

تأثیر آلاینده های نفتی مختلف بر روی خواص نشست پذیری ماسه رس دار

مهیار عربانی^{۱*}، حامد حق شنو^۲

۱- استاد، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲- دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- arabani@guilan.ac.ir

۲- haghsheno@phd.guilan.ac.ir

چکیده:

تأثیر نوع آلاینده های نفتی بر ویژگی های ژئوتکنیکی بخصوص نشست پذیری خاک، موضوع جالبی است که کمتر در مطالعات قبلی بررسی شده است. در این تحقیق خصوصیات نشست پذیری ماسه رس دار آلوده به مقدار ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک و آلوده به چهار نوع آلاینده نفتی ارزیابی شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تایید کردند که آلاینده های نفتی ساختار خاک را به ساختار لخته شده پراکنده تغییر می دهند. هرچه ویسکوزیته آلاینده نفتی بیشتر باشد، لخته های بزرگتری ایجاد می شود. نتایج این تحقیق نشان داد که آلاینده های نفتی علاوه بر اینکه فضای منافذ بین ذرات را افزایش دادند، با پوشاندن ذرات خاک، مساحت سطح ویژه (SSA) خاک را کاهش داده و در نتیجه با کاهش جذب آب توسط ذرات خاک، امکان تخلیه سریعتر آب را فراهم نمودند. این امر باعث افزایش ضریب فشردگی (C_c)، نشست تحکیمی، ضریب تحکیم (C_v) و ضریب نفوذپذیری می گردد.

واژگان کلیدی:

خاک آلوده به آلاینده های نفتی - خواص نشست پذیری - ویسکوزیته - ماسه رس دار.

* مهیار عربانی، استاد دانشکده فنی - دانشگاه گیلان.

ایمیل: arabani@guilan.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

The effect of various oil pollutants on the compressibility properties of clayey sand

M. Arabani ^۱, H. Haghsheno ^۲

^۱- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

^۲- Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract:

Soil pollution by oil and its derivatives is a highly controversial environmental problem that also causes geological and geotechnical harm. The effect of oil pollutant type on geotechnical characteristics, especially soil compressibility, is an interesting topic neglected in previous studies, which needs further investigation. The results of research on this topic can be used in the compressibility analysis of structures built on soils likely to be contaminated with oil pollutants. Using a one-dimensional consolidation test, this study evaluated the compressibility properties of clayey sand contaminated with ۲, ۶, and ۹% (dry weight of the soil) of four oil pollutants: used motor oil, crude oil, diesel, and kerosene. Scanning electron microscopy (SEM) was also employed to assess the microstructural interaction between the soil and the four oil pollutants. In addition to the low dielectric constant of oil pollutants, their high viscosity played a crucial role in altering the compressibility properties of clayey sand. The SEM micrographs confirmed that oil pollutants change the soil structure into a flocculated but dispersed one. The higher the viscosity of the oil pollutant, the larger the formed clots. Besides increasing the pore space between particles and facilitating the movement of water by covering the soil particles, oil pollutants reduced the soil's specific surface area (SSA) and water absorption by the soil particles. This caused the water to drain faster, ultimately increasing the compaction coefficient (C_c), consolidation settlement, consolidation coefficient (C_v), and permeability coefficient (k). The higher the viscosity of the oil contaminant, the higher the surface energy at the oil-water interface, which decreased water drainage. The highest compressibility belonged to the samples contaminated with kerosene, followed by those contaminated with diesel, crude oil, and used motor oil, respectively. Thus, in geotechnical plans, special attention should be paid to the settlement of clayey sand contaminated with kerosene.

Keywords: Oil-polluted soil, Compressibility properties, Viscosity, Clayey sand

۱ - مقدمه

آلودگی خاک، عبارتست از وجود، پخش یا آمیختن یک یا چند ماده خارجی در خاک، به مقدار و مدتی که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را طوری که برای انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان یا آثار و ابنیه زیان آور باشند، تغییر دهد. به عبارت دیگر هر گونه تغییر در ویژگیهای اجزای تشکیل دهنده خاک، بنحویکه استفاده از آن را ناممکن گرداند، آلودگی خاک نامیده می شود. منابع مختلف آلودگی خاک، کیفیت خاک و آب های زیرزمینی را کاهش داده و منجر به مشکلات زیست محیطی می شوند. نفت و مشتقات آن (بنزین، نفت سفید، گازوئیل، روغن موتور، سوخت جت و ...) از مهم ترین انواع آلاینده های خاک هستند [۱]. نفت و محصولات تصفیه شده آن، عمده منابع جهانی هستند که در بخشهای صنعتی و حمل و نقل برای نیازهای انرژی در سراسر جهان استفاده می شوند [۲]. به دلیل افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، اهمیت این مواد افزایش یافته است [۳]. از مراحل اولیه اکتشاف تا مراحل نهایی مصرف، امکان آلودگی های نفتی پدیده ای اجتناب ناپذیر است [۴].

۵. نفت در خشکی بیشترین آلودگی هیدروکربنی سیاره ما را تشکیل داده است [۶]. طبق گزارش بریتیش پترولیوم [۷]، مصرف جهانی نفت در سال ۲۰۲۰، ۸۸/۳ میلیون بشکه در روز بود. در سال ۲۰۲۱ میزان مصرف به ۵/۳ میلیون بشکه در روز افزایش یافت. بیشترین رشد مصرف در ایالات متحده آمریکا و چین به ترتیب ۱/۵ و ۱/۴ میلیون بشکه در روز گزارش شد. در دو دهه اخیر، استفاده از نفت خام تقریباً ۳۲٪ افزایش را نشان داده است [۸]. پس از نفت، آلودگی های نفتی تحت نیروی جاذبه به سمت پایین به سمت آبهای زیرزمینی حرکت می کنند و علاوه بر اینکه خاک را در مسیر خود آلوده و اشباع می نمایند، به صورت افقی توسط آب حمل شده و در نتیجه با کمک موئینگی، دوباره به خاک های دیگر رسیده و آلودگی بیشتری را منتشر می کنند [۹]. خاک و فرآورده های نفتی از نقطه نظر شیمیایی نسبتاً بی واکنش هستند، بنابراین این فرآورده های نفتی بیشتر در منافذ خاک به عنوان یک استخر کوچک مایع و به عنوان مایعات فاز غیر آبی (non-aqueous phase liquids) باقی می ماند [۱۰]. NAPL به دلیل غلظت و شیمی متفاوت در آب حل نمی شود و یا به راحتی با آن مخلوط نمی شود [۱۱]. همچنین سبب تغییر در رفتارهای فیزیکی و مکانیکی خاک

می گردد [۱۲، ۱۳]. میزان تاثیر آلاینده نفتی به نوع خاک، ترکیب خاص آلاینده نفتی و مقدار آلاینده بستگی دارد [۱۴]. ایران یکی از کشورهای دارای بیشترین ذخایر نفتی در جهان است. بر اساس گزارش ارائه شده توسط اداره اطلاعات انرژی آمریکا (EIA)، در سال ۲۰۲۱، ایران ۲۴ درصد از ذخایر نفت خاورمیانه و ۱۲ درصد در جهان را در اختیار داشت. بیشتر این ذخایر در جنوب ایران قرار دارد. نفت از منابع مختلف از جمله تصادفات نفتکش ها، نفت در پایانه های نفتی و نفت پساب های نفتی از انبارهای نفت خام و پالایشگاه های نفت، محیط زیست دریایی و ساحلی مناطق جنوبی ایران را در چند دهه گذشته آلوده کرده است. ویژگی های ژئوتکنیکی خاک های آلوده به نفت در این منطقه از جمله ویژگی های نشست پذیری برای طراحان ژئوتکنیک حائز اهمیت است. پیش بینی نشست توده خاکی که ممکن است در آینده با آلاینده های نفتی آلوده شود، برای ساختمانی که بر روی آن ساخته خواهد شد، ضروری است. در صورت استفاده مجدد از خاک آلوده در ساخت و ساز، ارزیابی میزان نشست پذیری و ارائه راهکارهای عملی برای کنترل آن از جمله دلایلی است که بررسی کیفیت نشست پذیری خاک آلوده به نفت را حیاتی می کند.

تحقیقات متعددی در مورد تاثیر آلاینده های نفتی بر ویژگی های تحکیم پذیری انواع خاکها انجام شده است. الرحمن و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعه ای را بر روی تاثیر نفت خام بر روی نشست پذیری خاک رس با خاصیت خمیری بالا (CH) انجام داده و نتیجه گرفته اند که افزودن نفت خام سبب افزایش ۶۳/۳ درصدی ضریب فشردگی شده، بطوریکه ضریب فشردگی را از ۰/۳۴۲ به ۰/۹۳۲ رسانیده است. در این مطالعه، محتمل ترین مکانیسم مسئول افزایش ضریب فشردگی، تغییر در ساختار خاک با حضور نفت خام بیان شده است [۱۵]. جیا و همکاران (۲۰۱۱) نیز با بررسی تاثیر مقادیر مختلف نفت خام بر روی ضریب فشردگی خاک لای نشان دادند که با افزودن میزان نفت خام در خاک، ضریب فشردگی افزایش پیدا کرده است. در این مطالعه توضیح داده شد که نفت خام اتصال بافتی بین دانه ها را کاهش داده، تعداد منافذ را افزایش داده و ساختار خاک را شل می نماید [۱۶]. کرمانی و عبادی (۲۰۱۲)، تاثیر نفت خام بر ضریب فشردگی خاک رس با خاصیت خمیری پایین (CL) را ارزیابی کردند. آنها نتیجه گرفتند که نفت خام باعث افزایش ضریب فشردگی خاک

شده است. این رفتار به اثرات روان کنندگی روغن و کاهش اصطکاک بین ذرات خاک نسبت داده شد [۱۷]. اوتا (۲۰۱۳) نیز با بررسی تاثیر نفت خام بر ضریب فشردگی خاک *CL* نشان داد که افزودن تا ۲۰ درصد نفت خام سبب افزایش ۵۴/۸ درصدی ضریب فشردگی شده است. این موضوع علاوه بر تاثیر نفت خام بر کاهش اصطکاک بین ذرات، به ساختار باز ایجاد شده در خاک ناشی از وجود نفت خام نسبت داده شد [۱۸]. الادهمی و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود نشان دادند که افزودن تا ۱۵ درصد نفت خام به خاک *CL*، باعث کاهش ۹/۶ درصدی ضریب فشردگی شده است [۱۹]. سلیم نژاد و همکاران (۲۰۲۰) نتیجه گرفته اند که افزودن تا ۱۲ درصد نفت خام به خاک رس با خاصیت خمیری بالا (*CH*)، سبب افزایش ۲۱/۶ درصدی ضریب فشردگی شده است [۲۰]. تالوکدار و سایکا (۲۰۱۳) تاثیر نفت خام را بر روی سه نوع خاک *CL*، *CH* و ماسه رس دار (*SC*) بررسی نموده و نتیجه گرفتند که وجود نفت خام در خاکها سبب افزایش ضریب فشردگی همه خاک ها شده است [۲۱]. خسروی و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه ای را بر روی تاثیر گازوئیل بر روی رفتار نشست پذیری خاک *CL* انجام داده و نتیجه گرفتند که اضافه شدن ۲۰ درصد از این آلاینده سبب کاهش ۳۴/۵ درصدی ضریب فشردگی شده است. توضیح داده شد که کاهش ضریب فشردگی مربوط به انرژی سطحی موجود در فصل مشترک نفت و آب است. این انرژی سطحی، کششی سطحی در سطح اتصال آب و آلاینده ایجاد کرده و مانع از خروج و زهکشی کامل آب شده است [۲۲]. البته جداری و فراهانی (۲۰۱۸) با مطالعه ای دیگر نتایج خسروی و همکاران (۲۰۱۳) را رد کردند. آنها نشان دادند که افزودن تا ۹ درصد گازوئیل به خاک *CL* سبب افزایش ۳۷/۱ درصدی ضریب فشردگی می گردد. این کاهش در ضریب نفوذپذیری، به خاصیت روانکاری نفت سفید نسبت داده شد [۲۳]. صفاهیان و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان دادند که افزودن ۲۰ درصد گازوئیل سبب افزایش ۳۴ درصدی ضریب فشردگی خاک *CH* شده است. افزایش ضریب فشردگی به ماهیت غیرقطبی مولکول های نفت خام نسبت داده شد. توضیح داده شد که ذرات خاک رس باردار نمی توانند مولکول های نفت خام غیر قطبی را همانند مولکول های دوقطبی آب جذب کنند. این امر سهولت زهکشی نفت خام را موجب شده است [۲۴]. کارکوش و کریم (۲۰۱۷) با بررسی تاثیر نفت کوره بر ضریب فشردگی خاک

CL نشان دادند که اضافه کردن نفت کوره به خاک رس، ضریب فشردگی آن را افزایش داده است. افزودن ۲۰ درصد از این آلاینده به خاک *CL* موجب افزایش ۱۳/۴ ضریب فشردگی شد و آن را از ۰/۲۷۴ به ۰/۳۲۰ رسانید. دلیل افزایش ضریب فشردگی به بزرگ شدن فضاهای خالی ناشی از بزرگ شدن دانه های خاک در اثر آلوده شده با نفت کوره و همچنین به نقش روان کننده نفت کوره ارتباط داده شد [۲۵]. کارکوش و جبهاد (۲۰۲۰) با بررسی اثر نفت سفید بر روی خصوصیات نشست پذیری خاک *CH* نشان دادند که افزودن این آلاینده سبب افزایش ضریب فشردگی خاک رسی شده و برای خاک مخلوط شده با ۵۰ درصد نفت سفید ضریب فشردگی ۴۴/۳ درصد افزایش یافته است. توضیح داده شد که کاهش پیوند بین ذرات خاک در نتیجه آلوده شدن با نفت سفید منجر به افزایش ضریب فشردگی شده است [۲۶]. مدهت و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی تاثیر روغن موتور بر روی نشست پذیری خاک *CL* نشان دادند که افزودن تا ۲۰ درصد این آلاینده سبب کاهش ۹۳/۵ درصدی ضریب فشردگی شد [۲۷]. اما در مطالعه ای دیگر نظیر (۲۰۱۱) نشان داد که روغن موتور سبب افزایش ۵۱/۶ درصدی ضریب فشردگی شده است [۲۸].

نشست پذیری خاک های حاوی ریزدانه به دلیل آلودگی های نفتی را می توان با دو مکانیسم مختلف توضیح داد. الف- به دلیل تغییرات در اثر نیروهای فیزیکی (عوامل مکانیکی) ب- به دلیل تغییر در عوامل فیزیوشیمیایی. عوامل مکانیکی شامل نوع خاک، خواص فیزیکی سیال منفذی مانند چگالی و ویسکوزیته می باشند. میزان برهمکنش فیزیوشیمیایی در خاک ها به صورت کیفی توسط نظریه لایه دوگانه ارائه شده توسط گوی (۱۹۱۰) و چاپمن (۱۹۱۳) بیان شده است [۲۹، ۳۰]. بر طبق این نظریه یکی از پارامترهایی که بر روی ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه ساختار خاک موثر است، ثابت دی الکتریک سیال حفره ای است. بنابراین دو ویژگی مهم آلاینده های نفتی، به عنوان سیالات منفذی، که تا حد زیادی سبب ایجاد تغییر در ویژگی های ژئوتکنیکی خاک ها می گردند، ثابت دی الکتریک پایین تر و ویسکوزیته بالاتر آن ها در مقایسه با آب است. در حالت کلی مایعات با ثابت دی الکتریک پایین، لایه های دوگانه بسیار نازکی را در مقایسه با مایعات با ثابت دی الکتریک بالاتر ایجاد می کنند و این به نوبه خود، نیروهای دافعه بین ذرات و در نتیجه لخته شدن ذرات را کاهش

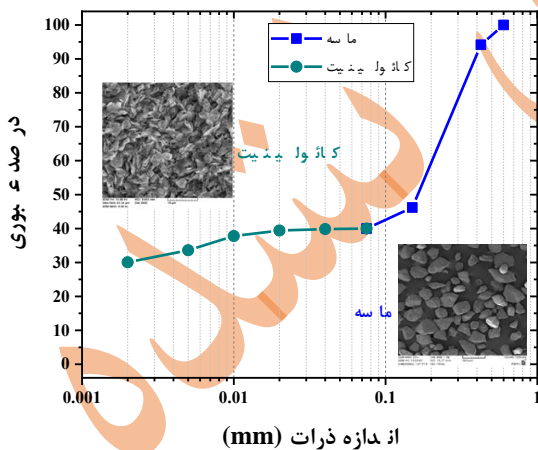
خاک‌هایی که احتمالاً آلوده به آلاینده‌های نفتی هستند و همچنین انتخاب بهترین روش اصلاح در صورت استفاده مجدد از این خاک‌ها در پروژه‌های دیگر ارائه خواهد کرد.

۲- مصالح و روشها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- خاک

از آنجا که بخش عمده ای از خاک مناطق جنوبی ایران (سواحل شمالی خلیج فارس) ترکیبی از کائولینیت و ماسه است [۱۸]، در این مطالعه از مخلوط ماسه-کائولینیت (*SKM*) استفاده شد. این خاک با مخلوط کردن ۶۰ درصد ماسه با ۴۰ درصد کائولینیت تهیه شد [۳۵]. ماسه مورد نظر از سواحل انزلی در شمال کشور ایران تهیه شده که عمده از ماسه‌های بسیار ریز و یکنواخت تشکیل شده است. جنس این ماسه‌ها عموماً سیلیسی است و با وجود ریزدانه بودن ماسه‌ها، غالباً از سنگدانه‌های تیز گوشه تشکیل شده است. کائولینیت مورد استفاده در این مطالعه از کارخانه خاک چینی ایران تهیه شد. توزیع دانه بندی مخلوط ماسه و کائولینیت مطابق استاندارد *ASTM D422* در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: توزیع دانه بندی ماسه و کائولینیت

ترکیبات شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز اشعه ایکس فلورسانس (*XRF*) در جدول ۱ و مشخصات ژئوتکنیکی ماسه و کائولینیت و همچنین مخلوط ماسه-کائولینیت در جدول ۲ ارائه شده است.

می دهد [۳۱]. ویسکوزیته بالا و خاصیت روان کنندگی آلاینده‌های نفتی دو رفتار متضاد را در خاک‌های آلوده به نفت ایجاد می کنند. ویسکوزیته بالای آلاینده‌های نفتی، ذرات خاک را به یکدیگر می چسباند و برهمکنش بین آنها را افزایش می دهد. در حالی که خاصیت روان کنندگی آنها، این برهمکنش را کاهش می دهد. از آنجایی که ثابت دی الکتریک آلاینده‌های نفتی تقریباً یکسان است (بین ۲/۱ و ۲/۴) [۳۲]، تأثیر آن در تغییر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، برای همه آلاینده‌های نفتی یکسان است (به ازای یک درصد معین از همه آلاینده‌های نفتی). بطور کلی نوع آلاینده نفتی و ویسکوزیته آن عاملی غیرقابل انکار در تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی می باشد [۳۳، ۳۴]، لذا ضروری است که نقش ویژگی‌های مکانیکی آلاینده‌های نفتی بویژه ویسکوزیته، با دقت بیشتری بر روی خصوصیات نشست پذیری خاکها مورد ارزیابی قرار گیرد. به این موضوع در مطالعات گذشته توجه زیادی نشده است و کمتر به بررسی این موضوع پرداخته شده است. در یکی از تنها مطالعات انجام شده در این زمینه، جداری و فراهانی (۲۰۱۸) به این نتیجه رسیدند که وجود آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته بالاتر در خاکهای ریزدانه *CH* و *CL*، سبب افزایش ضریب فشردگی و کاهش ضریب نفوذپذیری شده است [۲۳].

با توجه به بررسی پیشینه مطالعات، در مطالعات قبلی تنها به بررسی اثر ویسکوزیته یک نوع آلاینده بر روی خصوصیات نشست پذیری خاکهای ریزدانه پرداخته شده است و هیچگونه مطالعه جامع و مقایسه‌ای به منظور بررسی نشست پذیری خاکها، تحت اثر انواع آلاینده‌های مختلف نفتی انجام نشده است. در این پژوهش برای اولین بار، اندرکنش توام بخش ریزدانه و درشت دانه خاک ماسه رس دار با انواع آلاینده‌های نفتی مختلف با ویسکوزیته متفاوت به منظور بررسی خصوصیات نشست پذیری مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای این منظور آزمایشهای تراکم و تحکیم یک بعدی بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده انجام شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی (*SEM*) نیز برای ارزیابی ریزساختاری استفاده شد. این مطالعه ابتکاری با توصیف میزان تغییرات در خواص نشست پذیری خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی مختلف، اطلاعات مورد نیاز را برای طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های ساخته شده بر روی چنین خاک‌ها و/یا

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز XRF

ماسه	کائولینیت	اکسید (wt %)
۶۱/۷	۶۳	SiO ₂
۱۱/۹	۲۴	Al ₂ O ₃
۴/۳	۰/۵۵	Fe ₂ O ₃
۰/۸۵	۰/۰۴	TiO ₂
۸/۵	۱/۲	CaO
۲/۱	۰/۴	MgO
۲	۰/۳	Na ₂ O
۴	۰/۴	K ₂ O

۲-۱-۲- آلاینده های نفتی

در این مطالعه از چهار نوع آلاینده نفتی شامل نفت خام، نفت سفید، گازوئیل و روغن موتور سوخته استفاده شده است. نفت خام، نفت سفید و گازوئیل از پالایشگاه تهران و روغن موتور مستعمل از یک کارگاه تعویض روغن تهیه شده است. خواص اساسی این آلاینده ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه و کائولینیت و مخلوط ماسه-کائولینیت

شماره استاندارد	مخلوط		
	ماسه-کائولینیت	ماسه	کائولینیت
	۲۲/۵	N.P	۴۰/۶
ASTM D4318	۱۵	N.P	۲۹/۸
	۷/۵	N.P	۱۱/۱
ASTM D845	۲/۶۹	۲/۷۴	۲/۶۲
	-	۰/۲۸	-
ASTM D422	-	۰/۱۹	-
	-	۰/۱۶	-
	-	۱/۷۵	-
ASTM D2487	-	۱/۸۰۵	-
	SC	SP	CL

جدول ۳: خصوصیات آلاینده های نفتی

واحد	نوع آلاینده نفتی			پارامتر
	نفت سفید	گازوئیل	نفت خام	
cp	۲/۵۷	۳/۴۹	۱۳/۸۷	ویسکوزیته
-	۰/۸۱۴	۰/۸۲۱	۰/۸۴۱	چگالی نسبی

۲-۲- آماده سازی نمونه ها

خاک آلوده به طور طبیعی، در مقایسه با خاک آلوده شده بطور مصنوعی، برای استفاده ایده آل تر است، زیرا این احتمال وجود دارد که با آلودگی مصنوعی، تقسیم بندی بین مواد معدنی و فازهای مخلوط خاک و آلاینده ها مانند خاک آلوده به طور طبیعی نباشد [۳۶]. اما ناهمگنی آلودگی ها در خاک های طبیعی، تجزیه و تحلیل و مقایسه مخلوط های مختلف را پیچیده می کند. بنابراین، از آلودگی مصنوعی برای تولید مخلوطی همگن استفاده شد تا کار مقایسه نتایج آسان تر باشد [۳۷]. در این مطالعه خاکهای ماسه و کائولینیت قبل از مخلوط شدن با یکدیگر به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای 110 ± 5 درجه سانتی گراد خشک شدند. برای تهیه نمونه های آلوده، مقدار آلاینده های نفتی (روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید) ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک مخلوط، انتخاب شده اند. این میزان آلودگی بر اساس مطالعه انجام شده توسط نظری هریس و همکاران (۲۰۲۰) بر روی خاک ماسه رس دار آلوده با بنزین [۳۵]، الادهمی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی خاک ماسه لای دار آلوده با نفت خام [۳۸] و ناصحی و همکاران (۲۰۱۶) بر روی خاک ماسه بد دانه بندی شده آلوده با گازوئیل انتخاب شده است [۳۹]. لازم به توضیح است که برای افزودن آلاینده های نفتی بیشتر به نمونه های خاک محدودیت هایی وجود داشت. آزمایش تراکم بر روی نمونه های خاک حاوی بیش از ۹ درصد آلاینده نفتی (برای مثال ۱۱ و ۱۲ درصد) منجر می شد که نمودار آزمایش تراکم بصورت زنگوله ای در نیاید. علاوه بر این، آلاینده نفتی مازاد، در هنگام اجرای آزمایش تراکم از نمونه ها خارج می شد. درصد تعیین شده از آلاینده های نفتی بر روی خاک اسپری شده و بصورت دستی هم زده شد تا مخلوطی یکنواخت بدست آید. مخلوط بدست آمده به مدت ۱ ماه در ظرف درب بسته ای برای توزیع یکنواخت آلودگی در خاک نگهداری شده اند. این دوره زمانی نیز بر اساس مطالعات انجام شده توسط سلیم

نژاد و همکاران (۲۰۲۱) و خامه چیان و همکاران (۲۰۰۷) در نظر گرفته شده است [۲۰، ۴۰]. این مخلوط ها، برای بررسی تاثیر آلاینده های نفتی بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲- آزمایشها

برای ارزیابی تاثیر آلاینده های نفتی بر ویژگی های نشست پذیری و نفوذپذیری ماسه رس دار، مجموعه ای از آزمایش های آزمایشگاهی شامل تراکم استاندارد و تحکیم یک بعدی به ترتیب مطابق استانداردهای *ASTM D 698* و *ASTM D 2435* انجام شد. آزمایش تراکم بر اساس پروکتور استاندارد برای تعیین درصد رطوبت بهینه (*OMC*) و وزن مخصوص خشک ماکزیمم (*MDD*) انجام گردید. آزمایش های تحکیم یک بعدی بر روی نمونه هایی با قطر ۵ سانتی متر و ضخامت ۲ سانتی متر انجام شد. تنش ها در فرآیند بارگذاری به ترتیب ۵/۱، ۱۰/۲، ۲۰/۴، ۴۰/۷، ۸۱/۵، ۱۶۳ و ۳۲۶ کیلو پاسکال و در مرحله باربرداری به ترتیب ۲۰/۴، ۸۱/۵ و ۵/۱ کیلو پاسکال انتخاب شده است. همه نمونه ها در *MDD* و *OMC* خودشان آماده شدند، زیرا بیشترین تعامل بین ذرات خاک در این حالت ایجاد خواهد شد [۴۱]. در مطالعات انجام شده توسط استوار و همکاران (۲۰۲۱) بر روی خاکهای ماسه ای آلوده با نفت خام [۴۲]، نظری هریس و همکاران (۲۰۲۱) بر روی خاک ماسه رس دار آلوده با بنزین [۳۵]، بجنوردی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی خاک ماسه رس دار آلوده با روغن موتور سوخته [۴۳] و دسوزا و کوریا (۲۰۲۰) بر روی ماسه رس دار آلوده با گازوئیل [۴۴] نیز ساخت نمونه ها در شرایط *MDD* و *OMC* انجام شده است.

روش تراکم استاتیک برای فشردن نمونه ها برای دستیابی به تراکم یکنواخت انتخاب شده است. برای آماده سازی نمونه ها، خاک آلوده در قالب های تهیه شده از لوله پلیکا، با قطر ۵ سانتی متر و تا ارتفاع ۲ سانتی متر بطور یکنواخت متراکم شده است. سپس توسط دستگاه نمونه درآور خاک، نمونه از لوله پلیکا خارج و درون رینگ فلزی دستگاه تحکیم قرار داده شد و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش تحکیم سه بار تکرار و نتایج بصورت میانگین ارائه شده است. به منظور بررسی ریزساختار اولیه نمونه های آلوده به درصد های مختلف آلاینده های نفتی مختلف و مقایسه آنها با خاک تمیز،

مجموعه ای از تصاویر *SEM* توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل *VEGA3-TESCAN* تهیه شده است. نتایج *SEM* در تفسیر داده های کمی به دست آمده در این مطالعه مفید است. در این مطالعه نمونه ها پس از آلوده شدن با انواع آلاینده های نفتی مختلف (پس از مدت ۱ ماه) مورد بررسی قرار گرفته اند. در تهیه تصاویر *SEM*، نمونه ها بر روی یک صفحه کوچک قرار گرفته و با روکش طلا پوشانده شدند تا وضوح لبه تصاویر و همچنین انتشار الکترون های ثانویه افزایش داده شود. تصاویر *SEM* یا ضریب بزرگنمایی ۲۰۰ تهیه شده است.

۳- نتایج و بحث :

۳-۱- تاثیر آلاینده های نفتی بر روی خصوصیات

تراکمی

در آزمایش تراکم محاسبه مقدار آب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. لازم به توضیح است اگرچه همیشه برای تعیین درصد رطوبت از رابطه (۱) استفاده می شود، اما این معادله نمی تواند برای خاکهای آلوده به مشتقات نفتی استفاده شود، زیرا مشتقات نفتی دارای ترکیبات پیچیده ای هستند که ممکن است حتی در دمای اتاق بخار شوند. با توجه به اینکه آب و آلاینده های نفتی درجه تبخیر متفاوتی دارند، در این پژوهش از معادله پیشنهادی (۲) که توسط ژن و همکاران [۴۵] ارائه شده برای تعیین مقدار رطوبت نمونه های خاک آلوده به مشتقات نفتی استفاده شده است.

$$w_w = \frac{m_w}{m_d} * 100 \quad (1)$$

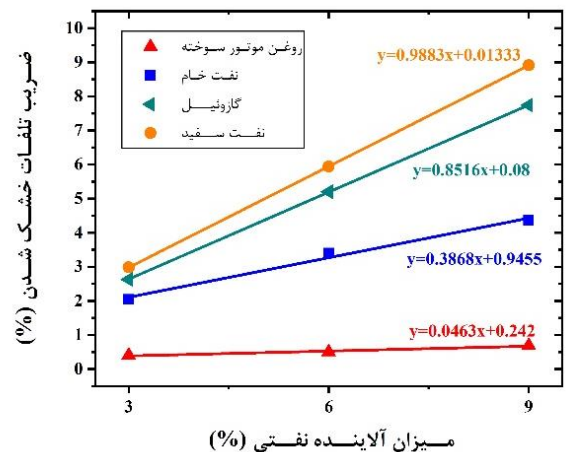
$$w_w = \frac{m_w}{m_d} = \left[\frac{m_t}{m_r} (1+n-n) - 1 - n \right] * 100 \% \quad (2)$$

که در آن w_w مقدار رطوبت بر حسب درصد، m_t جرم نمونه قبل از خشک شدن (گرم)، m_r جرم نمونه پس از خشک شدن در کوره (گرم)، m_w جرم آب تبخیر شده (گرم)، m_d جرم خشک نمونه (گرم)، n مقدار آلاینده نفتی قبل از خشک شدن و U ضریب تلفات خشک شدن آلاینده نفتی است. تفاوت بین مقادیر m_r و m_t برابر است با از دست دادن جرم آلاینده نفتی ناشی از خشک کردن (یعنی

جرم آلاینده تبخیر شده). بنابراین، ضریب تلفات خشک شدن آلاینده نفتی از معادله ۳ به دست می آید.

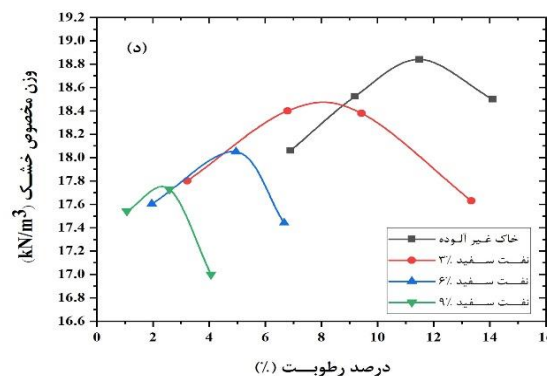
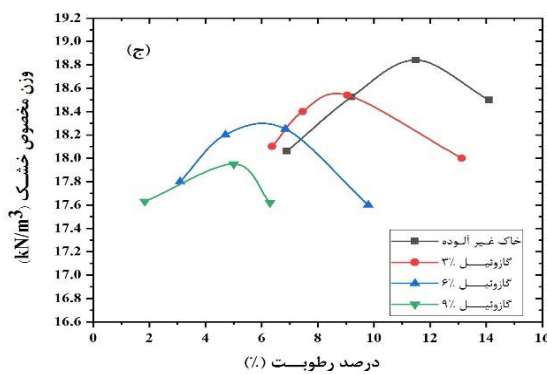
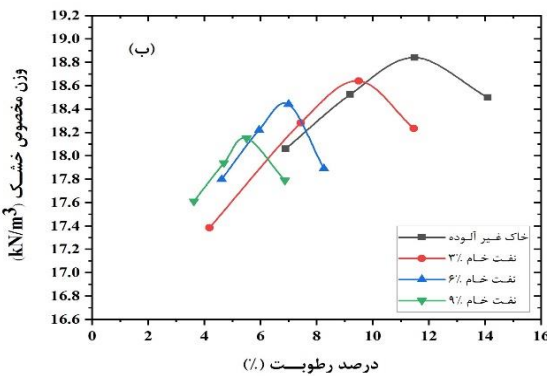
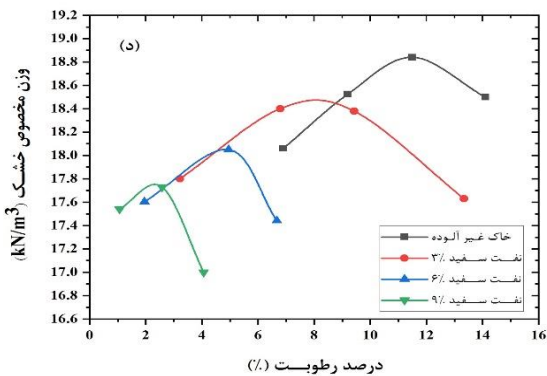
$$(%) = \frac{m_t - m_r}{m_t} * 100 \quad (3)$$

با برازش یک خط بین داده‌های نرخ تلفات خشک شدن آلاینده نفتی در مقابل درصد آلاینده نفتی و محاسبه شیب خط برازش، ضریب تلفات خشک شدن آلاینده نفتی (U) محاسبه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق با توجه به شکل (۲) ضریب تلفات خشک شدن روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب $0/9883$ ، $0/8516$ ، $0/3868$ و $0/0463$ تعیین شده است. بر اساس این نتایج می توان دریافت که افزایش ویسکوزیته آلاینده نفتی سبب افزایش کشش سطحی بین مولکولها گردیده و در نتیجه سبب کاهش نرخ تلفات خشک شدن آلاینده نفتی شده است.



شکل ۲: محاسبه ضریب تلفات خشک شدن آلاینده های نفتی (U)

نمودارهای آزمایش تراکم استاندارد و خلاصه نتایج این آزمایش، برای خاک های تمیز و آلوده با درصدهای مختلف آلاینده های نفتی، به ترتیب در شکل (۳) و (۴) ارائه شده است. بررسی نمودارهای آزمایش تراکم خاکهای آلوده با آلاینده های نفتی مختلف نشان می دهد که به غیر از اختلافات ناچیز در مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک ماکزیمم (MDD) و درصد رطوبت بهینه (OMC)، در همه منحنی ها، روند تغییرات افزایش مقدار آلاینده نفتی مشابه هم هستند.



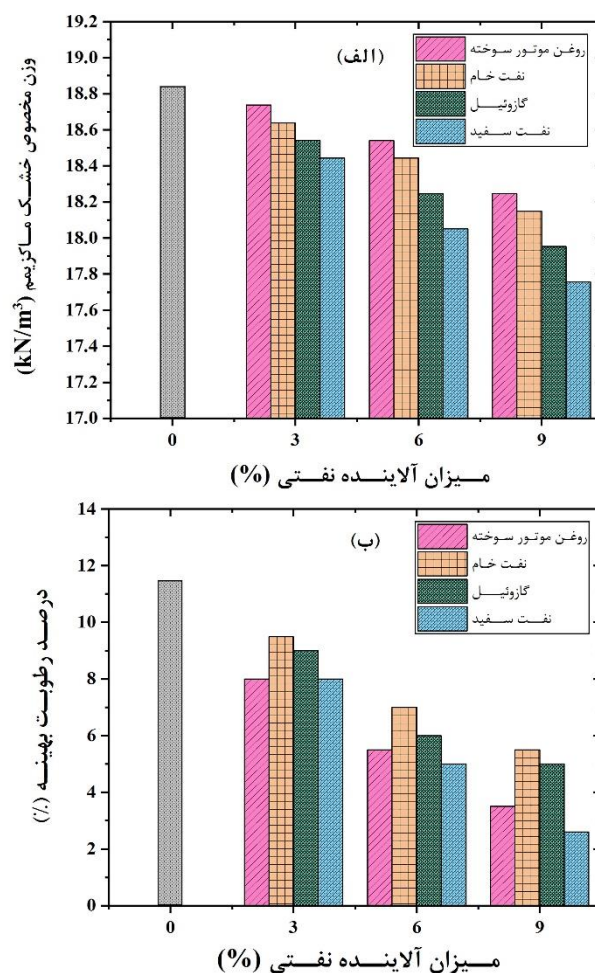
شکل ۳: نمودار آزمایش تراکم خاک تمیز و آلوده با درصد های مختلف (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید

کرده است. کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک آلوده به آلاینده های نفتی را می توان به چگالی کمتر آلاینده های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به دلیل وجود آلاینده های نفتی در هنگام اجرای آزمایش تراکم نسبت داد. بر اساس نتایج، ویسکوزیته نقش کلیدی در تغییر وزن مخصوص خشک ماکزیمم دارد. هر چه ویسکوزیته آلاینده نفتی بیشتر باشد، کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم کمتر است. کمترین کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم مربوط به نمونه های آلوده به روغن موتور سوخته و پس از آن نمونه های آلوده به نفت خام، گازوئیل و نفت سفید است. ویسکوزیته بالای آلاینده های نفتی با چسباندن ذرات خاک (به دلیل کمتر شدن فرآیند روغنکاری) و لخته های بزرگ ایجاد شده به یکدیگر، حجم منافذ خاک را کاهش داده و در نتیجه کاهش کمتری در وزن مخصوص خشک خاک ایجاد کرده است. کاهش درصد رطوبت بهینه، به اشغال فضاهای بین ذره ای توسط آلاینده های نفتی [۴۶]، جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به دلیل ویژگی های آبگریز آلاینده های نفتی [۴۷] و کاهش سطح ویژه (SSA) که جذب مولکول های آب توسط ذرات رس را کاهش خواهد داد، مرتبط است [۲۶]. نتایج تحقیق حاضر کاملاً با نتایج ارائه شده توسط بجنوردی و همکاران [۴۳] مطابقت دارد. مقایسه اثر آلاینده های مختلف نفتی بر درصد رطوبت بهینه نشان می دهد که بیشترین و کمترین کاهش درصد رطوبت بهینه به ترتیب مربوط به خاک آلوده به ۹ درصد نفت سفید و ۹ درصد نفت خام است. با این حال مشخص است که هیچ رابطه منطقی بین ویسکوزیته آلاینده نفتی و درصد رطوبت بهینه خاک آلوده به آلاینده نفتی وجود ندارد.

۲-۳- تاثیر آلاینده های نفتی بر روی پارامترهای نشست پذیری

در این مطالعه با انجام مجموعه ای از تست های تحکیم یک بعدی، رفتار تغییر حجم خاک آلوده با درصدهای مختلف آلاینده نفتی تعیین شده است. منحنی های تحکیم، در فضای $e - \log \sigma'_v$ در شکل (۵) نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که همه نمونه ها در OMC و MDD خودشان ساخته شده اند. شکل (۵) نشان می دهد که نشست پذیری با افزایش آلاینده های نفتی بیشتر می شود.

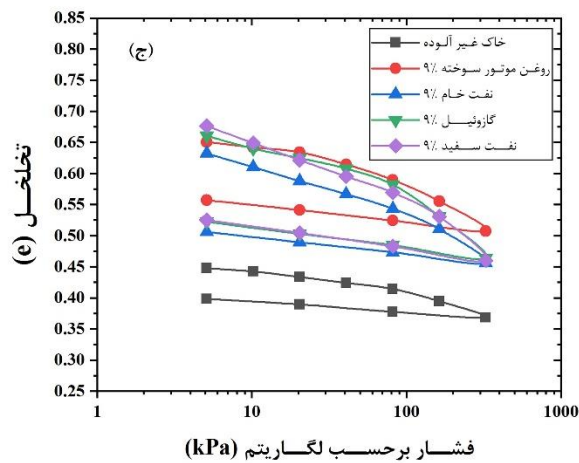
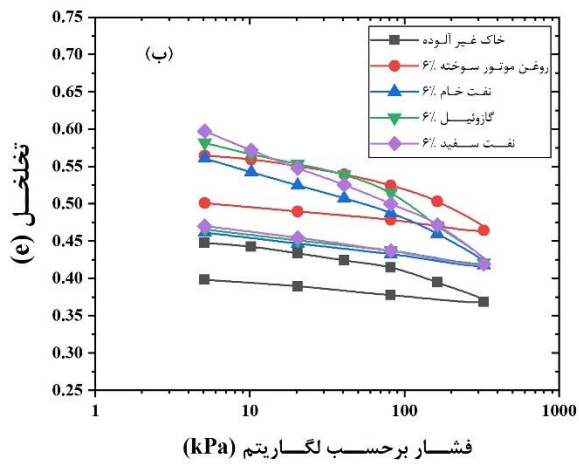
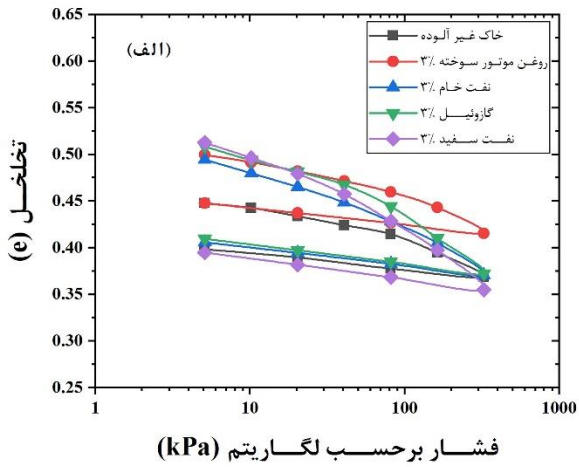
همانطور که از شکل ۳ مشخص است، افزودن ۳ درصد از آلاینده های نفتی مختلف به خاک تمیز باعث کاهش MDD و OMC شده است. این روند تا افزودن ۹ درصد آلاینده های نفتی به خاک تمیز ادامه پیدا کرده است.



شکل ۴: تغییرات (الف) درصد رطوبت بهینه، (ب) وزن مخصوص خشک ماکزیمم با افزایش مقدار آلاینده های نفتی

بر اساس نتایج آزمایش تراکم، که در شکل ۴ ارائه شده است، مشخص شد که MDD خاک تمیز با افزودن ۹ درصد روغن موتور، روغن خام، گازوئیل و نفت سفید از ۱۸/۸۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب به ترتیب به ۱۸/۲۵، ۱۸/۱۴، ۱۷/۹۵ و ۱۷/۷۶ کیلو نیوتن بر متر مکعب کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این مشخص است که با افزودن ۹ درصد روغن موتور، روغن خام، گازوئیل و نفت سفید به خاک تمیز OMC از ۱۱/۵ درصد به ترتیب به ۳/۵، ۵/۵، ۵ و ۲/۶ کاهش پیدا

ویژه مرتبط دانست. آلاینده های نفتی یک ساختار لخته شده اما پراکنده در خاک ایجاد کرده اند.



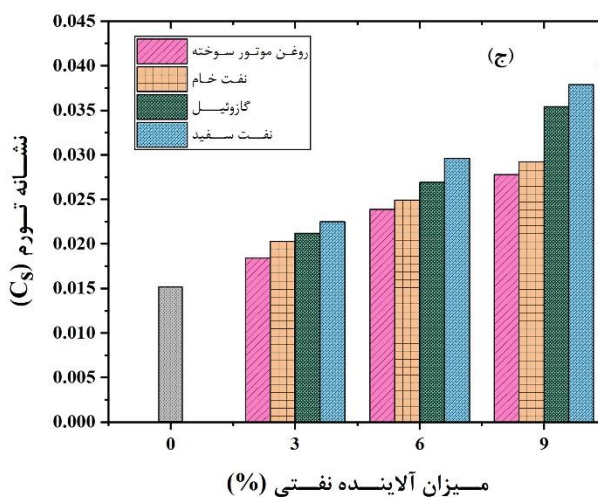
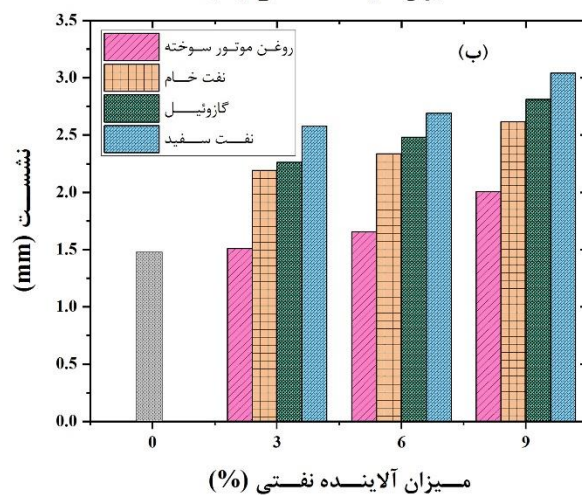
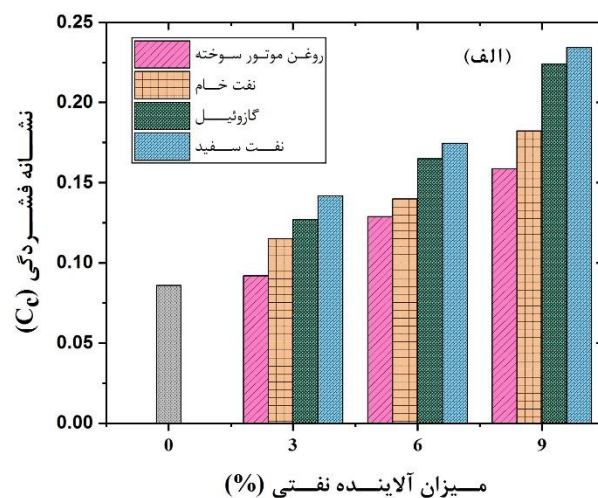
شکل ۵: منحنی تراکم خاک های آلوده با درصد های مختلف آلاینده های نفتی مختلف (الف) ۳ درصد، (ب) ۶ درصد، و (ج) ۹ درصد

همچنین مشخص است که با افزودن آلاینده نفتی به خاک تمیز، نسبت تخلخل اولیه افزایش یافته است. افزایش نسبت تخلخل اولیه می تواند ناشی تغییر ساختار خاک در نتیجه آلوده شدن با آلاینده های نفتی باشد. علاوه بر این مشخص است که وقتی درصد آلاینده نفتی افزایش پیدا کرده است، نسبت تخلخل اولیه بیشتر شده و منحنی های تحکیم به سمت بالا حرکت کرده است. نتایج نشان می دهد، برای مقدار معینی از آلاینده نفتی، بیشترین نسبت تخلخل اولیه مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است که کمترین ویسکوزیته را در بین آلاینده های نفتی دارد. با افزایش ویسکوزیته آلاینده نفتی، نسبت تخلخل اولیه کاهش یافته است. هر چه ویسکوزیته آلاینده نفتی بیشتر باشد، ذرات خاک در ساختار لخته شده پراکنده (ایجاد شده در نتیجه ثابت دی الکتریک پایین آلاینده های نفتی)، به یکدیگر می چسبند و منجر می شود که حجم منافذ خاک کاهش یابد. در واقع اثر ویسکوزیته اثر ثابت دی الکتریک را تعدیل می کند.

در شکل (۶) تغییرات ضریب فشردگی (C_c)، ضریب تورم (C_s) و نشست تحکیمی (ΔH) در برابر درصد های مختلف آلاینده های نفتی نشان داده شده است. نتایج آزمایش تحکیم نشان می دهد که افزودن آلاینده نفتی، سبب افزایش ضریب فشردگی و افزایش نشست خاک گردید. بر اساس نتایج این آزمایش (شکل (۶)-الف) مشخص است که ضریب فشردگی خاک تمیز حدود ۰/۰۸۷ است که با افزودن ۳ درصد روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب به ۰/۰۹۲، ۰/۱۱۵، ۰/۱۲۷ و ۰/۱۴۱ افزایش پیدا کرده است. این روند افزایشی با افزایش میزان آلاینده نفتی همچنان ادامه یافته بطوریکه در نمونه های حاوی ۹ درصد روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب به مقادیر ۰/۱۵۸، ۰/۱۸۲، ۰/۲۲۴ و ۰/۲۳۴ رسیده است. همچنین نتایج بدست آمده (شکل (۶)-ب) نشان می دهد که میزان نشست خاک تمیز حدود ۱/۴۷ میلیمتر بوده که با افزودن آلاینده های نفتی افزایش پیدا کرده است. بطوریکه نشست کل در نمونه های آلوده با ۹ درصد روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب به مقادیر ۲/۰۱، ۲/۶۲، ۲/۸۱ و ۳/۰۴ میلیمتر رسیده است. افزایش ضریب فشردگی و به تبع آن مقدار نشست کل را می توان به تغییر ساختار خاک، کاهش پیوند بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، کاهش اصطکاک بین ذرات به دلیل اثر روان کنندگی آلاینده های نفتی و کاهش مساحت سطح

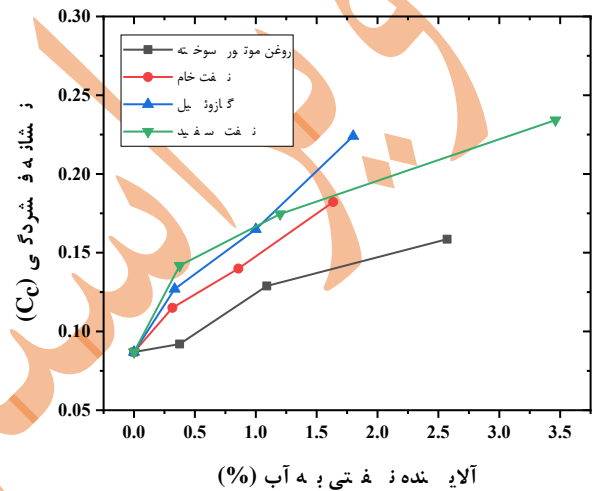
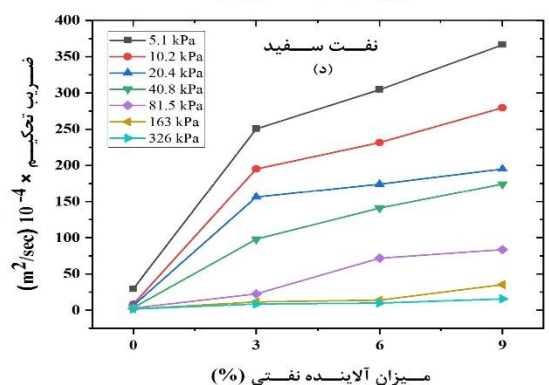
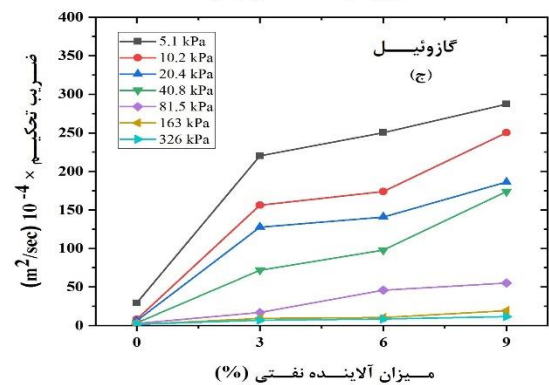
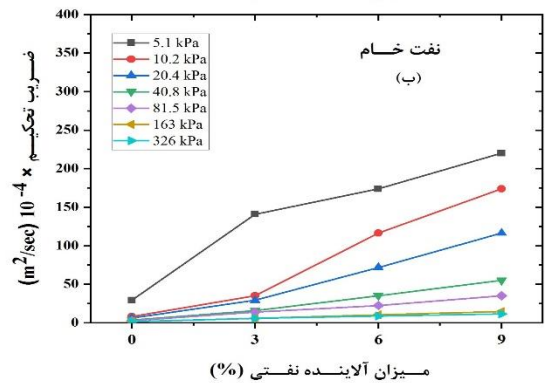
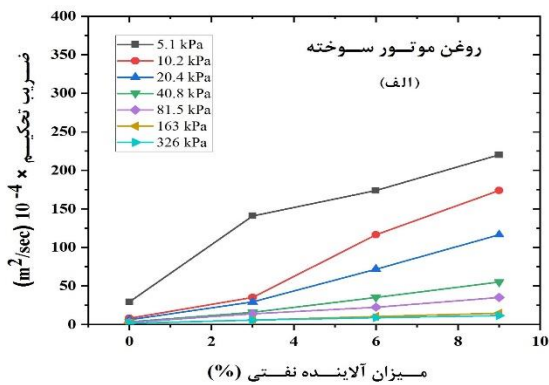
این تغییر در ساختار خاک باعث افزایش تعداد منافذ و حفره های خاک شده که به نوبه خود باعث افزایش C_c شده است. کاهش سطح مخصوص ویژه خاک های آلوده به نفت، جذب آب توسط ذرات خاک را کاهش داده و تخلیه راحت تر آب را باعث شده است. از طرف دیگر مشخص است که با افزایش ویسکوزیته آلاینده نفتی ضریب فشردگی و نشست کل، کمتر افزایش یافته است [۲۰]. دلیل این موضوع در بخش های قبلی توضیح داده شده است. بنابراین مشخص است که تأثیر عواملی که در بالا ذکر شد یعنی روان کنندگی آلاینده های نفتی، کاهش سطح مخصوص ویژه خاک های آلوده به نفت، ساختار لخته شده پراکنده خاک آلوده با آلاینده نفتی که باعث افزایش C_c شده اند، بیشتر از تأثیر ویسکوزیته آلاینده نفتی در کاهش آن است و در نتیجه C_c افزایش یافته است. با توجه شکل ۶-ج روند تغییرات مشابهی برای ضریب تورم مشاهده می شود. مشخص است که با افزایش میزان آلاینده های نفتی ضریب تورم افزایش یافته و با کاهش ویسکوزیته آلاینده نفتی افزایش آنها بیشتر شده است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج بدست آمده از مطالعات انجام شده توسط تالوکدار و سایکا (۲۰۱۳) در مورد ماسه رس دار آلوده با نفت خام [۲۱]، عسکر بیوکی و همکاران (۲۰۱۹) در مورد ماسه بدانه بندی شده آلوده با بنزین [۴۸] و الحسن و فاگ (۲۰۱۳) بر روی ماسه لای دار آلوده با گازوئیل [۴۹] مطابقت دارد. در این مطالعات، تغییر ساختار خاک، کاهش ارتباط بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، اثر روان کنندگی، کاهش اصطکاک بین ذرات و کاهش سطح ویژه دلیل افزایش ضریب فشردگی بیان شده است.

به منظور بررسی اثر غالب ثابت دی الکتریک یا ویسکوزیته بر تغییرات ضریب فشردگی خاک، شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می شود، با افزایش نسبت آلاینده نفتی به آب ضریب فشردگی افزایش می یابد. افزایش نسبت آلاینده نفتی به آب، سبب کاهش ثابت دی الکتریک و افزایش ویسکوزیته سیال منفذی می گردد. به ازای یک درصد مشخص از نسبت آلاینده نفتی به آب، برای مثال حدود ۰/۴، با توجه به نزدیک بودن ثابت دی الکتریک و اثر یکسان ثابت دی الکتریک، ویسکوزیته عامل حاکم است. بدین صورت که هر چه ویسکوزیته بیشتر باشد، افزایش مقدار ضریب فشردگی کمتر است. با ملاحظه شکل ۷ مشخص است که همه نمودارها روندی صعودی دارند. با افزایش نسبت آلاینده نفتی به آب، ضریب فشردگی



شکل ۶: تغییرات پارامترهای بدست آمده از آزمایش تحکیم بر اساس درصد و نوع آلاینده های نفتی مختلف (الف) ضریب فشردگی، (ب) نشست کل، و (ج) ضریب تورم

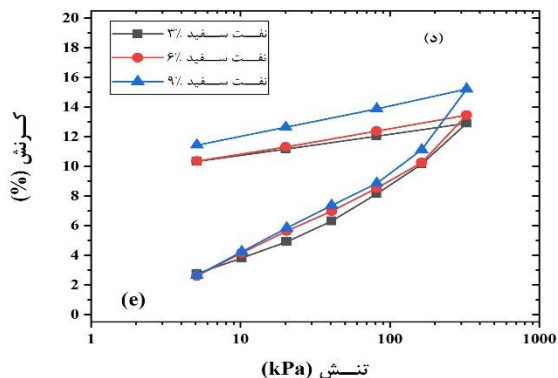
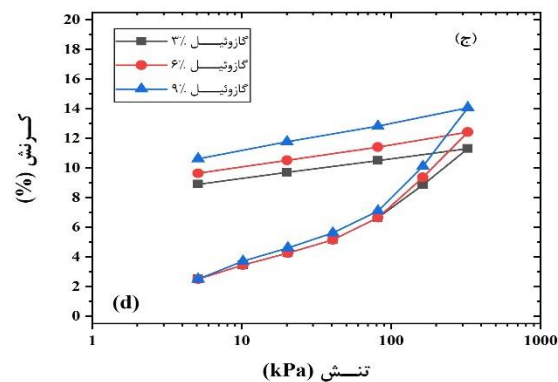
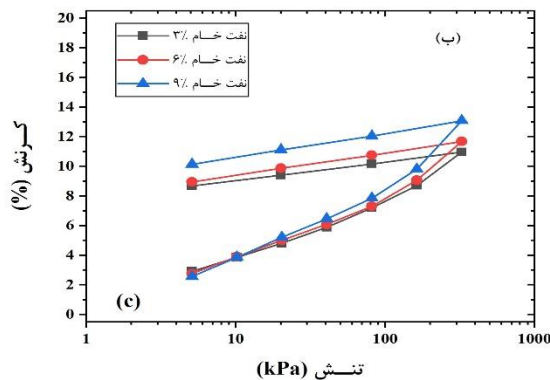
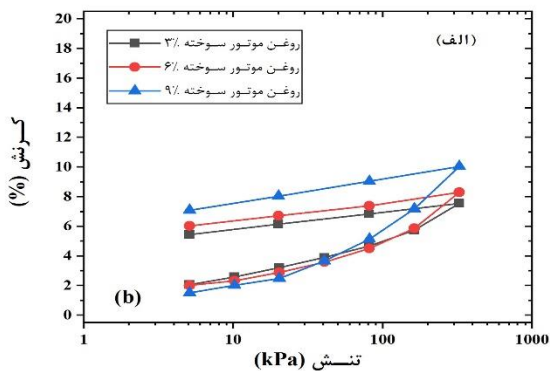
خاک آلوده افزایش یافته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اگرچه ثابت دی الکتریک سیال منفذی کاهش و ویسکوزیته آن نیز افزایش پیدا کرده، اما اثر کاهش ثابت دی الکتریک بیشتر از اثر افزایش ویسکوزیته بر رفتار خاک مشهود است. زیرا اگر ویسکوزیته عامل حاکم بود، به دلیل خاصیت چسبانندگی بین ذرات خاک، سبب می شد ذرات به یکدیگر بیشتر چسبیده، حجم منافذ خاک کمتر کاهش یافته و در نتیجه ضریب فشردگی کاهش یابد.



شکل ۷: تاثیر تغییرات آلاینده نفتی به آب بر روی ضریب فشردگی

تغییرات ضریب تحکیم (C_v) در مقابل میزان آلاینده های نفتی مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که افزودن انواع آلاینده های نفتی مختلف به خاک باعث افزایش ضریب تحکیم شده است. این افزایش را می توان به افزایش نسبت فضای خالی در حضور آلاینده های نفتی نسبت داد که باعث افزایش ضریب نفوذپذیری و کاهش زمان لازم برای تحکیم شده است. همچنین مشخص است که با افزایش درصد آلاینده های نفتی در خاک، ضریب تحکیم همه نمونه های آلوده به میزان بیشتری افزایش پیدا کرده است که با نتایج تحقیقات قبلی مطابقت دارد [۴۶، ۵۰]. از طرف دیگر افزایش ضریب تحکیم در نمونه های با ویسکوزیته بالاتر کندتر صورت گرفته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که هر چه میزان آلاینده نفتی بیشتر و ویسکوزیته آن کمتر باشد، سرعت خروج سیال منفذی (آب و آلودگی نفتی) بیشتر و در نتیجه نشست بیشتری در زمان کوتاهتری ایجاد خواهد شد.

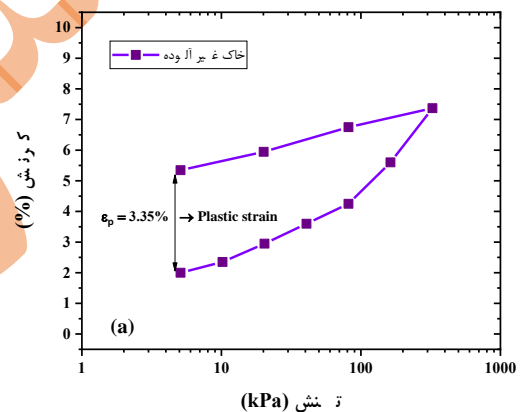
شکل ۸: تغییرات ضریب تحکیم در مقابل درصد های مختلف (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید با تغییرات تنش



شکل ۱۰: تغییرات کرنش پلاستیک برای نمونه های آلوده با (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، و (د) نفت سفید

علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که در سطوح بالای تنش اعمالی، تغییرات ضریب تحکیم در خاک آلوده به روغن موتور سوخته و نفت خام کم و ناچیز است. این موضوع به دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آنها در تنش های کم است. با این حال، در خاک های آلوده به گازوئیل و نفت سفید، مقدار ضریب تحکیم برای همه بارهای اعمال شده به دلیل تعداد زیاد فضاهای منافذ و گسترش این منافذ در حضور این آلاینده ها قابل توجه است.

در شکل (۹) و (۱۰) نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه تمیز و نمونه های آلوده با روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید بر اساس نتایج آزمایش تحکیم ارائه شده است. در جدول ۴ مقادیر کرنش پلاستیک (ϵ_p) ارائه شده است. با توجه به شکل (۹) مقدار کرنش پلاستیک در طی فرآیند بارگذاری و باربرداری برای نمونه خاک تمیز ۳/۳۵ درصد است. در این شکل نحوه محاسبه کرنش پلاستیک مشاهده می شود.



شکل ۹: تغییرات کرنش پلاستیک برای نمونه تمیز

نتایج نشان می دهد (شکل های ۱۰) که با افزایش آلاینده نفتی کرنش پلاستیک در همه خاکهای آلوده افزایش پیدا کرده است. همچنین مشهود است که برای نسبت معینی از آلاینده های نفتی، ϵ_p با کاهش ویسکوزیته آلاینده نفتی افزایش پیدا کرده است. آلوده به روغن موتور سوخته کمترین افزایش ϵ_p را نشان می دهد، در حالی که بیشترین افزایش ϵ_p مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است.

۳-۳- تاثیر آلاینده های نفتی بر روی نفوذپذیری

نفوذ آلاینده های نفتی به خاک تأثیر بسزایی بر ویژگی های ژئوتکنیکی آنها دارد. در این تحقیق ضریب نفوذپذیری به طور غیرمستقیم از نتایج آزمون تحکیم یک بعدی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$K = C_v \gamma_w m_v \quad (4)$$

که در آن m_v و γ_w به ترتیب ضریب تراکم پذیری حجمی و وزن مخصوص آب است.

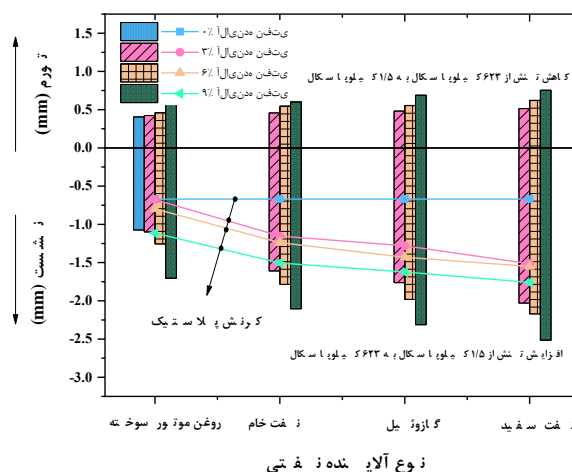
مقادیر ضریب نفوذپذیری خاکهای آلوده با درصد های مختلف آلاینده های نفتی، در تنشهای مختلف، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است روند تغییر ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم با افزایش تنشهای اعمالی در آزمایش تحکیم یک بعدی مشابه است. با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که با افزایش تنش اعمالی، ضریب نفوذپذیری خاکهای آلوده با نفت خام، گازوئیل و نفت سفید کاهش پیدا کرده است، زیرا بیشتر فضاهای خالی خاک آلوده در سطوح پایین تنشهای اعمالی از بین رفته است. برای نمونه های آلوده با درصد های مختلف روغن موتور سوخته، تغییرات تنش اعمالی، تأثیر زیادی بر تغییرات ضریب نفوذپذیری ندارد. این موضوع همانطور که قبلاً نیز اشاره شد به دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آنها در تنش های اعمالی کم است.

نتایج تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده های نفتی مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است. لازم به توضیح است که ضریب نفوذپذیری از میانگین گیری ضرایب نفوذپذیری تحت تنشهای مختلف (شکل ۱۲) بدست آمده است. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می دهد که با افزودن آلاینده های نفتی ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا می کند. نفوذپذیری خاک تمیز $10^{-7} * 1/81$ سانتی متر بر ثانیه است که با افزودن ۳ درصد روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب به $10^{-7} * 4/19$ ، $10^{-7} * 13/2$ ، $10^{-7} * 22/8$ و $10^{-7} * 29/2$ سانتی متر بر ثانیه می رسد. با افزودن مقادیر بیشتر آلاینده های نفتی نفوذپذیری بیشتر افزایش پیدا کرده تا اینکه در نمونه های آلوده با ۹ درصد روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب به $10^{-7} * 8/03$ ، $10^{-7} * 25/5$ ، $10^{-7} * 33/3$ و $10^{-7} * 47/6$ سانتی متر بر ثانیه رسیده است.

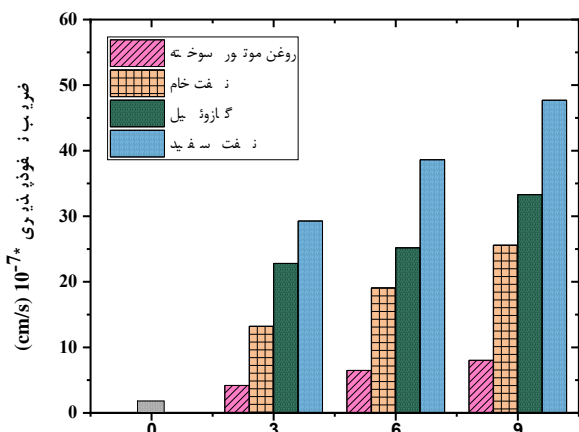
کرنش پلاستیک به طور مستقیم به نشست پلاستیک بستگی دارد، و بیانگر تفاوت بین مقدار نشست در هنگام بارگذاری (از ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلو پاسکال) و مقدار تورم در هنگام باربرداری (از ۳۲۶ تا ۵/۱ کیلو پاسکال) است. در شکل (۱۱) میزان نشست و تورم و همچنین نشست پلاستیک در محدوده تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلو پاسکال نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد، اگرچه با افزایش میزان آلاینده نفتی و همچنین به ازای یک مقدار مشخص آلاینده نفتی با کاهش ویسکوزیته آلاینده نفتی مقدار نشست و تورم افزایش یافته است، اما میزان تورم در مقابل مقدار نشست ناچیز بوده که سبب شده کرنش پلاستیک به میزان نشست وابسته باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که کرنش پلاستیک خاک آلوده شده با افزایش میزان آلاینده نفتی و همچنین به ازای یک مقدار مشخص آلاینده نفتی با کاهش ویسکوزیته آلاینده نفتی افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. یعنی کرنش پلاستیک با ویسکوزیته آلاینده نفتی رابطه عکس دارد.

جدول ۴: مقادیر کرنش پلاستیک خاکهای آلوده با درصدهای مختلف آلاینده های نفتی

نوع آلاینده نفتی	مقدار آلاینده نفتی (%)			
	نفت سفید	گازوئیل	نفت خام	روغن موتور سوخته
۳	۷/۱۵۸	۶/۴۰	۵/۷۷	۳/۶۷
۶	۷/۷۵	۷/۱۳	۶/۳۰	۴/۰۲
۹	۸/۸۰	۸/۱۱	۷/۵۳	۵/۸۵

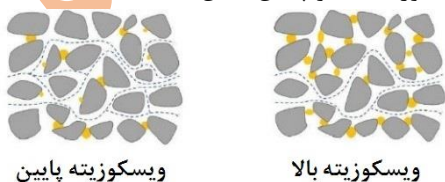


شکل ۱۱: تغییرات نشست، تورم و نشست پلاستیک در فرآیند بارگذاری و باربرداری در محدوده تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال

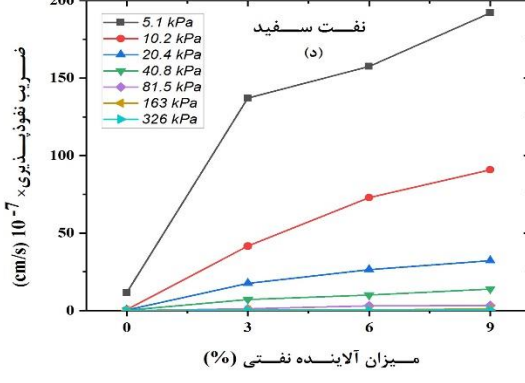
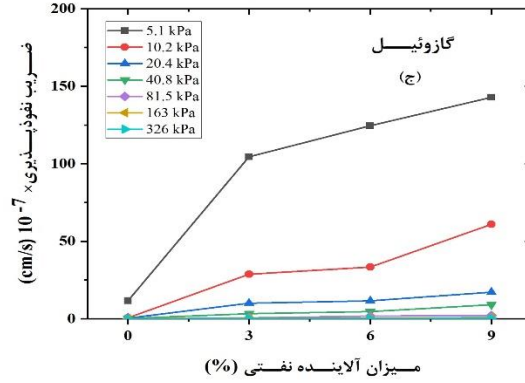
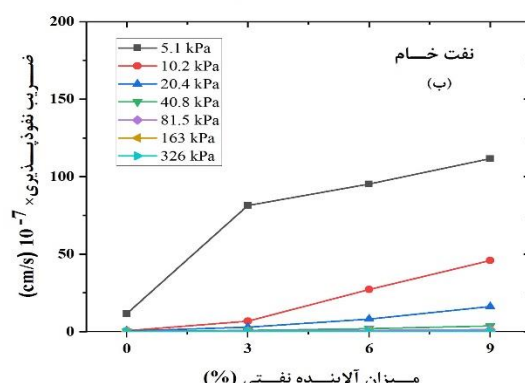
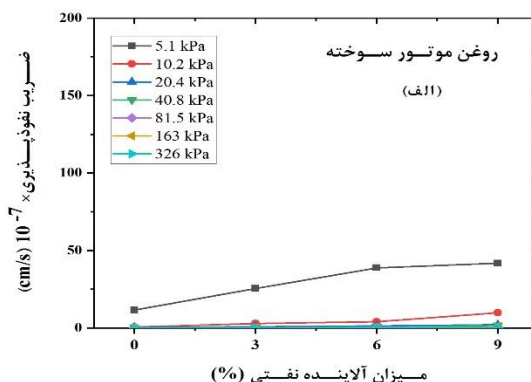


شکل ۱۳: تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده های مختلف

افزایش ضریب نفوذپذیری را می توان به کاهش سطح مخصوص ویژه در نتیجه حضور آلاینده ها نسبت داد که سبب می شود ذرات خاک کمتر آب را جذب نموده و اجازه می دهد آب سریعتر حرکت کند [۲۰]. البته نقش روانکاری آلاینده های نفتی در تسهیل این حرکت نباید نادیده گرفته شود. علاوه براین در مطالعات پیشین، افزایش ضریب نفوذپذیری، به ساختار با فضاهای خالی زیاد موجود در خاکهای آلوده با آلاینده های نفتی نسبت داده شده است [۲۸]. همچنین نتایج نشان می دهد که برای نسبت معینی از آلاینده نفتی، نفوذپذیری با کاهش ویسکوزیته آلاینده افزایش یافته است. این بدان معناست که بیشترین مقدار ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه های آلوده به نفت سفید و پس از آن گازوئیل، نفت خام و روغن موتور سوخته است. هرچه ویسکوزیته آلاینده نفتی بیشتر باشد، علاوه بر اینکه فضاهای خالی کاهش پیدا می کند، ذرات بیشتری به هم می چسبند و موانع بیشتری برای خروج آب ایجاد می شود. در شکل ۱۴ به صورت شماتیک مسیر حرکت آب در خاک آلوده به آلاینده های نفتی با ویسکوزیته بالا و پایین نشان داده شده است.



شکل ۱۴: نمایش شماتیک مسیرهای جریان در خاک آلوده به آلاینده های نفتی با ویسکوزیته کم و زیاد



شکل ۱۲: تغییرات ضریب نفوذپذیری خاکهای آلوده با درصد های مختلف (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید با تغییرات تنش

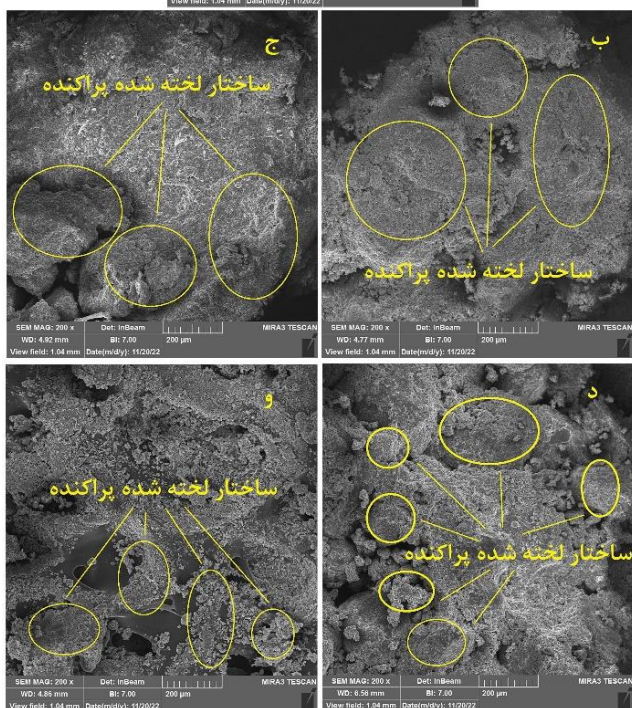
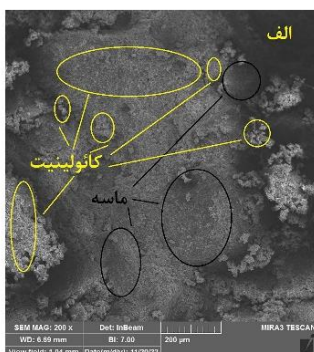
۳-۴- تاثیر آلاینده های نفتی بر روی ریز ساختار

خاک با استفاده از تصاویر SEM

در شکل (۱۵)، عکس های SEM از نمونه های تمیز و آلوده با ۹ درصد انواع مختلف آلاینده های نفتی نشان داده شده است. ترکیبات آلودگی نفتی که سطوح ذرات رس را در بخش ریزدانه خاک پوشانده، ویژگی آبدوستی دانه های رسی تمیز را به حالت آبگریز تغییر داده است. از طرفی آلاینده های نفتی ثابت دی الکتریک پایینی دارند. طبق تئوری گوی-چاپمن [۲۹، ۳۰]، مایعات با ثابت دی الکتریک کم باعث ایجاد لایه دوگانه بسیار نازک در مقایسه با مایعات با ثابت دی الکتریک بالاتر می شوند و این به نوبه خود باعث کاهش نیروهای دافعه بین ذره ای و در نتیجه لخته شدن ذرات می شود [۳۱]. در نتیجه ساختار خاکی که قبل از آلوده شدن متشکل از ماسه و کائولینیتی بود که کائولینیت فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده بود به ساختاری متشکل از دانه های ماسه و کائولینت و دانه های بهم چسبیده کائولینیت حتی بزرگتر از دانه های ماسه تبدیل شده است (شکل ۱۶). این موضوع باعث شد که خاک آلوده دارای ساختاری سست شده و در آن منافذ بیشتری بین ذرات مشاهده شود [۵۱].

یعنی آلاینده های نفتی سبب ایجاد یک ساختار لخته شده پراکنده (*flocculated but dispersed structure*) در خاک ماسه رس دار شده اند. برای درک بهتر، ساختار لخته شده اما پراکنده، به صورت شماتیک در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با مقایسه شکل های (۱۵) ب تا (۱۵) د مشخص است که لخته های بزرگتری در خاک آلوده به روغن موتور سوخته که بالاترین ویسکوزیته را در بین آلاینده های نفتی مورد استفاده در این مطالعه دارد، تشکیل شده است. پس از روغن موتور سوخته، خاک آلوده به نفت خام بزرگترین ذرات لخته را تشکیل داده است. با این حال، زمانی که ساختار خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید با یکدیگر مقایسه می شوند (شکل های (۱۵) د تا (۱۵) ه)، تفاوت معنی داری در اندازه لخته های تشکیل شده وجود ندارد. لخته های بزرگتر ایجاد شده با افزایش ویسکوزیته آلاینده نفتی به دلیل خاصیت چسبندگی آلاینده با ویسکوزیته بالاتر است که می تواند ذرات بیشتری را به یکدیگر بچسباند. در ساختار لخته شده ی پراکنده ناشی از وجود آلاینده های نفتی، ریز منافذ کاهش، درشت منافذ افزایش یافته و

بین ساختارهای خاک شکاف ایجاد شده که مشارکت بین ذرات را کاهش می دهد.



شکل ۱۵: تصاویر SEM ماسه رس دار، (الف) تمیز، (ب) آلوده با ۹ درصد روغن موتور سوخته، (ج) آلوده با ۹ درصد نفت خام، (د) آلوده با ۹ درصد گازوئیل، (ه) آلوده با ۹ درصد نفت سفید



شکل ۱۶: شماتیک تاثیر آلاینده نفتی بر روی ریزساختار

بیشترین کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم مربوط به خاک آلوده به آلاینده با ویسکوزیته پایین (نفت سفید) است.

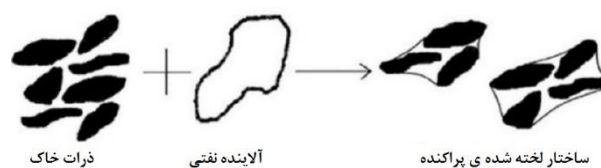
۴- هر چهار آلاینده نفتی سبب کاهش درصد رطوبت بهینه شده اند. کاهش درصد رطوبت بهینه به دلیل اشغال فضاهای بین ذره ای توسط آلاینده های نفتی، جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به دلیل ویژگی های آبریز آلاینده های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه است که جذب مولکول های آب توسط ذرات رس را کاهش خواهد داد.

۵- به دلیل تغییر ساختار خاک، کاهش پیوند بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، کاهش اصطکاک بین ذرات به دلیل اثر روان کنندگی آلاینده های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه، آلاینده های نفتی سبب افزایش ضریب فشردگی و ضریب نفوذپذیری شده اند.

۶- نفت سفید باعث بیشترین افزایش (۱۶۹ درصد) در ضریب فشردگی شده است. بنابراین کنترل نشست در خاک های آلوده به نفت سفید بسیار مهم است. اگر سازه ای بر روی خاک های آلوده به نفت سفید ساخته شوند یا اگر چنین خاک هایی در پروژه های ساختمانی مجدداً استفاده شوند، بدلیل افزایش نشست پذیری لازم است توجه ویژه ای در طراحی های ژئوتکنیکی صورت پذیرد.

منابع (References)

۱. Haghsheno, H. and M. Arabani, ۲۰۲۳. Stabilization and solidification of oil-polluted soils using secondary stabilizers and industrial wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. ۱-۳۴. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05285-x>.
۲. Singh, S., R. Srivastava, and S. John, ۲۰۰۸. Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & sediment contamination*, ۱۷, pp. ۲۹۰-۳۰۰. <https://doi.org/10.1080/15320380802007028>.
۳. Abousnina, R.M., et al., ۲۰۱۵. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine



شکل ۱۷: شکل شماتیک ساختار لخته شده پراکنده

۵- نتیجه گیری :

این تحقیق به بررسی تاثیر انواع آلاینده های نفتی بر ویژگی های نشست پذیری خاک ماسه رسی پرداخته است. ویسکوزیته و ثابت دی الکتریک به عنوان دو ویژگی مهم آلاینده های نفتی، تاثیر زیادی بر روی خصوصیات نشست پذیری خاک مورد مطالعه دارند. اما با توجه به اینکه ثابت دی الکتریک تمام آلاینده های نفتی نزدیک به یکدیگرند، ثابت دی الکتریک اثر یکسانی در خاک آلوده با یک درصد معین از آلاینده های مختلف نفتی دارد. بنابراین نقش ویسکوزیته آلاینده های نفتی بر روی خصوصیات نشست پذیری پر رنگ تر است. نتایج اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

- ۱- زمانی که ماسه رس دار در معرض آلاینده های نفتی قرار گیرد، آلاینده های نفتی ذرات خاک رس را خواهد پوشاند. به دلیل ثابت دی الکتریک پایین آلاینده های نفتی، نیروی دافعه بین ذرات رس کاهش پیدا خواهد کرد و باعث لخته شدن ذرات رس می گردد. در نتیجه ساختار خاکی که قبل از آلوده شدن متشکل از ماسه و کائولینیتی بود و کائولینیت فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده بود به ساختاری متشکل از دانه های ماسه و دانه های بهم چسبیده رس حتی بزرگتر از دانه های ماسه تبدیل خواهد شد. این موضوع باعث خواهد شد که خاک آلوده دارای ماتریس به طور قابل توجهی شل باشد و در ساختار خاک، منافذ بین ذرات بیشتر مشاهده شود.
- ۲- آلاینده های نفتی در خاک ماسه رس دار ساختار لخته شده پراکنده ایجاد می کنند. هر چه ویسکوزیته آلاینده نفتی بیشتر باشد، به دلیل خاصیت چسبندگی، ذرات بیشتری را به یکدیگر می چسباند و سبب ایجاد لخته های بزرگتری می شود.
- ۳- به دلیل چگالی کمتر آلاینده های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به دلیل وجود آلاینده های نفتی در آزمایش تراکم، هر چهار آلاینده نفتی باعث کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم شدند. نقش ویسکوزیته در تغییر وزن مخصوص خشک ماکزیمم نیز مهم است.

۱۰. Payatakes, A., ۱۹۸۲. Dynamics of oil ganglia during immiscible displacement in water-wet porous media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, ۱۴, pp. ۳۶۵-۳۹۳.
DOI: ۱۰.۱۱۴۶/annurev.fl.۱۴.۰۱۰۱۸۲.۰۰۲.۵۳
۱۱. Karimpour-Fard, M. and R. Alimohammadi-jelodar, ۲۰۱۸. Permeability of Two Clayey Soils Exposed to Petroleum Products and Organic Solvents. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, ۵۱, pp. ۱۳۱-۱۴۶. <https://doi.org/۱۰.۷۵۰۸/CEIJ.۲۰۱۸.۰۱.۰۰۸>
۱۲. Mackenzie, J., ۱۹۷۰. Interaction between oil drops and mineral surfaces. *Society of Mining Engineers, AIME, Transaction*, ۲۴۷, pp. ۲۰۲-۲۰۸. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.fuel.۲۰۲۲.۱۲۴۴.۲>
۱۳. Arabani, M. and H. Haghsheno, ۲۰۲۴. The effect of temperature curing on total petroleum hydrocarbon (TPH) values of slag-based polluted sample leachate. *Materials Letters*, ۳۵۶, p. ۱۳۵۵۴۲. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.matlet.۲۰۲۳.۱۳۵۵۴۲>
۱۴. Haghsheno, H. and M. Arabani, ۲۰۲۲. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, ۲۹, pp. ۳۲۶۷۰-۳۲۷۰۱. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۱۳۵۶-۰۲۲-۱۹۴۱۸-۱>
۱۵. Ur-Rehman, H., S. Abduljawwad, and T. Akram, ۲۰۰۷. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, ۱۲, pp. ۱-۱۲.
۱۶. Jia, Y., et al., ۲۰۱۱. The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the sand. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, ۲۴, pp. ۸۳۳-۸۴۵. <https://doi.org/۱۰.۱۰۸۰/۱۵۳۲.۳۸۳.۲۰۱۵.۱۰۵۸۳۳۸>
۴. Haghsheno, H. and M. Arabani, ۲۰۲۳. The effect of primary stabilizers for stabilization/solidification of oil-polluted soils—a review. *Environmental Technology Reviews*, ۱۲, pp. ۳۳۷-۳۵۸. <https://doi.org/۱۰.۱۰۸۰/۲۱۶۲۲۵۱۵.۲۰۲۳.۲۱۵۴۶>
۵. Arabani, M. and H. Haghsheno, ۲۰۲۳. The effect of various environmental conditions on stabilization/solidification (S/S) of oil-contaminated soil using alkaline activation of granulated blast furnace slag (GBFS). *Construction and Building Materials*, ۴۰۹: p. ۱۳۴۰۲۲.
۶. Al-Hamaiedh, H.D. and O.N. Maaitah, ۲۰۱۱. Treatment of oil polluted soil using electrochemical method. *Alexandria Engineering Journal*, ۵۰, pp. ۱۰۵-۱۱۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.aej.۲۰۱۱.۰۱.۰۱۰>
۷. Dudley, B., ۲۰۱۸. BP statistical review of world energy ۲۰۱۸. Energy economic, Centre for energy economics research and policy. British Petroleum, Available via <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/electricity>
۸. Kandiyoti, R., et al., ۲۰۱۶. Solid fuels and heavy hydrocarbon liquids: thermal characterization and analysis. Elsevier.
۹. Van der Perk, M., ۲۰۱۳. Soil and water contamination. CRC Press.

۲۲. Khosravi, E., et al., ۲۰۱۳. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, ۱۶۶, pp. ۱۱-۱۶.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>
۲۳. Jedari, C. and M. Farahani, ۲۰۱۸. Permeability and Compression Characteristics of Clay Contaminated with Kerosene and Gasoil. *Mapta Journal of Architecture, Urbanism and Civil Engineering (MJAUCE)*, ۱, pp. ۱-۱۰.
۲۴. Safehian, H., A.M. Rajabi, and H. Ghasemzadeh, ۲۰۱۸. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, ۲۴۱, pp. ۵۵-۶۳.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.020>
۲۵. Karkush, M.O. and A.G. Jihad. ۲۰۲۰. Studying the Geotechnical Properties of Clayey Soil Contaminated by Kerosene. in *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ, ۸۵۷, pp. ۳۸۳-۳۹۳.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.383>
۲۶. Karkush, M.O. and Z.A. Kareem, ۲۰۱۷. Investigation of the Impacts of fuel oil on the geotechnical properties of cohesive soil. *Engineering Journal*, ۲۱, pp. ۱۲۷-۱۳۷. DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.4.127>
۲۷. Medhat, F.K., et al., ۲۰۱۹. Influence of Kawergosk Refinery Waste Oil on Geotechnical Properties of Contaminated Clayey Soil. *Polytechnic Journal*, ۹, pp. ۶۴-۷۳.
- Yellow River Delta, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, ۷۰, pp. ۵۱۷-۵۲۵.
<https://doi.org/10.1007/s10643-011-0349-8>
۱۷. Kermani, M. and T. Ebadi, ۲۰۱۲. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, ۲۱, pp. ۶۵۵-۶۷۱. <https://doi.org/10.1080/15320383.2012.672486>
۱۸. Ota, J.O., ۲۰۱۳. The effect of light crude oil contamination on the geotechnical properties of kaolinite clay soil. Doctoral dissertation, Anglia Ruskin University.
۱۹. Al-Adhamii, R.A., M.Y. Fattah, and M.T. Al-Hadidi, ۲۰۱۸. Crude oil effect on the clayey soil mechanical and physical properties. *International Journal of Engineering & Technology*, ۷, pp. ۴۵۳-۴۵۸.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.2026242>
۲۰. Salimnezhad, A., H. Soltani-Jigheh, and A.A. Soorki, ۲۰۲۱. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۱۳, pp. ۶۵۳-۶۷۰.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
۲۱. Talukdar, D. and B. Saikia, ۲۰۱۳. Effect of crude oil on some consolidation properties of clayey soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, ۳, pp. ۱۱۷-۱۲۰.

- advances: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Problems Related to Geo-environment, Okayama, Japan. Taylor & Francis, 7, pp. 954-961. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.954.961>
35. Nazari Heris, M., et al., 2020. Effects of Lead and Gasoline Contamination on Geotechnical Properties of Clayey Soils. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 29, pp. 340-354. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1719973>
36. Kogbara, R.B., Y. Yi, and A. Al-Tabbaa, 2011. Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime-slag blend. Environmental Science and Pollution Research, 18, pp. 1286-1296. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0480-x>
37. Oluwatuyi, O.E. and O.O. Ojuri, 2017. Environmental performance of lime-rice husk ash stabilized lateritic soil contaminated with lead or naphthalene. Geotechnical and Geological Engineering, 35, pp. 2947-2964. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0294-9>
38. Al-Adhamii, R.A., et al., Geotechnical properties of gypseous soil contaminated with crude oil. MS&E, 737, pp. 012115. DOI 10.1088/1757-899X/737/1/012115.
39. Nasehi, S.A., et al., 2016. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. Geotechnical and Geological Engineering, 34, pp. 333-345. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9948-7>
- <https://doi.org/10.25156/ptj.v9n1y2019.p64-73>
40. Nazir, A.K., 2011. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. Alexandria Engineering Journal, 50, pp. 331-335. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.05.002>
41. Guoy, G., 1910. Constitution of the electric charge at the surface of an electrolyte. J Physique, 9, pp. 457-67.
42. Chapman, D.L., 1913. LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science, 25, pp. 475-481.
43. Quigley, R.M. and F. Fernandez, 1991. Hydrocarbon liquids and clay microstructure, in Microstructure of Fine-Grained Sediments. Springer, New York, NY. pp 469-474. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4428-8_5
44. Carey, A. and A. Hayzen, 2013. Machinery Lubrication—The Dielectric Constant and Oil Analysis. Emerson Process Management.
45. Al-Aghbari, M., R. Dutta, and Y. Mohamedzeini, 2011. Effect of diesel and gasoline on the properties of sands—a comparative study. International Journal of Geotechnical Engineering, 5, pp. 61-68. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.61-68>
46. Rojas, J., L. Salinas, and I. Garnica, 2003. Influence of the kinematic viscosity of oil contaminants in the compaction and hydraulic conductivity in certain type of soils. in Groundwater engineering: recent

<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2541-6>

۴۶. Hamidi, A. and A.H. Karimi, ۲۰۲۱. Effect of Phytoremediation on Compression Characteristics of Silty Clayey Sand Contaminated with Crude Oil. *International Journal of Civil Engineering*, ۱۹, pp. ۹۷۳-۹۹۵. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00699-9>
۴۷. Akinwumi, I., D. Diwa, and N. Obianigwe, ۲۰۱۴. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, ۳, pp. ۸۱۶-۸۲۴. <https://doi.org/10.6088/ijaser.۰۳۰۴۰۰۰۰۷>
۴۸. Askarbioki, M., et al., ۲۰۱۹. Impact of gasoline contamination on mechanical behavior of sandy clay soil. *Journal of Mining and Environment*, ۱۰, pp. ۳۸۹-۳۹۹. <https://doi.org/10.22044/jme.۲۰۱۹.۷۶۶۰.۱۶۲۲>
۴۹. Alhassan, H.M. and S.A. Fagge, ۲۰۱۳. Effects of crude oil, low point pour fuel oil and vacuum gas oil contamination on the geotechnical properties sand, clay and laterite soils. *Int J Eng Res Appl*, ۳, pp. ۱۹۴۷-۱۹۵۴.
۵۰. Karkush, M. and M. AbdulKareem, ۲۰۱۸. Effects of residue oil contamination on the geotechnical properties of clay soil. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, ۲۵, pp. ۲۴۳-۲۵۵.
۵۱. Izdebska-Mucha, D., et al., ۲۰۱۱. Influence of hydrocarbon contamination on clay soil microstructure. *Clay Minerals*, ۴۶, pp. ۴۷-۵۸.
۴۰. Khamehchiyan, M., A.H. Charkhabi, and M. Tajik, ۲۰۰۷. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering geology*, ۸۹, pp. ۲۲۰-۲۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.۲۰۲۱.۱۰۶۰۲۱>
۴۱. Kogbara, R.B. and A. Al-Tabbaa, ۲۰۱۱. Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil. *Science of the Total Environment*, ۴۰۹, pp. ۲۳۲۵-۲۳۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.۲۰۱۱.۰۲.۰۳۷>
۴۲. Ostovar, M., et al., ۲۰۲۱. Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, ۳۰, pp. ۵۸-۷۳. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1792410>
۴۳. Bojnourdi, S., et al., ۲۰۲۰. Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures. *Engineering Geology*, ۲۷۹, pp. ۱۰۵۸۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.۲۰۲۰.۱۰۵۸۸۶>
۴۴. De Souza Correia, N., et al., ۲۰۲۰. Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, ۱۱, pp. ۱-۱۵. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00115-2>
۴۵. Zheng, X., et al., ۲۰۱۴. A developed technique for measuring water content in oil-contaminated porous media. *Environmental earth sciences*, ۷۱, pp. ۱۳۴۹-۱۳۵۶.

میراث‌شناسی نسله