

تأثیر نوع آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های ژئوتکنیکی بخصوص نشست‌پذیری خاک، موضوع جالبی است که کمتر در مطالعات پیشین بررسی شده است. در پژوهش حاضر، خصوصیات نشست‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار آلوده به مقدار ۳، ۶، و ۹ درصد وزن خشک خاک و آلوده به ۴ نوع آلاینده‌ی نفتی ارزیابی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تأیید کرده‌اند که آلاینده‌های نفتی، ساختار خاک را به ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده تغییر می‌دهند. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، لخته‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که آلاینده‌های نفتی علاوه بر اینکه فضای منافذ بین ذرات را افزایش می‌دهند، با پوشاندن ذرات خاک، مساحت سطح ویژه‌ی (SSA) خاک را کاهش می‌دهند و در نتیجه، با کاهش جذب آب توسط ذرات خاک، امکان تخلیه‌ی سریع‌تر آب را فراهم می‌کنند. این امر باعث افزایش ضریب فشردگی (CC)، نشست تحکیمی، ضریب تحکیم (CV)، و ضریب نفوذپذیری می‌شود.

واژگان کلیدی: خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی، خواص نشست‌پذیری، ویسکوزیته، ماسه‌ی رس‌دار.

arabani@guilan.ac.ir

haghsheno@phd.guilan.ac.ir

## ۱. مقدمه

آلودگی خاک، عبارت است از وجود، پخش، یا آمیختن یک یا چند ماده‌ی خارجی در خاک به مقدار و مدتی است که کیفیت فیزیکی، شیمیایی، و بیولوژیکی آن را طوری که برای انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان یا آثار و ابنیه‌ی زیان‌آور باشند، تغییر دهد. به عبارت دیگر، هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی خاک، به نحوی که استفاده از آن را ناممکن گرداند، آلودگی خاک نامیده می‌شود. منابع مختلف آلودگی خاک، کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهند و منجر به مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند. نفت و مشتق‌های آن (بنزین، نفت سفید، گازوئیل، روغن موتور، سوخت جت، و ...) از مهم‌ترین انواع آلاینده‌های خاک هستند.<sup>[۱]</sup> نفت و محصولات تصفیه‌شده‌ی آن، عمده‌ی منابع جهانی هستند که در بخش‌های صنعتی و حمل و نقل برای نیازهای انرژی در سراسر جهان استفاده می‌شوند.<sup>[۲]</sup> به دلیل افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، اهمیت مواد مذکور افزایش یافته است.<sup>[۳]</sup> از مراحل اولیه‌ی اکتشاف تا مراحل نهایی مصرف، امکان آلودگی‌های نفتی پدیده‌ی اجتناب‌ناپذیر است.<sup>[۴ و ۵]</sup>

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶.

استناد به این مقاله:

عربانی، مهیار و حق شنو، حامد، ۱۴۰۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی مختلف در خواص نشست‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار، ۴۰(۴)، صص. ۱۱۶-۱۳۱

DOI: 10.24200/j30.2024.63856.3291

<sup>۱</sup> British Petroleum

<sup>۲</sup> Non-Aqueous Phase Liquids

فشردگی همه‌ی خاک‌ها شده است.<sup>[۲۱]</sup> خسروی و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعه‌ی بر روی تأثیر گازوئیل در رفتار نشست‌پذیری خاک رس CL انجام داده و نتیجه گرفته‌اند که اضافه‌شدن ۲۰٪ از آلاینده‌ی مذکور سبب کاهش ۳۴/۵ درصدی ضریب فشردگی شده است. همچنین توضیح داده شده است که کاهش ضریب فشردگی مربوط به انرژی سطحی موجود در فصل مشترک نفت و آب است؛ که کشش سطحی در سطح اتصال آب و آلاینده را ایجاد کرده و مانع از خروج و زهکشی کامل آب شده است.<sup>[۲۲]</sup> البته جداری و فراهانی (۲۰۱۸)، با مطالعه‌ی دیگر نتایج خسروی و همکاران (۲۰۱۳) را رد کردند و نشان دادند که افزودن تا ۹٪ گازوئیل به خاک رس CL، سبب افزایش ۳۷/۱ درصدی ضریب فشردگی می‌شود. این کاهش در ضریب نفوذپذیری، به خاصیت روان‌کاری نفت سفید نسبت داده شده است.<sup>[۲۳]</sup> صفاهیان و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داده‌اند که افزودن ۲۰٪ گازوئیل سبب افزایش ۳۴ درصدی ضریب فشردگی خاک رس CH شده است. افزایش ضریب فشردگی به ماهیت غیرقطبی مولکول‌های نفت خام نسبت داده شده است. همچنین، توضیح داده شده است که ذرات خاک رس باردار نمی‌توانند مولکول‌های نفت خام غیرقطبی را همانند مولکول‌های دوقطبی آب جذب کنند. این امر سهولت زهکشی نفت خام را موجب شده است.<sup>[۲۴]</sup> کارکوش و کریم<sup>۶</sup> (۲۰۱۷)، با بررسی تأثیر نفت کوره در ضریب فشردگی خاک رس CL نشان دادند که اضافه‌کردن نفت کوره به خاک رس، ضریب فشردگی آن را افزایش می‌دهد. افزودن ۲۰٪ از آلاینده‌ی نفت کوره به خاک CL موجب افزایش ۱۳/۴٪ ضریب فشردگی شده و آن را از ۰/۲۷۴ به ۰/۳۲۰ رسانیده است. دلیل افزایش ضریب فشردگی به بزرگ‌شدن فضاهای خالی ناشی از بزرگ‌شدن دانه‌های خاک در اثر آلوده‌شدن با نفت کوره و همچنین به نقش روان‌کننده‌ی نفت کوره ارتباط داده شده است.<sup>[۲۵]</sup> کارکوش و جیهاد<sup>۷</sup> (۲۰۲۰)، با بررسی اثر نفت سفید در خصوصیات نشست‌پذیری خاک رس CH نشان دادند که افزودن آلاینده‌ی نفت سفید سبب افزایش ضریب فشردگی خاک رسی شده و برای خاک مخلوط‌شده با ۵۰٪ نفت سفید، ضریب فشردگی ۴۴/۳٪ افزایش یافته است. توضیح داده شده است که کاهش پیوند بین ذرات خاک در نتیجه‌ی آلوده‌شدن با نفت سفید منجر به افزایش ضریب فشردگی شده است.<sup>[۲۶]</sup> مدهت<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، با بررسی تأثیر روغن موتور در نشست‌پذیری خاک رس CL نشان دادند که افزودن تا ۲۰٪ روغن موتور، سبب کاهش ۹۳/۵ درصدی ضریب فشردگی شده است.<sup>[۲۷]</sup> اما در مطالعه‌ی دیگر، نظیر<sup>۹</sup> (۲۰۱۱) نشان داد که روغن موتور سبب افزایش ۵۱/۶ درصدی ضریب فشردگی شده است.<sup>[۲۸]</sup>

نشست‌پذیری خاک‌های حاوی ریزدانه به‌دلیل آلودگی‌های نفتی را می‌توان با دو مکانیسم مختلف توضیح داد: (الف) به‌دلیل تغییرات در اثر نیروهای فیزیکی (عوامل مکانیکی)؛ (ب) به‌دلیل تغییر در عوامل فیزیکوشیمیایی. عوامل مکانیکی، شامل: نوع خاک، خواص فیزیکی سیال منفذی، مانند: چگالی و ویسکوزیته هستند. میزان برهمکنش فیزیکوشیمیایی در خاک‌ها به‌صورت کیفی توسط نظریه‌ی لایه‌ی دوگانه‌شده توسط گوی (۱۹۱۰)،<sup>[۲۹]</sup> و چاپمن (۱۹۱۳)،<sup>[۳۰]</sup> ارائه شده است؛ که بر طبق آن، یکی از پارامترهایی که در

ایران، یکی از کشورهای دارای بیشترین ذخایر نفتی در جهان است. براساس گزارش ارائه‌شده توسط اداره‌ی اطلاعات انرژی آمریکا (EIA)، در سال ۲۰۲۱، ایران ۲۴٪ از ذخایر نفت خاورمیانه و ۱۲٪ در جهان را در اختیار داشته است؛ که بیشتر آن‌ها در جنوب ایران قرار دارد. نشئت نفت از منابع مختلف، از جمله: تصادف‌های نفتکش‌ها، نشئت در پایانه‌های نفتی، و نشئت پساب‌های نفتی از انبارهای نفت خام و پالایشگاه‌های نفت، محیط زیست دریایی، و ساحلی مناطق جنوبی ایران را در چند دهه‌ی گذشته آلوده کرده است. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به نفت در منطقه‌ی مذکور از جمله ویژگی‌های نشست‌پذیری برای طراحان ژئوتکنیک حائز اهمیت است. پیش‌بینی نشست توده‌ی خاکی که ممکن است در آینده با آلاینده‌های نفتی آلوده شود، برای ساختمانی که بر روی آن ساخته خواهد شد، ضروری است. در صورت استفاده‌ی مجدد از خاک آلوده در ساخت و ساز، ارزیابی میزان نشست‌پذیری و ارائه‌ی راهکارهای عملی برای کنترل آن، از جمله دلایلی است که بررسی کیفیت نشست‌پذیری خاک آلوده به نفت را حیاتی می‌کند.

مطالعات متعددی در مورد تأثیر آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های تحکیم‌پذیری انواع خاک‌ها انجام شده است. الرحمن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷)، مطالعه‌ی بر روی تأثیر نفت خام در نشست‌پذیری خاک رس با خاصیت خمیری بالا (CH) انجام داده و نتیجه گرفته‌اند که افزودن نفت خام سبب افزایش ۶۳/۳٪ ضریب فشردگی شده است؛ به‌طوری که ضریب فشردگی از ۰/۳۴۲ به ۰/۹۳۲ رسیده است. در مطالعه‌ی اخیر، محتمل‌ترین مکانیسم مسئول افزایش ضریب فشردگی، تغییر در ساختار خاک با حضور نفت خام بیان شده است.<sup>[۱۵]</sup> جیا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، نیز با بررسی تأثیر مقادیر مختلف نفت خام در ضریب فشردگی خاک لای نشان داده‌اند که با افزودن میزان نفت خام در خاک، ضریب فشردگی افزایش پیدا کرده است. همچنین، نفت خام اتصال بافتی بین دانه‌ها را کاهش و تعداد منافذ را افزایش داده و ساختار خاک را شل کرده است.<sup>[۱۶]</sup> کرمانی و عبادی (۲۰۱۲)، تأثیر نفت خام در ضریب فشردگی خاک رس با خاصیت خمیری پایین (CL) را ارزیابی کرده و نتیجه گرفته‌اند که نفت خام باعث افزایش ضریب فشردگی خاک شده است. این رفتار به آثار روان‌کنندگی روغن و کاهش اصطکاک بین ذرات خاک نسبت داده شده است.<sup>[۱۷]</sup> اوتا<sup>۳</sup> (۲۰۱۳)، نیز با بررسی تأثیر نفت خام در ضریب فشردگی خاک رس CL نشان داد که افزودن تا ۲۰٪ نفت خام سبب افزایش ۵۴/۱٪ ضریب فشردگی شده است. این موضوع علاوه‌بر تأثیر نفت خام در کاهش اصطکاک بین ذرات، به ساختار باز ایجادشده در خاک ناشی از وجود نفت خام نسبت داده شده است.<sup>[۱۸]</sup> الادهمی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ی خود نشان داده‌اند که افزودن تا ۱۵٪ نفت خام به خاک رس CL، باعث کاهش ۹/۶٪ ضریب فشردگی شده است.<sup>[۱۹]</sup> سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱) نتیجه گرفته‌اند که افزودن تا ۱۲٪ نفت خام به خاک رس CH، سبب افزایش ۲۱/۶٪ ضریب فشردگی شده است.<sup>[۲۰]</sup> تالوکدار و سایکا<sup>۵</sup> (۲۰۱۳)، تأثیر نفت خام را در سه نوع خاک رس CH، خاک رس CL، و ماسه‌ی رس‌دار (SC) بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که وجود نفت خام در خاک‌ها سبب افزایش ضریب

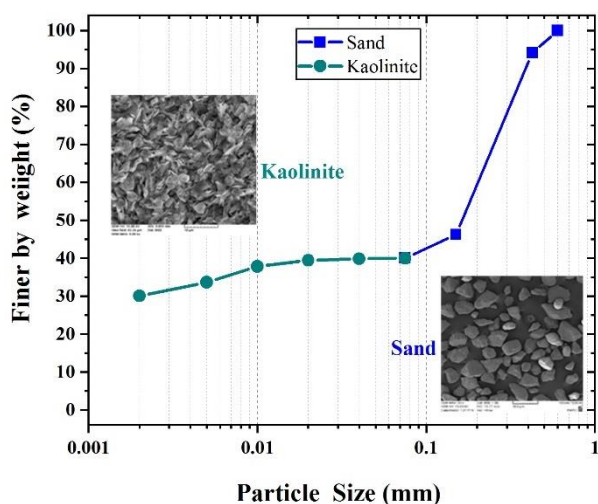
<sup>۶</sup> Karkush & Kareem<sup>۷</sup> Karkush & Jihad<sup>۸</sup> Medhat<sup>۹</sup> Nazir<sup>۱</sup> Ur-Rehman<sup>۲</sup> Jia<sup>۳</sup> Ota<sup>۴</sup> Al-Adhamii<sup>۵</sup> Talukdar & Saikia

ماسه-کائولینیت (SKM) استفاده شده است؛ که با مخلوط کردن ۶۰٪ ماسه با ۴۰٪ کائولینیت تهیه شده است.<sup>[۲۵]</sup> ماسه‌ی موردنظر از سواحل انزلی در شمال کشور ایران تهیه شده است، که عمده از ماسه‌های بسیار ریز و یکنواخت تشکیل شده است. جنس ماسه‌های اخیر عموماً سیلیسی بوده و با وجود ریزدانه‌بودن ماسه‌ها، غالباً از سنگ‌دانه‌های تیزگوشه تشکیل شده است. کائولینیت استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر از کارخانه‌ی خاک چینی ایران تهیه شده است. توزیع دانه‌بندی مخلوط ماسه و کائولینیت مطابق استاندارد ASTM D۴۲۲ در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

ترکیب‌های شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز اشعه‌ی ایکس فلورسانس (XRF) در جدول ۱ و مشخصات ژئوتکنیکی ماسه و کائولینیت و همچنین مخلوط ماسه- کائولینیت در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

### ۲.۱.۲. آلاینده‌های نفتی

در مطالعه‌ی حاضر، از چهار نوع آلاینده‌ی 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 و خواص اساسی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱. توزیع دانه‌بندی ماسه و کائولینیت.

جدول ۱. ترکیب‌های شیمیایی ماسه و کائولینیت با استفاده از آنالیز

### XRF

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

ضخامت لایه‌ی دوگانه و در نتیجه ساختار خاک مؤثر است، ثابت دی الکتریک سیال حفره‌ی است. بنابراین، دو ویژگی مهم آلاینده‌های نفتی، به‌عنوان سیال‌های منفذی، که تا حد زیادی سبب ایجاد تغییر در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها می‌شوند، ثابت دی الکتریک پایین‌تر و ویسکوزیته‌ی بالاتر آن‌ها در مقایسه با آب است. در حالت کلی، مایعات با ثابت دی الکتریک پایین، لایه‌های دوگانه‌ی بسیار نازکی را در مقایسه با مایعات با ثابت دی الکتریک بالاتر ایجاد می‌کنند و این به نوبه‌ی خود، نیروهای دافعه‌ی بین ذرات و در نتیجه، لخته‌شدن ذرات را کاهش می‌دهد.<sup>[۲۱]</sup> ویسکوزیته‌ی بالا و خاصیت روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی دو رفتار متضاد را در خاک‌های آلوده به نفت ایجاد می‌کنند. ویسکوزیته‌ی بالای آلاینده‌های نفتی، ذرات خاک را به یکدیگر می‌چسباند و برهمکنش بین آن‌ها را افزایش می‌دهد. در حالی که خاصیت روان‌کنندگی آن‌ها، این برهمکنش را کاهش می‌دهد. از آنجایی که ثابت دی الکتریک آلاینده‌های نفتی تقریباً یکسان است (بین ۲/۱ و ۲/۴)،<sup>[۲۲]</sup> تأثیر آن در تغییر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، برای همه‌ی آلاینده‌های نفتی یکسان است (به ازاء ۱٪ معین از همه‌ی آلاینده‌های نفتی). به‌طور کلی نوع آلاینده‌ی نفتی و ویسکوزیته‌ی آن، عاملی غیرقابل‌انکار در تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی است؛<sup>[۲۳]</sup> لذا ضروری است که نقش مکانیکی آلاینده‌های نفتی به‌ویژه ویسکوزیته، با دقت بیشتری بر روی خصوصیات نشست‌پذیری خاک‌ها ارزیابی شود. به این موضوع در مطالعات پیشین توجه زیادی نشده و کمتر به بررسی آن پرداخته شده است. در یکی از یگانه مطالعات انجام‌شده در این زمینه، جداری و فراهانی (۲۰۱۸)، به این نتیجه رسیدند که وجود آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌ی بالاتر در خاک‌های ریزدانه‌ی CH و CL، سبب افزایش ضریب فشردگی و کاهش ضریب نفوذپذیری شده است.<sup>[۲۳]</sup> با توجه به بررسی پیشینه‌ی مطالعات، در مطالعات اخیر، فقط به بررسی اثر ویسکوزیته‌ی یک نوع آلاینده بر روی خصوصیات نشست‌پذیری خاک‌های ریزدانه پرداخته شده و هیچ‌گونه مطالعه‌ی جامع و مقایسه‌ی به‌منظور بررسی نشست‌پذیری خاک‌ها، تحت اثر انواع آلاینده‌های مختلف نفتی انجام نشده است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار، اندرکنش توأم بخش‌های ریزدانه و درشت‌دانه‌ی خاک ماسه‌ی رس‌دار با انواع آلاینده‌های نفتی مختلف با ویسکوزیته‌ی متفاوت به‌منظور بررسی خصوصیات نشست‌پذیری مطالعه شده است.

برای این منظور، آزمایش‌های تراکم و تحکیم یک‌بعدی بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده انجام شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز برای ارزیابی ریزساختاری استفاده شده است. مطالعه‌ی ابتکاری حاضر، با توصیف میزان تغییرات در خواص نشست‌پذیری خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی مختلف، اطلاعات موردنیاز برای طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های ساخته‌شده بر روی چنین خاک‌ها و/ یا خاک‌هایی که احتمالاً آلوده به آلاینده‌های نفتی هستند و همچنین انتخاب بهترین روش اصلاح در صورت استفاده‌ی مجدد از خاک‌های مذکور را در پروژه‌های دیگر ارائه خواهد کرد.

## ۲. مصالح و روش‌ها

### ۲.۱.۲. مواد و مصالح مصرفی

#### ۲.۱.۲.۱. خاک

از آنجا که بخش عمده‌ی از خاک مناطق جنوبی ایران (سواحل شمالی خلیج فارس)، ترکیبی از کائولینیت و ماسه است،<sup>[۱۸]</sup> در مطالعه‌ی حاضر از مخلوط

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

شماره‌ی استاندارد	مخلوط ماسه- کائولینیت	ماسه	کائولینیت	
ASTM D۴۳۱۸	۲۲/۵	N.P	۴۰/۶	حدروانی (%)
	۱۵	N.P	۲۹/۸	حد خمیری (%)
	۷/۵	N.P	۱۱/۱	نشانه‌ی خمیری (%)
ASTM D۸۴۵	۲/۶۹	۲/۷۴	۲/۶۲	G <sub>s</sub>
ASTM D۴۲۲	-	۰/۲۸	-	D <sub>۶</sub> . (mm)
	-	۰/۱۹	-	D <sub>۳</sub> . (mm)
	-	۰/۱۶	-	D <sub>۱</sub> . (mm)
ASTM D۲۴۸۷	-	۱/۷۵	-	C <sub>u</sub>
	-	۱/۸۰۵	-	C <sub>c</sub>
	SC	SP	CL	طبقه‌بندی

جدول ۳. خصوصیات آلاینده‌های نفتی.

واحد	نوع آلاینده‌ی نفتی				پارامتر
	نفت سفید	گازوئیل	نفت خام	روغن موتور سوخته	
cp	۲/۵۷	۳/۴۹	۱۳/۸۷	۳۸۵/۲	ویسکوزیته
-	۰/۸۱۴	۰/۸۲۱	۰/۸۴۱	۰/۸۷۲	چگالی نسبی

## ۲.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

شد، تا مخلوط یکنواختی به‌دست آید. مخلوط به‌دست‌آمده به مدت ۱ ماه در ظرف درب بسته‌ی برای توزیع یکنواخت آلودگی در خاک نگهداری شده است. این دوره‌ی زمانی نیز براساس مطالعات انجام‌شده توسط سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱) و خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در نظر گرفته شده است. [۴۰ و ۲۰]

مخلوط‌های مذکور، برای بررسی تأثیر آلاینده‌های نفتی در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک استفاده شده است.

## ۳.۲. آزمایش‌ها

برای ارزیابی تأثیر آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های نشست‌پذیری و نفوذپذیری ماسه‌ی رس‌دار، مجموعه‌ی از آزمایش‌های آزمایشگاهی، شامل تراکم استاندارد و تحکیم یک‌بُعدی به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D۶۹۸ و ASTM D۲۴۳۵ انجام شده است. آزمایش تراکم براساس پروکتور استاندارد برای تعیین درصد رطوبت بهینه (OMC) و وزن مخصوص خشک بیشینه (MDD) انجام شده است. آزمایش‌های تحکیم یک‌بُعدی بر روی نمونه‌هایی با قطر ۵ و ضخامت ۲ سانتی‌متر انجام شده‌اند. تنش‌ها در فرآیند بارگذاری به ترتیب ۵/۱، ۱۰/۲، ۲۰/۴، ۴۰/۷، ۸۱/۵، ۱۶۳، و ۳۲۶ کیلوپاسکال و در مرحله‌ی باربرداری به ترتیب ۸۱/۵، ۲۰/۴، و ۵/۱ کیلوپاسکال انتخاب شده‌اند. همه‌ی نمونه‌ها در MDD و OMC و خودشان آماده شده‌اند، زیرا بیشترین تعامل بین ذرات خاک در این حالت ایجاد خواهد شد. [۴۱] در مطالعات انجام‌شده توسط استوار و همکاران (۲۰۲۱)، بر روی خاک‌های ماسه‌ی آلوده با نفت خام، [۴۲] نظری هریس و همکاران (۲۰۲۱) بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار آلوده با بنزین، [۳۵] بجنوردی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار

خاک آلوده به‌طور طبیعی، در مقایسه با خاک آلوده‌شده به‌طور مصنوعی، برای استفاده ایده‌آل‌تر است، زیرا این احتمال وجود دارد که با آلودگی مصنوعی، تقسیم‌بندی بین مواد معدنی و فازهای مخلوط خاک و آلاینده‌ها مانند خاک آلوده به‌طور طبیعی نباشد. [۳۶] اما ناهمگنی آلودگی‌ها در خاک‌های طبیعی، تجزیه و تحلیل و مقایسه‌ی مخلوط‌های مختلف را پیچیده می‌کند. بنابراین، از آلودگی مصنوعی برای تولید مخلوطی همگن استفاده شد تا کار مقایسه‌ی نتایج آسان‌تر باشد. [۳۷] در مطالعه‌ی حاضر، خاک‌های ماسه و کائولینیت قبل از مخلوط‌شدن با یکدیگر به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای  $\pm 5$  ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک شدند. برای تهیه‌ی نمونه‌های آلوده، مقدار آلاینده‌های نفتی (روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید) ۳، ۶، و ۹ درصد وزن خشک مخلوط انتخاب شده‌اند. این میزان آلودگی براساس مطالعه‌ی انجام‌شده توسط نظری هریس و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی خاک ماسه‌ی رس‌دار آلوده با بنزین؛ [۳۵] الادهمی و همکاران (۲۰۲۰)، بر روی خاک ماسه‌ی لای‌دار آلوده با نفت خام؛ [۳۸] و ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)، بر روی خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی آلوده با گازوئیل انتخاب شده است. [۳۹] این توضیح لازم است که برای افزودن آلاینده‌های نفتی بیشتر به نمونه‌های خاک محدودیت‌هایی وجود داشته است. آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک حاوی بیش از ۹٪ آلاینده‌ی نفتی (برای مثال: ۱۱ و ۱۲ درصد) منجر می‌شد که نمودار آزمایش تراکم به‌صورت زنگوله‌ی در نیاید. علاوه‌بر این، آلاینده‌ی نفتی مازاد، در هنگام اجرای آزمایش تراکم از نمونه‌ها خارج می‌شد. درصد تعیین‌شده از آلاینده‌های نفتی بر روی خاک اسپری و به‌صورت دستی هم زده

آلوده با روغن موتور سوخته<sup>[۴۳]</sup> و دسوزا کوریا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۰) بر روی ماسه‌ی رس‌دار آلوده با گازوئیل<sup>[۴۴]</sup> نیز ساخت نمونه‌ها در شرایط MDD و OMC انجام شده است.

روش تراکم استاتیک برای فشرده‌سازی نمونه‌ها برای دستیابی به تراکم یکنواخت انتخاب شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، خاک آلوده در قالب‌های تهیه‌شده از لوله‌ی پلیکا، با قطر ۵ و تا ارتفاع ۲ سانتی‌متر به‌طور یکنواخت متراکم شده است. سپس توسط دستگاه نمونه‌درآور خاک، نمونه از لوله‌ی پلیکا خارج و درون رینگ فلزی دستگاه تحکیم قرار گرفت و آزمایش شد. آزمایش تحکیم، سه بار تکرار و نتایج به‌صورت میانگین ارائه شده‌اند. به‌منظور بررسی ریزساختار اولیه‌ی نمونه‌های آلوده به درصد‌های مختلف آلاینده‌های نفتی مختلف و مقایسه‌ی آن‌ها با خاک تمیز، مجموعه‌ی تصاویر SEM توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل VEGA<sup>۳</sup>-TESCAN تهیه شده است. نتایج SEM در تفسیر داده‌های کمی به‌دست‌آمده در مطالعه‌ی حاضر مفید است.

در مطالعه‌ی حاضر، نمونه‌ها پس از آلوده‌شدن با انواع آلاینده‌های نفتی مختلف (پس از مدت ۱ ماه) بررسی شده‌اند. در تهیه‌ی تصاویر SEM، نمونه‌ها بر روی یک صفحه‌ی کوچک قرار گرفتند و با روکش طلا پوشانده شدند، تا وضوح لبه‌ی تصاویر و همچنین انتشار الکترون‌های ثانویه افزایش داده شود. تصاویر SEM با ضریب بزرگ‌نمایی ۲۰۰ تهیه شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در خصوصیات تراکمی

محاسبه‌ی مقدار آب در آزمایش تراکم، اهمیت ویژه‌ی دارد. این توضیح لازم است که اگرچه همیشه برای تعیین درصد رطوبت از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود، اما معادله‌ی مذکور نمی‌تواند برای خاک‌های آلوده به مشتق‌های نفتی استفاده شود؛ زیرا مشتق‌های نفتی، ترکیب‌های پیچیده‌ی دارند، که ممکن است حتی در دمای اتاق بخار شوند. با توجه به اینکه آب و آلاینده‌های نفتی، درجه‌ی تبخیر متفاوتی دارند؛ در پژوهش حاضر از معادله‌ی پیشنهادی ۲، که توسط ژنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۴۵]</sup> ارائه شده است، برای تعیین مقدار رطوبت نمونه‌های خاک آلوده به مشتق‌های نفتی استفاده شده است.

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

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

که در آن،  $w_w$  مقدار رطوبت بر حسب درصد،  $m_t$  جرم نمونه قبل از خشک‌شدن (گرم)،  $m_r$  جرم نمونه پس از خشک‌شدن در کوره (گرم)،  $m_w$  جرم آب تبخیرشده (گرم)،  $m_d$  جرم خشک نمونه (گرم)،  $n$  مقدار آلاینده‌ی نفتی قبل از خشک‌شدن، و  $U$  ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی است. تفاوت بین مقادیر  $m_t$  و  $m_r$  برابر با از دست‌دادن جرم آلاینده‌ی نفتی ناشی از خشک‌کردن (یعنی جرم آلاینده‌ی تبخیرشده) است. بنابراین، ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی از معادله‌ی ۳ به‌دست می‌آید.

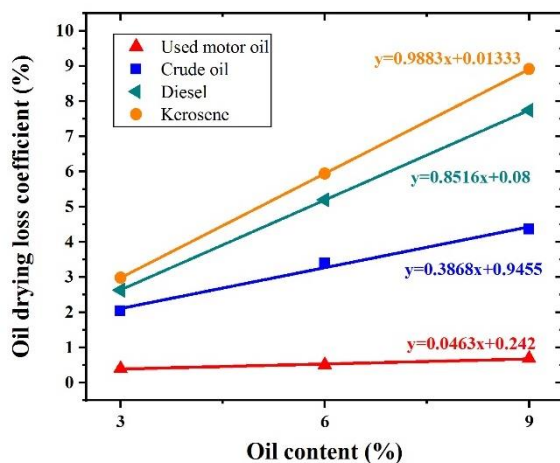
$$u(\%) = \frac{m_t - m_r}{m_t} \times 100 \quad (3)$$

با برآزش یک خط بین داده‌های نرخ تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی در مقابل درصد آلاینده‌ی نفتی و محاسبه‌ی شیب خط برآزش، ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی ( $U$ ) محاسبه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با توجه به شکل ۲، ضریب تلفات خشک‌شدن روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب ۰/۹۸۸۳، ۰/۸۵۱۶، ۰/۳۸۶۸، و ۰/۴۶۳ تعیین شده است. براساس نتایج اخیر می‌توان دریافت که افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی سبب افزایش کشش سطحی بین مولکول‌ها و در نتیجه، سبب کاهش نرخ تلفات خشک‌شدن آلاینده‌ی نفتی شده است.

نمودارهای آزمایش تراکم استاندارد و خلاصه‌ی نتایج آزمایش ذکرشده، برای خاک‌های تمیز و آلوده با درصد‌های مختلف آلاینده‌های نفتی، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. بررسی نمودارهای آزمایش تراکم خاک‌های آلوده با آلاینده‌های نفتی مختلف نشان می‌دهد که به غیر از اختلاف‌های ناچیز در مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه (MDD) و درصد رطوبت بهینه (OMC)، در همه‌ی منحنی‌ها، روند تغییرات افزایش مقدار آلاینده‌ی نفتی مشابه هم هستند.

مطابق شکل ۳، افزودن ۳٪ از آلاینده‌های نفتی مختلف به خاک تمیز باعث کاهش MDD و OMC شده است. این روند تا افزودن ۹٪ آلاینده‌های نفتی به خاک تمیز ادامه پیدا کرده است.

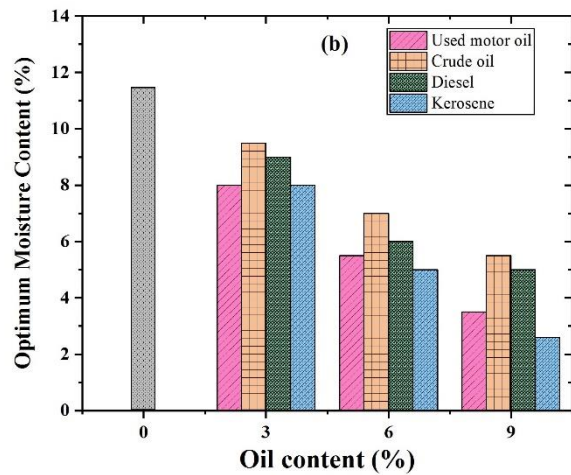
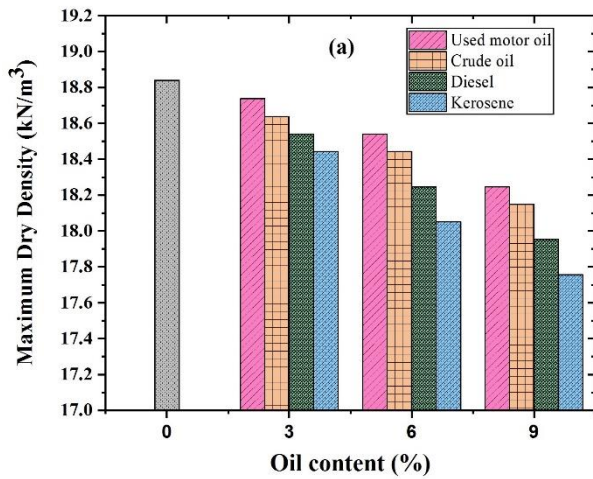
براساس نتایج آزمایش تراکم، که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مشخص شد که MDD خاک تمیز با افزودن ۹٪ روغن موتور، روغن خام، گازوئیل، و نفت سفید از ۱۸/۸۳ کیلو نیوتن بر مترمکعب به ترتیب به ۱۸/۲۵، ۱۸/۱۴، ۱۷/۹۵، و ۱۷/۷۶ کیلو نیوتن بر مترمکعب کاهش پیدا کرده است. علاوه‌بر این، مشخص است که با افزودن ۹٪ روغن موتور، روغن خام، گازوئیل، و نفت سفید به خاک تمیز، OMC از ۱۱/۵٪ به ترتیب به ۵/۳، ۵/۵، ۵، و ۲/۶ کاهش پیدا کرده است. کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی



شکل ۲. محاسبه‌ی ضریب تلفات خشک‌شدن آلاینده‌های نفتی ( $U$ ).

<sup>۲</sup> Zheng

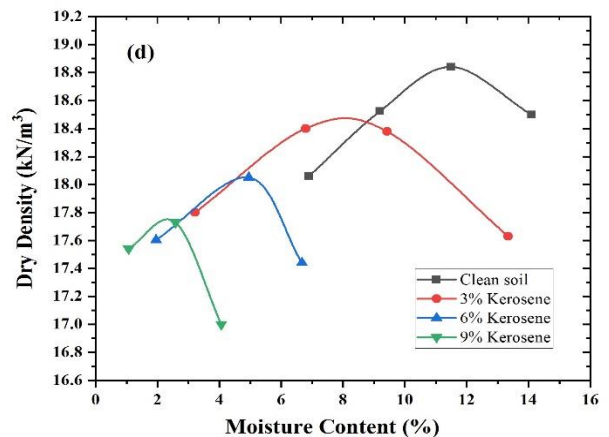
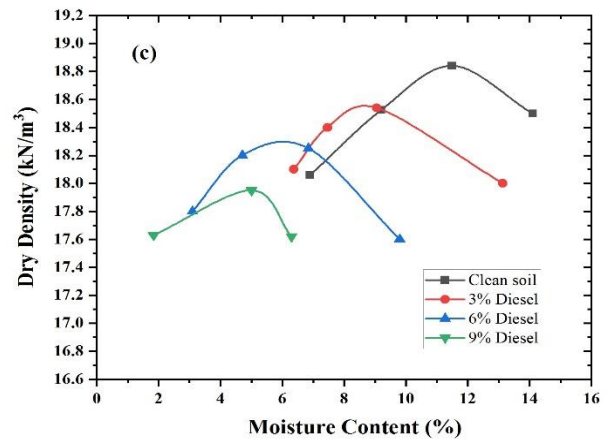
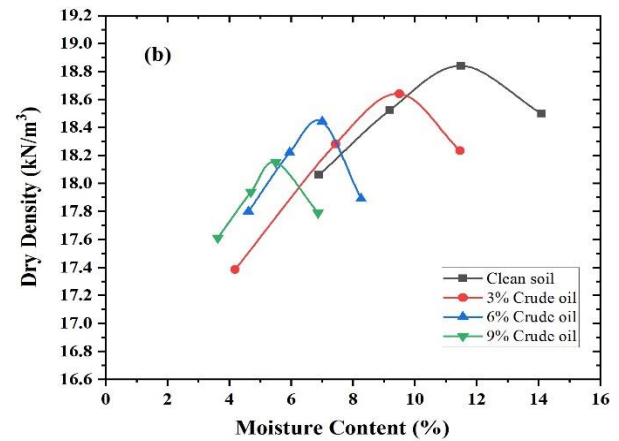
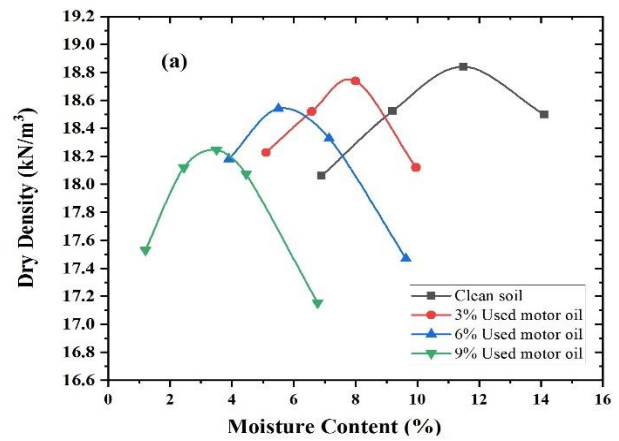
<sup>۱</sup> De Souza Correia



شکل ۴. تغییرات: (الف) درصد رطوبت بهینه،

(ب) وزن مخصوص خشک بیشینه با افزایش مقدار آلاینده‌های نفتی.

را می‌توان به چگالی کمتر آلاینده‌های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به‌دلیل وجود آلاینده‌های نفتی در هنگام اجرای آزمایش تراکم نسبت داد. براساس نتایج، ویسکوزیته نقش کلیدی در تغییر وزن مخصوص خشک بیشینه دارد. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه کمتر است. کمترین کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه مربوط به نمونه‌های آلوده به روغن موتور سوخته و پس از آن نمونه‌های آلوده به نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید است. ویسکوزیته‌ی بالای آلاینده‌های نفتی با چسباندن ذرات خاک (به‌دلیل کمتر شدن فرآیند روغن‌کاری) و لخته‌های 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 ذره‌ی توسط آلاینده‌های نفتی، [۴۶] جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به دلیل ویژگی‌های آب‌گریز آلاینده‌های نفتی، [۴۷] و کاهش سطح ویژه (SSA)، که جذب مولکول‌های آب توسط ذرات رس را کاهش می‌دهد، مرتبط است. [۲۶] نتایج پژوهش حاضر کاملاً با نتایج ارائه‌شده توسط بجنوردی و همکاران (۲۰۲۰)، [۴۳] مطابقت دارد. مقایسه‌ی اثر آلاینده‌های مختلف نفتی در درصد رطوبت بهینه نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین کاهش درصد رطوبت بهینه به ترتیب مربوط به خاک آلوده به ۹٪ نفت سفید و ۹٪ نفت خام است. با این حال مشخص است که هیچ رابطه‌ی منطقی بین ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی و درصد رطوبت بهینه‌ی خاک آلوده به آلاینده‌ی نفتی وجود ندارد.



شکل ۳. نمودار آزمایش تراکم خاک تمیز و آلوده با درصدهای مختلف:

(الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت

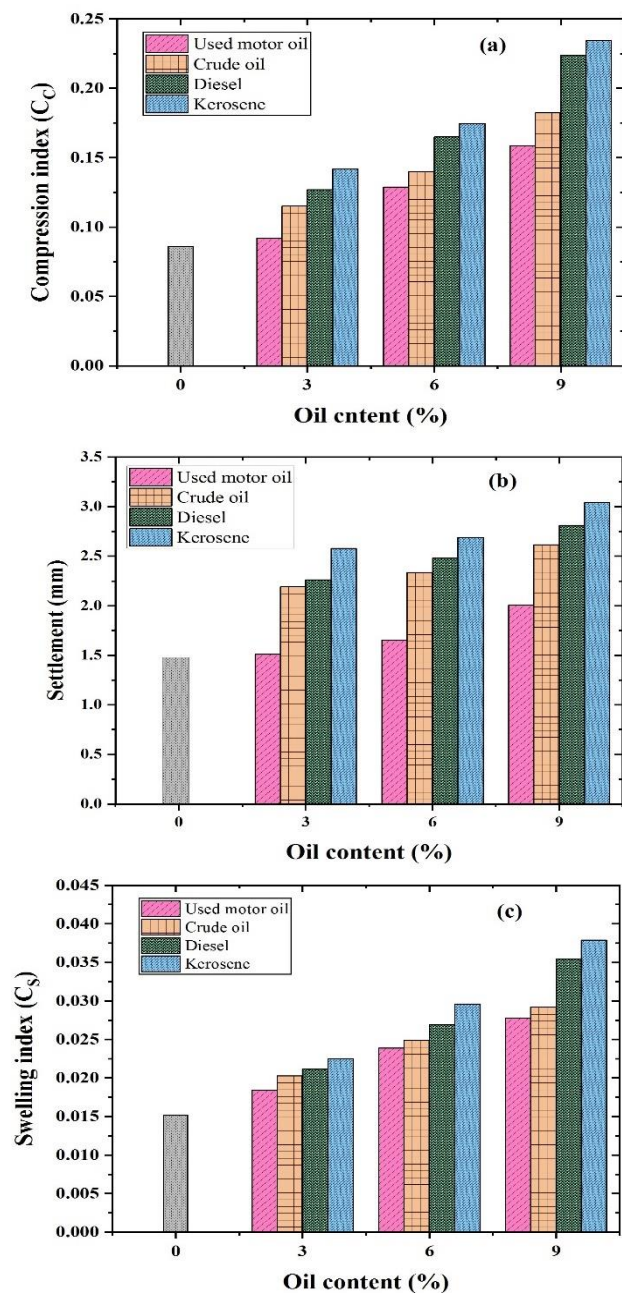
سفید.

### ۲.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در پارامترهای نشست‌پذیری

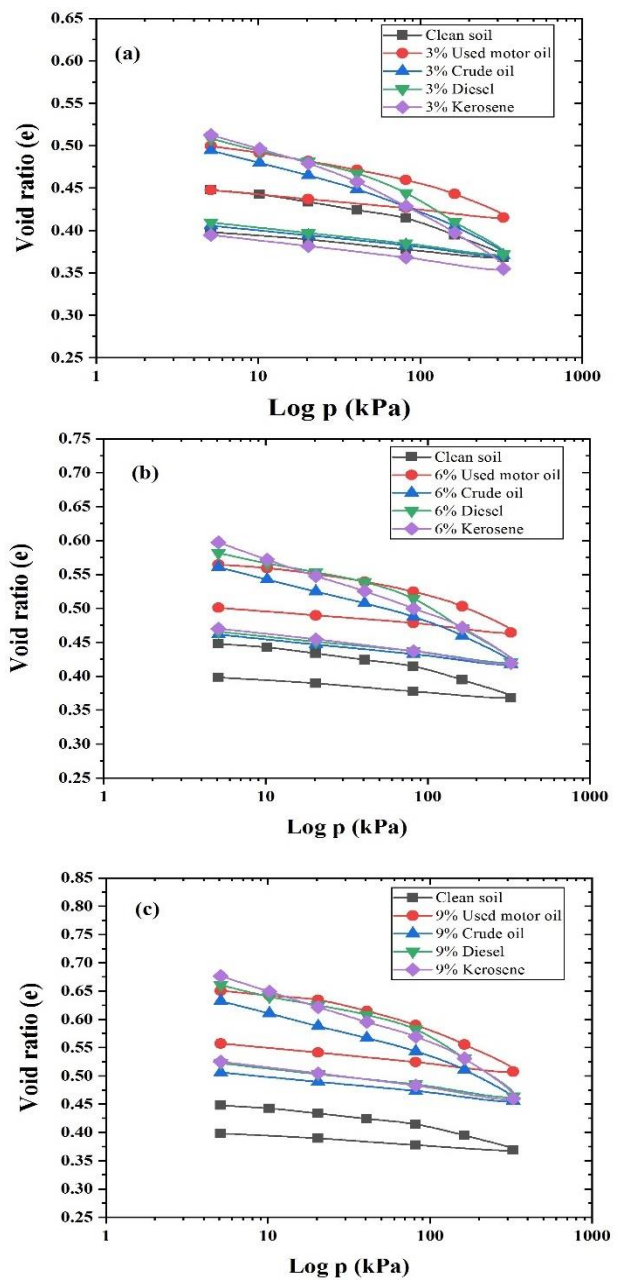
در مطالعه‌ی حاضر، با انجام مجموعه‌ی آزمایشی از آزمون‌های تحکیم یک‌بُعدی، رفتار تغییر حجم خاک آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌ی نفتی تعیین شده است. منحنی‌های تحکیم، در فضای  $e - \log \sigma'_v$  در شکل ۵ مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که همه‌ی نمونه‌ها در MDD و OMC خودشان ساخته شده‌اند. مطابق شکل مذکور، نشست‌پذیری با افزایش آلاینده‌های نفتی بیشتر شده است. همچنین مشخص است که با افزودن آلاینده‌ی نفتی به خاک تمیز، نسبت تخلخل اولیه افزایش یافته است، که می‌تواند ناشی از تغییر ساختار خاک در نتیجه‌ی آلوده‌شدن با آلاینده‌های نفتی باشد. علاوه بر این، مشخص است که وقتی درصد آلاینده‌ی نفتی افزایش پیدا کرده است، نسبت تخلخل اولیه بیشتر شده و منحنی‌های تحکیم به سمت بالا حرکت کرده‌اند. نتایج

نشان می‌دهند که برای مقدار معینی از آلاینده‌ی نفتی، بیشترین نسبت تخلخل اولیه مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است، که کمترین ویسکوزیته را در بین آلاینده‌های نفتی دارد. با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، نسبت تخلخل اولیه کاهش یافته است. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، ذرات خاک در ساختار لخته‌شده پراکنده (ایجادشده در نتیجه‌ی ثابت دی‌لکتریک پایین آلاینده‌های نفتی)، به یکدیگر می‌چسبند و منجر به کاهش حجم منافذ خاک می‌شود. در واقع، اثر ویسکوزیته، اثر ثابت دی‌لکتریک را تعدیل می‌کند.

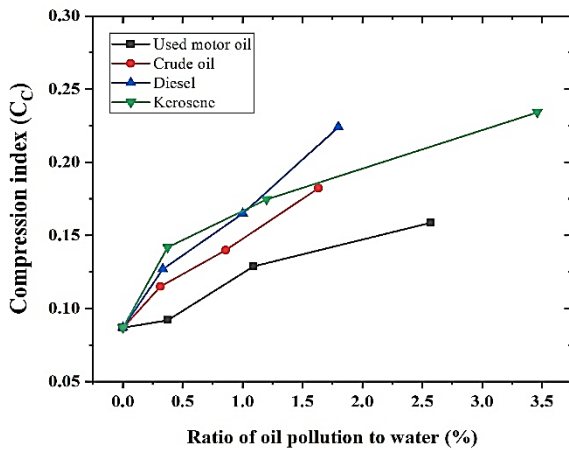
در شکل ۶، تغییرات ضریب فشردگی ( $C_c$ )، ضریب تورم ( $C_s$ )، و نشست تحکیمی ( $\Delta H$ ) در برابر درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی مشاهده می‌شود.



شکل ۶. تغییرهای پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش تحکیم براساس درصد و نوع آلاینده‌های نفتی مختلف: (الف) ضریب فشردگی، (ب) نشست کل، و (ج) ضریب تورم.



شکل ۵. منحنی تراکم خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی مختلف: (الف) ۳٪، (ب) ۶٪، و (ج) ۹٪.



شکل ۷. تأثیر تغییرات آلاینده‌ی نفتی به آب در ضریب فشردگی.

به ازاء یک درصد مشخص از نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، برای مثال حدود ۰/۴، با توجه به نزدیک‌بودن ثابت دی‌الکتریک و اثر یکسان ثابت دی‌الکتریک، ویسکوزیته، یک عامل حاکم است. بدین صورت که هر چه ویسکوزیته بیشتر باشد، افزایش مقدار ضریب فشردگی کمتر است. با ملاحظه‌ی شکل ۷ مشخص است که همه‌ی نمودارها روند صعودی دارند. با افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، ضریب فشردگی خاک آلوده افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه ثابت دی‌الکتریک سیال منفی کاهش و ویسکوزیته‌ی آن نیز افزایش پیدا کرده است، اما اثر کاهش ثابت دی‌الکتریک بیشتر از اثر افزایش ویسکوزیته در رفتار خاک مشهود است. زیرا اگر ویسکوزیته، یک عامل حاکم بود، به دلیل خاصیت چسبانندگی بین ذرات خاک، سبب می‌شد ذرات بیشتر به یکدیگر بچسبند، حجم منافذ خاک کمتر کاهش یابد، و در نتیجه ضریب فشردگی کاهش یابد.

تغییرات ضریب تحکیم ( $C_c$ ) در مقابل میزان آلاینده‌های نفتی مختلف در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن انواع آلاینده‌های نفتی مختلف به خاک، باعث افزایش ضریب تحکیم شده است. این افزایش را می‌توان به افزایش نسبت فضای خالی در حضور آلاینده‌های نفتی نسبت داد، که باعث افزایش ضریب نفوذپذیری و کاهش زمان لازم برای تحکیم شده است. همچنین مشخص است که با افزایش درصد آلاینده‌های نفتی در خاک، ضریب تحکیم همه‌ی نمونه‌های آلوده به میزان بیشتری افزایش پیدا کرده است که با نتایج برخی مطالعات پیشین،<sup>[۴۶ و ۵۰]</sup> مطابقت دارد. از طرف دیگر، افزایش ضریب تحکیم در نمونه‌های با ویسکوزیته‌ی بالاتر کندتر صورت گرفته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر چه میزان آلاینده‌ی نفتی بیشتر و ویسکوزیته‌ی آن کمتر باشد، سرعت خروج سیال منفذی (آب و آلودگی نفتی) بیشتر و در نتیجه، نشست بیشتری در زمان کوتاه‌تری ایجاد خواهد شد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که در سطوح بالای تنش اعمالی، تغییرات ضریب تحکیم در خاک آلوده به روغن موتور سوخته و نفت خام کم و ناچیز بوده است. این موضوع به دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آن‌ها در تنش‌های کم است. با این حال، در خاک‌های آلوده به گازوئیل و نفت سفید، مقدار ضریب تحکیم برای همه‌ی بارهای اعمال شده به دلیل تعداد زیاد فضاهای منافذ و گسترش آن‌ها در حضور آلاینده‌های ذکر شده قابل توجه است.

نتایج آزمایش تحکیم نشان می‌دهند که افزودن آلاینده‌ی نفتی، سبب افزایش ضریب فشردگی و افزایش نشست خاک شده است. براساس نتایج آزمایش اخیر (شکل ۶-الف) مشخص است که ضریب فشردگی خاک تمیز حدود ۰/۸۷ است، که با افزودن ۳٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به ۰/۹۲، ۰/۱۱۵، ۰/۱۲۷، و ۰/۱۴۱ افزایش پیدا کرده و روند افزایشی مذکور با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی همچنان ادامه یافته است؛ به طوری که در نمونه‌های حاوی ۹٪ 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 به دست آمده (شکل ۶-ب) نشان می‌دهند که میزان نشست خاک تمیز حدود ۱/۴۷ میلی‌متر بوده است، که با افزودن آلاینده‌های نفتی افزایش پیدا کرده است. به طوری که نشست کل در نمونه‌های آلوده با ۹٪ 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 می‌توان به تغییر ساختار خاک، کاهش پیوند بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، کاهش اصطکاک بین ذرات به دلیل اثر روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه مرتبط دانست. آلاینده‌های نفتی یک ساختار لخته‌شده، اما پراکنده در خاک ایجاد کرده‌اند.

این تغییر در ساختار خاک باعث افزایش تعداد منافذ و حفره‌های خاک شده است، که به نوبه‌ی خود باعث افزایش  $C_c$  شده است. کاهش سطح مخصوص ویژه‌ی خاک‌های آلوده به نفت، جذب آب توسط ذرات خاک را کاهش داده و تخلیه‌ی راحت‌تر آب را باعث شده است. از طرف دیگر مشخص است که با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، ضریب فشردگی و نشست کل به میزان کمتری افزایش یافته است،<sup>[۲۰]</sup> که دلیل آن در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است. بنابراین مشخص است که تأثیر عواملی که ذکر شده است، یعنی روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی، کاهش سطح مخصوص ویژه‌ی خاک‌های آلوده به نفت، ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده‌ی خاک آلوده با آلاینده‌ی نفتی، که باعث افزایش  $C_c$  شده‌اند، بیشتر از تأثیر ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی در کاهش آن بوده و در نتیجه،  $C_c$  افزایش یافته است. با توجه به شکل ۶-ج، روند تغییرات مشابهی برای ضریب تورم مشاهده می‌شود. مشخص است که با افزایش میزان آلاینده‌های نفتی ضریب تورم افزایش یافته و با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، افزایش آن‌ها بیشتر شده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط تالوکدار و سایکا<sup>[۲۰۱۳]</sup> در مورد ماسه رس‌دار آلوده با نفت خام،<sup>[۲۱]</sup> عسکر بیوکی و همکاران (۲۰۱۹) در مورد ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی آلوده با بنزین،<sup>[۴۸]</sup> و الحسن و فاگ<sup>[۲۰۱۳]</sup> بر روی ماسه‌ی لای‌دار آلوده با گازوئیل،<sup>[۴۹]</sup> مطابقت دارد. در مطالعات اخیر، تغییر ساختار خاک، کاهش ارتباط بین ذرات، افزایش فضاهای خالی، اثر روان‌کنندگی، کاهش اصطکاک بین ذرات، و کاهش سطح ویژه دلیل افزایش ضریب فشردگی بیان شده است.

اثر غالب ثابت دی‌الکتریک یا ویسکوزیته در تغییرات ضریب فشردگی خاک شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، ضریب فشردگی افزایش یافته است. افزایش نسبت آلاینده‌ی نفتی به آب، سبب کاهش ثابت دی‌الکتریک و افزایش ویسکوزیته‌ی سیال منفذی می‌شود.

<sup>۲</sup> Alhassan & Fage

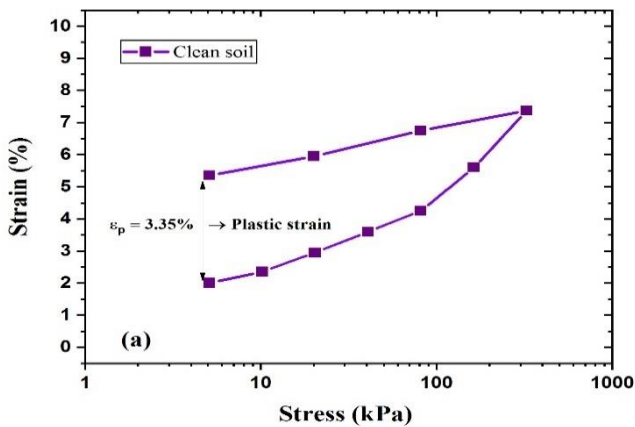
<sup>۱</sup> Talukdar & Saikia



در شکل‌های ۹ و ۱۰، نمودارهای تنش- کرنش برای نمونه‌ی تمیز و نمونه‌های آلوده با روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید براساس نتایج آزمایش تحکیم مشاهده می‌شوند. در جدول ۴، مقادیر کرنش خمیری ( $\epsilon_p$ ) ارائه شده است. با توجه به شکل ۹، مقدار کرنش خمیری در طی فرآیند بارگذاری و باربرداری برای نمونه‌ی خاک تمیز، ۳/۳۵٪ است و در آن، نحوه‌ی محاسبه‌ی کرنش خمیری مشاهده می‌شود.

همچنین مطابق شکل ۱۰، با افزایش آلاینده‌ی نفتی، کرنش خمیری در همه‌ی خاک‌های آلوده افزایش پیدا کرده است. همچنین مشهود است که برای نسبت معینی از آلاینده‌های نفتی،  $\epsilon_p$  با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی افزایش پیدا کرده است. خاک آلوده به روغن موتور سوخته، کمترین افزایش  $\epsilon_p$  را نشان می‌دهد، در حالی که بیشترین افزایش  $\epsilon_p$  مربوط به خاک آلوده به نفت سفید است.

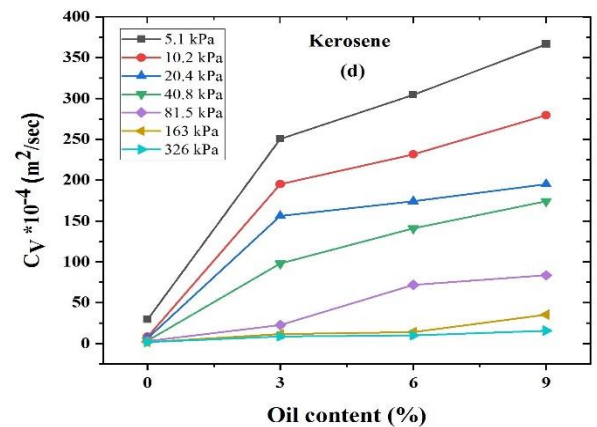
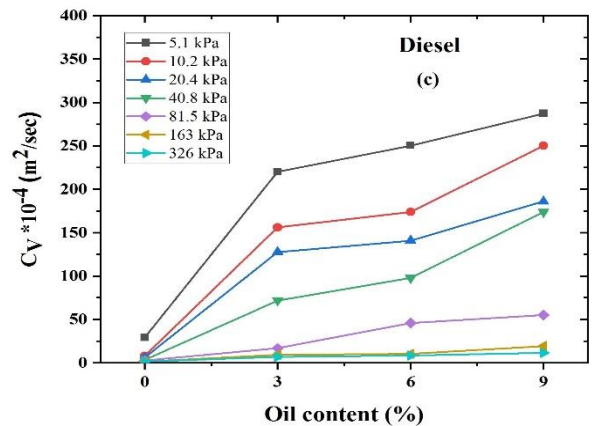
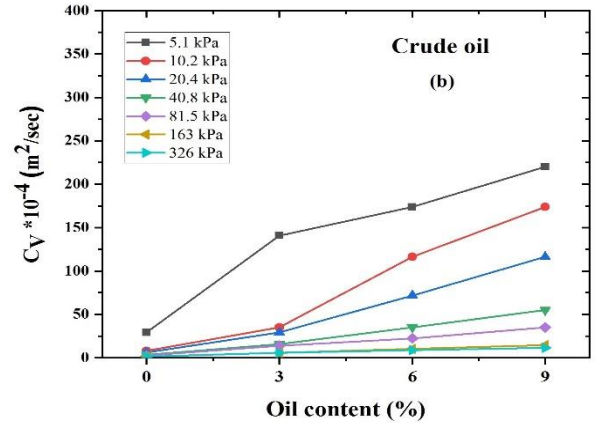
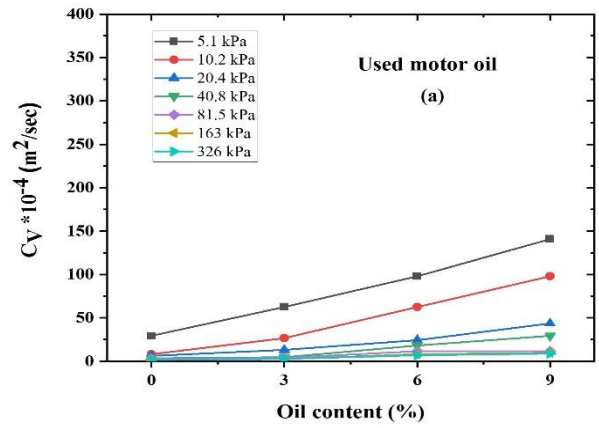
کرنش خمیری مستقیماً به نشست خمیری بستگی دارد، و بیانگر تفاوت بین مقدار نشست در هنگام بارگذاری (از ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال) و مقدار تورم در هنگام باربرداری (از ۳۲۶ تا ۵/۱ کیلوپاسکال) است. در شکل ۱۱، میزان نشست و تورم و همچنین نشست خمیری در محدوده‌ی تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، اگرچه با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی و همچنین به ازاء یک مقدار مشخص آلاینده‌ی نفتی با کاهش



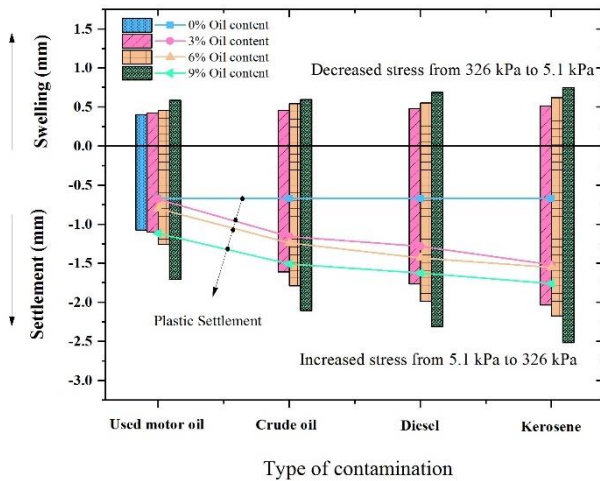
شکل ۹. تغییرات کرنش خمیری برای نمونه‌ی تمیز.

جدول ۴. مقادیر کرنش خمیری خاک‌های آلوده با درصد‌های مختلف آلاینده‌های نفتی.

نوع آلاینده‌ی نفتی				مقدار آلاینده‌ی نفتی (%)
نفت سفید (%)	گازوئیل (%)	نفت خام (%)	روغن موتور سوخته (%)	
۷/۵۸	۶/۴۰	۵/۷۷	۳/۶۷	۳
۷/۷۵	۷/۱۳	۶/۲۰	۴/۰۲	۶
۸/۸۰	۸/۱۱	۷/۵۳	۵/۸۵	۹



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



شکل ۱۱. تغییرات نشست، تورم، و نشست خمیری در فرآیند بارگذاری و محدوده‌ی تنش ۵/۱ تا ۳۲۶ کیلوپاسکال.

ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی مقدار نشست و تورم افزایش یافته است. اما میزان تورم در مقابل مقدار نشست ناچیز بوده است، که سبب وابستگی کرنش خمیری به میزان نشست شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کرنش خمیری خاک آلوده شده، با افزایش میزان آلاینده‌ی نفتی و همچنین به ازاء یک مقدار مشخص آلاینده‌ی نفتی با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی، افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد. یعنی کرنش خمیری با ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی رابطه‌ی عکس دارد.

### ۳.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در نفوذپذیری

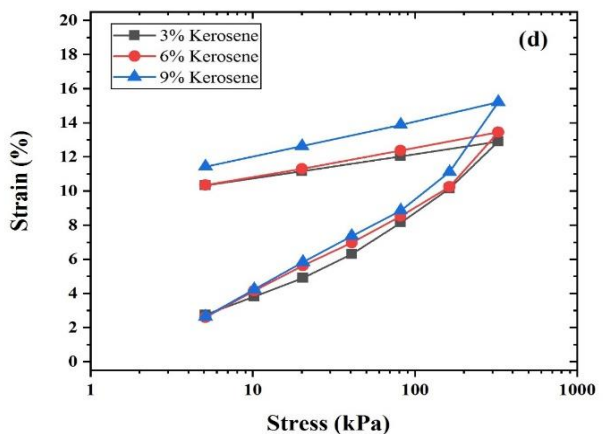
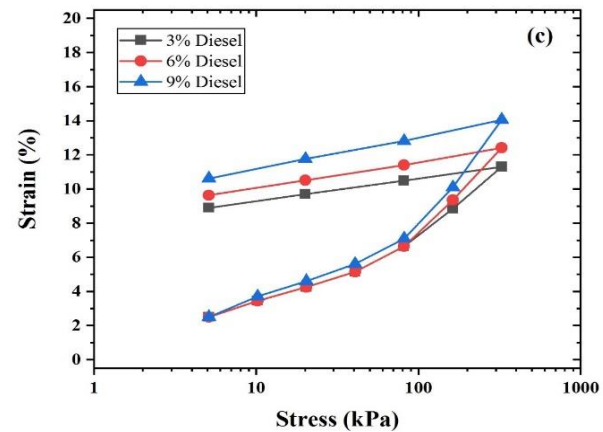
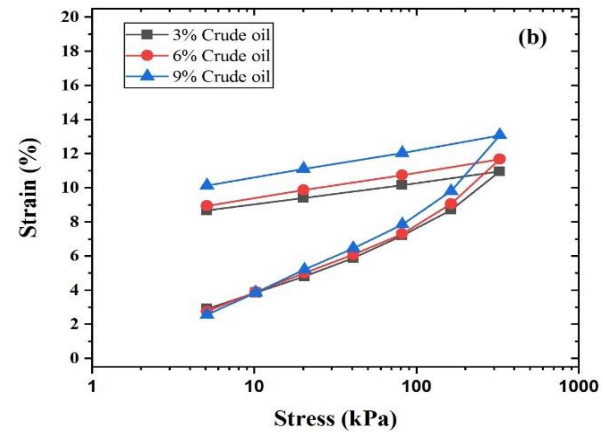
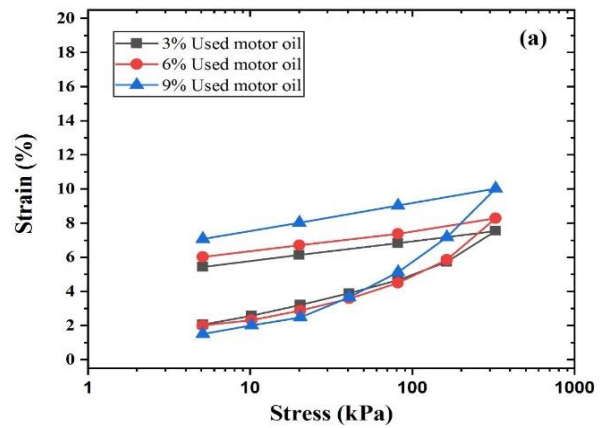
نفوذ آلاینده‌های نفتی به خاک تأثیر بسزایی در ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن‌ها دارد. در پژوهش حاضر، ضریب نفوذپذیری به‌طور غیرمستقیم از نتایج آزمون تحکیم یک‌بعدی با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شده است.

$$K = C_v \gamma_w m_v \quad (۴)$$

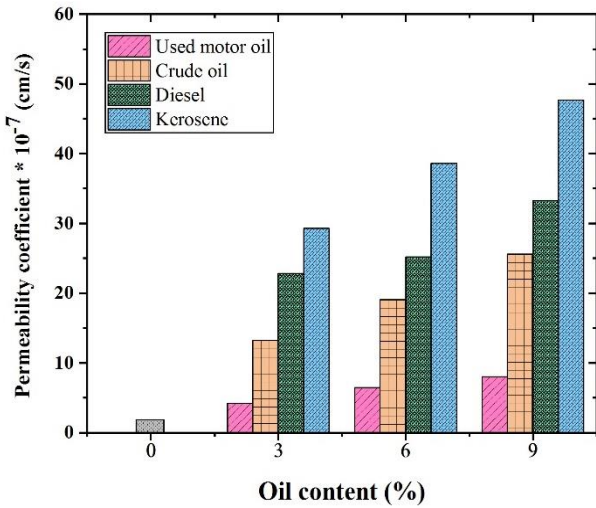
که در آن،  $m_v$  و  $\gamma_w$  به ترتیب ضریب تراکم‌پذیری حجمی و وزن مخصوص آب هستند.

مقادیر ضریب نفوذپذیری خاک‌های آلوده با درصدهای مختلف آلاینده‌های نفتی در تنش‌های مختلف در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، روند تغییر ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم با افزایش تنش‌های اعمالی در آزمایش تحکیم یک‌بعدی 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 نمونه‌های آلوده با درصدهای مختلف روغن موتور سوخته، تغییرات تنش اعمالی، تأثیر زیادی در تغییرات ضریب نفوذپذیری ندارد. این موضوع همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شده است، به دلیل تعداد اندک فضاهای منفذی و کاهش آن‌ها در تنش‌های اعمالی کم است.

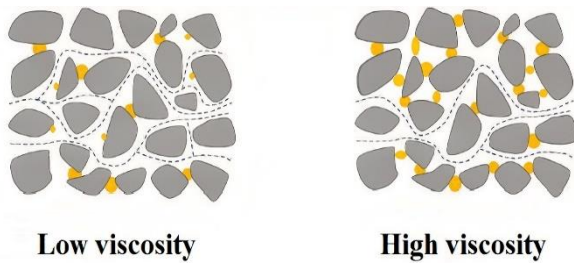
نتایج تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده‌های نفتی مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. این توضیح لازم است که ضریب نفوذپذیری از میانگین‌گیری ضریب‌های نفوذپذیری تحت تنش‌های مختلف (شکل ۱۲) به‌دست آمده است. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهند که با افزودن



شکل ۱۰. تغییرات کرنش خمیری برای نمونه‌های آلوده با: (الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، و (د) نفت سفید.



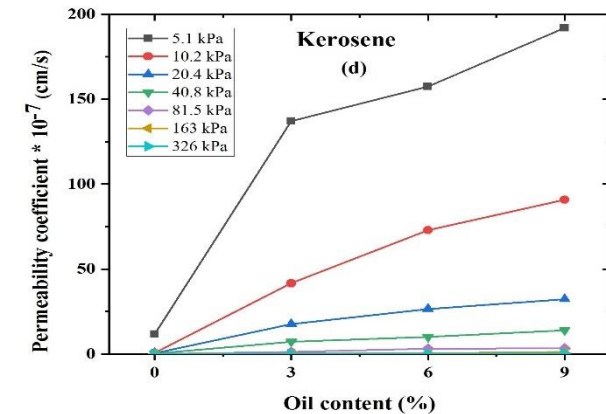
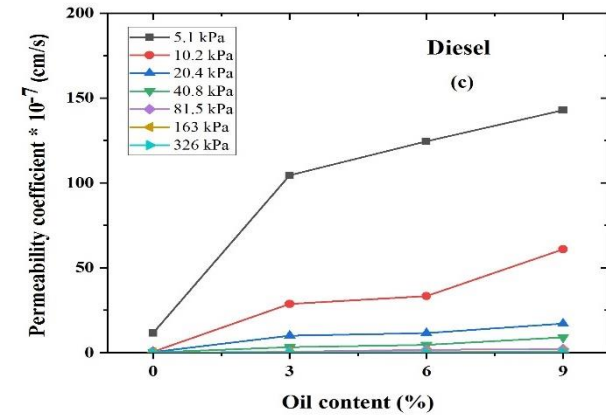
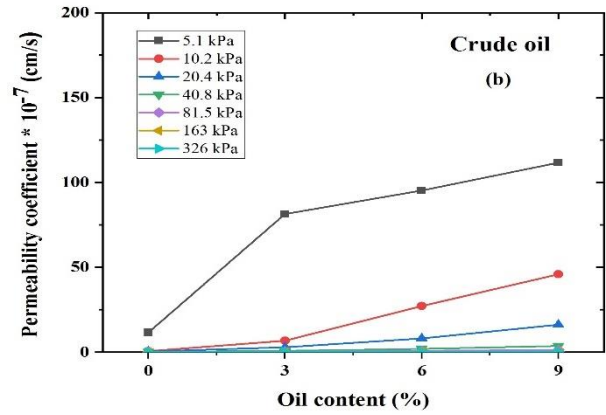
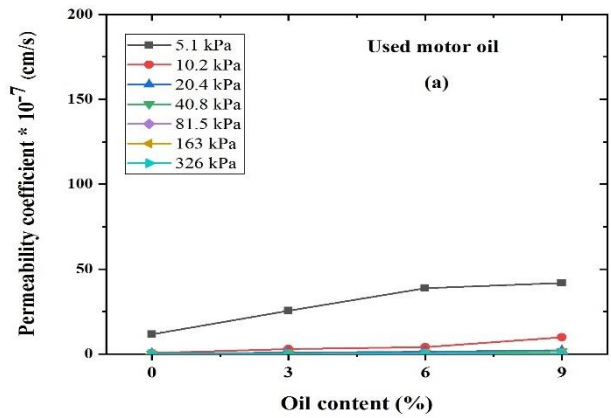
شکل ۱۳. تغییرات ضریب نفوذپذیری با افزودن آلاینده‌های مختلف.



شکل ۱۴. نمایش شماتیک مسیرهای جریان در خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌های کم و زیاد.

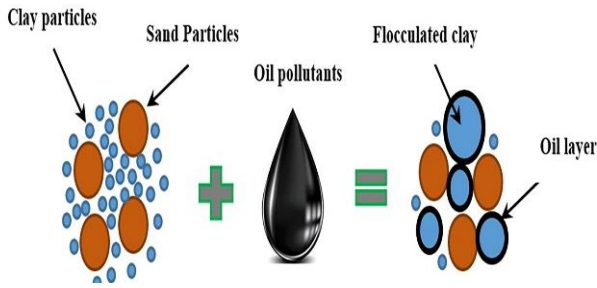
آلاینده‌های نفتی ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا کرده است. نفوذ پذیری خاک تمیز  $1/81 \times 10^{-7}$  سانتی‌متر بر ثانیه است، که با افزودن ۳٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به:  $4/19 \times 10^{-7}$ ،  $13/2 \times 10^{-7}$ ،  $22/8 \times 10^{-7}$  و  $29/2 \times 10^{-7}$  سانتی‌متر بر ثانیه رسیده است. با افزودن مقادیر بیشتر آلاینده‌های نفتی، نفوذپذیری به میزان بیشتری افزایش پیدا کرده است، تا اینکه در نمونه‌های آلوده با ۹٪ روغن موتور سوخته، نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید به ترتیب به  $8/03 \times 10^{-7}$ ،  $25/5 \times 10^{-7}$ ،  $33/3 \times 10^{-7}$  و  $47/6 \times 10^{-7}$  سانتی‌متر بر ثانیه رسیده است.

افزایش ضریب نفوذپذیری را می‌توان به کاهش سطح مخصوص ویژه در نتیجه‌ی حضور آلاینده‌ها نسبت داد، که سبب می‌شود ذرات خاک، آب کمتری را جذب کنند و اجازه می‌دهد آب سریع‌تر حرکت کند. [۲۰] البته نقش روان‌کاری آلاینده‌های نفتی در تسهیل این حرکت نباید نادیده گرفته شود. علاوه بر این، در مطالعات پیشین، افزایش ضریب نفوذپذیری به ساختار با فضاهای خالی زیاد موجود در خاک‌های آلوده با آلاینده‌های نفتی نسبت داده شده است. [۲۸] همچنین نتایج نشان می‌دهند که برای نسبت معینی از آلاینده‌ی نفتی، نفوذپذیری با کاهش ویسکوزیته‌ی آلاینده افزایش یافته است. این بدان معناست که بیشترین مقدار ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های آلوده به نفت سفید و پس از آن گازوئیل، نفت خام، و روغن موتور سوخته است. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، علاوه بر اینکه فضاهای خالی کاهش پیدا می‌کنند، ذرات بیشتری به هم می‌چسبند و موانع بیشتری برای خروج آب ایجاد می‌شوند. در شکل ۱۴، به‌صورت شماتیک مسیر حرکت

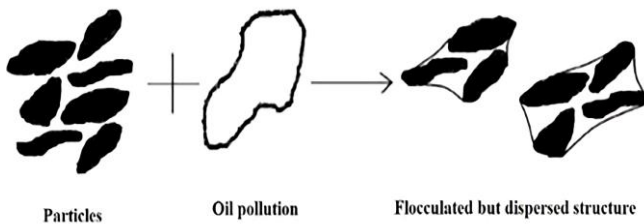


شکل ۱۲. تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک‌های آلوده با درصد‌های مختلف:

(الف) روغن موتور سوخته، (ب) نفت خام، (ج) گازوئیل، (د) نفت سفید با تغییرات تنش.



شکل ۱۶. شماتیک تأثیر آلاینده‌ی نفتی در ریزساختار.



شکل ۱۷. شکل شماتیک ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده.

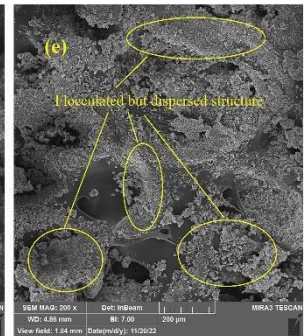
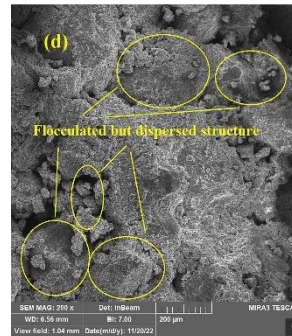
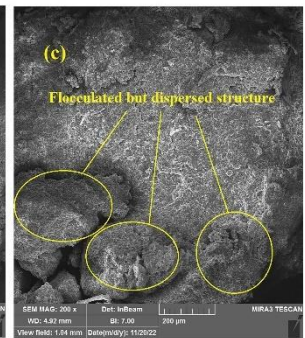
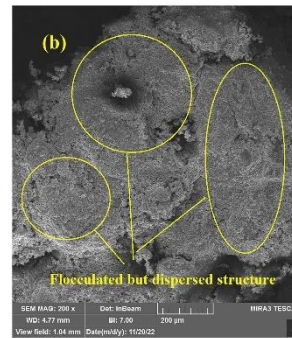
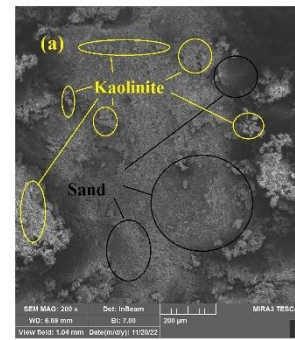
کائولینت و دانه‌های به هم چسبیده‌ی کائولینیت حتی بزرگ‌تر از دانه‌های ماسه تبدیل شده است (شکل ۱۶).

این موضوع باعث شده است که خاک آلوده، ساختاری سُست داشته باشد و در آن منافذ بیشتری بین ذرات مشاهده شود.<sup>[۵۱]</sup> یعنی آلاینده‌های نفتی سبب ایجاد یک ساختار لخته‌شده اما پراکنده<sup>۲</sup> در خاک ماسه‌ی رس‌دار شده‌اند. برای درک بهتر، ساختار لخته‌شده اما پراکنده، به صورت شماتیک در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۵ (ب الی د)، مشخص است که لخته‌های بزرگ‌تری در خاک آلوده به روغن موتور سوخته هستند که بالاترین ویسکوزیته را در بین آلاینده‌های نفتی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر دارند. 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 می‌شوند (شکل‌های ۱۵: د الی ه)، تفاوت معنی‌داری در اندازه‌ی لخته‌های تشکیل‌شده وجود ندارد. لخته‌های بزرگ‌تر ایجادشده با افزایش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی به دلیل خاصیت چسبندگی آلاینده با ویسکوزیته‌ی بالاتر است که می‌تواند ذرات بیشتری را به یکدیگر بچسباند. در ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده‌ی ناشی از وجود آلاینده‌های نفتی، ریزمنافذ کاهش و درشت‌منافذ افزایش یافته‌اند و بین ساختارهای خاک شکاف ایجاد شده است، که مشارکت بین ذرات را کاهش داده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر انواع آلاینده‌های نفتی در ویژگی‌های نشست‌پذیری خاک ماسه‌ی رسی پرداخته شده است. ویسکوزیته و ثابت دی‌الکتریک به عنوان دو ویژگی مهم آلاینده‌های نفتی، تأثیر زیادی در خصوصیات نشست‌پذیری خاک مورد مطالعه داشته‌اند. اما با توجه به اینکه ثابت دی‌الکتریک تمام آلاینده‌های نفتی به یکدیگر نزدیک هستند، ثابت



شکل ۱۵. تصاویر SEM ماسه‌ی رس‌دار: (الف) تمیز، (ب) آلوده با ۹٪ روغن موتور سوخته، (ج) آلوده با ۹٪ نفت خام، (د) آلوده با ۹٪ گازوئیل، (و) آلوده با ۹٪ نفت سفید.

آب در خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی با ویسکوزیته‌های بالا و پایین مشاهده می‌شود.

## ۴.۳. تأثیر آلاینده‌های نفتی در ریزساختار خاک با استفاده از تصاویر SEM

در شکل ۱۵، عکس‌های SEM از نمونه‌های تمیز و آلوده با ۹٪ انواع مختلف آلاینده‌های نفتی مشاهده می‌شود. ترکیب‌های آلودگی نفتی، که سطوح ذرات رس را در بخش ریزدانه‌ی خاک پوشانده‌اند، ویژگی آب‌دوستی دانه‌های رسی تمیز را به حالت آب‌گریز تغییر داده است. از طرفی، آلاینده‌های نفتی، ثابت دی‌الکتریک پایینی دارند. طبق تئوری گوی<sup>۱</sup> - چاپمن<sup>۲</sup>،<sup>[۲۹ و ۳۰]</sup> مایعات با ثابت دی‌الکتریک کم، باعث ایجاد لایه‌ی دوگانه‌ی بسیار نازک در مقایسه با مایعات با ثابت دی‌الکتریک بالاتر می‌شوند و این به نوبه‌ی خود، باعث کاهش نیروهای دافعه بین ذره‌ی و در نتیجه، لخته‌شدن ذرات می‌شود.<sup>[۳۱]</sup> در نتیجه، ساختار خاکی که قبل از آلوده‌شدن، متشکل از ماسه و کائولینیتی بوده است و فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده بود، به ساختاری متشکل از دانه‌های ماسه و

<sup>۲</sup> flocculated but dispersed structure

<sup>۱</sup> Guoy

<sup>۲</sup> Chapman

کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه شده‌اند. نقش ویسکوزیته در تغییر وزن مخصوص خشک بیشینه نیز مهم است. بیشترین کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه مربوط به خاک آلوده به آلاینده با ویسکوزیته‌ی پایین (نفت سفید) بوده است.

۴- هر چهار آلاینده‌ی نفتی سبب کاهش درصد رطوبت بهینه شده‌اند. کاهش درصد رطوبت بهینه به دلیل اشغال فضاهای بین ذره‌ی توسط آلاینده‌های نفتی، جلوگیری از تعامل بین ذرات خاک و آب به دلیل ویژگی‌های آب‌گریز آلاینده‌های نفتی، و کاهش مساحت سطح ویژه است، که جذب مولکول‌های 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 روان‌کنندگی آلاینده‌های نفتی و کاهش مساحت سطح ویژه، آلاینده‌های نفتی سبب افزایش ضریب فشردگی و ضریب نفوذپذیری شده‌اند.

۶- نفت سفید باعث بیشترین افزایش ۱۶۹ درصدی در ضریب فشردگی شده است. بنابراین کنترل نشست در خاک‌های آلوده به نفت سفید بسیار مهم است. اگر سازه‌ی بر روی خاک‌های آلوده به نفت سفید ساخته شوند یا اگر چنین خاک‌هایی در پروژه‌های ساختمانی مجدداً استفاده شوند، به دلیل افزایش نشست‌پذیری لازم است توجه ویژه‌ی در طراحی‌های ژئوتکنیکی صورت پذیرد.

دی‌الکتریک اثر یکسانی در خاک آلوده با یک درصد معین از آلاینده‌های مختلف نفتی دارد. بنابراین، نقش ویسکوزیته‌ی آلاینده‌های نفتی بر روی خصوصیات نشست‌پذیری پُررنگ‌تر است. نتایج اصلی مطالعه‌ی حاضر به این شرح است:

۱- زمانی که ماسه‌ی رس‌دار در معرض آلاینده‌های نفتی قرار گیرد، آلاینده‌های نفتی ذرات خاک رس را خواهد پوشاند. به دلیل ثابت دی‌الکتریک پایین آلاینده‌های نفتی، نیروی دافعه بین ذرات رس کاهش پیدا کرده و باعث لخته‌شدن ذرات رس شده است. در نتیجه، ساختار خاکی که قبل از آلوده‌شدن متشکل از ماسه و کائولینیتی بوده و کائولینیت فضاهای خالی بین ذرات ماسه را پر کرده است، به ساختاری متشکل از دانه‌های ماسه و دانه‌های به هم چسبیده‌ی رس حتی بزرگ‌تر از دانه‌های ماسه تبدیل خواهد شد. این موضوع باعث خواهد شد که خاک آلوده دارای ماتریس به‌طور قابل توجهی شُل باشد و در ساختار خاک، منافذ بین ذرات بیشتری مشاهده شود.

۲- آلاینده‌های نفتی در خاک ماسه‌ی رس‌دار، ساختار لخته‌شده‌ی پراکنده ایجاد می‌کنند. هر چه ویسکوزیته‌ی آلاینده‌ی نفتی بیشتر باشد، به دلیل خاصیت چسبندگی، ذرات بیشتری را به یکدیگر می‌چسباند و سبب ایجاد لخته‌های بزرگ‌تری می‌شود.

۳- به دلیل چگالی کمتر آلاینده‌های نفتی نسبت به آب و اتلاف انرژی به دلیل وجود آلاینده‌های نفتی در آزمایش تراکم، هر چهار آلاینده‌ی نفتی باعث

## منابع (References)

- Haghsheno, H., and Arabani, M., 2023. Stabilization and solidification of oil-polluted soils using secondary stabilizers and industrial wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(2), pp 2129-2162. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05285-x>.
- Singh, S., Srivastava, R., and John, S., 2008. Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & Sediment Contamination*, 17(3), pp 290-300. <https://doi.org/10.1080/15320380802007028>
- Abousnina, R. M., Manalo, A., Shiao, J., and Lokuge, W., 2015. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 24(8), pp 833-845. <https://doi.org/10.1080/15320383.2015.1058338>
- Haghsheno, H., and Arabani, M., 2023. The effect of primary stabilizers for stabilization/solidification of oil-polluted soils—a review. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), pp 337-358. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2215460>
- Arabani, M., and Haghsheno, H., 2023. 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*, 409, p.134022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134022>
- Al-Hamaiedh, H. D., and Maaitah, O. N., 2011. Treatment of oil polluted soil using electrochemical method. *Alexandria Engineering Journal*, 50(1), pp 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.010>.
- Dudley, B., 2018. BP statistical review of world energy 2018. 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>.
- Kandiyoti, R., Herod, A., Bartle, K. D., and Morgan, T. J., 2016. Solid fuels and heavy hydrocarbon liquids: thermal characterization and analysis, Elsevier Science.
- Van der Perk, M., 2013. Soil and water contamination. CRC Press.
- Payatakes, A., 1982. Dynamics of oil ganglia during immiscible displacement in water-wet porous media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14, pp.

- 365-393.  
DOI: 10.1146/annurev.fl.14.010182.002053
11. Karimpour-Fard, M., and Alimohammadi-jelodar, R., 2018. Permeability of Two Clayey Soils Exposed to Petroleum Products and Organic Solvents. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51(1), pp 131-146. <https://doi.org/10.7508/CEIJ.2018.01.008>
  12. Mackenzie, J., 1970. Interaction between oil drops and mineral surfaces. *Society of Mining Engineers, AIME, Transaction*, 247, pp. 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124402>
  13. Arabani, M., and Haghsheno, H., 2024. The effect of temperature curing on total petroleum hydrocarbon (TPH) values of slag-based polluted sample leachate. *Materials Letters*, 356, p. 135542. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135542>.
  14. Haghsheno, H., and Arabani, M., 2022. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), pp 32670-32701. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19418-1>.
  15. Ur-Rehman, H., Abduljawwad, S., and Akram, T. 2007. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12, pp. 1-12.
  16. Jia, Y., Wu, Q., Shang, H., Yang, Z. N., and Shan, H., 2011. The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River Delta, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(3), pp 517-525. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0349-8>
  17. Kermani, M., and Ebadi, T., 2012. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(5), pp 655-671. <https://doi.org/10.1080/15320383.2012.672486>.
  18. Ota, J.O., 2013. The effect of light crude oil contamination on the geotechnical properties of kaolinite clay soil. Doctoral dissertation, Anglia Ruskin University.
  19. Al-Adhamii, R. A., Fattah, M. Y., and Al-Hadidi, M. T., 2018. Crude oil effect on the clayey soil mechanical and physical properties. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.20), pp 453-458. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.20.26242>.
  20. Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H., and Soorki, A. A., 2021. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), pp 653-670. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
  21. Talukdar, D., and Saikia, B., 2013. Effect of crude oil on some consolidation properties of clayey soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), pp 117-120.
  22. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., and Yazdani, H., 2013. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, pp.11-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>
  23. Jedari, C., and Farahani, M., 2018. Permeability and Compression Characteristics of Clay Contaminated with Kerosene and Gasoil. *Mapta Journal of Architecture, Urbanism and Civil Engineering (MJAUCE)*, 1(3), pp 1-10.
  24. Safehian, H., Rajabi, A. M., and Ghasemzadeh, H., 2018. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, 241, pp. 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.020>.
  25. Karkush, M. O., and Kareem, Z. A., 2017. Investigation of the Impacts of fuel oil on the geotechnical properties of cohesive soil. *Engineering Journal*, 21, pp. 127-137. DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.4.127>
  26. Karkush, M. O., and Jihad, A. G., 2020. Studying the Geotechnical Properties of Clayey Soil Contaminated by Kerosene. in Key Engineering Materials. *Trans Tech Publ*, 857, pp. 383-393. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.383>.
  27. Medhat, F. K., Carpuzcu, M., Cabalar, A. F., and Al-Obaidi, A., 2019. Influence of Kawergosk Refinery Waste Oil on Geotechnical Properties of Contaminated Clayey Soil. *Polytechnic Journal*, 9(1), pp 64-73. <https://doi.org/10.25156/ptj.v9n1y2019.pp64-73>
  28. 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>
  29. Guoy, G., 1910. Constitution of the electric charge at the surface of an electrolyte. *J Physique*, 9, pp. 457-67.
  30. 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.

31. Quigley, R. M., and Fernandez, F., 1991. Hydrocarbon liquids and clay microstructure. *Microstructure of Fine-Grained Sediments. Frontiers in Sedimentary Geology*. Springer, New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4428-8\\_50](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4428-8_50)
32. Carey, A., and Hayzen, A., 2013. Machinery Lubrication—The Dielectric Constant and Oil Analysis. *Emerson Process Management*.
33. Al-Aghbari, M., Dutta, R., and Mohamedzeini, Y., 2011. Effect of diesel and gasoline on the properties of sands—a comparative study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(1), pp 61-68. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.61-68>
34. Rojas, J., Salinas, L., and Garnica, I., 2003. Influence of the kinematic viscosity of oil contaminants in the compaction and hydraulic conductivity in certain type of soils. *Groundwater engineering: recent 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., Aghajani, S., Hajjalilue-Bonab, M., and Vafaei Molamahmood, H., 2020. Effects of Lead and Gasoline Contamination on Geotechnical Properties of Clayey Soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 29(3), pp 340-354. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1719973>
36. Kogbara, R. B., Yi, Y., and Al-Tabbaa, A., 2011. Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime-slag blend. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(8), pp 1286-1296. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0480-x>
37. Oluwatuyi, O. E., and Ojuri, O. O., 2017. Environmental performance of lime-rice husk ash stabilized lateritic soil contaminated with lead or naphthalene. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(6), pp 2947-2964. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0294-9>
38. Al-Adhamii, R. A., Rahil, F. H., Kadhim, Y. M., and Atia, T. A., 2020. Geotechnical properties of gypseous soil contaminated with crude oil. *MS&E*, 737(1), pp 012115. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012115>.
39. Nasehi, S. A., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., and Morsali, A., 2016. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), pp 333-345. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9948-7>
40. Khamchayan, M., Charkhabi, A. H., and Tajik, M., 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89(3-4), pp 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106021>
41. Kogbara, R. B., and Al-Tabbaa, A., 2011. Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 409(11), pp 2325-2335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.037>.
42. Ostovar, M., Ghiassi, R., Mehdizadeh, M. J., and Shariatmadari, N., 2021. Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 30(1), pp 58-73. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1792410>.
43. Bojnourdi, S., Narani, S. S., Abbaspour, M., Ebadi, T., and Hosseini, S. M. M., 2020. Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures. *Engineering Geology*, 279, pp. 105886. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105886>.
44. De Souza Correia, N., Portelinha, F. H. M., Mendes, I. S., and da Silva, J. W. B., 2020. Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, 11(1), pp 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40703-020-00115-2>.
45. Zheng, X., Zhang, J., Zheng, T., Liang, C., and Wang, H., 2014. A developed technique for measuring water content in oil-contaminated porous media. *Environmental Earth Sciences*, 71(3), pp 1349-1356. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2541-6>
46. Hamidi, A., and Karimi, A. H., 2021. Effect of Phytoremediation on Compression Characteristics of Silty Clayey Sand Contaminated with Crude Oil. *International Journal of Civil Engineering*, 19, pp. 973-995. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00609-9>
47. Akinwumi, I., Diwa, D., and Obianigwe, N., 2014. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4), pp 816-824. <https://doi.org/10.6088/ijaser.030400007>.
48. Askarbioki, M., Kargaran Bafghi, F., Mokhtari, M., and Khaleghi, M., 2019. Impact of gasoline

- contamination on mechanical behavior of sandy clay soil. *Journal of Mining and Environment*, 10(2), pp 389-399. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.7660.1622>.
49. Alhassan, H. M., and Fagge, S. A., 2013. 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*, 3(1), pp 1947-1954.
50. Karkush, M., and AbdulKareem, M., 2018. Effects of residuse oil contamination on the geotechnical properties of clay soil. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 25(5), pp 243-255.
51. Izdebska-Mucha, D., Trzciński, J., Żbik, M. S., and Frost, R. L., 2011. Influence of hydrocarbon contamination on clay soil microstructure. *Clay Minerals*, 46(1), pp 47-58.