

بررسی تاثیر آلودگی های نفتی قابل توجه بر روی خواص مکانیکی خاک های ریزدانه

محمد شیردل^۱، مسعود مکارچیان^{۲*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، mts_sh14@yahoo.com

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، makarchian@yahoo.com

چکیده	اطلاعات مقاله
آبراهه های منطقه به خصوص دریای خلیج فارس و عمان، روزانه شاهد عبور نفت کش های گول پیکر است. به علت استخراج نفت در مناطق نفتی، جنگ های رخ داده در منطقه، وقوع حوادث غیرمترقبه و بروز انفجارهای مختلف، مناطق جنوبی ایران آلوده به مشتقات نفتی است. در این مقاله، تاثیر حضور آلودگی های نفت خام و گازوییل بر روی خاک ریزدانه رسی و تاثیر آن بر سازه های ساحلی بررسی شده است. بدین منظور علاوه بر آزمایش های مقدماتی، هیدرومتری، برش مستقیم، مقاومت فشاری محدود نشده و جامدسازی بر روی خاک های آلوده انجام شد. مشخص گردید، حضور بیش از بیست درصد مشتقات نفتی بر روی خاک ریزدانه رسی، منجر به کاهش فاحش مقاومت برشی خاک می گردد که برای بستر سازه های ساحلی و سازه های مناطق نفتی، خطر جدی تلقی می شود. همچنین با استفاده از سیمان تیپ دو با ده درصد وزنی، علاوه بر افزایش نسبی مقاومت می توان از حرکت آلودگی در آب و لایه های زیر زمینی خاک نیز جلوگیری نمود.	نارنجیه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳ کلمات کلیدی: سازه ساحلی آلودگی خاک گازوییل نفت خام جامدسازی

Investigation of the Impact of Considerable Oil Contamination on Mechanical Properties of Fine-Grained Soils

Mohammad Shirdel¹, Masuod Makarchian^{2*}

¹ M.Sc. Graduated, Geotechnical Engineering, Civil Engineering Department, University of Bu-Ali-Sina; mts_sh14@yahoo.com

² Assistant Professor of Civil Engineering Department, Bu-Ali Sina University; Hamedan, makarchian@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Feb. 2020
Accepted: 24 Oct. 2020

Keywords:
Coastal Structures
Soil pollution
Gas oil
Crude Oil
Solidification

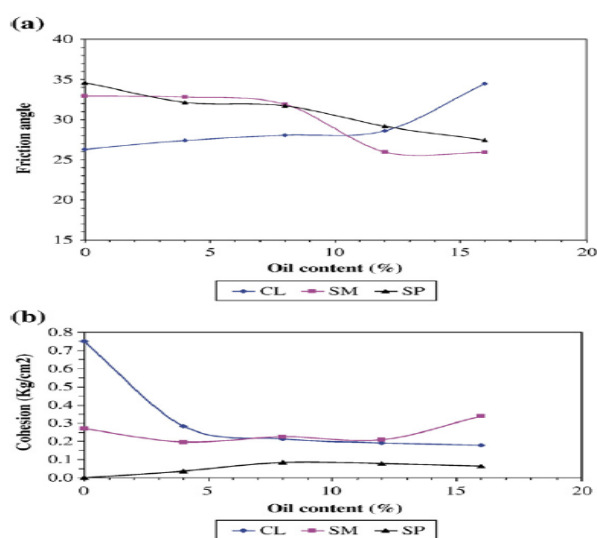
ABSTRACT

The regional waterways, especially Persian Gulf and Oman Sea, are witnessing the passage of giant oil tankers daily. Due to oil extraction in the oil fields, wars in the region, unexpected incidents, and various explosions, southern areas of Iran are contaminated with oil derivatives. In this paper, the impact of crude oil and gas oil contamination on clayey fine soil and its impact on coastal structures is investigated. For this purpose, in addition to preliminary tests, hydrometer test, direct shear test, unconfined compressive strength and solidification were carried out on contaminated soils. It was found that the presence of more than 20% of petroleum derivatives on clayey soil leads to a sharp decrease in soil shear strength, which is considered as a serious risk for the coastal structures and oil field structures. Also, by using type II cement with 10% of dry soil weight, in addition to the relative increase in soil strength, it can also prevent the movement of contamination in water and soil substrates.

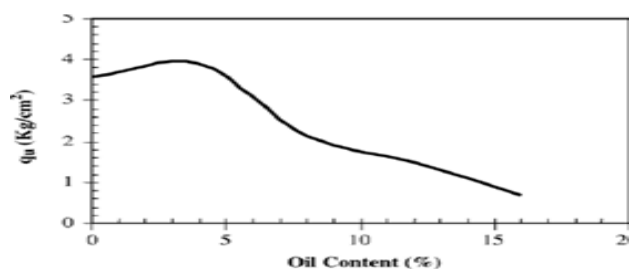
دارد. با توجه به این که این تغییرات در مشخصات مهندسی خاک می تواند باعث تغییر در مقاومت، نشست و ایجاد تغییر شکل در خاک ها شود و نیز حذف مواد آلوده کننده امری پرهزینه، زمان بر و در برخی موارد با توجه به وجود سازه ها غیرممکن است، بنابراین بررسی رفتار خاک آلوده، برای استفاده از آن در پروژه های مهندسی امری ضروری است. از حدود سی سال قبل، تحقیقات گسترده ای بر روی نشست مواد نفتی و مشتقات آن به درون خاک و بستر خاکی

۱ - مقدمه

آلودگی های نفتی در خاک های دانه ای، باعث تغییر خصوصیات فیزیکی و در خاک های چسبنده، باعث تغییر در بافت و ساختار خاک می شود. پایداری و مقاومت خاک های آلوده به نفت برای پی سازه ها، مخازن نفتی، لوله های انتقال نفت، پایداری شیب های خاکی و از جمله برای بررسی پایداری سازه های دریایی و ساحلی اهمیت



شکل ۱- تأثیر آلودگی بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در خاک‌های CL و SP، SM (خامه‌چیان و همکاران، ۲۰۰۷)



شکل ۲- تأثیر افزایش مقدار آلودگی بر مقاومت فشاری محدود نشده روی نمونه‌های خاک CL (خامه‌چیان و همکاران، ۲۰۰۷)

خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) بررسی ژئوتکنیکی ماسه آلوده به نفت را انجام داده و کاهش مقاومت و نفوذپذیری این خاک‌ها را گزارش نمودند. سینگ^۶ و همکاران (۲۰۰۹) نیز افزایش پنجاه درصدی نشست خاک‌های نرم آلوده به هیدروکربورهای نفتی را مشاهده کردند. خسروی (۱۳۸۹) اثر آلاینده‌های نفتی را بر پایداری بستر رسی مخازن نفتی بررسی کرد. وی دریافت که آلودگی با گازوییل، باعث افزایش مقاومت برشی می‌گردد و از این رو تاکید کرد که استفاده از این مصالح به‌عنوان مصالح راه مناسب است. کرمانی و عبادی (۲۰۱۲) افزایش زاویه اصطکاک و حداکثر دانسیته خشک و حدود اتربرگ را در صورت وجود نفت خام گزارش کردند. خسروی و همکاران (۲۰۱۳) خصوصیات ژئوتکنیکی کائولینیت آلوده به گازوییل را بررسی کردند، همچنین بررسی شمع‌های موجود در ماسه‌های آغشته به نفت نیز توسط نصر (۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفت. ابوسنینا^۷ و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی تأثیر آلودگی نفت خام در روانی ملات ماسه و سیمان دریافتند که با افزایش آلودگی، کارایی نمونه ملات افزایش می‌یابد و نفت خام مانند روان‌کننده عمل می‌کند. این موضوع توسط دانشمندان مختلفی در

سازه‌های مختلف، انجام گرفته است. وقوع حوادث غیرمترقبه و جنگ‌ها در سال‌های اخیر منجر به پخش وسیع آلودگی‌های نفتی در سواحل کشور شده است. انفجار در نفت‌کش سانچی، انفجار در نفت‌کش‌های بندر فجیره، حمله به خطوط انتقال نفت در شرق عربستان، شکایت سازمان محیط زیست ایران از پالایشگاه شهید تندگویان به سبب نشست بسیار زیاد نفت به پایین‌دست پالایشگاه و چاه‌های آب شرب و مزارع مناطق روستایی و حمله به نفت‌کش‌های مستقر در دریای عمان، همگی حوادثی است که در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ رخ داده است. باید به لیست موارد مطرح شده، ده‌ها حادثه در سال‌های گذشته را نیز اضافه کرد. کوک^۱ و همکاران (۱۹۹۲) مقاومت ماسه‌های آلوده به نفت را بررسی کردند. آنان بیان کردند که اگرچه تأثیر آلودگی در درصد‌های کم آن زیاد نیست؛ اما زاویه اصطکاک داخلی را کاهش داده و فشردگی‌پذیری را افزایش می‌دهد. پوری^۲ و همکاران (۱۹۹۴) و میگو و راتناویرا^۳ (۱۹۹۴) نیز نتایج مشابهی به‌ترتیب برای ماسه و خاک رس به‌دست آوردند. اوگین و داس^۴ (۱۹۹۲) آزمایش سه‌محوری را بر روی ماسه تمیز و آلوده انجام دادند و دریافتند که اشباع کامل با مشتقات نفتی باعث کاهش شدید زاویه اصطکاک داخلی دو ماسه سست و متراکم می‌شود. السند و اسماعیل^۵ (۱۹۹۲) افزایش مقاومت ماسه آلوده به نفت کویت را با گذشت زمان و کاهش میزان نفت گزارش کرده‌اند. گیتی پور و همکاران (۱۳۸۱) با آزمایش‌های مختلف صحرایی و آزمایشگاهی، میزان آلودگی خاک‌های اطراف پالایشگاه‌ها را بررسی کردند. خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) پارامترهای مقاومت خاک را از طریق آزمایش برش مستقیم بررسی کردند. این آزمایش به‌منظور تعیین تأثیر آلودگی بر پارامترهای مقاومت خاک‌های آلوده صورت گرفته است. در شکل ۱ نتایج این آزمایش‌ها نشان داده شده‌اند. در شکل (a) تأثیر آلودگی بر زاویه اصطکاک و در شکل (b) تأثیر آلودگی بر میزان چسبندگی برای خاک‌های SM، SP و CL نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آلودگی در خاک CL، مقدار زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد؛ اما برعکس در خاک‌های SM و SP با افزایش آلودگی این پارامتر کاهش می‌یابد. همچنین چسبندگی برای خاک CL با افزایش آلودگی کاهش و برای خاک‌های SM و SP افزایش می‌یابد. همچنین آنان آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده را بر روی نمونه‌های خاک CL انجام دادند. در این آزمایش‌ها از درصد‌های وزنی نفت نسبت به خاک خشک از ۴ تا ۱۶ درصد استفاده شده است. در شکل ۲ نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آلودگی، مقاومت فشاری محدود نشده کاهش می‌یابد.

آزمایش تراکم استاندارد نیز بررسی گردیده و نتایج مشابهی حاصل گردیده است. محمدی و همکاران (۲۰۱۸) رفتار رواناب را در خاک در حضور آلودگی نفت سفید و گازوییل بررسی کردند. آنان بیان کردند که تغییرات هیدرولوژیکی خاک آلوده، تاثیر زیادی در افزایش رواناب در پی دارد. بنابراین باید در خصوص خاک‌های آلوده نفتی و تاثیرات هیدرولوژیکی آن مطالعات گسترده‌تری صورت گیرد. وی و همکاران (۲۰۱۹) بر روی رس اصلاح شده توسط خاکستر شیل نفت، برای استفاده در پروژه‌های راهسازی، ارزیابی زیست‌محیطی انجام دادند.

در سال‌های گذشته استفاده از فرآیند تثبیت، جامدسازی به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل آلودگی‌های مختلف و کاهش هزینه‌های حذف آنها در نظر گرفته شده است. از سال ۱۹۵۰ استفاده از این فرآیند برای کنترل پسماند رادیو اکتیو در نظر گرفته شده است. از سال ۱۹۷۰ زباله‌های خطرناک در آمریکا، با استفاده از این فرآیند کنترل شده است (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۸۲، ۱۹۹۳، ۲۰۰۰، ۲۰۰۹). این فرآیند در حقیقت راهکاری برای جلوگیری از شستشوی آلودگی و نفوذ آلودگی به لایه‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش صرفاً به دنبال بهره‌گیری از فرآیند جامدسازی و بررسی آزمایشگاهی گسترده این موضوع نیست؛ بلکه بررسی مختصر این روش به‌عنوان راهی برای کنترل شستشوی آلودگی و استفاده از خاک آلوده به‌عنوان مصالح ساختمانی جایگزین در جهت بهبود رفتار خاک آلوده به مواد نفتی در برخی پروژه‌های راهسازی است. در صورتی که بهبود عملکرد خاک در برخی از درصدهای حضور آلودگی مشاهده شود و امکان استفاده از خاک آلوده به‌عنوان مصالح جایگزین اثبات گردد؛ راهکار کنترل شستشوی آلودگی در مصالح راهسازی، بهره‌مندی از فرآیند تثبیت و جامدسازی است. امینی و همکاران (۲۰۰۸) برای اولین بار در ایران ضایعات لجن آبیگری شده از تصفیه فاضلاب نیروگاه حرارتی را به‌وسیله سیمان، جامدسازی و تثبیت نمودند. آنان در گزارش خود بیان کردند که با استفاده از این روش، تا ۹۵ درصد از شستشوی آلودگی فلزات سنگین جلوگیری نمودند. محبی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از سیمان پرتلند تیپ دو، برخی مواد شیمیایی خطرناک موجود در نمونه‌های خاک پالایشگاه تهران تثبیت کردند. آنان بیان داشتند ترکیب ۳۰ درصد سیمان با بنتونیت ۲۰ درصد اصلاح شده، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری محدود نشده در خاک آلوده می‌گردد. اولواتونی^۸ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از آهک و سیمان، جامدسازی خاک کائولینیت آلوده به نفت خاک را انجام دادند. نتایج آنان در دوره‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مؤید افزایش تمامی پارامترهای مقاومتی خاک است.

در بررسی‌های محققان خارجی و داخلی، بیشتر مطالعات به پیروی از دانشمندان پیشرو در دهه‌های گذشته، معطوف به حضور آلودگی

های نفتی در درصدهای کم و زیر بیست درصد است؛ این در حالی است که دو ایراد عمده در خصوص مطالعه و تحقیق بر روی درصدهای کم آلودگی، به‌خصوص در ایران وجود دارد:

۱- فرسودگی برخی سامانه‌های ذخیره، انتقال و پالایش نفت به دلیل قدمت واحدهای صنعت نفت در ایران و همچنین وقوع حوادث غیرمترقبه موجب گردیده میزان نشت مواد نفتی، به‌مراتب بیش از میزان مورد تحقیق پژوهشگران داخلی و خارجی باشد. در همین راستا به دو نمونه ذیل اشاره می‌شود:

— پالایشگاه نفت آبادان با ظرفیت تولید نفت در حدود ۶۳۰ هزار بشکه در ابتدای انقلاب اسلامی، در دوران جنگ تحمیلی مورد تهاجم عراق قرار گرفت و به‌کلی تخریب شد. تمامی نفت و فرآورده‌های نفتی طعمه حریق و تبخیر شد و یا به زمین نفوذ کرد. با بررسی میزان آلودگی خاک‌های سایت پالایشگاه و اطراف آن، میزان اشباع خاک به نفت از ۲۰ تا ۸۵ درصد گزارش شده و به‌طور کلی میانگین مقدار مواد نفتی در خاک به میزان ۵۲ درصد از حجم فضای بین دانه‌ای بیان گردیده است (دادالهی، ۱۳۹۳).

۲- امکان همگن‌سازی خاک بخصوص خاک‌های رسی همانند کائولینیت و بنتونیت در حضور درصدهای کم آلودگی بسیار دشوار است. همگن‌سازی خاک بسیار خمیری همانند بنتونیت، با دو درصد گازوییل، در شرایطی که بنتونیت جاذب بسیار قوی محسوب می‌گردد، تقریباً امکان‌پذیر نیست و این موضوع موجب بروز خطای عمده در آزمایش بر روی این نمونه آلوده می‌گردد و نتایج تحقیقات این چنینی چندان قابل اتکا نیست. با توجه به ضرورت پژوهش بر روی خاک‌های ریزدانه رسی و به جهت ضعف بررسی‌های انجام شده، آزمایش‌های متعددی بر روی خاک ریزدانه کائولینیت در حضور دو نوع آلودگی گازوییل و نفت خام انجام شد.

در این پژوهش در راستای انجام آزمایش‌های دقیق مطابق موارد نشت در ایران، برای نخستین بار از خاک پالایشگاه شهید تندگویان نمونه استخراج و درصدهای زیاد آلودگی برای انجام آزمایش‌های گسترده ریزساختاری و مکانیکی انتخاب گردید. همچنین بررسی جامدسازی آلودگی توسط سیمان در حضور درصدهای زیاد آلودگی انجام گردید که امکان استفاده از خاک آلوده را در حضور سیمان برای استفاده به‌عنوان مصالح راهسازی، مطرح می‌نماید. با جامدسازی آلودگی، امکان انتقال آلودگی از طریق لایه‌های زیرزمینی به منابع آب شهری متوقف شده و خطرات ناشی از آلودگی نفتی سواحل کاهش می‌یابد. در پژوهش‌های محققان داخلی، عطف به تحقیقات خارجی و نشت اندک در برخی کشورها، عموم تحقیقات بدون بررسی‌های میدانی در درصدهای کم به‌انجام رسیده است. حال آنکه به علل مختلف موارد نشت در ایران بسیار گسترده‌تر و در درصدهای زیاد مشاهده گردیده است. همچنین در تحقیقات محققان پیشین، امکان استفاده از خاک آلوده نفتی در راهسازی



شکل ۳- دستگاه مخلوط‌کن آسفالت

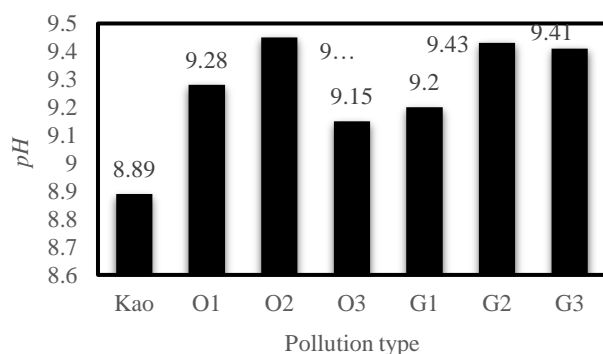
بنابراین یک نمونه خاک بدون آلودگی به‌عنوان نمونه شاهد، سه نمونه آلوده به نفت خام و سه نمونه آلوده به گازوییل و در مجموع هفت نمونه خاک در این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱ تاثیر آلودگی بر رفتار ریزساختاری کائولینیت

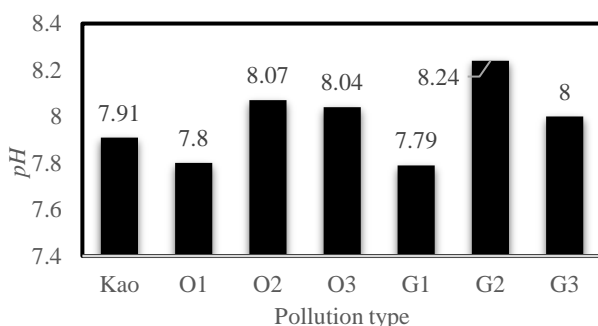
برای اطمینان از تاثیر یا عدم تاثیر آلودگی بر ویژگی‌های ریزساختاری و تغییرات شیمیایی، دو آزمایش *XRD* همچنین *pH* بر روی هفت ترکیب مختلف انجام گردید. در صورتی که حضور آلودگی در ساختار خاک تغییر ایجاد نماید، نیاز است تا آزمایش‌های بیشتر و جزئی‌تری روی ترکیبات صورت گیرد.

۲-۱-۱ آزمایش تعیین *pH*

این آزمایش طی ۲۴ ساعت اول و همچنین بعد از گذشت ۲۸ روز مجدداً جهت بررسی دوام آلودگی تکرار گردید. در شکل‌های ۴ و ۵ میزان *pH* مشخص است.



شکل ۴- میزان *pH* در هفت ترکیب مختلف در ۲۴ ساعت اول



شکل ۵- میزان *pH* در هفت ترکیب مختلف در روز ۲۸م

صرفاً به‌عنوان فرضیه مطرح گردیده، اما در این تحقیق با آزمایش‌های انجام شده، این امکان به‌وضوح مطرح می‌گردد. در پایان با انجام آزمایش جامدسازی برای سواحل آلوده نفتی، امکان انتقال آلودگی به سفره‌های زیر زمینی کاهش می‌یابد که برای سواحل آلوده، قابل پیاده‌سازی است.

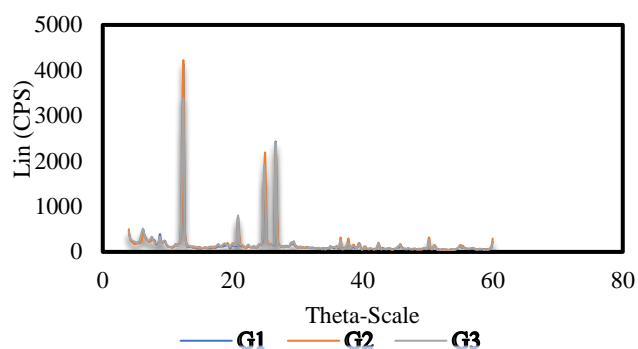
۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور یافتن درصد مناسب هیدروکربن‌های نفتی جهت مخلوط کردن با خاک کائولینیت و برای یافتن درصدی که مطابق موارد نشت در ایران باشد، از خاک گمانه‌های موجود در بالادست پالایشگاه شهید تندگویان تهران که در گزارش‌های مختلف زیست‌محیطی به موارد گسترده نشت آن منطقه اشاره شده بود، دو نمونه استخراج گردید. نمونه‌ها برای بررسی دقیق به پژوهشگاه صنعت نفت ایران ارسال گردید و نتایج به‌صورت درصد وزنی با انجام آزمایش TPH مشخص گردید. برای کاربرد راحت‌تر در پژوهش ترکیبات آلودگی با گازوییل با نماد (G) و ترکیبات آلودگی با نفت خام با نماد (O) در نتایج پژوهش معرفی می‌گردند. به‌عنوان مثال نماد O3 بیانگر ترکیب سی‌درصد وزنی نفت خام و G3 بیانگر ترکیب سی‌درصد گازوییل و خاک کائولینیت است. همچنین نماد Kao معرف خاک کائولینیت خالص و بدون آلودگی است.

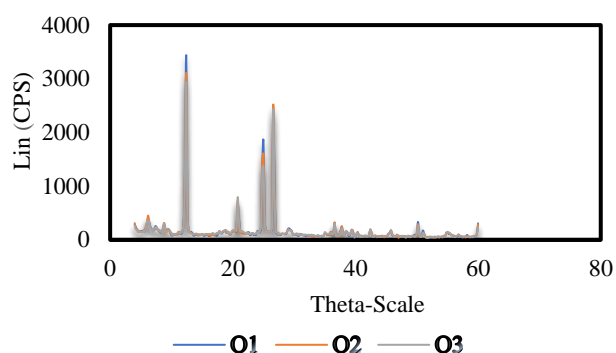
جدول ۱- تعیین میزان آلودگی خاک پالایشگاه شهید تندگویان

نام آزمایش	روش استاندارد	خاک خالص	خاک آلوده
درصدوزنی مواد هیدروکربنی	St. Method 5520 B, D, F	٪۰/۰۲	٪۱۱

همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشخص است، در نمونه‌های ارسالی از محل بالادست پالایشگاه شهید تندگویان تهران ۱۱ درصد آلودگی نفتی به‌عنوان حداقل آلودگی برآورد گردید. خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها، خاک کائولینیت موجود در منطقه زون استان آذربایجان شرقی است. دو نوع آلودگی برای بررسی شامل، نفت خام و گازوییل به ترتیب از پالایشگاه اراک و جایگاه‌های عرضه سوخت شهری تهیه شد. دو آلودگی نفت خام و گازوییل به‌عنوان آلودگی‌های مورد بحث در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ انتخاب شدند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ۵۰۰ گرم خاک کائولینیت با درصدهای وزنی خشک آلودگی، ابتدا ۱۵ دقیقه به‌صورت دستی، به‌خوبی مخلوط شده سپس با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن آسفالت، ۲۴۰۰ دور معادل نیم ساعت به‌خوبی هم‌زده شده است. سپس به نمونه‌ها در نایلون‌های در بسته به مدت یک هفته برای اختلاط کامل و احیاناً واکنش‌های شیمیایی فرصت داده شد. در شکل ۳ دستگاه مخلوط‌کن آسفالت قابل مشاهده است.



شکل ۶- مقایسه نمودارهای XRD در حضور درصدهای مختلف آلودگی گازوییل



شکل ۷- مقایسه نمودارهای XRD در حضور درصدهای مختلف آلودگی نفت خام

جدول ۲ - جدول تعیین میزان آلودگی خاک پالایشگاه شهید تندگویان

نام خاک براساس طبقه‌بندی یکنواخت	CL
pH	۷/۹۱
درصد رطوبت اولیه	۱/۱۰
LL (درصد)	۴۲/۸۳
G _s	۲/۶۳
درصد رطوبت بهینه	۲۰/۹۵
وزن مخصوص خشک حداکثر (گرم بر سانتی مترمکعب)	۱/۵۹

۲-۲ آزمایش هیدرومتری

مطابق با استاندارد شماره ASTM D 421-58 & D 422-63، آزمایش هیدرومتری بر روی هفت نمونه خاک، از محلول ۴ درصد هگزامتافسفات سدیم استفاده شد که این محلول مناسب خاک‌های قلیایی است.

۳-۲ آزمایش برش مستقیم

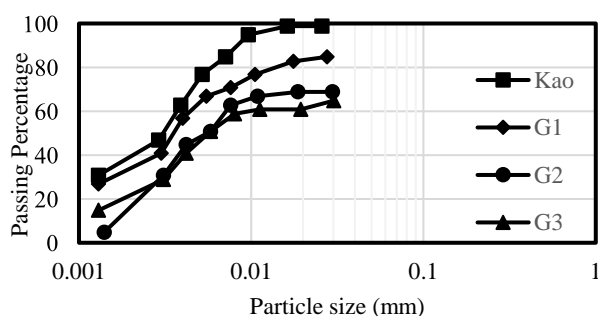
آزمایش برش مستقیم بر مبنای استاندارد شماره ASTM D 3080-90 بر روی هفت نمونه خاک و روی هر نمونه سه آزمایش انجام گردید و به جهت حساسیت و وجود خطا در این آزمایش برای خاک‌های ریزدانه، آزمایش برای هر نمونه دو بار دیگر تکرار گردید.

همان‌طور که مشخص است، میزان pH نسبت به حالت بدون آلودگی در حضور گازوییل و نفت خام افزایش یافته است. در بیست درصد حضور آلودگی، بیشترین میزان جذب آلودگی در ماکرو حفرات مشاهده می‌شود و بعد از آن مجدداً به جهت وجود مازاد آلودگی روند کاهش می‌یابد. با گذشت مدت زمان، میزان pH در ترکیب‌های شش گانه کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که با گذشت زمان ترکیبات آلوده بیشتر جذب رس شده و pH بیشتر افت می‌کند که این افت به منزله کاهش بیشتر بار منفی رس و کم بودن ظرفیت بافرینگ آن خاک است. در حقیقت با کاهش بار منفی رس، رفتار رس به لای تبدیل می‌گردد. البته یکی دیگر از علل این موضوع می‌تواند به دلیل لرزاندن مجدد نمونه‌ها و گرم شدن آن‌ها و در نهایت خروج آلودگی به صورت گاز در هنگام آزمایش و باز شدن فاکلونها باشد. مشاهده می‌شود که با گذشت ۲۸ روز، از میزان آلودگی حدود ۱/۵ واحد کاسته شده است؛ اما این میزان به ناحیه اسیدی وارد نشده است. بنابراین نیاز به بررسی روی CEC خاک وجود ندارد. چون تغییر در حالت از بازی به اسیدی رخ نداده است.

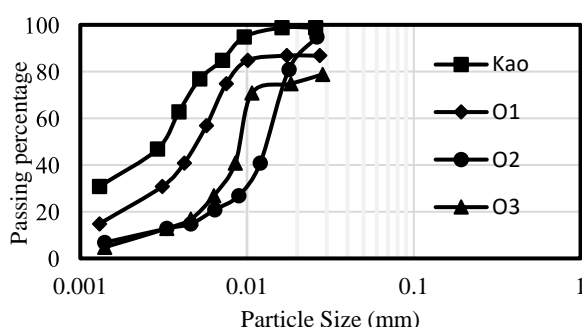
۲-۱-۲ آزمایش XRD

با توجه به مفاهیم قانون براگ (هیچ دو کانی دارای فاصله یکسان صفحات گسترش اتم‌ها در سه جهت نیستند)، که اساس شناخت کریستال‌ها و کانی‌های مختلف به کمک نتایج آزمایش اشعه ایکس است؛ برای بررسی تکمیلی بر روی تأثیر یا عدم تأثیر ترکیب آلودگی‌های مشتقات نفتی با خاک کائولینیت روی ویژگی‌های ریزساختاری و تغییر ساختار، آزمایش XRD انجام شد. در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج آزمایش‌ها قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قله‌ها در حضور درصدهای مختلف آلودگی تغییر عرضی پیدا نمی‌کنند؛ اما تشدید قله ۲۰ درصد در این آزمایش، به معنی افزایش قطر دانه‌ها به صورت محدود است و این بدان معناست که تغییرات در کانی و هویت اصلی رس در حضور آلودگی رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر، تأثیر آلودگی‌های نفتی بر روی خاک‌های کائولینیت بیشتر در حوزه ساختار فیزیکی است و این تأثیر در ویژگی‌های ریزساختاری بسیار محدود است. بنابراین از بررسی‌های بیشتر ریزساختاری در این پژوهش صرف‌نظر گردیده است.

در این پژوهش، تعدادی آزمایش اولیه برای تعیین ویژگی‌های ساختاری خاک کائولینیت در حضور آلودگی‌های نفتی گازوییل و نفت خام انجام شد. در جدول شماره ۲ نتایج آن قابل مشاهده است.



شکل ۹- منحنی دانه‌بندی ترکیبات مختلف گازوییل و کائولینیت



شکل ۱۰- منحنی دانه‌بندی ترکیبات مختلف نفت خام و کائولینیت
جدول ۳ - درصد‌های رس و لای در حضور آلودگی گازوییل

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در درصد‌های بیشتر ترکیبات آلوده رفتار خاک‌ها و منحنی دانه‌بندی آن‌ها عمودی‌تر می‌شود و این بدان معناست که محدوده دانه‌بندی محدودتر گردیده و فاقد بخش‌های قبلی گردیده است. همچنین جهت تقعر از حالت بدون آلودگی تا حالت با آلودگی بیست درصد عوض می‌شود و این به معنای درشت‌تر شدن اندازه دانه‌ها است. همان‌طور که در جدول‌های ۳ و ۴ نیز مشاهده می‌شود، درصد لای در مقایسه با رس، با افزایش آلودگی نفت خام و گازوییل افزایش می‌یابد. در حقیقت خاک کائولینیت در حضور آلودگی نفتی، درشت‌دانه‌تر رفتار می‌نماید و میزان عمده اندازه رس موجود به اندازه لای تبدیل شده است که اندازه بزرگ‌تری نسبت به رس دارد. ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ mm، سیلت یا لای نامگذاری می‌شوند.

جدول ۳ - درصد‌های رس و لای در حضور آلودگی گازوییل

نوع آلودگی	درصد رس (%)	درصد لای (%)
Kao	۳۷/۸۰	۶۲/۲۰
G1	۳۲/۶۰	۶۷/۴۰
G2	۱۴/۳۰	۸۵/۷۰
G3	۲۰/۰۰	۸۰/۰۰

در شکل یک نمونه ۱۰×۱۰ cm از نمونه خاک با آلودگی نفت خام سی درصد قابل مشاهده است.



شکل ۸- نمونه خاک با سی درصد نفت به همراه چکش و قالب

۴-۲ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده طبق استاندارد شماره ASTM D 2166-87 بر روی هفت نمونه خاک در بازه ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام گردید. برای انجام این آزمایش متناسب با رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر هر نمونه، به خاک‌ها رطوبت اضافه شده و متراکم شدند. در این آزمایش برای هر نمونه خاک آلوده ۴ نمونه ساخته شده و این ۴ نمونه طی دو مرحله در روز هفتم و روز بیست و هشتم مورد آزمایش قرار گرفت.

۵-۲ آزمایش جامدسازی

به‌منظور تثبیت آلودگی و بررسی تأثیر افزودنی سیمان برای افزایش مقاومت خاک آلوده جهت استفاده در بستر راهسازی و همچنین جلوگیری از حرکت سیال در بسترهای آلوده به مشتقات نفتی روش تثبیت خاک آلوده به سیمان انتخاب گردید. هفت نمونه خاک به همراه ۵ و ۱۰ درصد سیمان مخلوط شده و در روز هفتم و بیست و هشتم تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفت تا تأثیر سیمان روی جامدسازی نمونه‌ها مشخص گردد. بدین ترتیب ۵۶ نمونه برای آزمایش جامدسازی آماده گردید.

۳- نتایج آزمایش‌ها

۱-۳ آزمایش هیدرومتری

آزمایش هیدرومتری به منظور یافتن جواب قابل اتکا دو بار برای هر ترکیب و در مجموع ۱۴ بار انجام شد. با توجه به نتایج آزمایش pH، از محلول هگزامتافسفات سدیم که ویژه محلول‌های قلیایی است، استفاده شد. نتایج این آزمایش برای نمونه کائولینیت خالص و ترکیبات گازوییل و نفت خام در شکل‌های شماره ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود.

جدول ۴ - درصدهای رس و لای در حضور آلودگی نفت خام

نوع آلودگی	درصد رس (%)	درصد لای (%)
Kao	۳۷/۸۰	۶۲/۲۰
O1	۲۰/۹۰	۷۹/۱۰
O2	۸/۸۰	۹۱/۲۰
O3	۷/۵۰	۹۲/۵

۲-۳ آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی خاک روی هفت ترکیب مختلف انجام گرفت. این آزمایش به رغم سادگی و کاربرد زیاد به خصوص در خاک‌های درشت دانه، نقایصی دارد که قبل از ارائه نتایج، بدان‌ها اشاره می‌گردد:

- در این آزمایش، خاک این فرصت و امکان را که در امتداد ضعیف‌ترین صفحه خود گسیخته شود، نمی‌یابد و بالاجبار در امتداد صفحه بین دو نیم‌جعبه برش گسیخته می‌شود.

- بزرگ‌ترین اشکال این آزمایش، غیرقابل کنترل بودن شرایط زهکشی نمونه است. چون فشار آب حفره‌ای قابل اندازه‌گیری نیست، فقط می‌توان تنش قائم کل را تعیین کرد. این مقدار در صورتی که فشار آب حفره‌ای برابر صفر باشد، با تنش مؤثر قائم برابر خواهد بود. این اشکال به خصوص در این تحقیق به دلیل حضور آلودگی‌های نفتی به صورت سیال، درصد خطا را افزایش می‌دهد. چون ویسکوزیته سیال نفتی و رطوبت آب متفاوت بوده و با گذشت زمان این دو از یکدیگر در بافت خاک جدا می‌شوند.

- نایکنواختی تنش برشی در صفحه گسیختگی.

به همین جهت برای کاهش میزان خطا، بر روی هر ترکیب سه بار این آزمایش تکرار گردید تا مقادیر تا حدودی به واقعیت نزدیک‌تر باشند. آزمایش بر روی نمونه با ابعاد 10×10 cm با بارهای قائم معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم انجام گرفت. در جدول شماره ۵ نتایج این آزمایش قابل مشاهده است.

جدول ۵ - نتایج آزمایش برش مستقیم برای هفت ترکیب مختلف

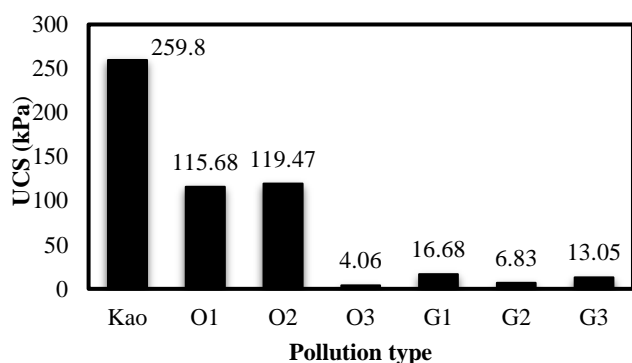
نوع آلودگی	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)
Kao	۲۴/۲۲	۲۶/۶۴
O1	۲۸/۳۰	۲۷/۲۰
O2	۲۷/۹۱	۳۱/۰۰
O3	۲۶/۹۶	۲۳/۷۴
G1	۲۳/۴۰	۲۹/۴۲
G2	۲۲/۵۶	۳۴/۸۳
G3	گسیخته نشد	گسیخته نشد

نتایج حاصل از این آزمایش مطابق نتایج خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) است. بدین معنی که تا حدود ۲۰ درصد حضور آلودگی،

افزایشی در مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی مشاهده می‌شود که مطابق نتایج آزمایش هیدرومتری، به معنی افزایش اندازه دانه‌ها یا قطر بافت فولکوله است. همچنین این نتایج با نتایج کلی خسروی (۱۳۹۱) مطابقت دارد. این گونه می‌توان نتیجه گرفت که تغییر رفتار خاک به سمت رفتار خاک درشت دانه است، به خصوص در زمانی که خاک به صورت همگن آلوده نشود، مانند شرایط طبیعی که نشأت آلودگی یکسان و همگن نیست، رفتار خاک در نواحی مختلف متفاوت بوده و منجر به بروز حوادث مختلفی می‌گردد. به عنوان مثال در این شرایط سرعت نشست و تحکیم خاک در نواحی مختلف یکسان نبوده و خاک زیر سازه‌های ساحلی ممکن است به شکست و واژگونی منجر گردد. البته این نتایج با نتایج آزمایش السند و همکاران (۱۹۹۵) و پوری (۲۰۰۰) در خاک ماسه‌ای، متفاوت است.

۳-۳ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی ۲۸ نمونه ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ها بعد از این که در قالب و با توجه به رطوبت بهینه و آلودگی مد نظر و همچنین میزان وزن مخصوص خشک حداکثر ساخته شدند، با سلفون پوشیده شده و در نایلون‌های زیپ‌دار قرار گرفتند و بعد از هفت و بیست و هشت روز مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل شماره ۱۱، با افزایش آلودگی در برخی ترکیب‌ها افت مقاومت اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های گازویلی این افت بسیار شدیدتر و سریع‌تر اتفاق می‌افتد. یکی از علل این موضوع، خاصیت آب‌گریزی گازوییل است که در ترکیب با آب عمدتاً در بالا و پایین نمونه تجمع کرده و مانع از بروز رفتار همگن نمونه‌ها است.



شکل ۱۱- نتایج هفت ترکیب آلودگی در روز هفتم

همان‌طور که در شکل شماره ۱۲ مشاهده می‌شود، با گذشت ۲۸ روز مقاومت شش نمونه آلوده، نسبت به روز هفتم، افزایش یافته است. این در حالی است که در نمونه بدون آلودگی بعد از گذشت ۲۸ روز، مقاومت تقریباً ثابت باقی مانده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افت رطوبت از طریق آب به افزایش مقاومت کمکی نکرده و این افزایش مقاومت، ناشی از تبخیر مشتقات نفتی در شش نمونه آلوده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش

در حقیقت با جامدسازی، جلوی حرکت سیال نفتی و آلوده سازی سواحل گرفته می‌گردد. در جدول شماره ۶ نتایج این آزمایش برای تمام نمونه‌ها قابل مشاهده است.

همان‌طور که در نتایج آزمایش در شکل شماره ۱۳ مشخص است، ده درصد سیمان قابلیت کنترل و جامدسازی قابل قبولی دارد. در حقیقت می‌توان گفت با گذشت ۱۴ روز و در حضور ۱۰ درصد سیمان، نشت و جریان سیال آلودگی از حرکت باز می‌ایستد و خاک تقریباً به حالت جامد در می‌آید و بدین صورت از آلودگی بخش بیشتری از خاک، جلوگیری به عمل می‌آید. این روش، قابلیت برای کنترل آلودگی و نه حذف آن است. نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش سانچی و شروف (۲۰۰۲) مطابقت دارد با این تفاوت که آنان در گزارش نهایی خود از ترکیب آهک و سیمان و خاکستر بادی استفاده کرده بودند که وجود پنج درصد سیمان در آن ترکیب بهینه ارزیابی شده بود. همچنین نتایج این آزمایش با پژوهش ابوسینا و همکاران (۲۰۱۶) و اولواتونی^۹ و همکاران (۲۰۲۰) نیز به صورت کلی همخوانی دارد، چرا که افزایش تحقیقات آنان نیز در ۱۴ روز بیانگر افزایش دو برابری مقاومت است.

جدول ۶ - نتایج آزمایش جامدسازی با سیمان در دو دوره عمل آوری هفت روزه و چهارده روزه

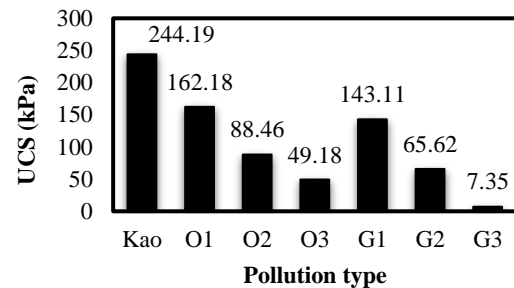
نوع آلودگی	۵٪ سیمان				۱۰٪ سیمان			
	نمونه‌های ۷ روزه		نمونه‌های ۱۴ روزه		نمونه‌های ۷ روزه		نمونه‌های ۱۴ روزه	
Kao	۵۸۷/۷۰	۵۵۴/۰۲	۱۰۷۴/۴۱	۱۰۴۴/۴۱	۱۲۷۲/۲۵	۱۶۳۳/۲۵	-	-
O ₁	۴۴۶/۵۸	۴۱۱/۸۱	۷۵۶/۶۳	-	۲۶۴/۷۱	۷۰۳/۷۰	۶۵۵/۶۱	۸۶۸/۸۸
O ₂	۱۹۷/۲۰	-	۳۷۲/۱۸۵	-	۲۶۱/۵۷	-	۵۹۳/۰۰	-
O ₃	۱۴۴/۰۴	-	۱۶۴/۷۸	-	۱۶۱/۵۷	۱۷۸/۶۴	۲۱۴/۶۴	-
G ₁	۳۹۰/۱۰	۴۲۰/۲۰	۹۱۰/۱	۹۱۷/۲۰	۹۷۷/۴۵	-	۱۰۱۰/۱۰	۹۱۰/۴۰
G ₂	۱۶۷/۸۰	-	۲۱۰/۵	۲۰۵/۷۰	۱۹۴/۹۰۶	۱۶۹/۴۹	۴۵۵/۴۰	-
G ₃	۹۹/۱۰	-	۱۵۰/۴	-	۱۳۸/۵۷	-	۲۸۰/۸۰	-

۴- نتیجه گیری

۱- وجود آلودگی مشتقات نفتی در خاک باعث بروز تغییرات منفی در ویژگی‌های خاک می‌گردد که این تغییرات به دلیل نشت غیرهمگن در سطح و عمق خاک یکسان اعمال می‌گردد و به همین دلیل باعث بروز حوادث فراوانی می‌شود.

۲- وجود آلودگی‌های نفت خام و گازوییل بیش از بیست درصد، باعث افت شدید خواص مقاومتی خاک کائولینیت

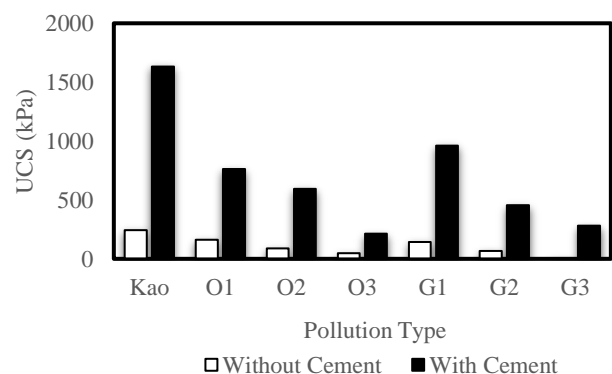
آلودگی، به خصوص آلودگی‌های بیشتر از بیست درصد، در خاک ریزدانه کائولینیت، افت مقاومت بسیار شدید بوده و در نمونه‌های واقعی باید این خطر بالقوه حتماً کنترل گردد. نتایج این آزمایش با نتایج پوری (۲۰۰۰) و خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد.



شکل ۱۲- نتایج هفت ترکیب آلودگی در روز بیست و هشتم

۳-۴ جامدسازی

با استفاده از سیمان تیب دو کارخانه هگمتانه همدان در درصدهای وزنی پنج و ده به وسیله آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای بررسی اثر حضور سیمان در ترکیب آلودگی و خاک کائولینیت، انجام شد. در مجموع ۵۶ نمونه برای این آزمایش ساخته و شکسته شد.



شکل ۱۳- نتایج آزمایش جامدسازی برای سیمان ۱۰ درصد، دوره عمل آوری ۱۴ روزه در مقایسه با نمونه‌های بدون سیمان

with light crude oil, Procedia Engineering, Vol. 145, pp. 250-258.

5- Nasr, A. M. A. (2013). *Uplift Behavior of Vertical Piles Embedded in Oil-Contaminated Sand*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 1, pp. 162-174.

6- Cook, E. E., Puri, V. K. and Shin, E. C. (1992). *Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands*, The Second International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

7- Kermani, M., and Ebadi, T. (2012). *The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils*, Soil and Sediment Contamination, Vol. 21, No. 5, pp. 655-671.

8- Khamchian, M., Charkhabi, A. H. and Tajik, M. (2007). *Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils*, Engineering Geology, Vol. 89, No. 3, pp. 220-229.

9- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R. and Yazdani, H. (2013). *Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite*, Engineering Geology, Vol. pp. 166, 11-16 .

10- Meegoda, N. J., and Ratnaweera, P. (1994). *Compressibility of contaminated fine-grained soils*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No. 1, pp. 101-112.

11- Puri, V. K., Das, B. M., Cook, E. E. and Shin, E. C. (1994). *Geotechnical properties of crude oil contaminated sand. Analysis of Soils Contaminated with petroleum constituents*, ASTM International, pp 75-88.

12- Singh, S. K., Srivastava, R. K. and John, S. (2008). *Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons*, Soil & Sediment Contamination, Vol. 17, No. 3, pp. 290-300.

13- Mohammadi, S., Homaei, M., and Sadeghi, S. H. (2018). *Runoff and sediment behavior from soil plots contaminated with kerosene and gasoil*, Soil and Tillage Research, Vol. 182, 1-9.

14- Wei, H., Zhang, Y., Cui, J., Han, L. and Li, Z. (2019). *Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material*, Construction and Building Materials, Vol. 196, 204-213.

15- Amini, H. R., Saeedi, M. and Baghvand, A. (2008). *Solidification/stabilization of heavy metals from air heater washing wastewater treatment in thermal power plants*, International Journal of Environmental Research, Vol. 2, No. 3, pp. 297-306.

می‌گردد. از این جهت باید سواحل آلوده از جهت میزان آلودگی و درجه خطر بررسی گردند.

۳- افزایش محدود خواص مقاومتی خاک ریزدانه و افزایش اندازه ذرات کائولینیت در درصد خاص بیست درصد، امکان استفاده از خاک آلوده در برخی پروژه‌های مهندسی را امکان‌پذیر می‌نماید.

۴- با افزودن ده درصد سیمان تیپ دو به ترکیب خاک و آلودگی نفتی، می‌توان از حرکت سیال نفتی و آلودگی در سواحل جلوگیری کرد و جامدسازی آلودگی در سواحل جنوبی به‌خصوص مناطق آلوده آن قابل بررسی است.

۵- در نهایت بررسی همه‌جانبه پیرامون تأثیر آلودگی نفتی بر پی و بستر سازه‌های ساحلی امری ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین بررسی تأثیر حضور آلودگی بر سرعت تحکیم خاک‌ها بسیار حائز اهمیت است.

کلید واژگان

- 1- Cook
- 2- Puri
- 3- Meegoda & Ratnaweera
- 4- Evgin & Das
- 5- Al-Sanad & Ismael
- 6- Sing
- 7- Abousnina
- 8- Oluwatuyi

۵- مراجع

- 1- Dadolahi Sohrab, A., Naghdi Dorbati, Z. and Soleymani, A. (2015). *The role of clay as a natural barrier in controlling oil pollution in Abadan refinery*, Proceedings of the First National Conference on Sustainable Development of Sea-Centered, Khorramshahr University of Marine Science & and Technology (In Persian).
- 2- Gitipour, S., Nabi Bidhendi, Gh. and Gorji, M. (2003). *Soil contamination in south Tehran refinery due to oil composition*, Journal of Environmental 34, pp. 39-45 (In Persian).
- 3- Khosravi, A. and Ghasem Zade, H. (2011). *Effect of petroleum pollutants on the stability of the clay of oil tanks*, Master Thesis, Khaje Nasir Toosi University, Tehran (In Persian).
- 4- Abousnina, R. M., Manalo, A. and Lokuge, W. (2016). *Physical and mechanical properties of cement mortar containing fine sand contaminated*

- 16- Mohebbi, M., Gitipour, S., and Madadian, E. (2013). *Solidification/stabilization of cresol-contaminated soil: mechanical and leaching behavior*, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, Vol. 23, No. 8, pp. 783-799.
- 17-Oluwatoyi, O. E., Ojuri, O. O. and Khoshghalb, A. (2020). *Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 160-167.
- 18- USEPA (1982). *Handbook for Remedial Action at Waste Disposal Sites*, Cincinnati.
- 19- USEPA (1993). *Technical Resource Document Solidification/Stabilization and its Application to Waste Materials*, Cincinnati.
- 20-USEPA (2000). *Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites*, Cincinnati.
- 21- USEPA (2009). *Technology Performance Review: Selecting and Using Solidification/Stabilization Treatment for Site Remediation*, Cincinnati.