشد. دژپنده و همکاران (Deshpande et al., 1999) تحقیقی در مورد انتخاب شست‌وشودهنده برای افزایش عملکرد شست‌وشوی خاک انجام داده‌اند. در این تحقیق کارکرد شست‌وشودهنده‌های یونی و غیریونی برای خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها بررسی گردید و طی آن مشخص شد که انتخاب شست‌وشودهنده مناسب براساس شرایط خاک آلوده می‌باشد و بسته به ماهیت آلودگی تعیین می‌گردد. بهانداری و همکاران (Bhandari et al., 1999) مطالعاتی بر روی اثر شست‌وشوی خاک بر سطوح شن‌های آلوده به مواد هیدروکربنه انجام داده‌اند که طی آن مشخص گردید وجود اکسیدهای فلزی در بافت خاک آلوده باعث کاهش راندمان روش شست‌وشوی خاک می‌گردد.

اوروم و همکاران (Urum et al., 2004) تحقیقاتی بر روی راندمان شست‌وشوی خاک آلوده به نفت خام انجام داده‌اند که طبق نتایج حاصل شده مشخص گردید حالت بهینه‌ی شناسایی شده زمان ده دقیقه می‌باشد. در این تحقیق پارامتر دما بررسی گردید و دماهای زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد راندمان‌های کمتر را نشان داد و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با بازده بیش از هفتاد و نه درصد بهترین دما شناسایی گردید. در تحقیقاتی که توسط مولیگان و افتخاری (Mulligan and Eftekhari, 2003) جهت بررسی اثر شوینده‌ی آنیونی (شوینده‌ی JBR425) انجام پذیرفت در آلودگی اولیه‌ی 1000ppm کاهش میزان آلودگی تا میزان ۶۷ درصد گزارش گردید. تحقیقاتی که توسط کاترین و همکاران (Catherine et al., 2003) در بررسی اثر شوینده‌ها بر خاک‌های ماسه‌ای انجام پذیرفت در آزمون با شوینده‌ی آنیونی JBR425 در کاهش میزان آلودگی تا میزان ۶۷ درصد آلودگی اولیه، این آزمون موفقیت‌آمیز گزارش گردید. پس از تحقیقات اولیه، اوروم و همکاران (Urum et al., 2004) در تحقیقاتی تکمیلی در زمینه‌ی شست‌وشوی خاک انجام دادند که طی آن مشخص گردید خاک‌هایی که آلودگی کمتر و ذرات درشت‌تر دارا می‌باشند طی عملیات شست‌وشوی خاک بازده بهتری دارند. در تحقیقات انجام شده توسط یانگ و ژو سال ۲۰۰۶ در خصوص شست‌وشوی خاک آلوده به فنانترن با استفاده از روش شست‌وشوی خاک با بهره‌گیری از سورفکتانت‌های SDBS و TX100 با موفقیت در کاهش ۸۹ درصد از آلودگی خاک در بهینه‌ترین حالت، روش در

می‌ماند و این امر خود موجب گسترش شدیدتر آلودگی می‌شود (Melali and Afyoni, 2011). وجود طیف متفاوتی از ترکیبات شیمیایی در پیکره مواد نفتی، باعث می‌گردد این مواد دارای خاصیت تجزیه‌پذیری و پایداری متفاوتی باشند به طوری که ورود برخی از آنها به آب و خاک می‌تواند به صورت طولانی مدت موجب آلودگی گردد. به‌طور کلی تجمع هیدروکربن‌های نفتی در خاک می‌تواند اثرات مخربی بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. زیرا آلاینده‌های موجود در خاک می‌تواند وارد زنجیره غذایی شده و سلامت تمامی جانداران به ویژه انسان را با خطر جدی مواجه می‌سازد (Liu, 2018). بنابراین پاکسازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی امری ضروری محسوب می‌گردد (Lau et al., 2014). در جهت تحقق ضرورت موجود و حل این معضل از گذشته تا به حال تلاش گسترده‌ای آغاز گردیده است که به بحث شست‌وشوی خاک آلوده به عنوان یکی از موارد مطرح شده می‌توان اشاره کرد. در ابتدای آغاز به کار این تکنولوژی، شست‌وشو با آب خالص مورد توجه قرار گرفت و پس از گذشت زمان به علت عدم کارایی در موارد آزمون شده از حیث اعتبار ساقط گشت. با پیشرفت در این تکنولوژی نوظهور بحث حلال‌های قوی‌تر مورد بررسی قرار گرفت که در این بین، شست‌وشو دهنده‌ها به علت سمیت بالقوه کمتر و قابلیت تجزیه‌پذیری زیست‌محیطی از جذابیت بیشتری برخوردار گردید (Deshpande et al., 1999).

در خصوص مباحث تحقیقاتی در امر قابلیت روش خاک‌شویی با شرایط مختلف در کاهش آلاینده‌های نفتی از خاک مطالعات متعددی انجام پذیرفته است که در ذیل به موارد مرتبط آن اشاره می‌گردد. در تحقیق انجام شده توسط صالحیان سال ۱۳۸۷ با موضوع شست‌وشوی خاک آلوده به گازوئیل با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات بیشترین حذف، در غلظت‌های ۲۰۰۰۰ ppm، pH برابر ۱۱ و غلظت شوینده‌ی یک درصد و با میزان راندمان ۴۵ درصد گزارش گردید (Salehian., 2008). به منظور بررسی بازدهی روش شست‌وشوی خاک با استفاده از دو نوع سورفکتانت یونی سدیم دودسیل سولفات و سورفکتانت غیریونی X100 بر خاک آلوده به ترکیبات نفتی تحقیقی توسط عندلیب مقدم (Andalib Moghadam, 2008) انجام پذیرفت که نشان دهنده افزایش راندمان با استفاده از شوینده‌ها بود و افزایش زمان شست‌وشو به یک ساعت و تکرار شست‌وشو، ۵۳/۳ درصد حذف ترکیبات آلیفاتیک و ۷۵/۷ درصد حذف ترکیبات آروماتیک را افزایش داد. تحقیقی که توسط مهراسی و همکاران (Mehrasbi et al., 2006) در بررسی کارایی شست‌وشودهنده‌ها در پالایش خاک آلوده به گازوئیل انجام پذیرفت نشان دهنده این موضوع بود که افزایش سرعت و زمان همزدگی، کارایی حذف گازوئیل را افزایش داد و تغییرات pH بدون تاثیر بود. همچنین این محققان گزارش نمودند که کاهش میزان آلودگی با شست‌وشودهنده‌ی BRIJ35، به میزان ۶۵-۶۰ درصد و برای

بررسی توان روش مذکور در پاکسازی خاک آلوده ایجاد شده، با نوآوری آلودگی خاک با روغن قطران و نزدیک نمودن شرایط حاکم برآزمون‌ها به شرایط واقعی و قابل ایجاد در صنعت گردید.

مواد و روش‌ها

مواد و تجهیزات مورد استفاده

جهت تهیه نمونه خاک اولیه از خاک بکر محدوده نزدیک شهرک صنعتی رازی اصفهان با بستر دارای بافت ترکیبی ریز و درشت دارای سنگریزه شامل جزء معدنی با بافت شنی رسی لومی با در صد ترکیب ۳۲ درصد رس، ۱۱ درصد سیلت، ۵۷ درصد شن و pH برابر ۷، میزان مواد آلی ۲،۳ درصد وزنی با دانسیته ۱/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برداشت گردید.

به منظور شست‌وشوی خاک آلوده از شوینده آنیونی سدیم دودسیل سولفات شرکت مرک آلمان با وزن مولکولی ۲۸۸/۳۸ گرم بر مول، چگالی ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه‌بحرانی میسلی^۱ ۰/۱۷۳ - ۰/۲۳ در صد بهره‌گیری شد. همچنین در این تحقیق از تتراکلرواتیلن شرکت جی. تی. بی‌کر آمریکا و آب مقطر شرکت زلاب ایران نیز استفاده گردید.

برای شست‌وشوی اولیه ظروف و تجهیزات آزمایشگاهی از محلول‌های رقیق (۰/۱ مولار) اسید هیدروکلریدریک استفاده شد و همچنین از دستگاه‌های آزمایشگاهی همچون دستگاه شیکر شرکت فن آزما مدل TN52E، سانتریفیوژ EBA200 شرکت هیتچ و اینفراکال سنجشگر کل هیدروکربن‌های نفتی و کل روغن و گریس شرکت ویلکس انتر پریس نیز بهره‌برداری گردید.

روش انجام آزمون

نمونه اولیه خاک غیرآلوده از لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۰/۵ متری در محوطه خاکی نزدیک شهرک صنعتی رازی اصفهان برداشته شد. جهت برداشت نمونه ابتدا تعداد ۶ نمونه خاک غیرآلوده از اعماق مختلف تا عمق ۰/۵ متری محل برداشت شد (در این مرحله به منظور پیشگیری از متأثر شدن نتایج در اثر حذف ذرات درشت از عملیات غربالگری خاک خودداری و به جهت عدم تغییر بافت خاک در اثر حرارت، از گذاردن نمونه خاک در کوره پرهیز گردید). ابتدا نمونه خاک برداشت شده به منظور اختلاط کامل در دستگاه همزن ملات خشک ساز کاملاً مخلوط و نمونه اصلی از آن توزین و برداشت گردید. نمونه

مورد رفع این نوع از آلودگی موفق معرفی گردید (Yang and Zho, 2006). در پژوهشی که توسط ژویی با همکاری ژو (Zhoe and Zhu, 2008) در خصوص شست‌وشوی خاک آلوده به فنانترن با استفاده از سورفکتانت‌های SDS و TX100 انجام گرفت راندمان حاصل شده میزان ۸۷/۵ در صد اعلام گردید و در مقایسه نتیجه حاصل شده با نتیجه پژوهش گذشته که در آن از سورفکتانت‌های SDBS و TX100 با سایر شرایط مشابه این پژوهش استفاده گردیده بود اختلاف راندمان به صورت توانایی بالاتر سورفکتانت معرفی شد. در تحقیقات پنگ و همکاران (Peng et al., 2011) که جهت بررسی فاکتورهای مؤثر در کارایی خاکشویی با شست‌وشودهنده‌ها انجام گرفت. با استفاده از دو نوع متفاوت از شوینده تکرار آزمون انجام شد و طی آن مشخص گردید زمان شست‌وشو و سرعت شست‌وشو از فاکتورهای مهم در حذف هیدروکربن‌های آروماتیک می‌باشد، در ضمن این تحقیق مشخص نمود بهترین سرعت همزنی ۲۵۰ دور در دقیقه و بهترین زمان ۳۰ دقیقه جهت شوینده TX100 و زمان ۶۰ دقیقه جهت TW80 می‌باشد. در تحقیقاتی که توسط داووزا و همکارانش سال ۲۰۱۱ انجام گرفت خاک با بافت رسی و سنگی دارای سه نوع متفاوت از آلودگی با مواد آلی با استفاده از شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات مورد شست‌وشو قرار گرفت که نتایج حاصل شده بیانگر تفاوت راندمان چشمگیری بود و در موفق ترین حالت، کاهش آلودگی تا میزان ۸۹ در صد مشاهده گردید (Daveza et al., 2011). در تحقیقی که به منظور بررسی استخراج هیدروکربن‌های آروماتیک از خاک با تکنولوژی شست‌وشوی خاک توسط لائو و همکارانش (Lau et al., 2014) انجام پذیرفت با بررسی‌های به عمل آمده جهت جایگزینی حلال‌های آلی در روش شست‌وشوی خاک، با کسب راندمان قابل قبول در اثر استفاده از شست‌وشو دهنده‌ها، این مواد به عنوان جایگزین معرفی گردیدند.

شست‌وشوی خاک بعنوان فن آوری احیای احتمالی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و سایر مواد شیمیایی آلی هیروقیل ارائه شده است ولی موفقیت این روش تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند سطح ذرات و ویژگی‌های معدنی خاک آلوده، نوع آلودگی و خواص محیط شست‌وشو می‌باشد (Bhandari et al., 2000). نظر به هدف لحاظ شده برای انجام این پژوهش مبنی بر استفاده صنعتی از روش خاکشویی با بهره‌گیری از شوینده سدیم دودسیل سولفات جهت پاکسازی خاک آلوده شده به روغن قطران در محدوده شهرک صنعتی رازی اصفهان و با توجه به تأثیر به سزای عوامل مختلف شامل شرایط محیط شست و شو، نوع و جنس خاک آلوده، نوع و میزان آلاینده در کسب نتایج حاصل شده از خاکشویی‌های انجام گرفته در قبل و پژوهش‌های گذشته، به منظور افزایش اطمینان به نتایج و قابلیت استناد جهت برنامه‌ریزی و صرف هزینه، طی مطالعه حاضر سعی بر

۱- CMC به غلظتی از ماده شوینده اطلاق می‌شود که تشکیل میسل‌ها آغاز گردیده و با افزایش میزان ماده شوینده مونومرها به میسل تبدیل می‌گردند از دیگر خصوصیات این نقطه می‌توان کمترین کشش سطحی برای شوینده را ذکر نمود.

حقیقی قابل ایجاد در صنعت و افزایش اطمینان از نتایج حاصل جهت پرهیز از غربالگری و حذف قطعات درشت دانه خاک که استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی به علت توان محدود ایجاد می‌نمود اقدام به طراحی و ساخت دستگاه با توان بالا در مقیاس کوچک صنعتی گردید.

اندازه‌گیری میزان آلودگی نمونه‌ها

اندازه‌گیری میزان آلودگی در خاک آلوده شده مصنوعی و نمونه‌های شسته شده با روش استخراج آلودگی به کمک حلال و قرائت میزان آلودگی با دستگاه بر اساس استاندارد متدهای (EPA و ASTM D ۷۰۶۶) به شرح ذیل انجام پذیرفت.

در هر اندازه‌گیری میزان ۲۵ گرم نمونه از خاک آلوده جهت شناسایی میزان کل هیدروکربن‌های نفتی انتخاب و عملیات انحلال بافت هیدروکربنی آن به کمک حلال تتراکلرواتیلن و دستگاه شیکر انجام گردید. سپس عملیات استخراج فاز مایع با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ آزمایشگاهی تکمیل گشت. پس از جداسازی ترکیبات قطبی وارد شده به حلال با استفاده از سیلیکا ژل، میزان وجود هیدروکربن‌های نفتی با استفاده از دستگاه سنجشگر کل هیدروکربن‌های نفتی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و میزان غلظت آلودگی قرائت گردید. عدد حاصل شده به علت جامد بودن نمونه و براساس منحنی کالیبراسیون اصلاح و برای هر نمونه ثبت گردید.

اصلی با استفاده از روغن قطران ذغال سنگ تهیه شده از بازمانده ته تانکرهای حمل روغن آلوده گردید. با توجه به معین و مشخص بودن مقدار ماده آلاینده که به ازای هر کیلوگرم خاک بکر اضافه شده بود میزان 30000 mg/Kg آلودگی نمونه به راحتی محاسبه گردید، اما چون مقدار کل هیدروکربن نفتی موجود در خاک آلوده مصنوعی ایجاد شده می‌توانست متاثر از عوامل مختلفی گردد، خاک آلوده به مدت زمان سه هفته به صورت ایزوله نگهداری گردید و پس از اطمینان از جذب طبیعی آلودگی در خاک و بعد از همزنی مجدد، میزان آلودگی خاک مذکور اندازه‌گیری و ثبت گردید. پس از آن نمونه‌های متعدد از خاک آلوده بدست آمده برداشت گردید و با بهره‌گیری از دستگاه همزن صنعتی که به صورت پایلوت طراحی و ساخته شد و با استفاده از ماده شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات، تحت شرایط متفاوت محیط شست و شو شامل: ۱- زمان همزنی ۲۰ دقیقه و میزان ۰ ماده شوینده ثابت و دمای $30, 50, 70, 90$ درجه سانتی‌گراد متغیر ۲- دمای 30 درجه سانتی‌گراد و زمان همزنی ۲۰ دقیقه ثابت و میزان $0, 2, 4, 6$ گرم بر لیتر ماده شوینده متغیر ۳- دمای 90 درجه سانتی‌گراد و میزان 4 گرم بر لیتر شوینده ثابت و زمان‌های $10, 20, 40, 80$ دقیقه متغیر شست و شو گردید و میزان آلودگی باقی مانده اندازه‌گیری و ثبت شد. با مقایسه نتایج پیشرفت مراحل، بهینه‌ترین فاکتورهای حاکم بر محیط شست‌وشو شناسایی گردید.

ساخت دستگاه پایلوت

به منظور نزدیک‌تر نمودن هر چه بیشتر شرایط آزمون‌ها به شرایط



شکل ۱- نمایی از پایلوت ساخته شده برای فرآیند خاکشویی

Figure 1- View of the pilot model prepared for the leaching process

نتایج و بحث

نتیجه آنالیز نمونه آلوده شده اولیه

در اندازه‌گیری آلودگی مصنوعی ایجاد شده در نمونه خاک بکر آلوده شده توسط روغن قطران علی‌رغم انتظار (بر اساس میزان مخلوط شده روغن و خاک انتظار عدد 30000 mg/Kg می‌رفت) میزان آلودگی برابر با 26776 mg/kg ثبت گردید.

بررسی تاثیر تغییرات دما بر حذف آلودگی خاک

افزایش دما در محیط شست‌وشو حاوی آب خالص (غلظت ۰ گرم بر لیتر ماده شوینده) از دمای ۳۰ به ۹۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش همواره بیشتر آلودگی خاک همراه بود که علت این امر را می‌توان افزایش دما و به واسطه آن افزایش جنش مولکولی و کاهش چسبندگی ماده آلاینده به ذرات خاک بیان نمود زیرا براساس تئوری سنتیک مولکولی زمانی که دمای سیستم افزایش می‌یابد حرکت مولکول‌ها بیشتر دچار تغییر شده و ارتعاشات مولکولی رخ می‌دهد (شکل ۲). در کل این ارتعاشات شامل کلیه مولکول‌ها شده و حتی بر پیوندها و اتصالات بین مولکول‌ها نیز اعمال می‌گردد. این امر منجر به کاهش گرانروی و همچنین کاهش نیروی چسبندگی آلاینده به ذرات خاک گردیده و منجر به افزایش کنده شدن آلاینده در مقابل نیروهای اعمال شده از طرف محیط شست‌وشو می‌گردد (Sherwood, 1972).

بررسی تاثیر غلظت سورفکتانت بر حذف آلودگی از خاک

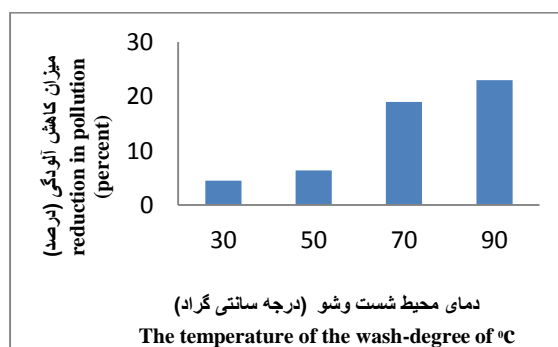
در شست‌وشوی خاک آلوده مصنوعی با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان همزنی ۲۰ دقیقه به صورت ثابت و با متغیر افزایشی قرار دادن

میزان ماده شوینده همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد نتایج همواره مثبت حاصل نگردید. به طوری که با بالا بردن سطح ماده شوینده تا میزان ۴ گرم برلیتر افزایش راندمان تا ۴۰ درصد حاصل شد و پس از افزایش میزان ماده شوینده به ۶ گرم بر لیتر کاهش راندمان تا میزان ۳۸ درصد ثبت گردید. البته افزایش ناگهانی راندمان حذف به میزان چهل درصد در غلظت ۴ گرم در لیتر ماده شوینده را می‌توان مستقیماً حاصل افزایش میزان سورفکتانت تا رسیدن به میزان بحرانی میسلی و در نتیجه افزایش تبدیل منومرها و تشکیل میسل‌ها دانست و کاهش جزئی راندمان در غلظت ۶ گرم بر لیتر محلول شوینده را می‌توان حاصل از برآیند عوامل قابل شهود چون کف کردن زیاد محیط و عدم جدا شدن کامل آب حاوی آلودگی از باقی مانده خاک شسته‌شده و ماندن قسمتی از آلاینده جدا شده در بافت خاک پس از خشک شدن کامل دانست. ولی موثرتر از موارد مذکور این است که افزایش میزان ماده شوینده به میزان بالاتر از حد بحرانی میسلی باعث گردیده که پس از جدا گشتن ماده آلاینده از خاک مجدداً در اثر افزایش آبگریزی، آلاینده مجدداً جذب خاک گردد (Chalkesh Amiri, 2008; Khosravi, Daveza et al., 2011; 2007).

بررسی اثر توانان افزایش دمای محیط شست‌وشو با

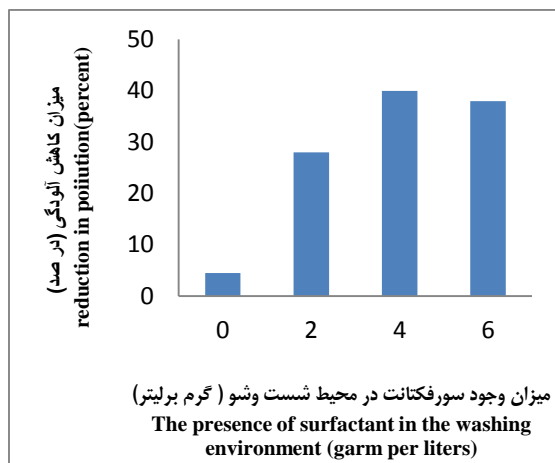
غلظت ۴ گرم بر لیتر شوینده بر حذف آلودگی از خاک

با افزایش دمای محیط شست‌وشو در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت، راندمان کاهش آلاینده در آزمون شست‌وشوی خاک افزایش یافت که این افزایش راندمان در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به بهترین و بیشترین حالت خود رسید.



شکل ۲- تأثیر دما بر بازده شست‌وشوی خاک بدون حضور شست‌وشو دهنده

Figure 2- Effect of temperature on soil washing efficiency without the presence of detergent



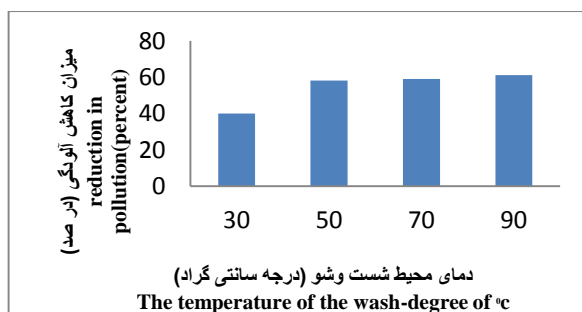
شکل ۳- اثر غلظت ماده شوینده بر راندمان شست و شو

Figure 3- Effect of the concentration of the detergent concentration on the efficiency

با توجه به این که نتایج افزایش راندمان ملموس تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به شکل جزئی افزایش را نشان داد علت این افزایش راندمان قابل توجه تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان افزایش جنبش مولکولی، کاهش چسبندگی آلاینده به خاک و تشکیل میسل‌ها در محیط شست و شو بیان کرد. لازم به ذکر است که افزایش دما در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت میزان کف ایجاد شده بر روی محیط را کاهش داد که این رویداد را می‌توان مزید بر علت در افزایش راندمان دانست و علت آن را نیز صرفاً می‌توان حاصل از افزایش غلظت بحرانی میسلی سورفکتانت دانست. با ادامه افزایش مجدد دما اگرچه راندمان افزایشی ادامه یافت ولی تغییرات چشمگیری مشاهده نگردید که دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان نمود که اگر چه افزایش دما از طرفی بر اساس رفتار پیش‌بینی شده، تاثیرات مثبت در امر تسهیل شست و شوی خاک آلوده را مانند تبخیر هیدرکربن‌های فرار و کاهش پیوستگی ملکول‌های ماده آلاینده با خاک را انجام داده است ولی از طرفی تاثیرات خاص خود در راستای کاهش راندمان را هم، مانند افزایش غلظت بحرانی میسلی، تبخیر محیط شست و شو را نیز اعمال نموده است. از این رو در برابند کلیه عوامل، افزایش دما باعث دسترسی به راندمان بالاتر نگردید (Daveza et al., 2011).

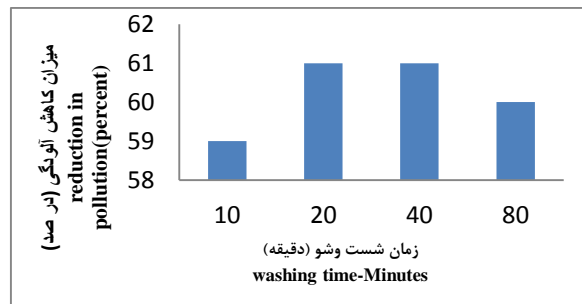
با توجه به این که نتایج افزایش راندمان ملموس تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به شکل جزئی افزایش را نشان داد علت این افزایش راندمان قابل توجه تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان افزایش جنبش مولکولی، کاهش چسبندگی آلاینده به خاک و تشکیل میسل‌ها در محیط شست و شو بیان کرد. لازم به ذکر است که افزایش دما در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت میزان کف ایجاد شده بر روی محیط را کاهش داد که این رویداد را می‌توان مزید بر علت در افزایش راندمان دانست و علت آن را نیز صرفاً می‌توان حاصل از افزایش غلظت بحرانی میسلی سورفکتانت دانست. با ادامه افزایش مجدد دما اگرچه راندمان افزایشی ادامه یافت ولی تغییرات چشمگیری مشاهده نگردید که دلیل آن را می‌توان این‌گونه بیان نمود که اگر چه افزایش دما از طرفی بر اساس رفتار پیش‌بینی شده، تاثیرات مثبت در امر تسهیل شست و شوی خاک آلوده را مانند تبخیر هیدرکربن‌های فرار و کاهش پیوستگی ملکول‌های ماده آلاینده با خاک را انجام داده است ولی از طرفی تاثیرات خاص خود در راستای کاهش راندمان را هم، مانند افزایش غلظت بحرانی میسلی، تبخیر محیط شست و شو را نیز اعمال نموده است. از این رو در برابند کلیه عوامل، افزایش دما باعث دسترسی به راندمان بالاتر نگردید (Daveza et al., 2011).

بررسی تاثیر زمان شست و شو بر میزان حذف آلاینده با ثابت نگه داشتن دمای محیط شست و شو در ۹۰ درجه سانتی‌گراد و غلظت ماده شوینده برابر با ۴ گرم بر لیتر و متغیر افزایشی قرار گرفتن مدت زمان همزنی نتایج نشان از افزایش صعودی میزان حذف آلاینده از خاک با افزایش زمان از ۱۰ به ۲۰ دقیقه بود و پس از آن افزایش زمان تاثیر خود را به صورت غیر خطی و معکوس نشان داد که می‌توان علت آن را در زمان کمتر از ۲۰ دقیقه را به صورت مستقیم به کم شدن میزان اختلاط و از دست رفتن زمان کافی جهت جدا شدن آلاینده از خاک ربط داد. پس از آن افزایش زمان به بالای ۲۰ دقیقه را به تبخیر آب محیط و کاهش در حجم محیط شست و شوی باقیمانده و در نهایت افزایش غلظت ماده فعال سطحی در محیط شست و شو مربوط دانست.



شکل ۴- اثر دماهای مختلف در غلظت ۴ گرم بر لیتر ماده شوینده بر راندمان شست و شو

Figure 4- Effect of different temperatures at concentration of 4 g/l species of detergent on the efficiency



شکل ۵- اثر تغییر زمان بر راندمان شست‌وشوی خاک آلوده

Figure 5- Effect of changing time on washing efficiency of contaminated soil

شست و شو به صورت همواره و مستقیم باعث افزایش راندمان کاهش میزان آلودگی نگردید و تا نقطه بهینه خاصی این روند افزایشی سریع، حاکم بر راندمان می بود. در مورد فاکتور مدت زمان همزنی، صرفاً افزایش تا زمان خاص نشان دهنده افزایش راندمان موفقیت بود و پس از آن افزایش زمان باعث ایجاد روند معکوس در نتایج حاصله گردید. در کل راندمان کاهش آلودگی بدست آمده برای شست‌وشوی نمونه خاک آلوده مصنوعی با میزان آلودگی ۲۶۷۷۶ میلی گرم در کیلوگرم در نهایت و در شرایط بهینه، برابر با ۶۱ درصد ثبت گردید که مبین قدرت روش شست‌وشوی خاک با استفاده از همزن صنعتی و شوینده سدیم دودسیل سولفات جهت کاهش این نوع از آلودگی در خاک منطقه مورد نظر بود. پس بنابر اعداد حاصل شده از این پژوهش می‌توان روش خاک شویی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات را به عنوان فرایند بهبود دهنده جهت کاهش آلودگی این نوع از آلاینده در این جنس و ترکیب از خاک معرفی نمود. ولی با توجه به باقی ماندن میزان ۳۹ درصد از ماده آلاینده در خاک آلوده پس از اعمال تیمار شست‌وشو با پارامترهای بهینه و عدم حذف کامل ماده آلاینده نمی‌توان روش را موفق در پاکسازی خاک آلوده دانست و تنها می‌توان بیان نمود که فرایند مذکور می‌تواند به عنوان روشی کارآمد جهت پیش تصفیه در فرایندهای تکمیلی مورد استفاده قرار گیرد.

به این ترتیب که افزایش جذب شوینده توسط خاک، تشدید خاصیت آبریزی خاک را به همراه داشته و این امر باعث می‌گردد مواد آلاینده جدا شده مجدد جذب خاک شود و به تبع آن، مواد فعال در دسترس محیط شست‌وشو نیز کاهش یافته و در کنده شدن هیدروکربن از بافت خاک و جداسازی آن نیز از خاک آلوده تأثیر منفی گذارد و در کل کاهش راندمان را سبب گردد (Urum *et al.*, 2003; Hosnani *et al.*, 2019). با توجه به نتایج زمان بهینه شست‌وشوی خاک آلوده برابر با ۲۰ دقیقه شناسایی گردید (شکل ۵).

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شوینده و افزایش دما تأثیر بسزایی در موفقیت روش داشته است و فاکتور زمان شست‌وشو نیز در بازه آزمون شده بی‌تأثیر نبوده است ولی نکته قابل توجه و مشترک در کلیه مولفه‌های موثر این بود که افزایش میزان این پارامترها تا نقطه خاصی به صورت مستقیم و یکنواخت منجر به افزایش راندمان حذف آلاینده گردید و پس از آن حتی نتایج عکس نیز مشاهده گردید.

درخصوص مولفه میزان استفاده از ماده شوینده با افزایش میزان ماده شوینده پس از نقطه بهینه نتایج عکس (کاهش راندمان در حذف آلاینده) مشاهده گردید و درخصوص عامل موثر دوم یعنی دمای محیط شست‌وشو، نتایج حاکی از این بود که افزایش دمای محیط

منابع

- Andalib Moghadam H. 2008. Study of the efficiency of the thumb method soil washing to clean oil contaminated soil. Amir kabir rasbi university, Tehran. (In Persian with English abstract)
- Bhandari A., Novak J., and Dove D. 1999. effect of soil washing on petroleum hydrocarbons distribution on sand surfaces. Journal of Hazardous Substance Research 2: 1-7. <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1017>.
- Catherine N., Mulligan C., and Eftekhari F. 2003. Remediation with surfactant foam of PCP- contaminated soil. Engineering Geology, 70:269-279. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00095-4).
- Chalkesh Amiri M. 2008. Surface active materials. Arkan danesh publications, Tehran. (In Persian)
- Deshpande S., Shiau B., Wade D., Sabatini D and Harwell J. 1999. Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing. Water Reserch 33(2): 351-360. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00234-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00234-6).
- Daveza M., Fabari D., Prevot A.B., and Pramauro E. 2011. Removal of alkyphenols from polluted sites using and

- photocatalysis. *Environmental Science and Pollution Research* 8: 783-789. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0427-7>.
- 7- Hedayati M. 2010. Effectiveness of leaching method for cleaning soils contaminated with petroleum hydrocarbons with emphasis on BTEX compounds. environment university, Tehran. (In Persian with English abstract)
 - 8- Hosnani M., Amani H., and Sarmasti M. 2019. Removal of crude oil from a contaminated soil using offsite SDS surfactant. *Journal of Environmental Science and Technology* 21(3): 37-46. (In Persian with English abstract) https://jest.srbiau.ac.ir/article_14541_/10.22034/JEST.2019.14541.
 - 9- Kile D.E., Chiou C.T. 1989. Water solubility enhancement of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration. *Environmental Science Technology* 23(7): 832-838. <https://doi.org/10.1021/es00065a012>.
 - 10- Khosravi M. 2007. Petroleum chemistry. university of Tehran, Tehran. (In Persian)
 - 11- Lau E., Gan S., Kiat H., and Poh P. 2014. Extraction agents for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from soil in soil washing technologies. *Environmental Pollution* 184: 640-649. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.09.010>.
 - 12- Liu J. 2018. Soil remediation using soil washing followed by ozone oxidation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 65: 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.05.001>.
 - 13- Mulligan C., and Eftekhari F. 2003. Remediation with surfactant foam of PCP contaminated soil. *Engineering Geology* 70(3-4): 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00095-4).
 - 14- Mehrasbi M., Shareat M., Haghghi B., and Ranjbar D. 2006. Biological cleaning of soils contaminated with ethyl gasoline. telogen and naphthalene, *Scientific Journal of Zanjan University of Medical Sciences* 14(54): 17-23. (In Persian with English abstract). <https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5190-fa.html>.
 - 15- Melali A., Abasi M., Afyoni M., and Khosh Gofar A. 2011. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon in isfahan refinery wastewater sludge. *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources* 15(56) :155-167. (In Persian with English abstract). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1715-fa.html>.
 - 16- Peng S., Wu W., and Chen J. 2011. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing : influencing factors and removal effectiveness. *Chemosphere* 82(8): 1173-1177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.11.076>.
 - 17- Park B., and Son Y. 2017. Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils. *Ultrasonic Sonochemistry* 35: 640-625. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.002>.
 - 18- Sherwood P.M.A. 1972. Vibrational spectroscopy of solids. university of Newcastle upon tyne, Newcastle.
 - 19- Salehian A. 2008. Cleaning of diesel contaminated soils with the help of detergents. Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian with English abstract)
 - 20- Shah S., Jamroz N., and Sharif Q. 2011. Micellization parameters and electrostatic interactions in micellar solution of sodium dodecyl sulfate at different temperatures. *Physicochemical and Engineering Aspects* 178: 199-206. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00697-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00697-X).
 - 21- Urum K., Pekdemir Y., and Copur M. 2003. Optimum conditions for washing of crude oil contaminated soil with biosurfactants solutions. *Process Safety and Environmental Protection* 81(3):203-209. <https://doi.org/10.1205/095758203765639906>.
 - 22- Urum K., Pekdemir T., and Copur M. 2004. Surfactants treatment of crude oil contaminated soils. *Journal of Colloid and Interface Science* 276: 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.057>.
 - 23- Wang G., Zhang S., and Vigver M.G. 2018. Effect of soil washing with biodegradable chelators on the toxicity of residual metals and soil biological properties. *Science of the Total Environment* 625: 1021-1029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.019>.
 - 24- Yang K., and Zho L. 2006. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solution of TX100 and SDBS. *Environmental Science Technology* 40(13): 4274-4280. <https://doi.org/10.1021/es060122c>.
 - 25- Zhoe W., and Zhu B. 2008. Enhanced soil flushing of phenanthrene by anionic-nonionic mixed surfactants. *Water Research* 42(2): 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.7.021>.