بررسی تاثیر آلودگی‌های نفتی قابل توجه بر روی خواص مکانیکی خاک‌های ریزدانه

محمد شیردل[۱]، مسعود مکارچیان[۲*]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، mts_sh14@yahoo.com
[۲] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، makarchian@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳

کلمات کلیدی:
سازه ساحلی
آلودگی خاک
گازوییل
نفت خام
جامدسازی

چکیده

آبراهه‌های منطقه به‌خصوص دریای خلیج فارس و عمان، روزانه شاهد عبور نفت کش‌های غول‌پیکر است. به‌علت استخراج نفت در مناطق نفتی، جنگ‌های رخ داده در منطقه، وقوع حوادث غیرمترقبه و بروز انفجارهای مختلف، مناطق جنوبی ایران آلوده به مشتقات نفتی است. در این مقاله، تاثیر حضور آلودگی‌های نفت خام و گازوییل بر روی خاک ریزدانه رسی و تأثیر آن بر سازه‌های ساحلی بررسی شده است. بدین منظور علاوه بر آزمایش‌های مقدماتی، هیدرومتری، برش مستقیم، مقاومت فشاری محدود نشده و جامدسازی بر روی خاک‌های آلوده انجام شد. مشخص گردید، حضور بیش از بیست درصد مشتقات نفتی بر روی خاک ریزدانه رسی، منجر به کاهش فاحش مقاومت برشی خاک می‌گردد که برای بستر سازه‌های ساحلی و سازه‌های مناطق نفتی، خطر جدی تلقی می‌شود. همچنین با استفاده از سیمان تیپ دو با ده درصد وزنی، علاوه بر افزایش نسبی مقاومت می‌توان از حرکت آلودگی در آب و لایه‌های زیر زمینی خاک نیز جلوگیری نمود.

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

Mohammad Shirdel[1], 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

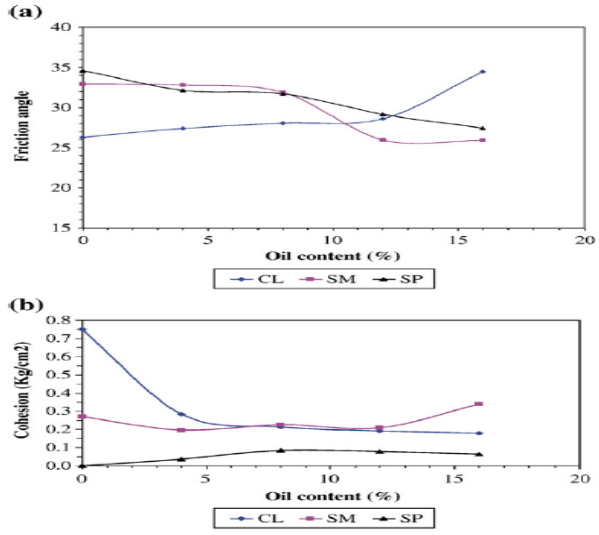
The regional waterways, especially Persian Gulf and Oman Sea, are witnessing the passage of giant oil tankers daily. Due to oil extraction in the oil fields, wars in the region, unexpected incidents, and various explosions, southern areas of Iran are contaminated with oil derivatives. In this paper, 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.

۱ – مقدمه

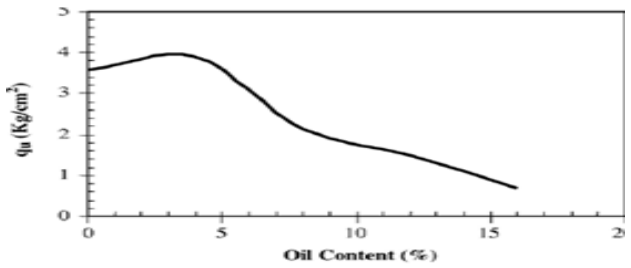
آلودگی‌های نفتی در خاک‌های دانه‌ای، باعث تغییر خصوصیات فیزیکی و در خاک‌های چسبنده، باعث تغییر در بافت و ساختار خاک می‌شود. پایداری و مقاومت خاک‌های آلوده به نفت برای پی سازه‌ها، مخازن نفتی، لوله‌های انتقال نفت، پایداری شیب‌های خاکی و از جمله برای بررسی پایداری سازه‌های دریایی و ساحلی اهمیت دارد. با توجه به این که این تغییرات در مشخصات مهندسی خاک می‌تواند باعث تغییر در مقاومت، نشست و ایجاد تغییر شکل در خاک‌ها شود و نیز حذف مواد آلوده‌کننده امری پرهزینه، زمان‌بر و در برخی موارد با توجه به‌وجود سازه‌ها غیرممکن است، بنابراین بررسی رفتار خاک آلوده، برای استفاده از آن در پروژه‌های مهندسی امری ضروری است. از حدود سی سال قبل، تحقیقات گسترده‌ای بر روی نشت مواد نفتی و مشتقات آن به درون خاک و بستر خاکی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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 نشت 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 میگودا 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 وSP 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.



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



شکل ۲- تأثیرافزایش 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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 لایه های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش صرفاً به‌دنبال 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 آبگیری 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 درایران، 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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 می یابد 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 زنوز 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 آلودگی های 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 مخلوط کن آسفالت قابل مشاهده است.



شکل ۳- دستگاه مخلوط‌کن آسفالت

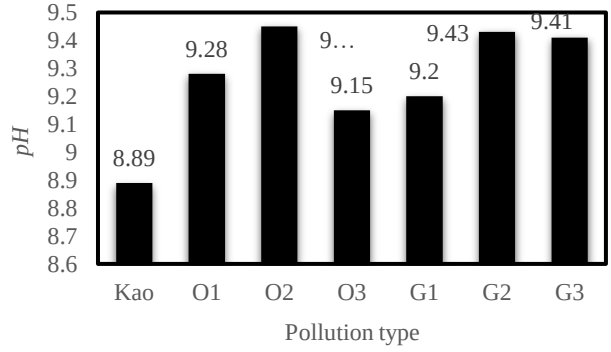
بنابراین یک نمونه خاک بدون آلودگی به‌عنوان نمونه شاهد، سه نمونه آلوده به نفت خام و سه نمونه آلوده به گازوییل و در مجموع هفت نمونه خاک در این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱ تأثیر آلودگی بر رفتار ریزساختاری کائولینیت

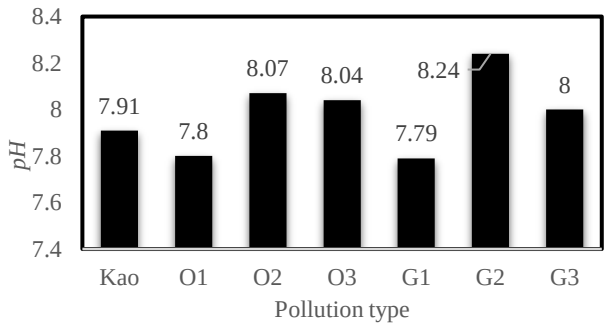
برای اطمینان از تأثیر یا عدم تأثیر آلودگی بر ویژگی‌های ریزساختاری و تغییرات شیمیایی، دو آزمایش *XRD* همچنین *pH*، بر روی هفت ترکیب مختلف انجام گردید. در صورتی که حضور آلودگی در ساختار خاک تغییر ایجاد نماید، نیاز است تا آزمایش‌های بیشتر و جزئی‌تری روی ترکیبات صورت گیرد.

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 ۲۸ام

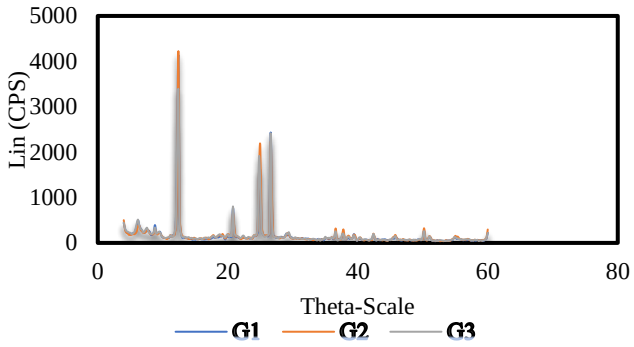
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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 ماکروحفرات 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 به‌صورت گاز در هنگام آزمایش و باز شدن فالکون‌ها 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.

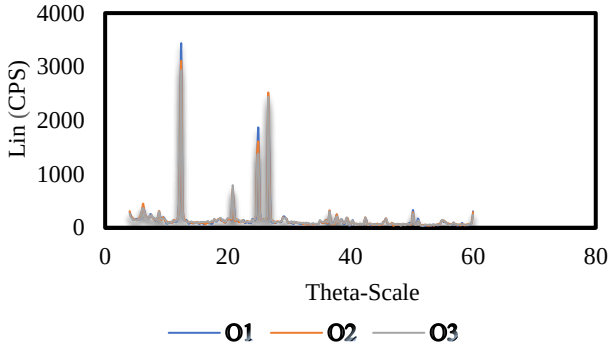
۲-۱-۲ آزمایش *XRD*

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 آلودگی های 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، به‌معنی افزایش قطر دانه‌ها به‌صورت محدود است و این بدان معناست که تغییرات در کانی و هویت اصلی رس در حضور آلودگی رخ نمی‌دهد. به‌عبارت 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 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 شهیدتندگویان

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.

۲-۳ 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

در شکل یک نمونه 10×10 cm از نمونه خاک با آلودگی نفت خام سی درصد قابل مشاهده است.



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

۲-۴ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده طبق استاندارد شماره ASTM D 2166-87 بر روی هفت نمونه خاک در بازه ۷روزه 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.

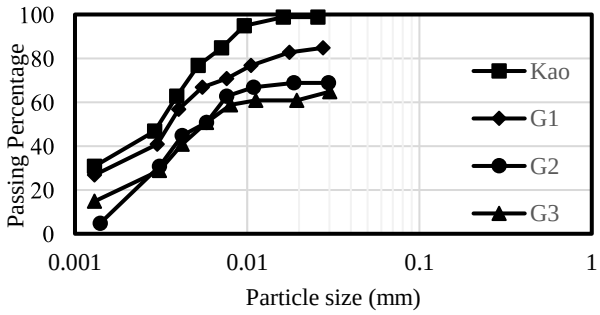
۲- ۵ آزمایش جامدسازی

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 محدودنشده قرار گرفت تا تأثیر سیمان روی جامدسازی نمونه‌ها مشخص گردد. بدین ترتیب ۵۶ نمونه برای آزمایش جامدسازی آماده گردید.

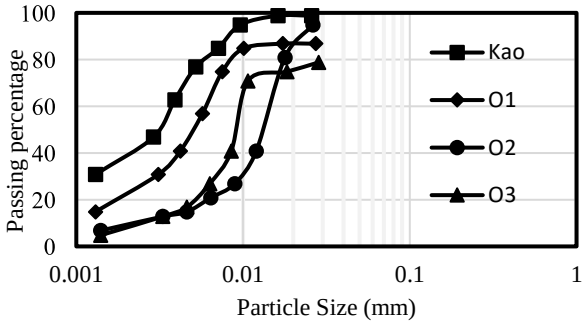
۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱ آزمایش هیدرومتری

آزمایش هیدرومتری به منظور یافتن جواب قابل اتکا دو بار برای هر ترکیب و در مجموع ۱۴بار انجام شد. با توجه‌به نتایج آزمایش *pH*، از محلول هگزامتافسفات‌سدیم 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.



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، درشت دانه‌تر 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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

۳-۲ آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی خاک روی هفت ترکیب مختلف انجام گرفت. این آزمایش به‌رغم سادگی و کاربرد زیاد به‌خصوص 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 به‌خصوص در این تحقیق به دلیل حضور آلودگی‌های نفتی به‌صورت 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.

به‌همین 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.

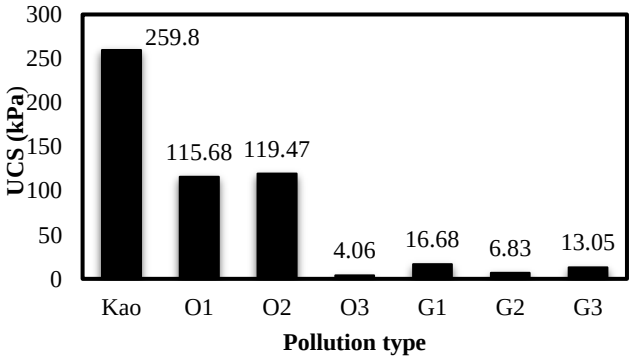
جدول ۵ – نتایج آزمایش برش مستقیم برای هفت ترکیب مختلف

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، به‌معنی افزایش اندازه دانه‌ها یا قطر بافت فولکوله است. همچنین این نتایج با نتایج کلی خسروی (۱۳۹۱) مطابقت دارد. این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که تغییر رفتار خاک به سمت رفتار خاک درشت‌دانه است، به‌خصوص در زمانی که خاک به‌صورت همگن آلوده نشود، مانند شرایط طبیعی که نشت آلودگی یکسان و همگن نیست، رفتار خاک در نواحی مختلف متفاوت بوده و منجر به بروز حوادث مختلفی می‌گردد. به‌عنوان 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 این‌که 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 گازوییلی 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.

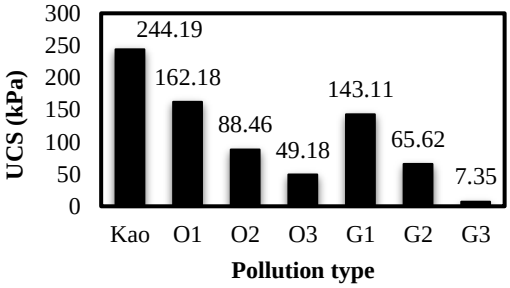


شکل ۱۱- نتایج هفت ترکیب آلودگی در روز هفتم

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

آلودگی، به‌خصوص 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.



شکل۱۲- نتایج هفت ترکیب آلودگی در روز بیست و هشتم

۳-۴ جامدسازی

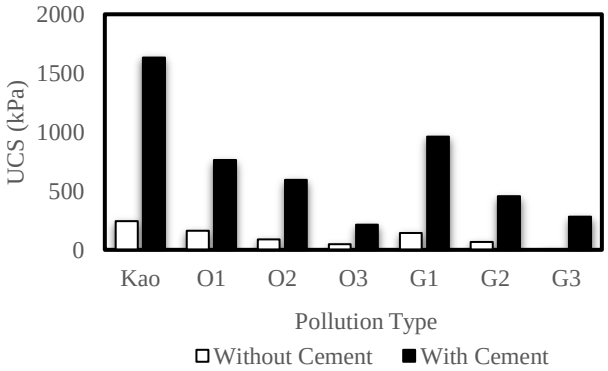
با استفاده از سیمان تیپ دو کارخانه هگمتانه همدان در درصدهای وزنی پنج و ده به‌وسیله آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای بررسی اثر حضور سیمان در ترکیب آلودگی و خاک کائولینیت، انجام شد. در مجموع ۵۶ نمونه برای این آزمایش ساخته و شکسته شد.

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 به‌عمل 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 ابوسنینا و همکاران (۲۰۱۶) و اولواتونی[9] و همکاران (۲۰۲۰) نیز به‌صورت 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 عمل‌آوری 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	۶۵۴/۲۹	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	-



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

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 به‌همین دلیل باعث بروز حوادث فراوانی می‌شود.

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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 می رسد . 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 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- Khamehchiyan, 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 Internationa, 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., Homaee, 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.32.7.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.32.97]