

## چکیده

توسعه پروژه‌های عمرانی در مناطق نفت‌خیز و نشت آلاینده‌های نفتی، اجرای چنین پروژه‌هایی را مستلزم شناخت کافی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی می‌نماید. برآورد پارامترهای دینامیکی خاک در تحلیل رفتار سازه‌ها و نتایج تنش-کرنش خاک نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. در این پژوهش از خاک رسی با خاصیت خمیری بالا و مقادیر مختلف (۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد) نفت خام پالایشگاه کرمانشاه به‌عنوان ماده آلاینده هیدروکربنی استفاده شد. جهت شناسایی کانی و مورفولوژی خاک، تحلیل‌های شناسایی XRD، FESEM، EDAX و BET مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نشان داد کانی خاک رسی از نوع کائولینیتی بوده است. از نتایج آزمایش تراکم، درصد رطوبت بهینه و نسبت تخلخل نمونه‌های تمیز و آلوده به دست آمد و مشاهده شد حداکثر تراکم خشک خاک برابر با ۱/۶۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده که در نمونه رس با ۱۲ درصد آلودگی ایجاد می‌شود. با قرار دادن نمونه‌های با حداکثر چگالی خشک در دستگاه المان خمشی، سرعت موج برشی و حداکثر مدول برشی ( $G_{max}$ )، خاک رس تمیز و آلوده و در محدوده تنش‌های محصورکننده‌ی (۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال) و فرکانس تحریک (۵ تا ۲۰ کیلوهرتز) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بیشترین سرعت موج برشی و در نتیجه مدول برشی حداکثر در خاک رس با ۱۲ درصد آلودگی، به ترتیب ۳۲۰ متر بر ثانیه و ۵۱۲ مگاپاسکال، تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال و در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز مشاهده می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** رفتار دینامیکی کرنش کوچک خاک، خاک رس کائولینیتی، خاک‌های آلوده‌ی هیدروکربنی، مدول برشی حداکثر، آزمون المان خمشی، شناسایی شیمیایی خاک.

## تأثیر آلودگی هیدروکربنی بر رفتار دینامیکی کرنش کوچک رس کائولینیتی خصوصیات تراکمی و سرعت موج برشی

حدیث محمدی

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

محمد شریفی پور (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، Sharifipour@razi.ac.ir

## ۱- مقدمه

از سوی دیگر در اثر نشت نفت در زمان بهره‌برداری از سازه‌ها، ماهیت خاک زیر پی این سازه‌ها دچار تغییر شده و بررسی صحت عملکرد این سازه‌ها در شرایط جدید، از منظر انتقال بارهای استاتیکی سازه به زمین و همچنین عملکرد لرزه‌ای پی این سازه‌ها در معرض ارتعاشات و بارهای دینامیکی زلزله، امری ضروری به نظر می‌رسد. در خصوص تأثیرات آلودگی نفتی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها از جمله خصوصیات تراکمی، حدود اتر برگ، مقاومت فشاری و برشی و نفوذپذیری بر روی نمونه‌های آلوده و غیر آلوده تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای توسط

آلودگی خاک با مواد نفتی در حین حفاری، استخراج، نشت نفت خام از لوله‌های انتقال و مخازن و یا نفوذ طبیعی نفت به لایه‌های بالایی زمین به دلیل جابه‌جایی صفحات پوسته‌ی زمین، امری اجتناب‌ناپذیر در مناطق نفت‌خیزی چون ایران است که علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، موجب تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک‌های دانه‌ای و تغییر در بافت و ساختار خاک‌های چسبنده می‌شود. با توجه به توسعه پروژه‌های عمرانی در مناطق نفت‌خیز، اجرای چنین پروژه‌هایی مستلزم شناخت کافی از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی می‌باشد.

رطوبت بهینه همچنان کاهش یافته است. کرمانی و عبادی (Kermani & Ebadi, 2012)، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی خود را بر روی تأثیرات آلودگی نفتی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه رس با خاصیت خمیری پایین منتشر نمودند. نتایج آزمایش‌های تراکم بر روی نمونه‌های خاک آلوده و غیر آلوده نشان می‌دهد که میزان وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش درصد نفت خام تا ۱۲ درصد وزنی خاک افزایش و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. اثرات روان کاری نفت، که ذرات رس را می‌پوشاند می‌تواند دلیل این تغییرات باشد. بر اساس نتایج تحقیقات قدیانی و همکاران (Ghadyani et al., 2019) بر روی خاک کائولینیت و بنتونیت آلوده به نفت سفید و گازوییل، اثرات روانکاری همراه با ثابت دی الکتریک کوچک مایعات، حداکثر چگالی خشک را افزایش و مقدار رطوبت بهینه خاک‌های کائولینیت و بنتونیت، حاصل از آزمایش پروکتور را کاهش می‌دهد. سفیهیان و همکاران (Safehian et al., 2018)، اثرات آلودگی دیزل بر رفتار ژئوتکنیکی خاک ایلیت را بررسی کردند. در این تحقیق از ایلیت خالص بنا به دلایلی استفاده شده است: ۱- به منظور بررسی اثر آلاینده، سایر متغیرها باید تا حدی حذف شوند، بنابراین خاک خالص انتخاب شد که تغییرات در مواد معدنی خاک بر نتایج تأثیر نگذارد. ۲- ایلیت خاصیت خمیری نسبتاً بالا و سطح ویژه مناسبی دارد به همین دلیل اندرکنش قابل ملاحظه‌ای با مایع آلی دارد. بر اساس نتایج ارائه شده، ضخامت آبی که ذرات رس آن را جذب می‌کنند، به عنوان آب لایه دوگانه، کاهش می‌یابد زیرا با افزودن دیزل به خاک ایلیت، دیزل سطح دانه‌های خاک را گرفته و مانع جذب آب می‌شود در نتیجه چسبندگی ایلیت با افزایش درصد دیزل کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۷ رجیبی و شریفی‌پور (Rajabi & Sharifipour, 2017a)، تأثیر میزان آلودگی نفتی بر سرعت موج برشی ماسه اتاوا در دامنه‌ی کرنش کوچک خاک را با دستگاه المان خمشی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج ارائه شده، سرعت موج برشی با اضافه کردن ۴ درصد وزنی نفت خام به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد ولی با افزودن

محققین انجام گرفته است (Khomehchiyan et al., 2007; Khosravi et al., 2013; Puri, 2000; Ukpong & Umoh, 2015). اما در زمینه‌ی تأثیر آلودگی هیدروکربنی بر روی پارامترهای دینامیکی خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های رسی آلوده مطالعات محدودی وجود دارد. از آنجا که رفتار بسیاری از سازه‌ها و فونداسیون‌ها بر روی خاک‌های آلوده در زمان اعمال بارهای دینامیکی مانند زلزله در بازه کرنش‌های کوچک می‌باشد، بررسی و محاسبه پارامترهای معرف رفتار کرنش کوچک خاک، از اهمیت قابل توجهی برای مهندسین عمران برخوردار بوده است. در این پژوهش خصوصیات کرنش کوچک خاک رس کائولینیتی با خاصیت خمیری بالا، با درصد‌های مختلف آلودگی هیدروکربنی با استفاده از دستگاه المان خمشی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که تراکم خاک عامل مؤثری بر سرعت موج برشی در خاک می‌باشد، در مطالعه‌ی حاضر آزمایش تراکم پروکتور جهت تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه‌ی خاک رسی تمیز و با درصد‌های مختلف آلودگی انجام شد، تراکم‌پذیری خاک به نوع و میزان آلودگی موجود در خاک وابسته است. همچنین ویسکوزیته مایع منفذی بر خصوصیات تراکمی خاک تأثیر می‌گذارد (Meegoda & Ratnaweera, 1994). در تحقیقی که توسط خامه‌چیان و همکاران (Khomehchiyan et al., 2007) بر روی سه نوع خاک شامل ماسه سیلتی، رس با خاصیت خمیری پایین و ماسه بد دانه‌بندی شده با درصد‌های مختلف نفت (از ۰ تا ۱۶ درصد وزنی خشک خاک) انجام شد، نتایج نشان داد که افزایش درصد نفت باعث کاهش حداکثر چگالی خشک و درصد بهینه آب می‌شود. میزان کاهش حداکثر چگالی خشک برای نمونه‌های CL, SM سریع‌تر بود. رحمان و همکاران (Rahman et al., 2010) دریافتند که در خاک‌های رسوبی با افزایش میزان آلودگی تا ۱۲ درصد حداکثر وزن مخصوص خشک خاک افزایش و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد اما پس از افزایش میزان آلودگی از ۱۲ تا ۱۶ درصد حداکثر وزن مخصوص خشک خاک اندکی کاهش یافته و روند درصد

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

هدف اصلی این کار تحقیقاتی، بررسی اثر میزان آلودگی هیدروکربنی (نفت خام) بر مدول برشی حداکثری خاک‌های رسی آلوده به مواد هیدروکربنی با خاصیت خمیری بالا می‌باشد که تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال با گام ۱۰۰ کیلو پاسکالی انجام شد. فرکانس‌های تحریک ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز به نمونه‌ها اعمال گردید. دلیل استفاده از محدوده‌ی فرکانسی فوق، کاهش اثرات حوزه نزدیک مربوط به فرکانس می‌باشد که به دلیل شرایط نمونه‌سازی، طول نمونه و طول موج مورد استفاده طبق معادله (۳) می‌باشد (Airey & Mohsin, 2013).

$$2 \leq f\Delta t = \frac{L}{\lambda} \leq 8 \quad (3)$$

که  $f$ : فرکانس موج ارسالی،  $\Delta t$ : زمان سفر موج و  $\frac{L}{\lambda}$ : نسبت طول نمونه به طول موج است.

جهت انجام این آنالیز از دستگاه سه محوری دیجیتالی مجهز به المان خمشی استفاده گردید که در شکل (۱) نشان داده شده است. این دستگاه شامل تیغه‌های گیرنده و فرستنده امواج، سلول اعمال فشار همه‌جانبه، دستگاه اسیلوسکوپ و دستگاه تولید کننده توابع مختلف امواج می‌باشد.

در کالیبراسیون اولیه آزمایش‌های المان خمشی (BE)، زمان‌های تأخیر ناشی از اتصالات سیم‌کشی بین دستگاه مورد استفاده، با محاسبه‌ی زمان تأخیر از ارسال تا دریافت موج در زمان اتصال نوک به نوک تیغه‌های ارسال و دریافت موج تحت پیکربندی المان خمشی به صورت دقیق تعیین شده و در تخمین زمان سفر موج لحاظ گردید که در شکل (۲) نتایج آن نشان داده شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج المان خمشی ساخته شده در دانشگاه رازی، نتایج حاصل از برآورد مدول برشی ناشی از انتشار امواج برشی در دستگاه المان خمشی این دانشگاه با نتایج آزمون ستون تشدید بر روی نمونه‌های تمیز ماسه اتاوا در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی مهندسی زلزله انجام شد و نتایج ارزیابی مبنایی برای انتخاب بهترین روش برآورد سفر موج برشی شد (Rajabi & Sharifipour, 2017b).

درصدهای بیشتری از نفت خام، اثرات منفی بر روی سرعت موج برشی دارد. همچنین در نمونه‌های با ۴ درصد وزنی با افزایش فشار محصور شده، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. همچنین این محققین در مطالعه‌ی دیگری، اثر نفت خام بر مدول برشی حداکثر ماسه‌ی فیروزکوه مورد بررسی قرار دادند، بر اساس نتایج این تحقیق تحت تمامی فشارهای محصور شده و فرکانس‌های تحریک، افزودن مقدار نفت خام به میزان ۴ درصد وزنی تغییرات مهمی در مقدار مدول برشی ماکزیمم ماسه دیده شد. افزایش فشار محصور شده در نمونه‌های آلوده باعث افزایش مدول برشی ماکزیمم می‌شود و نمونه‌های با ۴ درصد وزنی بالاترین مدول برشی ماکزیمم را در بین نمونه‌ها داشته است (Rajabi & Sharifipour, 2019).

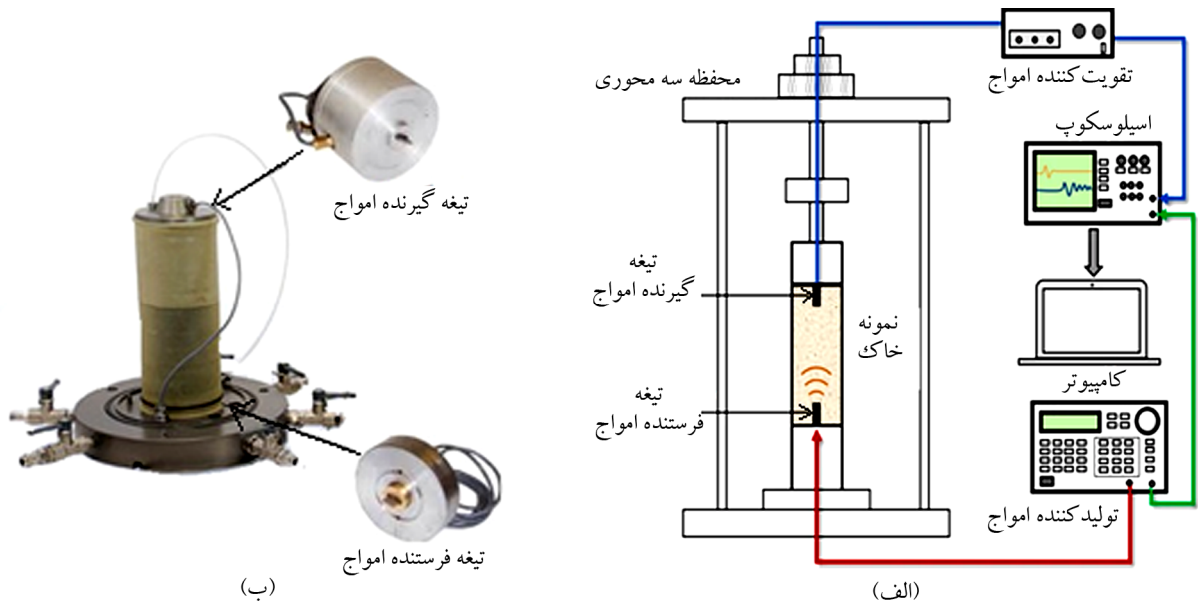
## ۲- تجهیزات مورد استفاده، مصالح و روش‌های انجام آزمایش

### ۲-۱- معرفی دستگاه آزمایش

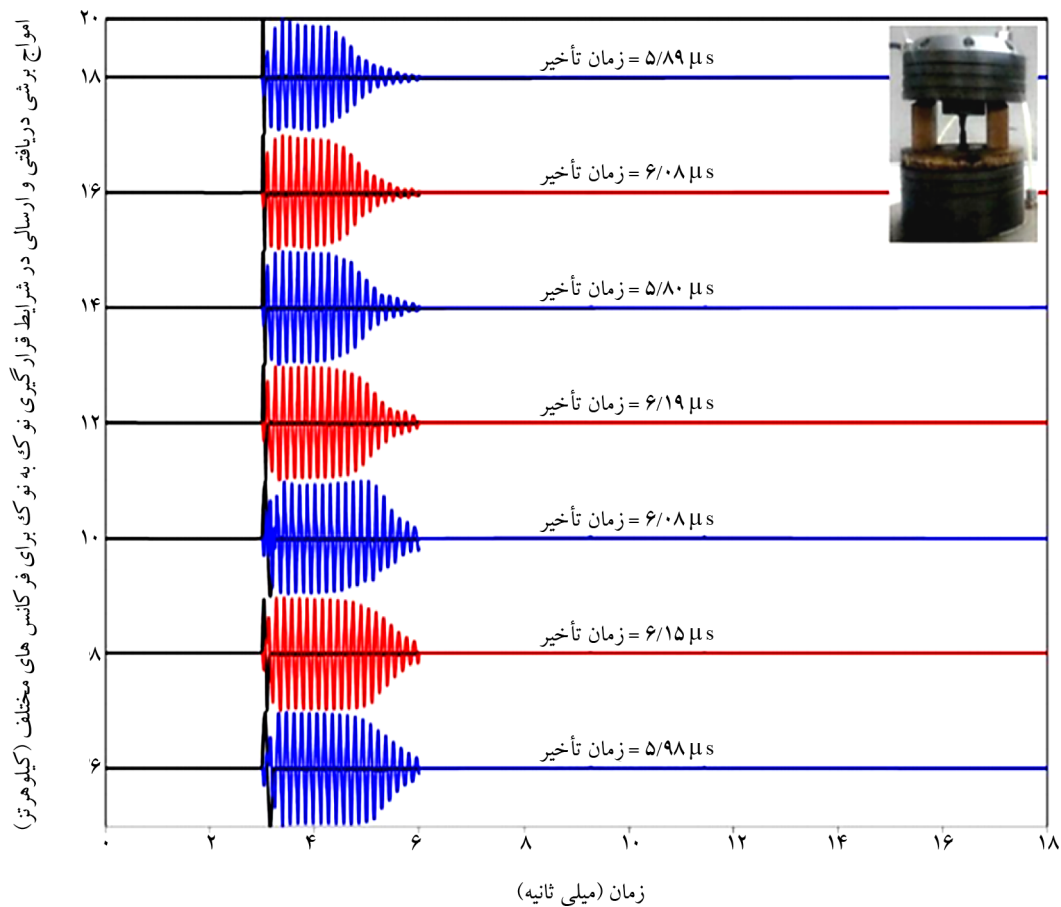
از آزمون‌های المان خمشی در راستای بررسی رفتار دینامیکی خاک‌ها استفاده می‌شود. در سال‌های ۱۹۶۳ و ۱۹۶۵، لارنس، به عنوان اولین محقق، از آزمون المان خمشی جهت بررسی سرعت موج برشی در خاک‌ها استفاده نمود (Fu, 2004). در یک سلول المان خمشی و توسعه دهنده، یک جفت المان پیزوالکتریک استفاده می‌شود. یک المان پیزوالکتریک به عنوان فرستنده موج برشی و دیگری به عنوان گیرنده موج برشی به کار گرفته می‌شود. بر اساس نوع موج ارسالی و دریافتی، زمان سفر موج ( $\Delta t$ ) و طول سفر موج ( $L_{tt}$ ) به صورت فاصله نوک تا نوک المان‌ها محاسبه شده و از طریق معادله (۱) می‌توان سرعت موج برشی ( $V_s$ ) را به دست آورد:

$$V = \frac{L_{tt}}{\Delta t} \quad (1)$$

بر اساس روابط پایه‌ای انتشار امواج در محیط‌های الاستیک که در زمان کرنش‌های کوچک در خاک قابل استفاده می‌باشند، می‌توان با داشتن سرعت موج برشی، میزان مدول برشی حداکثری را از طریق معادله (۲) محاسبه نمود (Kramer, 1996):



شکل (۱): (الف) تصویر شماتیک مجموعه دستگاه سه محوری دیجیتالی مجهز المان خمشی و (ب) تصویر واقعی دستگاه المان خمشی به همراه نمونه خاک آماده شده.

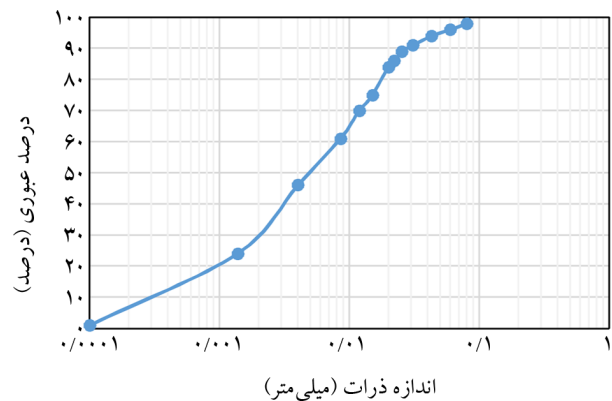


شکل (۲): اندازه گیری زمان های تأخیر در شرایط قرارگیری مستقیم نوک به نوک تیغه های بندر المنت در فرکانس های مختلف (Rajabi & Sharifpour, 2017b).

## ۲-۲- مصالغ مورد استفاده

### ۲-۲-۱- معرفی مشخصات خاک رس

در این کار تحقیقاتی از خاک رس از نوع کائولینیتی با خاصیت خمیری بالا استفاده شده است که مشخصات فیزیکی - شیمیایی و منحنی دانه بندی خاک، به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): منحنی دانه بندی خاک رس مورد استفاده.

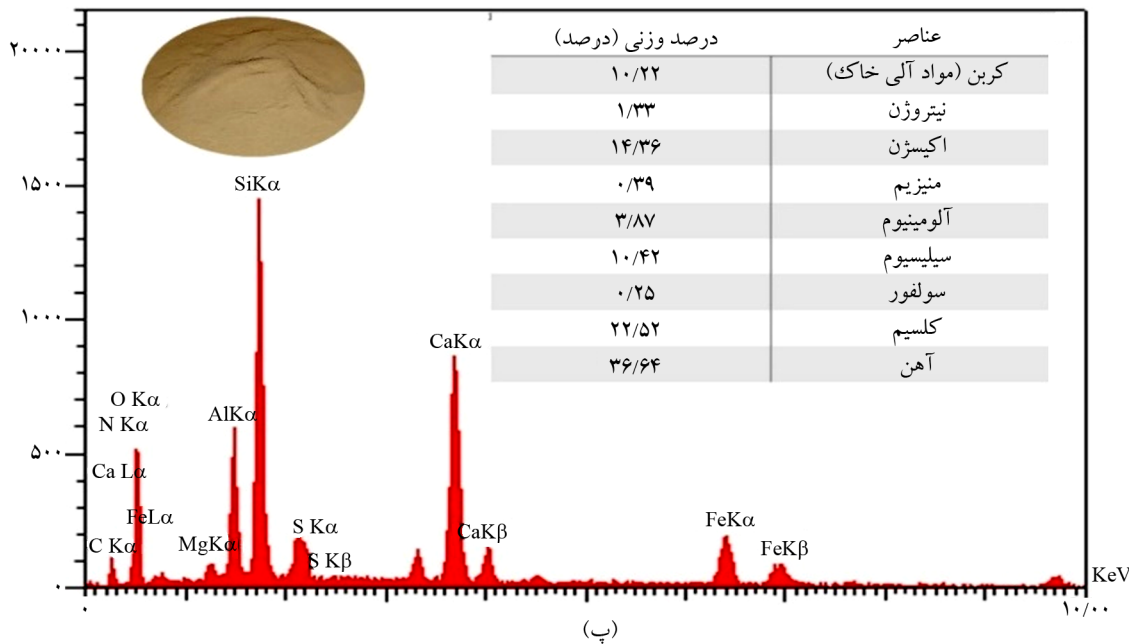
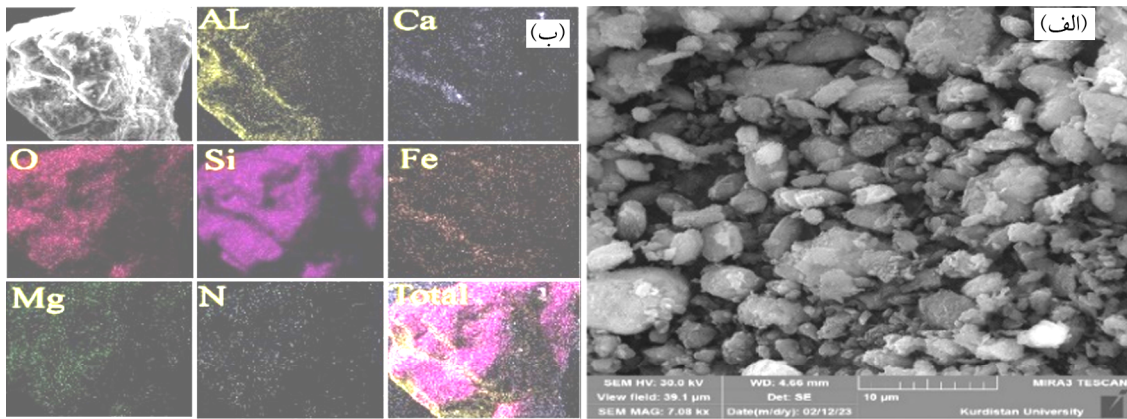
در ادامه روند بررسی خاک رسی تهیه شده، جهت شناسایی تخصصی تر آن از آنالیزهای شناسایی FESEM، EDAX XRD، Mapping و BET جهت کانی شناسی و بررسی مورفولوژیک استفاده شد. شکل (۴-الف) دانه بندی و مورفولوژی ذرات خاک توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FESEM)

را نشان می دهد. اندازه ذرات حدود ۵/۱ میکرومتر برآورد شده که رسی بودن خاک را تأیید می کند. آنالیز نقشه ای یا (Mapping) که در شکل (۴-ب) آورده شده، نوعی آنالیز رصد کردن توزیع یکنواخت عنصری در نمونه خاک می باشد که نتایج آن، توزیع عنصری یکنواخت اجزاء سازنده خاک رس را تأیید می کند. نتایج آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) که در شکل (۴-پ) نشان داده شده است، یک آنالیز بررسی عنصری می باشد که حضور عناصر شیمیایی خاک رس و میزان هر کدام را به صورت یک نمودار با پیک های متعدد ارائه می دهد به طوری که ارتفاع هر پیک، نماینده مقدار آن عنصر در نمونه خاک رس می باشد. به منظور مطالعه کانی شناسی و تعیین نوع خاک رسی از آنالیز پراش اشعه ی پرتو ایکس (XRD) بهره گرفته شد. الگوی پراش خاک رسی مورد مطالعه که در شکل (۵-الف) نشان داده شده، کائولینیتی بودن خاک رس را توسط پیک های مربوطه تأیید کرده و حضور دو کانی کوارتز و مگنتیت در بافت خاک تهیه شده را نیز نشان می دهد (Saeed et al., 2015).

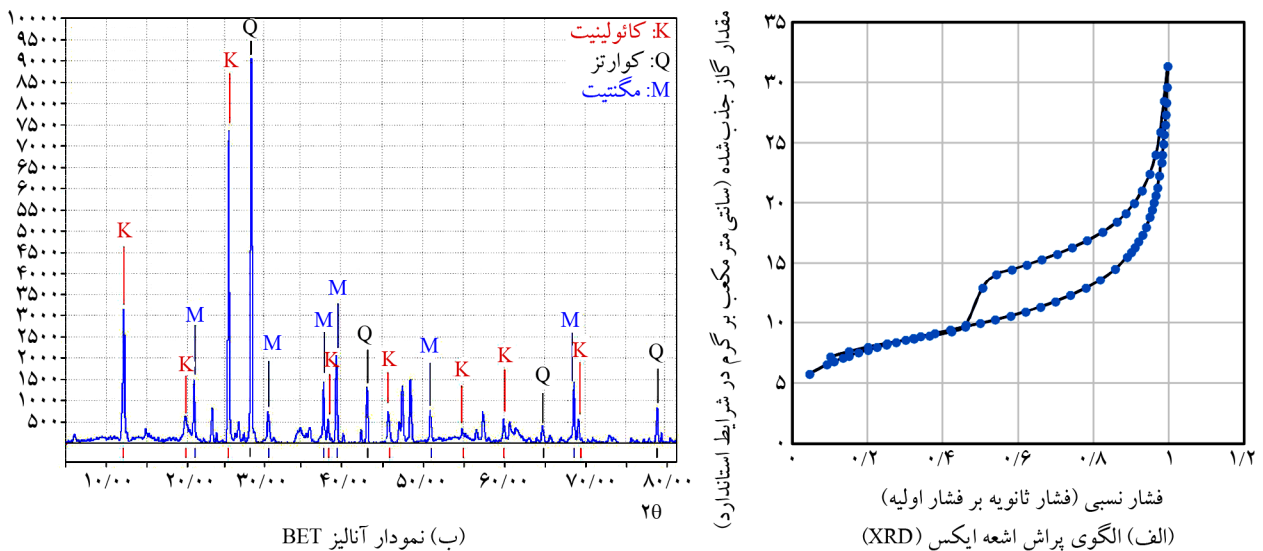
در ادامه روند شناسایی، به منظور بررسی توان جذب مواد بر روی ذرات خاک رس مورد نظر، از آنالیز BET استفاده شد که عدد ۲۶/۵۲ متر مربع بر گرم برای سطح مخصوص ویژه نمونه خاک رس به دست آمد. این عدد تأیید دیگری بر کائولینیتی بودن کانی

جدول (۱): خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک رس مورد استفاده.

نوع/مقادیر	پارامترهای خاک
کائولینیتی	۱ نوع کانی خاک
رس با خاصیت خمیری بالا (CH)	۲ طبقه بندی خاک طبق سیستم متحد
۲۷/۵	۳ رطوبت حد خمیری (%)
۵۲/۱۶	۴ رطوبت حد روانی (%)
۲۴/۶۶	۵ شاخص خمیری
۲/۶۵	۶ توده ویژه
۱/۵۶	۷ حداکثر وزن مخصوص خشک خاک (گرم بر سانتیمتر مربع)
۲۶	۸ رطوبت بهینه (%)
۶۱/۴	۹ ذرات کمتر از ۲ میکرومتر (%)
۲۶/۵۲	۱۰ سطح مخصوص ویژه (متر مربع بر گرم)
۰/۰۴۶	۱۱ سایز منافذ ذرات خاک (آنگستروم)
۶۹/۴۱	۱۲ حجم منافذ ذرات خاک (سانتیمتر مکعب بر گرم)



شکل (۴): آنالیزهای عنصری و مورفولوژیکی از نمونه خاک رس کائولینیتی آماده شده (الف) تصویر FESEM، (ب) تصاویر Mapping و (پ) نمودار آنالیز عنصری EDAX.



شکل (۵): آنالیز نمونه خاک رس کائولینیتی تمیز.

داخل آزمایشگاه نگاه‌داری شدند تا ضمن ممانعت از تبخیر نفت، زمینه برای واکنش‌های احتمالی آلاینده با کانی‌های رسی فراهم شود. سپس آزمایش تراکم جهت تعیین درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک هریک از نمونه‌ها انجام گرفت؛ که نتایج آن در شکل (۶) و جدول (۳) آورده شده است.

رسی است (Fang & Daniels, 2006). نمودار آنالیز BET نمونه خاک در شکل (۵-ب) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است نتایج آنالیز BET علاوه بر تعیین عدد سطح مخصوص ویژه نمونه خاک، اندازه و حجم منافذ ذرات خاک را تعیین می‌نماید که اعداد مربوطه در جدول (۱) گزارش شده است.

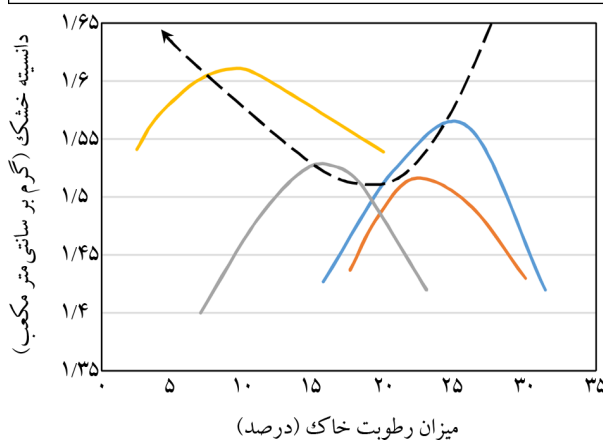
جدول (۲): مشخصات شیمیایی منبع هیدروکربنی مورد استفاده.

مقادیر	پارامترهای شیمیایی
۱	نوع منبع کربنی
۲	وزن مخصوص
۳	وزن مخصوص بر اساس API
۴	میزان نمک (گرم بر متر مکعب)
۵	میزان سولفور (H <sub>2</sub> S)

### ۲-۲-۲- معرفی مشخصات نفت خام

منبع هیدروکربنی مورد استفاده در این کار تحقیقاتی، از نفت خام با برش سبک کربنی تأمین شده توسط شرکت عملیات و بهره‌برداری نفت و گاز استان کرمانشاه می‌باشد که مشخصات شیمیایی آن در جدول (۲) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که این مشخصات توسط شرکت تأمین‌کننده نفت خام آنالیز و ارائه شده است.

آلودگی: — صفر درصد — ۴ درصد — ۸ درصد — ۱۲ درصد



شکل (۶): منحنی تراکم استاندارد خاک رس با درصد آلودگی مختلف.

### ۲-۳- روش آماده‌سازی نمونه

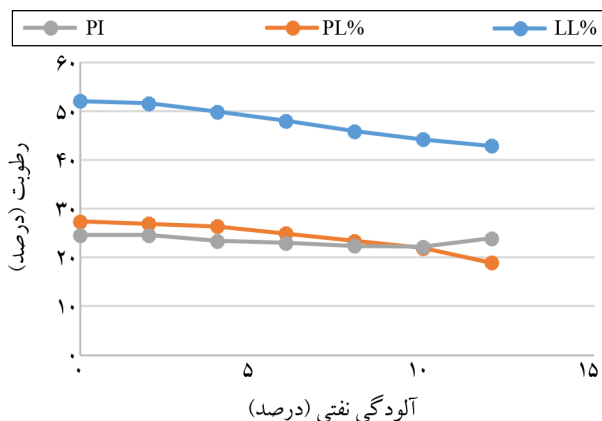
خاک رس ابتدا به مدت ۴۸ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا کاملاً خشک گردد و پس از سرد شدن برای باز شدن کلوخه‌های خاک، توسط دستگاه خرد کن به صورت پودری درآمده و از الک شماره ۴۰ عبور داده شد؛ سپس با درصدهای صفر، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد نفت، به صورت همگن مخلوط گردید. نمونه‌های آلوده شده به مدت سه روز درون ظرف کاملاً عایق‌بندی شده و در دمای محیط و شرایط

جدول (۳): مشخصات نمونه‌های آماده شده.

درصد آلودگی خاک	رطوبت بهینه (درصد)	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم/مترمکعب)	نسبت خلخل (درصد)	فرکانس (کیلوهرتز)	فشار همه‌جانبه (کیلوپاسکال)
۱	۲۶	۱/۵۶	۰/۶۹۹	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۲	۲۳	۱/۵۴	۰/۷۲	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۳	۲۲	۱/۵۲	۰/۷۴۳	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۴	۱۹	۱/۵۱	۰/۷۵۵	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۵	۱۷	۱/۵۳	۰/۷۳۲	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۶	۱۴	۱/۵۷	۰/۶۸۸	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۷	۱۰	۱/۶۱	۰/۶۴۶	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰
۸	۸	۱/۵۲	۰/۷۴۳	۲۰-۵	۴۰۰-۱۰۰

به آب موجود در ماتریس خاک، کمتر باشد، پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب نفوذپذیری و مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک افزایش یافته، اما حد روانی، شاخص خمیری و شاخص تورم کاهش می‌یابد. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2016) افزایش در حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را در خاک رسی آلوده با خاصیت خمیری کم گزارش نمودند. معاونیان و یثربی (Moavenian & Yasrobi, 2008) دریافتند در خاک رس با خاصیت خمیری بالا، آلودگی هیدروکربنی رفتار خاک را غیر پلاستیک می‌کند، حد خمیری را افزایش، حد روانی، شاخص خمیری و پتانسیل تورم را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تمیز با افزایش میزان آلودگی ابتدا کاهش یافته و سپس در آلودگی‌های بالاتر از ۸ درصد افزایش می‌یابد. اما درصد رطوبت بهینه‌ی خاک با افزایش آلودگی همواره روند کاهشی دارد. شکل (۷)، تأثیر میزان آلودگی نفتی بر حدود اتربرگ خاک رسی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش آلودگی، حدود خمیری و روانی همواره کاهش می‌یابند، و شاخص خمیری تا آلودگی ۱۰ درصد، کاهشی و پس از آن به دلیل افزایش سرعت کاهش حد روانی نسبت به حد خمیری، دامنه خمیری روند افزایشی را به همراه دارد. با این حال مقدار شاخص خمیری خاک تمیز بیشتر است.



شکل (۷): حدود اتربرگ خاک رس کائولینیتی با افزایش میزان آلودگی نفتی.

برای ایجاد شرایط قابل مقایسه، تمام نمونه‌های تمیز و آلوده، با رطوبت بهینه‌ی خود مرطوب شده و با حداکثر وزن مخصوص خشک خود، به صورت استوانه‌ای با قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر در پنج لایه کوبیده شدند (Rajabi & Sharifipour, 2018). به منظور دستیابی به تراکم همگن در تمام نمونه، از روش تراکم کاهش یافته استفاده شد. در این روش لایه‌های زیرین خاک در تراکمی کمتر از تراکم هدف ریخته و کوبیده می‌شوند و کوبش لایه‌های بالایی موجب متراکم شدن و رسیدن لایه‌های زیرین به تراکم هدف خواهد شد (Ladd, 1978). نمونه‌های استوانه‌ای به مدت سه روز در شرایط عایق‌بندی شده (به منظور جلوگیری از تبخیر نفت و رطوبت) در محیط آزمایشگاه قرار داده شد، سپس درون غشای مخصوص قرار گرفته و در سیلندر دستگاه سه محوری مجهز به دستگاه المان خمشی قرار گرفتند. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول (۳) آورده شده است (Trzciński et al., 2015). در این پژوهش، از روش تابع همبستگی متقابل برای تخمین زمان سفر موج استفاده شد (Kawaguchi et al., 2016; Viggiani & Atkinson, 1995).

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج

#### ۳-۱- آزمایش‌ها تراکم

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش تراکم استاندارد در خاک رس کائولینیتی تمیز و آلوده به درصد‌های مختلف نفت خام مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۳) خصوصیات نمونه‌ها، از جمله درصد رطوبت بهینه، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک‌ها و نسبت تخلخل آورده شده است. تمام نمونه‌ها با تراکم حداکثر خود (حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه) تهیه شده‌اند.

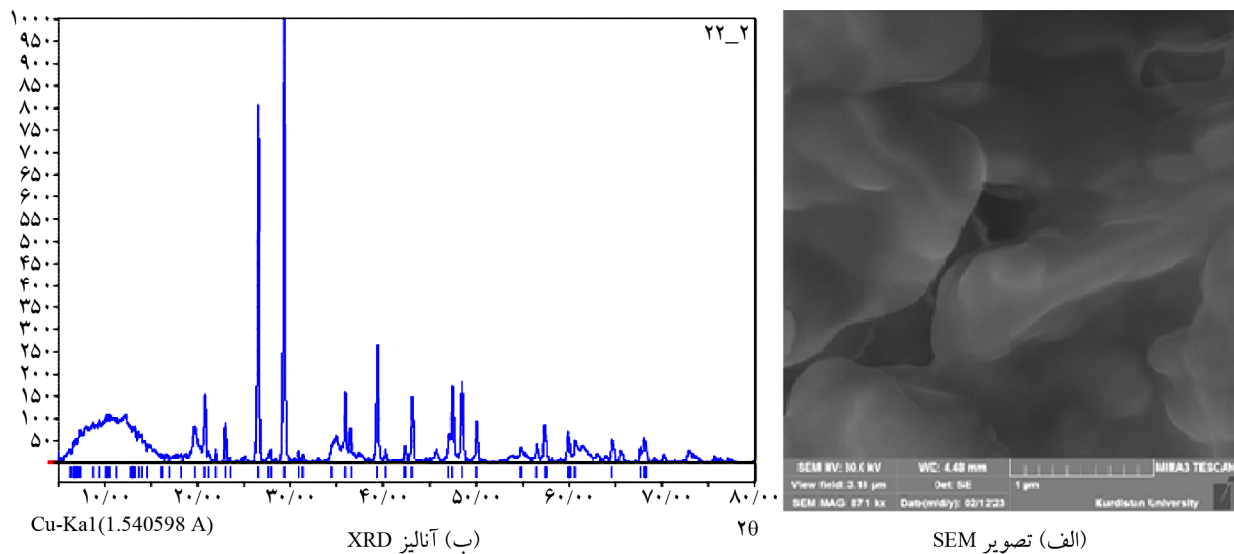
در شکل (۵) منحنی تراکم رس تمیز و آلوده با درصد‌های منتخب ۴، ۸ و ۱۲ آورده شده است. نتایج آزمایش‌های اولگان و ایلدیز (Olgun & Yıldız, 2010) بر روی خاک رسی با خاصیت خمیری بالا نشان داد در حالتی که نسبت آلودگی نفتی

به صورت مرحله‌ای تا رسیدن به رطوبت بهینه ادامه یافت. تا میزان آلودگی ۸ درصد، حضور نفت درون خاک محسوس نبوده و میزان نفت افزوده شده، به دلیل سطح ویژه‌ی بسیار بالای خاک رس مورد استفاده، اختلاف معناداری در حداکثر تراکم خشک خاک ایجاد نکرد. با افزایش میزان آلودگی به بالاتر از ۸ درصد، حضور مواد هیدروکربنی در محیط خاک، توانایی ایجاد لایه‌ی هیدروفوب (آب‌گریز) روی سطح ذرات رس با ضخامت جزئی را دارد، افزایش میزان آلودگی در ۱۲ درصد، منجر به ایجاد یک لایه‌ی آب‌گریز یکپارچه روی تمامی ذرات رسی شده که مانند یک لایه‌ی محافظ از جذب مولکول‌های آب بر سطح ذرات رسی جلوگیری کرده و از ایجاد هرگونه لایه‌ی دوگانه با حضور آب در اطراف ذرات رسی که منجر به تورم آنها می‌شود، پیشگیری می‌نماید. لذا در آلودگی نفتی ۱۲ درصد حداکثر تراکم خشک (حداقل تورم) را شاهد هستیم. تصویر SEM خاک رسی با ۱۲ درصد آلودگی که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، ایجاد این لایه‌ی یکپارچه نفتی اطراف ذرات رسی را تأیید می‌کند.

با توجه به اینکه آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس (XRD)، جهت بررسی ساختار کانی‌ها و مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ حضور مواد آلی مانند نفت خام و سایر آلاینده‌های هیدروکربنی، تأثیر معناداری بر الگوی پیک‌های این آنالیز نداشته و تنها منجر به ایجاد نویز در بازه‌ی  $10 < 2\theta$  می‌گردد. مقایسه‌ی نمودار XRD خاک رس با ۱۲ درصد آلودگی (شکل ۸-ب) با نمودار XRD خاک رس تمیز (شکل ۵-الف)، این مسئله را تأیید می‌نماید.

ترزینسکی و همکاران (Trzciński et al., 2015) با بررسی اثر آلودگی نفتی بر روی یک نوع خاک رس طبیعی، بیان کردند که نمونه‌های آلوده دارای بار الکتریکی کمتری نسبت به نمونه‌های غیر آلوده بوده و نیروهای دافعه الکترواستاتیک در نمونه‌های آلوده بسیار کمتر از نمونه‌های غیر آلوده بودند. در پژوهشی که توسط خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2013) بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیتی آلوده به گازوئیل

خاک‌های رسی رفتار پیچیده‌ای در حضور مایعات آلی دارند. میگوذا و راتناورا (Meegoda & Ratnaweera, 1994) در سال ۱۹۹۴ نشان دادند تراکم‌پذیری خاک‌های آلوده، به نوع و میزان آلودگی و نوع خاک بستگی دارد. توجه به این نکته ضروری است که در پژوهش حاضر، نمونه‌های خاک خشک ابتدا با آلاینده نفتی به صورت همگن مخلوط و سپس با افزودن آب، درصد رطوبت بهینه‌ی خاکی که از پیش آلوده شده و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک، تعیین گردید؛ بنابراین در تمامی نمونه‌های آلوده، دو سیال امتزاج‌ناپذیر آب و نفت به صورت هم‌زمان در ماتریس خاک وجود دارند (آب همواره درون ماتریس خاک وجود دارد و حذف نگردیده است) که تقدم حضور نفت در خاک نسبت به آب، در نتایج به دست آمده مؤثر خواهد بود. قدیانی و همکاران (Ghadyani et al., 2019) دو سری نمونه رسی را جهت بررسی خواص ژئوتکنیکی در اثر آلودگی نفتی مورد بررسی قرار دادند، سری اول شامل کائولینیت آلوده به نفت با میزان رطوبت بهینه معادل حالت خاک غیر آلوده و سری دوم شامل خاک کائولینیتی با میزان رطوبت بهینه معادل نمونه‌های از قبل آلوده شده بود. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش این محققین، اثرات روانکاری همراه با ثابت دی الکتریک کوچک مایعات آلی، حداکثر چگالی خشک خاک را افزایش داده و در نمونه‌هایی که با رطوبت معادل رطوبت بهینه‌ی خاک از قبل آلوده شده متراکم گردید، افزایش درصد آلودگی، مقاومت برشی تک‌محوره و زهکشی نشده خاک را افزایش داد. آنالیزهای بررسی سطحی انجام شده از جمله BET و BJH روی ذرات رسی، نشان‌دهنده‌ی سطح ویژه‌ی بسیار بالای این خاک می‌باشد (جدول ۱ و شکل ۴-ب)، بالا بودن سطح ویژه‌ی رس و باردار بودن ذرات، میل ترکیبی آن را با مایع قطبی آب نسبت به مایع غیر قطبی نفتی، افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه هدف آزمایش‌ها تراکم، محاسبه‌ی میزان رطوبت لازم برای رسیدن به تراکم حداکثر در خاک‌های با درصد‌های آلودگی مختلف بود، ابتدا خاک خشک و تمیز با درصد آلودگی مورد نظر مخلوط و سپس افزودن رطوبت



شکل (۸): آنالیز نمونه خاک آلوده با درصد نفت ۱۲ درصد.

ماده‌ای غیر قطبی و غیر قابل اختلاط با آب است که وجود هم‌زمان این دو مایع در ساختار خاک مانع نزدیکی ذرات رسی و در نتیجه کاهش وزن مخصوص خشک می‌گردد.

### ۳-۲- سرعت موج برشی در خاک رس کائولینیتی تمیز و آلوده

شکل (۹) تغییرات سرعت موج برشی بر حسب فشار همه‌جانبه را نشان می‌دهد. روند تغییرات سرعت موج برشی نسبت به فشار همه‌جانبه، برای تمامی نمونه‌ها و در فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوهرتز دارای روند افزایشی است. در فشارهای همه‌جانبه‌ی بیشتر، فضای خالی بین ذرات کمتر شده و سطح تماس آنها افزایش و در نتیجه سرعت حرکت عبور موج در خاک افزایش می‌یابد (Rajabi & Sharifipour, 2018; Viggiani & Atkinson, 1995).

نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری سرعت موج برشی بر حسب فشار همه‌جانبه در شکل (۹) را می‌توان با برازش یک تابع توانی مدل نمود که رابطه ریاضی آن در معادله (۴) نشان داده شده است:

$$V_s = A(P)^n \quad (4)$$

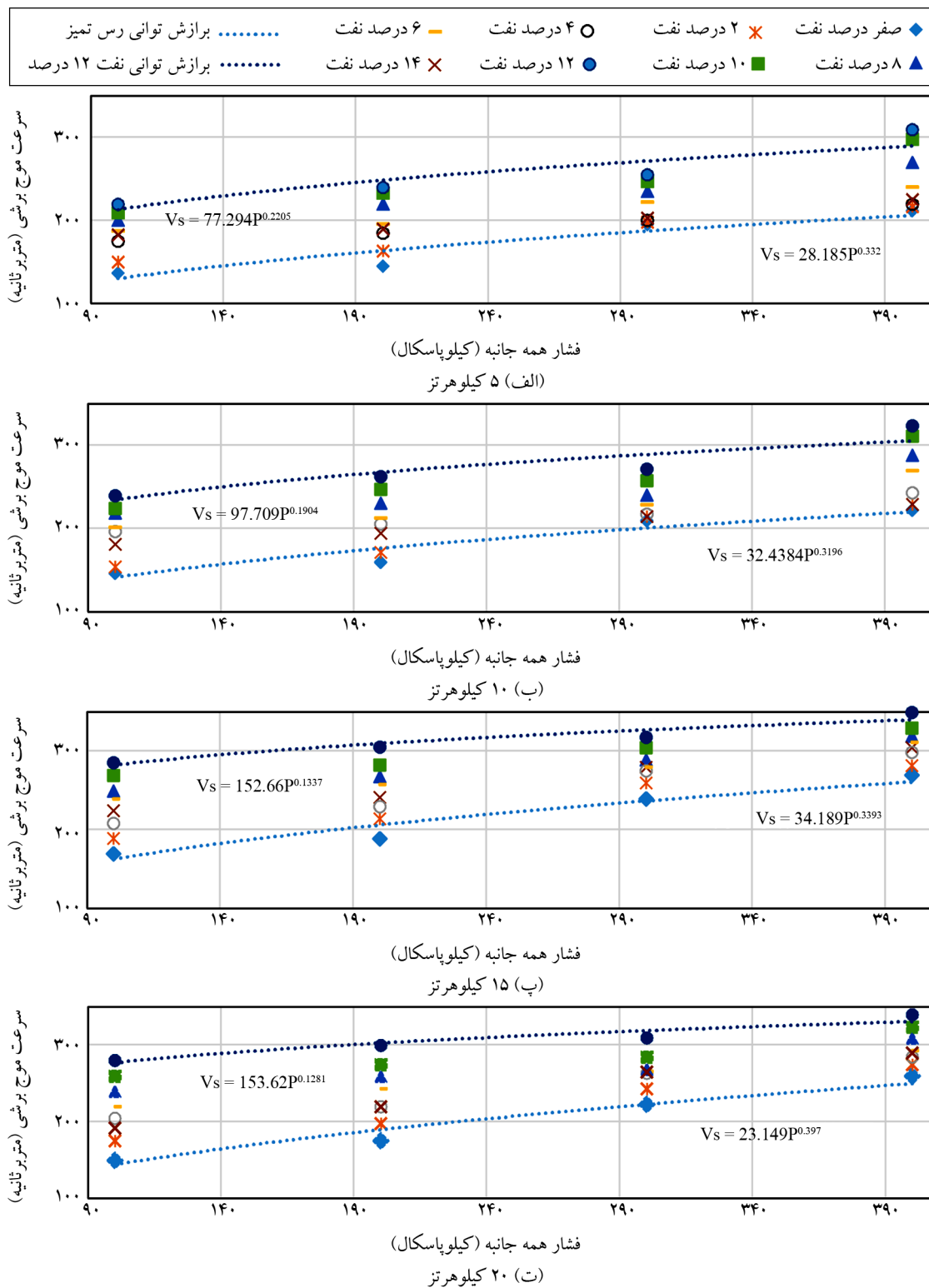
در رابطه فوق، P فشار همه‌جانبه و A و n ضرایب تجربی

انجام شد، نمونه‌های آلوده به گازوییل مقاومت برشی بالاتری در مقایسه با آنهایی که با آب در همان میزان مایع مخلوط شدند، از خود نشان دادند که خود حاکی از اثر مثبت آلودگی هیدروکربنی بر خصوصیات ژئوتکنیکی رس کائولینیتی است. در پژوهش انجام گرفته در سال ۲۰۱۲ بر روی یک خاک رسی با خاصیت خمیری بالا که در سه میدان نفتی در منطقه دلتای نیجر در نیجریه که در آن نشت نفت خام رخ داده بود انجام شد، افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک و کاهش درصد رطوبت بهینه را برای خاک آلوده نسبت به خاک تمیز گزارش کردند. همچنین آنها افزایش مقاومت برشی خاک رس در حضور نفت را در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا، مشاهده و علت آن را آگلومره شدن (قرار گرفتن تجمعی ذرات رس) در حضور نفت عنوان نمودند (Adejumo, 2012).

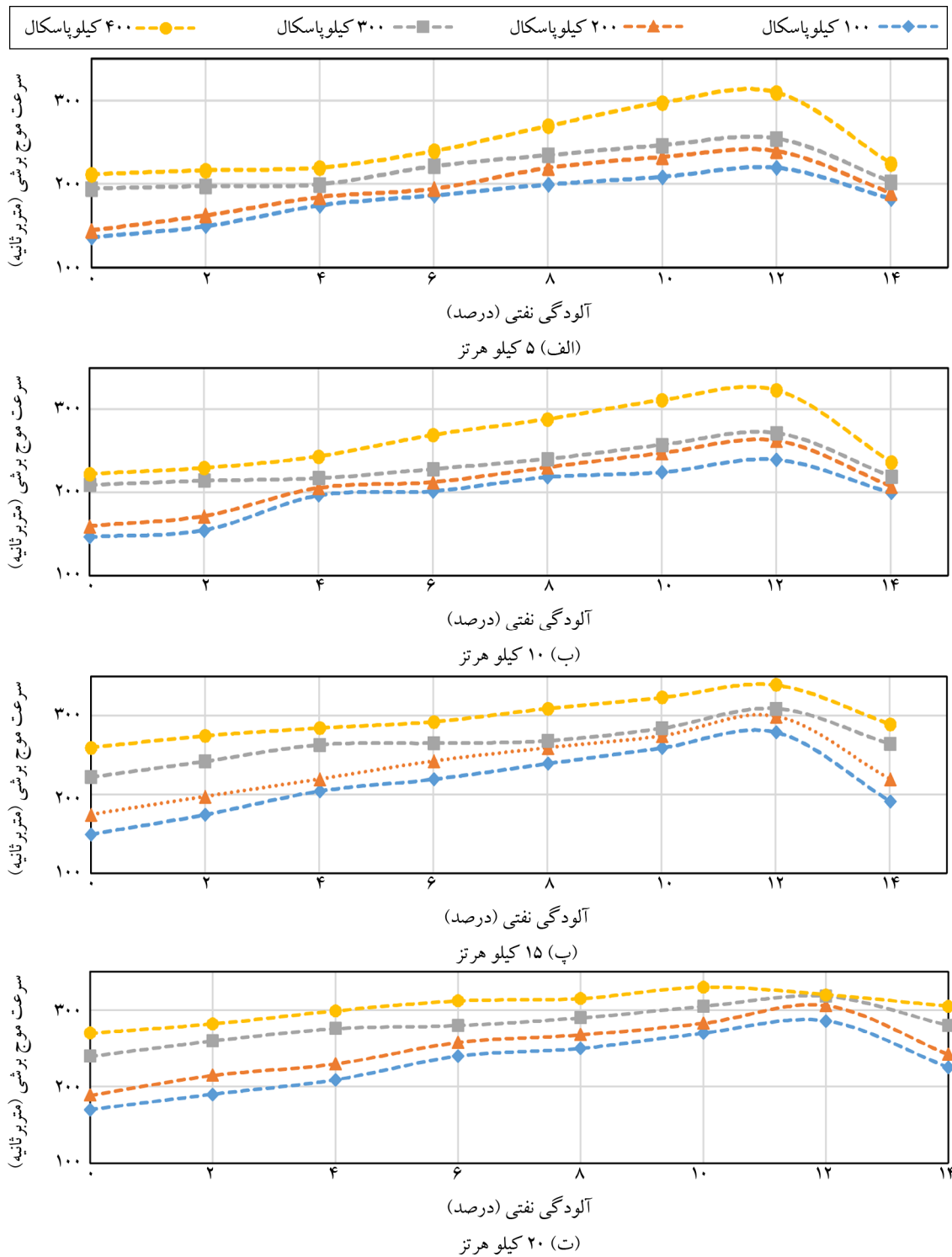
در آلودگی‌های بیش از ۱۴ درصد، مشاهده شد که با کوبیدن خاک، نفت از ساختار خاک خارج می‌شود؛ این مسئله نشان می‌دهد که آلودگی نفتی بیشتر از ۱۲ درصد به‌عنوان عامل بازدارنده‌ی تراکم عمل می‌کند؛ بنابراین میزان آلودگی کم، نمی‌تواند تمام سطوح خارجی ذرات رسی را پوشش داده و با افزودن رطوبت، آب لایه‌ی دوگانه‌ی اطراف ذرات باعث ایجاد تورم و مانع از نزدیکی ذرات به هم شده و از طرفی نفت خام

می‌باشند که از آزمایش‌ها به دست می‌آیند ( Murillo et al., 2011).  
 نشان می‌دهد تأثیر فشار همه‌جانبه بر سرعت موج برشی، با

در نمونه‌ی تمیز n عددی مابین ۰/۳۰ تا ۰/۳۹ و در نمونه‌ی با افزایش میزان آلودگی کاهش می‌یابد.



شکل (۹): نمودار تغییرات سرعت موج برشی بر حسب فشار همه‌جانبه خاک رسی تمیز و آلوده در فرکانس‌های مختلف.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات سرعت موج برشی بر حسب درصد آلودگی نفتی در فرکانس‌های مختلف.

می‌یابد. علت این موضوع این است که رس کائولینیتی با خاصیت خمیری بالا سطح ویژه بالایی دارد که تا آلودگی ۱۲ درصد، نفت اضافه شده صرف پوشش دهی فضای اطراف ذرات شده و با خاصیت روان کاری موجب تراکم بیشتر شده و از طرفی

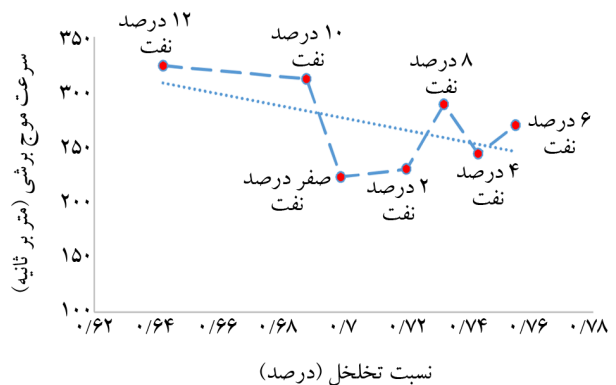
در شکل (۱۰) تغییرات سرعت موج برشی بر آلودگی نفتی نمایش داده شده است. در تمامی فشارهای همه‌جانبه و فرکانس‌های مختلف، با افزایش درصد آلودگی، سرعت موج برشی تا آلودگی ۱۲ درصد روند افزایشی داشته و سپس کاهش

### ۳-۳- مدول برشی حداکثر در رس کائولینیتی تمیز و آلوده

در شکل (۱۲) تأثیر آلودگی بر مدول برشی کرنش کوچک خاک رس کائولینیتی در فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال آورده شده است. ابتدا سرعت موج برشی به روش همبستگی متقابل محاسبه شده و سپس از معادله (۲)، مدول برشی حداکثر خاک محاسبه می‌شود. همان‌طور که در این نمودار میله‌ای مشخص است، با افزایش فرکانس در هر نمونه‌ی خاک، همواره مدول برشی حداکثر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد نفت تا ۱۲ درصد، روند تغییرات مدول برشی افزایشی و پس از آن کاهش خواهد شد. نمونه‌ی رسی با ۱۲ درصد وزنی آلودگی نفتی، و نمونه‌ی تمیز به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مدول برشی حداکثر در تمامی فرکانس‌ها و تحت تمامی فشارهای همه‌جانبه می‌باشد کریمی و شریفی‌پور (Karimi & Sharifipour, 2021) نشان دادند در خاک رس با خاصیت خمیری کم، نمونه‌ی با ۱۰ درصد آلودگی بیشترین و نمونه‌ی تمیز کمترین مدول برشی حداکثر را دارا بودند. طبق نظر نویسندگان هرچه خاصیت خمیری رس بالاتر باشد، به دلیل سطح ویژه‌ی بالاتر درصد بیشتری آلودگی برای پوشش کامل ذرات و به حداکثر رسیدن خاصیت روان کاری نفت نیاز دارند تا به بیشینه‌ی مدول برشی حداکثر برسند.

پتانسیل تورم آن را نیز کاهش می‌دهد؛ اما با افزایش بیشتر آلودگی، نفت حاصل در فضای بین ذرات به‌عنوان مایع آزاد مانع از نزدیک شدن ذرات به یکدیگر شده و سطح تماس آنها را کاهش می‌دهد (Soltani et al., 2018).

نمودار سرعت موج برشی برحسب نسبت تخلخل برای خاک رس با درصدهای مختلف آلودگی در شکل (۱۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد به‌صورت کلی با افزایش درصد تخلخل، سرعت موج برشی روند کاهشی دارد. نمودار نشان می‌دهد که سرعت موج برشی تنها به تخلخل خاک بستگی نداشته و میزان آلودگی نفتی در سرعت موج برشی مؤثر است.



شکل (۱۱): نمودار سرعت موج برشی برحسب نسبت تخلخل در نمونه‌های رسی با درصدهای مختلف آلودگی نفتی تحت فشار همه‌جانبه ۴۰۰ کیلوپاسکال و در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز.



شکل (۱۲): نمودار مدول برشی حداکثر بر حسب درصد نفت خام در فرکانس‌های مختلف تحت فشار همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک خاک رس کائولینیتی با خاصیت خمیری بالا (CH) آلوده به درصد‌های مختلف نفت خام (صفر، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد) و تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال و فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تمیز و آلوده با درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خود تهیه و مورد آزمایش با استفاده از دستگاه المان خمشی قرار گرفتند. از روش همبستگی متقابل جهت تعیین زمان سفر موج استفاده شده و نتایج زیر به دست آمد:

۱. با توجه به آزمایش‌ها XRD و خاک رسی از نوع کائولینیتی با خاصیت خمیری بالا تعیین شد که به دلیل سطح ویژه‌ی بالا، پتانسیل تورم بالایی دارد.

۲. نتایج آزمایش تراکم بر نمونه‌های تمیز و آلوده نشان داد با افزایش میزان آلودگی درصد رطوبت بهینه همواره کاهش می‌یابد اما حداکثر وزن مخصوص خشک تا آلودگی ۱۲ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۳. با افزایش فشار همه‌جانبه، در تمامی نمونه‌ها و در فرکانس‌های مختلف، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک خاک افزایش یافت، فشار همه‌جانبه باعث نزدیک شدن ذرات و افزایش سطوح تماس می‌شود.

۴. تغییرات سرعت موج برشی نسبت به فشار همه‌جانبه را می‌توان با تابع توانی  $V_s = A(P)^n$  نشان داد که در نمونه‌ی تمیز  $n$  عددی مابین ۰/۳۲ تا ۰/۳۹ و در نمونه‌ی با ۱۲ درصد آلودگی عددی بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۲ دارد. این مسئله نشان می‌دهد تأثیر فشار همه‌جانبه بر سرعت موج برشی، با افزایش میزان آلودگی کاهش می‌یابد.

۵. افزایش فرکانس تحریک همواره باعث افزایش سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر در تمام نمونه‌های تمیز و آلوده و تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف شد.

۶. در تمام فشارهای همه‌جانبه و فرکانس‌های تحریک، حداکثر

سرعت موج برشی در خاک آلوده به ۱۲ درصد نفت مشاهده شد.

۷. نتایج حاصل از این تحقیق بر نتایج پژوهش‌های رجبی و شریفی پور و کریمی و شریفی پور مطابقت دارد، این مسئله نشان داد تأثیر فشار همه‌جانبه، فرکانس تحریک و آلودگی اثرات مشابهی بر روند رفتاری رفتار خاک‌های رسی و ماسه‌ای می‌گذارد، اما در خاک‌های رسی به دلیل سطح مخصوص ویژه‌ی بالاتر نسبت به خاک‌های دانه‌ای، رسیدن به حداکثر سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک خاک، در درصد آلودگی بیش‌تری اتفاق می‌افتد. به طوری که در کار رجبی و شریفی پور بر روی خاک ماسه‌ای، حداکثر سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک خاک در آلودگی ۴ درصد گزارش شده است. همچنین در خاک‌های رسی با خاصیت خمیری بیشتر نسبت به خاک با خاصیت خمیری کمتر، به دلیل سطح ویژه و منافذ بیشتر درصد آلودگی‌ای که حداکثر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر در آن مشاهده می‌شود، بیشتر است، در مطالعه‌ای که کریمی و شریفی پور بر رس با خاصیت خمیری پایین انجام دادند، میزان آلودگی بحرانی ۱۰ درصد گزارش شده است.

این مطالعه بر روی رفتار کوتاه‌مدت خاک رس کائولینیتی با خاصیت خمیری زیاد، در حوزه کرنش‌های کوچک انجام گرفته است؛ لذا توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی اثر درازمدت آلودگی نفتی بر رفتار خاک رسی نیز مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می‌گردد مخلوط خاک با درصد‌های مختلف ماسه و رس مورد بررسی قرار گیرد تا اثر حضور مقادیر مختلف آلودگی بر ترکیبات مختلف ماسه و رس به دست آید.

#### مراجع

Adejumo, T. (2012). *Effect of Crude oil Contamination on the Geotechnical Properties of Soft Clay Soils of Niger Delta Region of Nigeria*.

Airey, D., & Mohsin, A. (2013). Evaluation of shear

- Meegoda, N.J., & Ratnaweera, P. (1994). Compressibility of contaminated fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 17, 101-101.
- Moavenian, M.H., & Yasrobi, S.S. (2008). Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant. *Applied Clay Science*, 39(1-2), 60-71.
- Murillo, C., Sharifipour, M., Caicedo, B., Thorel, L., & Dano, C. (2011). Elastic parameters of intermediate soils based on bender-extender elements pulse tests. *Soils and foundations*, 51(4), 637-649.
- Olgun, M., & Yildiz, M. (2010). Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil. *Applied Clay Science*, 48(4), 615-621.
- Puri, V.K. (2000). Geotechnical aspects of oil-contaminated sands. *Journal of Soil Contamination*, 9(4), 359-374.
- Rahman, Z., Hamzah, U., & Ahmad, N. (2010). Granitic and Metasedimentary Soils. *Asian Journal of Applied Sciences*, 3(4), 237-249.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2017a). An experimental characterization of shear wave velocity ( $V_s$ ) in clean and hydrocarbon-contaminated sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 2727-2745.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2017b). An Experimental characterization of shear wave velocity ( $V_s$ ) in Clean and hydrocarbon-contaminated sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(6), 2727-2745.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2018). Influence of weathering process on small-strain shear modulus ( $G_{max}$ ) of hydrocarbon-contaminated sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 129-140.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2019). Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooh sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(11), 1351-1367.
- Saeed, K.A.H., Kassim, K.A., Yunus, N.M., Nur, H., Abdul Hussein Saeed, K., Kassim, K., Mohd Yunus, N., & Nur, H. (2015). Physico-chemical characterization of lime stabilized tropical kaolin clay. *Jurnal Teknologi*, 72(3), 83-90.
- Safehian, H., Rajabi, A.M., & Ghasemzadeh, H. wave velocity from bender elements using cross-correlation. *Geotechnical Testing Journal*, 36(4), 506-514.
- Estabragh, A., Beytollahpour, I., Moradi, M., & Javadi, A. (2016). Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 503-519.
- Fang, H.-Y., & Daniels, J.L. (2006). *Introductory Geotechnical Engineering: an Environmental Perspective*. CRC Press.
- Fu, L. (2004). *Application of Piezoelectric Sensors in Soil Property Determination*. Case Western Reserve University.
- Ghadyani, M., Hamidi, A., & Hatambeigi, M. (2019). Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(1), 112-135.
- Karimi, S., & Sharifipour, M. (2021). Characterizing the Shear Modulus Variations of Crude Oil-Contaminated Clay on Small-Strain Range. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(2), 23-36.
- Kawaguchi, T., Ogino, T., Yamashita, S., & Kawajiri, S. (2016). Identification method for travel time based on the time domain technique in bender element tests on sandy and clayey soils. *Soils and foundations*, 56(5), 937-946.
- Kermani, M., & 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), 655-671.
- Khamehchiyan, M., Hossein Charkhabi, A., & Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89(3), 220-229.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11-16.
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Pearson Education India.
- Ladd, R. (1978). Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1(1), 16-23.

(2018). Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, 241, 55-63.

Soltani, A., Estabragh, A.R., Taheri, A., Deng, A., & Meegoda, J. N. (2018). Experiments and dimensional analysis of contaminated clay soils. *Environmental Geotechnics*, 6(7), 434-449.

Trzciński, J., Williams, D.J., & Žbik, M.S. (2015). Can hydrocarbon contamination influence clay soil grain size composition? *Applied Clay Science*, 109, 49-54.

Ukpong, E., & Umoh, I. (2015). Effect of crude oil spillage on geotechnical properties of lateritic soil in Okoroete, Eastern Obololo. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(1), 12-24.

Viggiani, G., & Atkinson, J. (1995). Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, 45(1), 149-154.

Viggiani, G., & Atkinson, J. (1995). Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Geotechnique*, 45(2), 249-265.

## The Effect of Hydrocarbon Contamination on the Small Strain Dynamic Behavior of Kaolinite Clay Compaction Properties and Shear Wave Velocity

Hadis Mohammadi<sup>1</sup> and Mohammad Sharifipour<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran, \*Corresponding Author, email: Sharifipour@razi.ac.i

The issue of soil contamination with petroleum compounds in Iran, a country renowned for its abundant oil reservoirs, presents a formidable challenge. The infiltration of oil pollutants in oil exploration sites results in soil contamination with hydrocarbons. The development of construction projects in oil-rich areas and the leakage of oil pollutants, the implementation of such projects requires sufficient knowledge of the geotechnical characteristics of oil contaminated soils. The estimation of soil dynamic parameters has a decisive role in the analysis of the structures and stress-strain behavior of soils. In this research, clay soil with highly plastic properties (It has a plastic index of 24.66) and different amounts (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14%) of Kermanshah refinery crude oil were used as hydrocarbon pollutants. The analysis of XRD, FESEM, EDAX and BET were used to characterize the mineral and morphology of the soil, and the results showed that the clay soil mineral was of kaolinite type with highly plastic properties was determined, which has a high swelling potential due to its high specific surface area. The results of the Atterberg limit test on clean and contaminated soil samples showed that with increasing pollution, the plastic limit and liquid limit decrease, and the plastic index decreases up to 10% of pollution and then increases. According to the compaction test, porosity ratio and the optimum moisture content of clean and contaminated samples obtained. The results showed that the maximum dry density of soil is equal to  $1.61 \text{ gr/cm}^3$ , which is created in the clay sample with 12% contamination. Sampling is done by the reduced compaction method in the optimal moisture percentage of clean and contaminated soils. The present research was carried out in a laboratory method in the research laboratory of Razi University Faculty of Engineering. Shear wave velocity and maximum shear modulus ( $G_{\max}$ ) of clean and contaminated clay samples prepared with maximum dry density, in the range of 100 to 400 KPa confining pressure and frequency of 5 to 20 kHz, were measured by a bender element device.

The cross-correlation method was used to determine the shear wave travel time. The graph of changes in shear wave velocity according to the porosity ratio for clay with different percentages of oil contamination showed that, with the increase of porosity, the shear wave velocity has decreasing trend. The results showed that the highest shear wave velocity and maximum shear modulus were observed in clay with 12% contamination in condition of 300 KPa confining pressure and 20 kHz frequency obtained 320 m/s and 512 MPa, respectively. Also, in all confining pressures and excitation frequencies, the maximum shear wave velocity was observed in soil contaminated with 12% oil. Increase of confining pressure causes the particles to approach and increase the contact surfaces, thus the shear wave velocity increase. The changes of the shear wave velocity compared to the confining pressure can be represented by the power function. The results show that the effect of confining pressure on shear wave velocity decreases with the increase of pollution content. The results of the tests showed that with the increase of frequency, the shear wave velocity increases.

**Keywords:** Small-Strain Dynamic Behavior of Soil, Kaolinite Clay, Hydrocarbon Contaminated Soils, Maximum Shear Modulus, Bender Element Test, Chemical Identification of Soil.