

چکیده

محیط زیست دائماً در معرض آلودگی های مختلفی قرار دارد. آلودگی نفتی از جمله آلودگی هایی است که می تواند منجر به آسیب های غیرقابل جبران به محیط زیست شود. همه روزه مقدار زیادی از محصولات نفتی به روش های مختلفی وارد محیط می شود که این آلودگی خصوصیات مکانیکی، شیمیایی و دینامیکی خاک را تحت تأثیر قرار می دهد. تغییر خواص ژئوتکنیکی خاک، برای سازه هایی که در مجاورت و یا بر روی خاک های آلوده نفتی قرار دارند، مسئله مهمی است که می تواند باعث گسیختگی و یا افزایش مقاومت خاک شود. از آنجا که رفتار بسیاری از سازه ها و فونداسیون ها در زمان بارهای دینامیکی در محدوده کرنش های کوچک می باشد، بررسی و ارزیابی سرعت امواج در ساختار خاک می تواند اطلاعات مفید و قابل توجهی را در خصوص رفتار کرنش کوچک خاک در اختیار محققین و مهندسين قرار دهد. اهمیت و ارزش سازه های صنعت نفت در ایران، به عنوان یکی از کشورهای فعال در میان کشورهای صادرکننده نفتی و نیز یک کشور با سطح لرزه خیزی بالا، باعث شده است که پژوهش و تحقیق، در راستای ارتقای سطح طراحی و صحت رفتار سازه های در معرض آلودگی، امری بسیار مهم باشد. هدف از تحقیق، شناسایی مدول برشی خاک رس در حالت آلوده به مواد نفتی با درصدهای مختلف از آلودگی و مقایسه ی آنها با خاک رس آلوده نشده در حوزه ی کرنش های کوچک است.

واژگان کلیدی: نفت خام، خاک رس آلوده، سرعت موج برشی، مدول برشی، آزمون المان خمشی.

بررسی تغییرات مدول برشی خاک های رسی آلوده به نفت خام در محدوده کرنش های کوچک

شیدا کریمی

دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

محمد شریفی پور (نویسنده مسئول)

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، sharifipour@razi.ac.ir

۱- مقدمه

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

که در آن ρ دانسیته ی نسبی و V_s سرعت متوسط انتشار امواج برشی در توده ی خاک است. سرعت موج برشی تابعی از خصوصیات فیزیکی، حالت قرارگیری و خصوصیات مکانیکی ذرات و همچنین بیان کننده ی آرایش دانه ها و نقاط تماس ذرات خاک می باشد [۱].

میگودا و راتناویرا [۲] تراکم پذیری خاک های ریزدانه ی آلوده به پروپانول و گلیسرول را بررسی کردند و دریافتند که تراکم پذیری به نوع و میزان آلودگی موجود در خاک وابسته است. همچنین ویسکوزیته ی مایع منفذی بر خصوصیات تراکمی

در تحقیق حاضر از مفاهیم پایه ای گسترش امواج در محیط های پیوسته با استقرار المان های خمشی^۱ در دستگاه سه محوری، به منظور اندازه گیری سرعت موج برشی و در نهایت مدول برشی خاک، تحت فشارهای همه جانبه و در محدوده ی کرنش های کوچک استفاده شده است. مدول برشی، پارامتری مهم در توصیف رفتار دینامیکی خاک ها می باشد. از طرفی سرعت موج برشی یکی از پارامترهای قابل اندازه گیری برای تعیین مدول برشی است. رابطه کلاسیک تعیین مدول برشی بر اساس سرعت موج برشی در محدوده ی کرنش های کوچک ($\varepsilon \leq 10^{(-3)}\%$) به صورت رابطه (۱) می باشد:

داخلی و فشردگی خاک کائولینیت به علت آلودگی را نشان داد. آکینومی و همکاران [۱۲] با انجام آزمایش‌های متعدد دریافتند که با افزایش درصد نفت خام میزان حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه، نفوذپذیری و دانسیته‌ی ویژه‌ی خاک کاهش و حد روانی، حد خمیری و دامنه‌ی خمیری خاک با افزایش درصد نفت خام افزایش می‌یابد. ایستبرق و همکاران [۱۳] اثرات آلودگی گلیسرول و اتانول بر رفتار مکانیکی خاک رس را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش درصد آلودگی ضریب فشردگی کاهش و مقاومت برشی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. ترزینسکی و همکاران [۱۴] آلودگی‌های هیدروکربنی بر دانه‌بندی خاک‌های ریزدانه و تفاوت ریزساختاری ناشی از آلودگی‌های هیدروکربنی در خاک رس را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، تمام آزمایش‌های اندازه‌ی ذرات، نتایج مشابهی را نشان دادند و تلاش برای تعیین تفاوت بین نمونه‌های آلوده و غیر آلوده بی‌نتیجه بود. سفیهیان و همکاران [۱۵] عنوان نمودند که اثرات آلودگی دیزل بر رفتار ژئوتکنیکی خاک ایلیت نشان می‌دهد که زاویه‌ی اصطکاک داخلی با افزودن دیزل به خاک ایلیت کاهش و در نهایت مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. همچنین افزودن دیزل میزان وزن مخصوص خشک حداکثر را کاهش و درصد رطوبت بهینه و ضریب فشردگی را افزایش می‌دهد.

رجبی و شریفی پور [۱۶-۱۷] اثر نفت خام بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر ماسه در دامنه‌ی کرنش‌های کوچک با استفاده از آزمایش المان خمشی کار گذاشته شده در دستگاه سه محوری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزودن درصد بیشتری از نفت خام اثرات منفی بر روی سرعت موج برشی دارد. در همین راستا رجبی و شریفی پور [۱۸] تأثیرات کوتاه مدت و بلندمدت آلودگی نفت خام بر مدول برشی حداکثر ماسه‌ی اوتاوا و فیروزکوه در دامنه‌ی کرنش‌های کوچک را بررسی نمودند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان از شروع آلودگی، مدول برشی ماسه‌های آلوده

خاک تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، راتناویرا و میگودا [۳] دریافتند که مقاومت برشی خاک ریزدانه با افزایش آلودگی کاهش می‌یابد.

نتایج آزمایش‌های خامه چیان و همکاران [۴] حاکی از آن است که در خاک رسی، افزایش درصد آلودگی نفتی باعث کاهش حدود اتربرگ، حداکثر چگالی خشک، درصد بهینه‌ی آب، نفوذپذیری و مقاومت خاک می‌شود. سینگ و همکاران [۵] ضریب فشردگی و ضریب تحکیم خاک آلوده را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درجه‌ی آلودگی ضریب فشردگی افزایش و ضریب تحکیم خاک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، سینگ و همکاران [۶] با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی خاک‌های رسی دریافتند که تحت اثر افزایش آلودگی با روغن موتور حداکثر چگالی خشک خاک کاهش و مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد. دی ماتیو و همکاران [۷] آلودگی نمونه‌های رس کائولینیتی با مخلوط‌های بنزین و اتانول را بررسی نمودند که نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش نسبت تخلخل و ضریب فشردگی بود. نظیر [۸] تأثیر آلودگی روغن موتور بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس پیش تحکیم یافته را بررسی نمود. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مدت زمان آلودگی حدهای روانی و خمیری کاهش و ضریب نفوذپذیری، شاخص فشردگی و شاخص تورم افزایش می‌یابد. کرمانی و عبادی [۹] عنوان نمودند که در یک سن مشخص با افزایش درصد نفت خام، چسبندگی خاک کاهش و از سوی دیگر، زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. همچنین میزان تراکم خاک با افزایش میزان آلودگی هیدروکربنی افزایش می‌یابد.

الیسا [۱۰] نشان داد که خاک رس آلوده به نفت خام منجر به افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک و کاهش نفوذپذیری می‌گردد. همچنین چگالی حجمی خاک رس آلوده به نفت به طور خطی با افزایش زمان جذب افزایش، درحالی که تخلخل آن کاهش می‌یابد. خسروی و همکاران [۱۱] خصوصیات ژئوتکنیکی کائولینیت آلوده به گازوئیل را بررسی نمودند. نتایج این بررسی‌ها افزایش چسبندگی و کاهش زاویه‌ی اصطکاک

مجهز به دستگاه المان خمشی استفاده شد. دستگاه سه محوری می‌تواند فشار همه‌جانبه‌ی قابل کنترل را به صورت دیجیتالی تا ۵۰۰ کیلوپاسکال ایجاد کند. به منظور جلوگیری از القاء الکترومغناطیسی در حین ارسال امواج، از سیستم اتصال گسترده‌ی مجموعه‌ی دستگاه سه محوری و المان خمشی به زمین استفاده گردید. مجموعه‌ی دستگاه المان خمشی مطابق شکل (۱) شامل سلول فشار جهت اعمال فشار همه‌جانبه، تیغه‌های فرستنده و گیرنده‌ی امواج، دستگاه سازنده‌ی توابع مختلف امواج و دستگاه اسیلوسکوپ^۳ جهت نمایش امواج می‌باشد.

۲-۲- معرفی مصالح مورد استفاده

۲-۲-۱- خاک رس

در تحقیق حاضر از خاک رس استفاده شده برای ساخت هسته‌ی رسی سد در ۹۰ کیلومتری کرمانشاه طبق خصوصیات جدول (۱) استفاده شده است. خاک مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های آزمایش از عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر زیر سطح زمین به منظور عدم وجود لایه‌های خاکی آلی که عموماً در لایه‌های سطحی حضور دارند، تهیه شده است.

افزایش می‌یابد. ضمناً میزان افزایش مدول برشی برای ماسه‌های مختلف متفاوت است.

۲- دستگاه مورد استفاده، مصالح و روش‌های انجام آزمایش

۲-۱- دستگاه آزمایش

در دو دهه‌ی اخیر، استفاده از آزمون المان‌های خمشی جهت اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج در خاک‌ها از استقبال خوبی برخوردار شده است. المان‌های خمشی از دو قطعه‌ی پیزوالکتریکی^۲ تشکیل شده که یکی جهت ارسال و دیگری برای دریافت موج می‌باشد. با توجه به خصوصیات پیزوالکتریکی این قطعات توانایی تبدیل ارتعاشات مکانیکی به بارهای الکتریکی و بالعکس را دارند.

در این تحقیق همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد؛ هدف اصلی بررسی آزمایشگاهی اثر میزان آلودگی نفت خام بر مدول برشی حداکثر خاک‌های رسی آلوده به نفت خام تحت فشار همه‌جانبه ۵۰۰-۵۰ کیلوپاسکال با گام‌های ۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. برای این منظور از یک دستگاه سه محوری دیجیتال



شکل (۱): (الف) دستگاه سازنده‌ی موج، (ب) دستگاه سه محوری دیجیتال همراه با سلول سه محوری، (پ) مجموعه‌ی تیغه‌های دستگاه المان خمشی و (ت) دستگاه اسیلوسکوپ.

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

خاک	طبقه بندی خاک	حد خمیری	حد روانی	دامنه خمیری	توده ی ویژه	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت بهینه
رس	رس با خاصیت خمیری پایین	۱۸	۴۴	۲۶	۲/۶۸	۱/۵۳	٪۱۹

$$\omega' = \frac{W_{oil}}{W_{dsoil}} \quad (۳)$$

$$\omega^* = \frac{W_{water} + W_{oil}}{W_{dsoil}} \quad (۴)$$

که در آن ω درصد رطوبت، W_{oil} وزن نفت، W_{dsoil} وزن خاک خشک و W_{water} وزن آب مورد نیاز برای ایجاد تراکم در هر نمونه است. هریک از نمونه های خاک با درصد رطوبت و درصد نفت مشخص ساخته شدند. برای تهیه ی نمونه ی تمیز، از مقدار مشخصی رس با درصد رطوبت بهینه استفاده شد. به منظور رسیدن به مخلوطی همگن، قبل از انجام آزمایش ها تمامی نمونه های آزمایش به مدت یک روز در ظروف پلاستیکی در بسته نگه داشته شدند.

۲-۲-۲- نفت خام

هیدروکربن مورد استفاده در این تحقیق، نفت خام سبک عرضه شده توسط شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب (WOGPC) ایران می باشد. بعضی از خصوصیات نفت خام را می توان در جدول (۲) بر اساس داده های تحلیلی عرضه شده توسط تأمین کننده مشاهده کرد.

جدول (۲): خصوصیات نفت خام استفاده شده.

ویسکوزیته (ρ)	نقطه جوش ($^{\circ}C$)	API	وزم مخصوص ($\frac{ton}{ft^3}$)
۲/۶۱	۴۷-۳۵۰	۴۳	۵۲

۳-۲-۳- روش انجام آزمایش

هدف از این بخش، توصیف روش آزمایشگاهی برای تهیه ی نمونه ی خاک رس تمیز و نمونه های خاک رس آلوده به نفت خام است. در این راستا، خاک تهیه شده از الک شماره ۴۰ عبور داده شد؛ سپس تمام نمونه های خاک رس عبور داده شده از الک شماره ۴۰ ابتدا برای مدت ۲۴ ساعت به منظور حذف رطوبت موجود در رس در اجاق با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. پس از گذشت ۱ روز (۲۴ ساعت)، تمام نمونه های رس خشک شده از اجاق خارج شد تا در شرایط آزمایشگاه سرد شود. پس از آن نمونه های سرد شده با مقادیر برنامه ریزی شده از نفت خام به میزان ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی خاک رس خشک و آب به طور یکنواخت به صورت دستی هم زده شد تا زمانی که مخلوط همگنی به دست آید. مقدار آب مورد نیاز برای ساخت نمونه ها، بر اساس کار تحقیقاتی کرمانی و عبادی [۹] و به کمک معادلات زیر محاسبه می شود:

$$\omega = \omega^* - \omega' \quad (۲)$$

۲-۳-۱- مراحل آماده سازی نمونه در دستگاه المان خمشی

برای آماده سازی نمونه های استوانه ای، پس از جایگذاری سنگ متخلخل بر روی کپ پایینی سلول سه محوری و نصب غشای لاستیکی، قالب آلومینیومی از پیش تهیه شده ویژه ی نمونه گیری مشابه آزمایش تراکم نیز نصب شده و نسبت به ساخت نمونه ها مشابه روش آزمایش تراکم اقدام شد. خاک ویژه ی هر آزمایش در قالب نمونه گیری با قطر ۱۰ سانتی متر و تا ارتفاع ۱۰ سانتی متر، در غشاء لاستیکی و در سه لایه ریخته شد. پس از پر کردن لایه ی اول، سطح لایه توسط یک کوبه متراکم شده تا به دانسیته ی مورد نظر نزدیک شود و این روند برای لایه های باقی مانده نیز تکرار شد. مراحل آماده سازی نمونه های آلوده، به طور کلی شباهت زیادی به نمونه ی تمیز با برخی تفاوت ها در تلاش برای فشرده سازی داشتند. در نمونه سازی های آزمایش المان خمشی برای شکل گیری مناسب مواد ریخته شده در غشاء لاستیکی و رسیدن به نمونه ی استوانه ای با شکل ظاهری مناسب و نگهداری نمونه در جهت عمودی، از پمپ خلأ با

ارسالی تا نقطه‌ی اوج موج دریافتی^۸ تقسیم می‌شود. از آنجاییکه موج برشی تولید شده در دستگاه المان خمشی همواره همراه با امواج فشاری ناشی از تحریک دانه‌های مجاور تیغه‌های المان خمشی می‌باشد. این موضوع تشخیص دقیق زمان رسیدن موج برشی به المان دریافت کننده موج را دچار چالش می‌کند. تأثیر این پدیده در ادبیات مربوط به تحلیل زمان دریافت موج در المان خمشی به عنوان اثر حوزه نزدیک^۹ معروف است [۲۲-۲۳]. برای جلوگیری و یا کاهش اثر پدیده حوزه نزدیک راهکارهایی توسط جویسیچ و همکاران [۲۴] ارائه گردید و این پیشنهادات



شکل (۲): نمونه‌ی رس نگه داشته شده تحت فشار مکشی ۳۰ کیلوپاسکال.

مکش ۳۰ کیلوپاسکال در دیواره‌ی نمونه‌ها استفاده شد. پس از پایان نمونه‌سازی، سلول شیشه‌ای بر روی دستگاه سه محوری جایگذاری و آبدگیری شد. بعد از اعمال فشار اولیه معادل ۳۰ کیلوپاسکال بر نمونه‌ی ساخته شده، مکش اولیه‌ی اعمال شده در مرحله‌ی ساخت نمونه‌ها به تدریج حذف گردید. بعد از راه‌اندازی دستگاه سه محوری، نمونه‌ی خاک تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال با گام‌های ۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفت و سرعت موج برشی در فرکانس ۲۰-۵ کیلوهرتز برای هر گام از فشار همه‌جانبه اندازه‌گیری شد (شکل ۲). در جدول (۳) مشخصات نمونه‌ها، بارگذاری‌ها و تعداد آزمایش‌های انجام شده آورده شده است.

۳- روش‌های مختلف تخمین زمان سفر موج

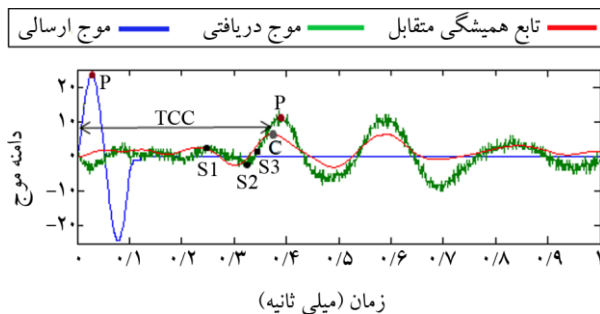
سرعت موج بر اساس نسبت طول مسیر حرکت موج به زمان سفر محاسبه می‌شود [۱۹-۲۰]. طول سفر موج در المان خمشی را برابر فاصله‌ی نوک تیغه‌ی فرستنده‌ی موج تا نوک تیغه‌ی گیرنده‌ی موج در نظر می‌گیرند [۲۱].

در تحقیقات انجام شده چندین روش برای محاسبه‌ی زمان سفر موج برشی از جمله روش‌های محاسبه‌ی سفر موج در حوزه‌ی زمان^۴، روش‌های ریاضی^۵ و روش محاسبه‌ی زمان سفر موج در حوزه‌ی فرکانس^۶ پیشنهاد شده است. روش‌های زمانی بر اساس شرایط استفاده‌ی کاربر به دو روش فاصله‌ی زمانی شروع موج ارسالی تا شروع موج دریافتی^۷ و فاصله‌ی زمانی نقطه‌ی اوج موج

جدول (۳): مشخصات نمونه‌ها و بارگذاری‌های انجام شده.

نام نمونه	مقدار آب (درصد)	مقدار نفت (درصد)	دانشیه‌ی نمونه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	فشار همه‌جانبه (کیلوپاسکال)	فرکانس (کیلوهرتز)
نمونه تمیز	۱۹	۰	۱/۵۳۰	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با دو درصد آلودگی	۱۷	۲	۱/۵۲۸	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با چهار درصد آلودگی	۱۵	۴	۱/۵۲۷	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با شش درصد آلودگی	۱۳	۶	۱/۵۲۵	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با هشت درصد آلودگی	۱۱	۸	۱/۵۲۳	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با ده درصد آلودگی	۹	۱۰	۱/۵۲۱	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵
نمونه با دوازده درصد آلودگی	۷	۱۲	۱/۵۱۷	۵۰-۵۰۰	۲۰، ۱۶، ۱۲، ۱۰، ۸، ۵

نظر گرفته شده است. به عبارت دقیق تر تمامی نقاط مذکور می توانند یک مبنا برای محاسبه ی زمان سفر موج باشند؛ بنابراین، در ادامه باید بهترین و دقیق ترین زمان سفر موج برشی را از میان این نقاط استخراج نمود.



شکل (۳): امواج ارسالی، دریافتی و تابع همبستگی متقابل برای نمونه با ۶ درصد آلودگی، تحت فشار همه جانبه ی ۵۰ کیلو پاسکال و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز.

در این تحقیق مبنای محاسبه ی زمان سفر موج برشی، فرکانس های ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز بوده است. بر اساس روش هایی که در بالا عنوان شد، مقادیر سرعت موج برشی برای نمونه های تمیز و آلوده به نفت خام تحت فشار همه جانبه ی ۳۰۰ کیلو پاسکال در شکل (۴) آورده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل (۴) برای محاسبه ی دقیق سرعت موج برشی و مقایسه ی روش های محاسبه ی زمان سفر موج موارد زیر پیشنهاد می گردد:

۱. از شکل ها استنباط می شود که مقادیر سرعت موج برشی محاسبه شده با استفاده از روش های ذکر شده از جمله $TSS1$ ، $TSS2$ ، $TSS3$ ، TPP و TCC به فرکانس بستگی دارد؛ به طوری که با افزایش فرکانس تحریک سرعت برآورد شده افزایش می یابد.
۲. همان طور که از شکل ها مشخص است؛ سرعت موج برشی نسبت به افزایش درصد آلودگی حساس بوده به طوری که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج برشی بسته به مقدار افزایش درصد آلودگی نفت خام تغییر می کند، به عبارتی این میزان تغییرات برای درصدهای مختلف آلودگی نفت خام، متفاوت است.

توسط برینولی و همکاران [۲۳] و لو پرستی و همکاران [۲۵] تایید گردیده است. در این راهکار پیشنهادی، نسبت طول سفر موج به طول موج ($R_d = L/\lambda$) می بایست محدود گردد. برای مقادیر ($R_d \geq 4$)، تأثیرات پدیده حوزه نزدیک به شدت کاهش می یابد. با این حال، سانچز-سالینرو [۲۶] برای کنترل اثر حوزه نزدیک مقدار ($R_d \geq 2$) را پیشنهاد داده اند. بعلاوه، لئونگ و همکاران [۲۷] برای کاهش اثرات حوزه نزدیک، مقدار R_d بیشتر از ۳/۳۳ را پیشنهاد دادند. در مجموع، تجربه نشان داده است که نسبت R_d ممکن است به خواص مصالح وابسته باشد و همین موضوع اثرات حوزه نزدیک را در مطالعات مختلف دچار پیچیدگی می کند. بهر حال، در این تحقیق پس از سعی و خطاهای فراوان، از نسبت ($R_d \geq 4$)، استفاده شده است. با توجه به بروز خطاهای ناشی از پدیده ی حوزه ی نزدیک در برآورد زمان سفر موج، یک روش ریاضی جایگزین، به نام تابع همبستگی متقابل^{۱۰} نیز پیشنهاد شده است. این روش اولین بار توسط ویجیانی و اتکینسون [۲۰] در سال ۱۹۹۵ به منظور تحلیل نتایج آزمایش های المان خمشی پیشنهاد شد. بر اساس مطالعات تجربی انجام شده توسط ویجیانی و اتکینسون [۲۰] و تأیید آن توسط محققین دیگر، بیشترین مقدار تابع همبستگی متقابل بین امواج ارسالی و دریافتی را بعنوان لحظه دریافت موج برشی توسط المان دریافت کننده موج، معرفی کردند [۲۴، ۲۸-۳۵].

شکل (۳) موج برشی ارسالی با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز، سیگنال های دریافتی و همچنین منحنی تابع همبستگی متقابل را برای نمونه با ۶ درصد آلودگی، تحت فشار همه جانبه ی ۵۰ کیلو پاسکال نشان می دهد. برای تعیین زمان سفر موج برشی نقاط خاصی روی سیگنال های فرستاده شده و دریافتی قرار گرفته است. از جمله نقاط S و P بر روی موج تولید شده و نقاط $S1$ ، $S2$ ، $S3$ و P روی موج دریافتی مشخص شده اند. بر این اساس علامت های $TSS1$ ، $TSS2$ و $TSS3$ جهت زمان شروع تا شروع موج، TPP برای حالت حداکثر موج ارسالی تا حداکثر موج دریافتی و نقطه ی C برای تابع همبستگی متقابل و علامت TCC برای زمان سفر معادل حالت حداکثر تابع همبستگی متقابل در

شروع تا شروع با تمرکز روی نقاط S1، S2 و S3 در تمامی نمونه‌ها مقادیر غیر قابل پذیرشی نسبت به بقیه روش‌های تعیین زمان سفر موج ارائه می‌دهد؛ زیرا که زمان دقیق رسیدن موج برشی به علت حضور امواج فشاری در روش شروع تا شروع قابل تشخیص نیست؛ بنابراین TSS1، TSS2 و TSS3 نمی‌توانند گویای زمان صحیح موج برشی باشند.

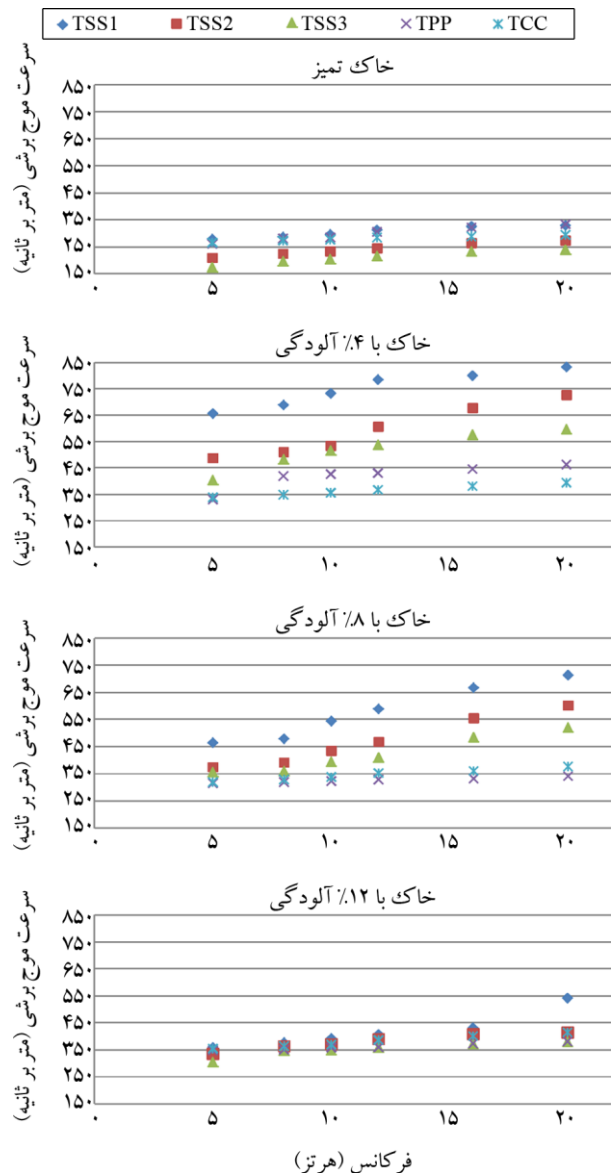
۵. به نظر می‌رسد مقادیر سرعت موج برشی محاسبه شده بر اساس روش‌های TCC و TPP نسبت به سایر روش‌ها قابلیت پذیرش بیشتری دارد.

مقایسه نتایج تحقیق حاضر که در خاک‌های رسی آلوده به نفت خام انجام شده است، با نتایج تحقیق شریفی و همکاران [۳۵] با وجود آنکه در خاک‌های دانه‌ای انجام شده است، حاکی از آن است که نتایج تحقیق حاضر با برخی از یافته‌های این محققین مطابقت دارد.

۴- تحلیل و بررسی نتایج آزمایش

همانطور که گفته شد آزمایش المان خمشی در فرکانس‌های ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز تحت فشارهای همه‌جانبه از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. سرعت موج برشی در نمونه‌های رس تمیز و آلوده به نفت خام در آزمایش المان خمشی با استفاده از روش تابع همبستگی متقابل محاسبه شده و سپس از رابطه‌ی $G_{max} = \rho V_s^2$ مدول برشی حداکثر تعیین شد.

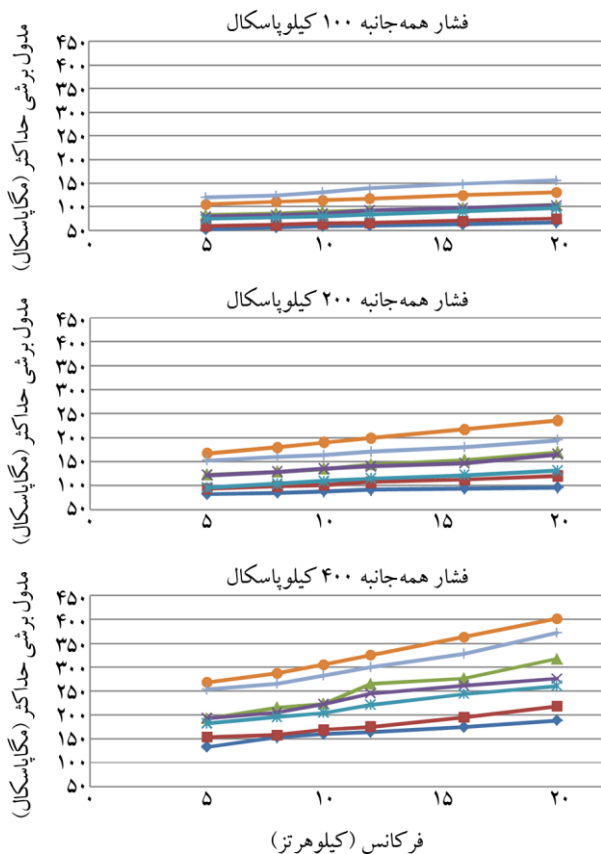
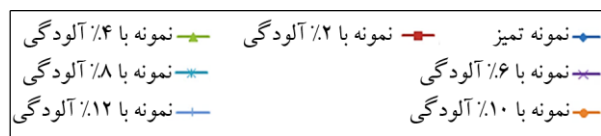
تغییرات سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر با فرکانس‌های ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز برای نمونه‌های تمیز و آلوده به نفت خام در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در هر سطح از فشار همه‌جانبه، افزایش فرکانس تحریک باعث افزایش سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی حداکثر در تمامی نمونه‌ها شده است که این نشان‌دهنده‌ی وابستگی سرعت موج برشی به فرکانس تحریک می‌باشد. با این وجود تغییرات آلودگی تأثیرات متفاوتی با افزایش فرکانس تحریک بر سرعت موج برشی داشته است که ناشی از لغزنده بودن



شکل (۴): مقادیر سرعت موج برشی برآورد شده در فرکانس‌های مختلف برای نمونه‌های تمیز و آلوده به نفت خام تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ کیلوپاسکال.

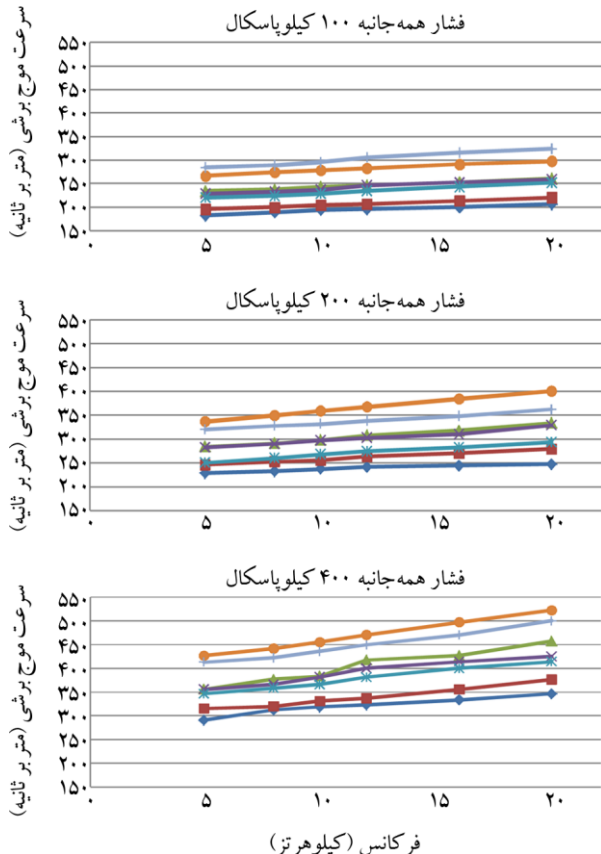
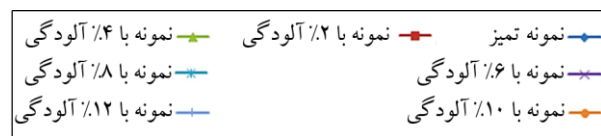
۳. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است؛ سرعت موج برشی نسبت به افزایش درصد آلودگی حساس بوده به‌طوری‌که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج برشی بسته به مقدار افزایش درصد آلودگی نفت خام تغییر می‌کند، به عبارتی این میزان تغییرات برای درصد‌های مختلف آلودگی نفت خام، متفاوت است.

۴. به علت احتمال وجود اثرات حوزوی نزدیک که نتیجه‌ی انتشار امواج فشاری داخل نمونه است، سرعت موج برشی در روش



شکل (۶): تغییرات مدول برشی حداکثر با فرکانس های ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز برای نمونه های تمیز و آلوده به نفت خام در فشارهای همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال.

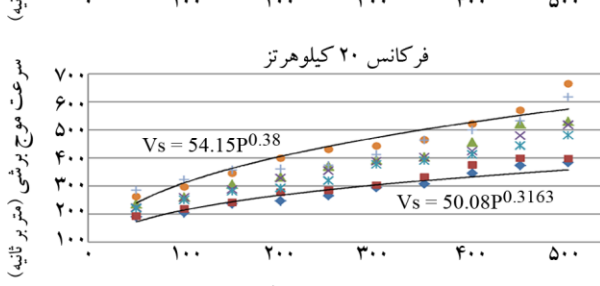
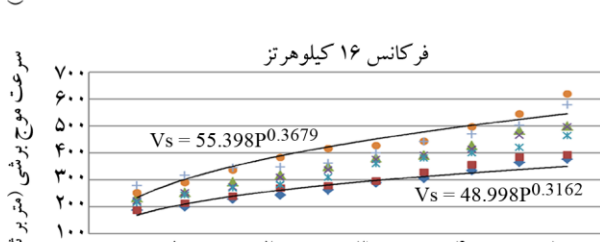
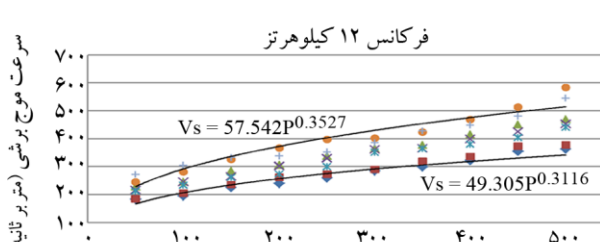
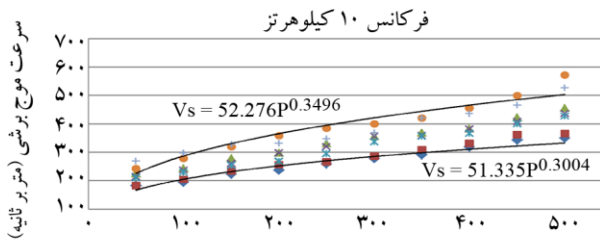
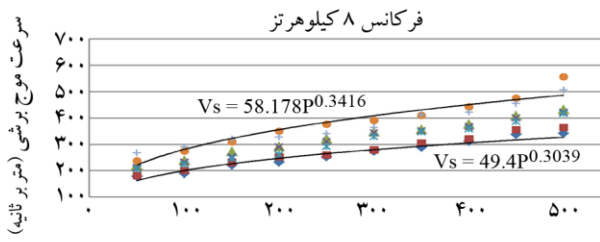
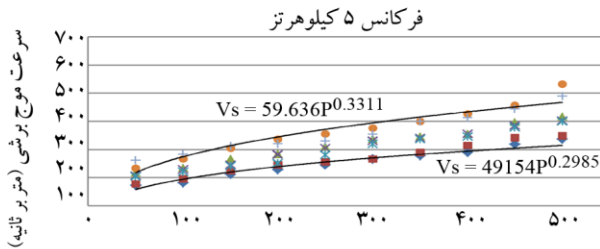
با افزایش فشار همه جانبه افزایش می یابد. همچنین تغییرات سرعت موج برشی در فشارهای همه جانبه مختلف در نمونه های مورد مطالعه از رابطه وابستگی سرعت موج برشی به فشار همه جانبه $V_s = A(P)^n$ تبعیت می کند که در آن ضرایب A و n متغیر هستند. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود ضریب A برای نمونه ی تمیز و نمونه با ۴ درصد آلودگی به ترتیب ۵۱/۳۳۵ و ۶۱/۶۵ و ضریب n به ترتیب ۰/۳۰۰۴ و ۰/۳۰۸۴ است. همچنین در شکل (۸) داریم که ضریب A برای نمونه ی تمیز و نمونه با ۴ درصد آلودگی به ترتیب ۴۹/۳۰۵ و ۵۷/۵۳ و ضریب n به ترتیب ۰/۳۱۱۶ و ۰/۳۲۷۵ است. تغییر ضرایب A و n نشان می دهد که تغییرات فرکانس تحریک می تواند عامل آن باشد.



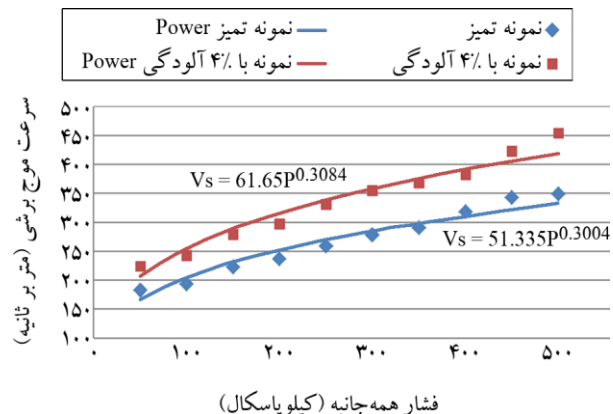
شکل (۵): تغییرات سرعت موج برشی با فرکانس های ۵ تا ۲۰ کیلوهرتز برای نمونه های تمیز و آلوده به نفت خام در فشارهای همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال.

و ترکیب متفاوت محیط مورد مطالعه می باشد. همچنین نمونه ی تمیز دارای کمترین مقادیر سرعت موج برشی در تمامی فرکانس های تحریک و فشارهای همه جانبه می باشد که این بدین معنا است که سرعت موج برشی بسته به مقدار افزایش درصد نفت خام با افزایش فرکانس تحریک تغییر می کند، به طوری که این میزان تغییرات برای فشارهای همه جانبه مختلف، متفاوت است. تغییرات سرعت موج برشی محاسبه شده به روش تابع همبستگی متقابل برای فشارهای همه جانبه از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه ی تمیز و نمونه با ۴ درصد آلودگی در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز در شکل (۷) و در فرکانس ۱۲ کیلوهرتز در شکل (۸) ارائه گردیده است. سرعت موج برشی محاسبه شده

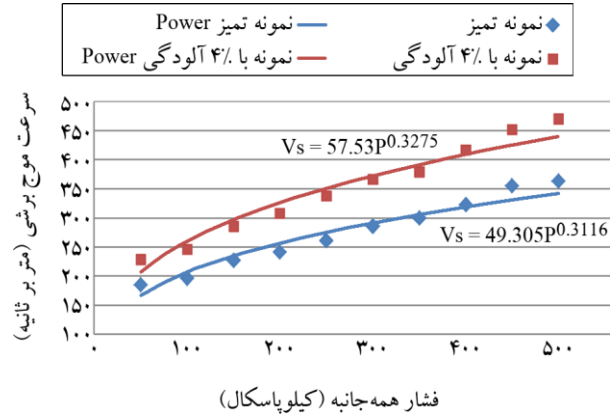
◆ نمونه تمیز
 ■ نمونه با ۲٪ آلودگی
 ▲ نمونه با ۴٪ آلودگی
 ✕ نمونه با ۶٪ آلودگی
 ✖ نمونه با ۸٪ آلودگی
 + نمونه با ۱۰٪ آلودگی
 ● نمونه با ۱۰٪ آلودگی



شکل (۹): تغییرات سرعت موج برشی با فشارهای همه‌جانبه‌ی ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های تمیز و آلوده به نفت خام در فرکانس‌های ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ کیلوهرتز.



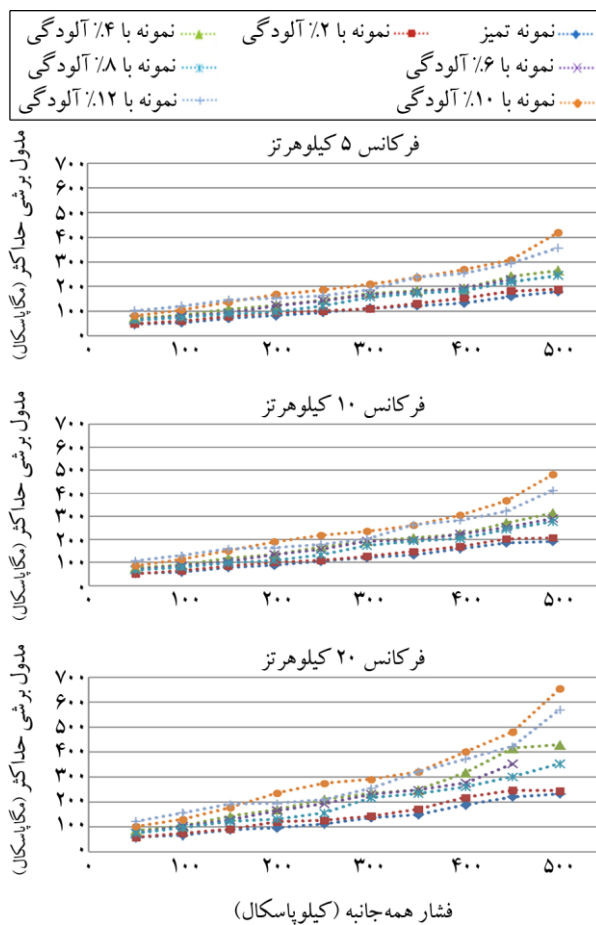
شکل (۷): تغییرات سرعت موج برشی با فشارهای همه‌جانبه مختلف برای نمونه‌های تمیز و آلوده به چهار درصد نفت خام در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز.



شکل (۸): تغییرات سرعت موج برشی با فشارهای همه‌جانبه مختلف برای نمونه‌های تمیز و آلوده به چهار درصد نفت خام در فرکانس ۱۲ کیلوهرتز.

تغییرات سرعت موج برشی برای تمامی گروه‌های مورد مطالعه در فرکانس‌های مختلف در شکل (۹) ارائه گردیده است. همانطور که از شکل‌ها استنباط می‌شود، رابطه‌ی وابستگی سرعت موج برشی به فشار همه‌جانبه در تمامی نمونه‌ها در فرکانس‌های ارائه شده از رابطه‌ی $V_s = A(P)^n$ تبعیت می‌کند؛ همچنین در شکل (۹) مشاهده می‌شود که ضریب A بین $۴۸/۹۹۸$ و $۵۹/۶۳۶$ و ضریب n بین $۰/۳$ و $۰/۳۸$ متغیر است که تغییر این ضرایب به دلیل تغییرات فرکانس تحریک می‌باشد. علاوه بر این، افزایش فشار همه‌جانبه در همه نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف نفت خام باعث افزایش سرعت موج برشی شده است که علت آن بیشتر شدن نقاط تماسی و اصطکاک میان دانه‌های خاک به دلیل خاصیت

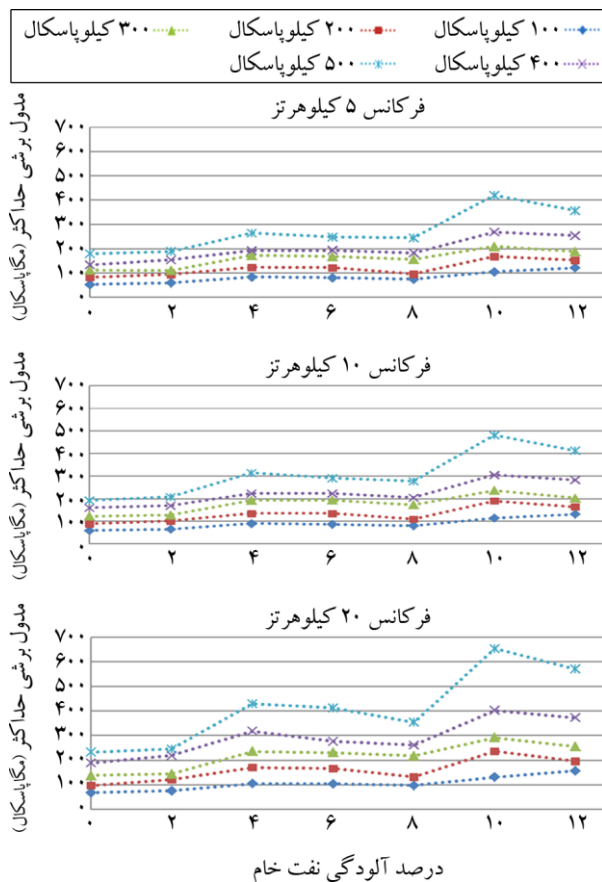
۱۰ درصد آلودگی می باشد. لازم به ذکر است که رفتار نمونه های آلوده به مواد نفتی تا ۱۰ درصد آلودگی مشابه رفتار تراکمی خاک در شاخه ی خشک آزمایش تراکم می باشد که افزایش آلودگی نفتی، سبب افزایش خاصیت روان کاری و لغزنده تر شدن سطوح دانه های خاک و در نتیجه ایجاد قفل و بست های بیشتر و تراکم بهتر نمونه های خاک رس می گردد. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۹)، با افزایش آلودگی با مقادیر بیشتر از ۱۰ درصد، به عنوان مثال در ۱۲ درصد آلودگی، سرعت موج برشی در کلیه ی حالات بارگذاری کاهش می یابد. دلیل بروز این پدیده هم مشابه رفتار خاک در حال تراکم و در شاخه ی تر منحنی تراکم می باشد. به بیان دیگر، افزودن آلودگی بیشتر از ۱۰ درصد مانع قفل و بست بهینه بین دانه ها خواهد شد.



شکل (۱۰): تغییرات مدول برشی حداکثر با فشارهای همه جانبه ی ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه های تمیز و آلوده به نفت خام در فرکانس های ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوهرتز.

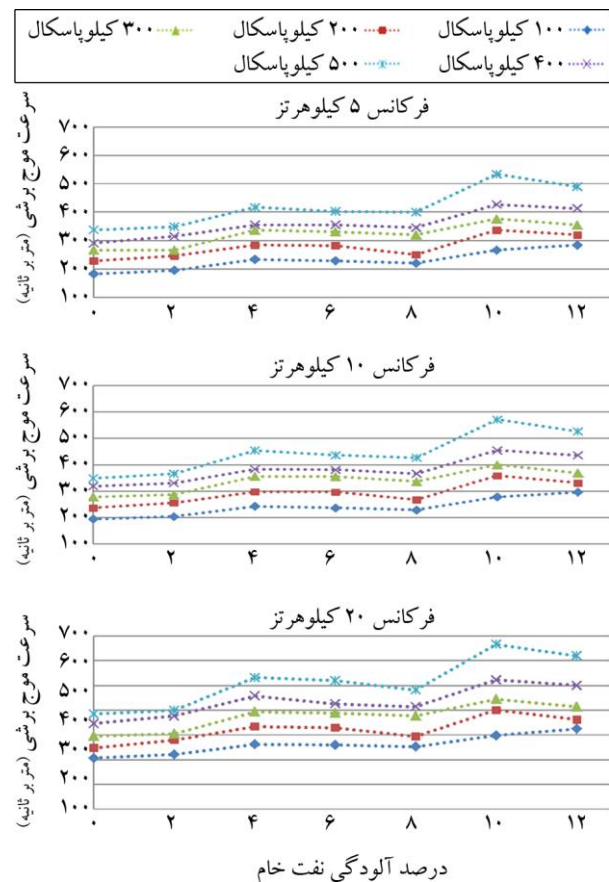
روان کاری نفت خام با افزایش فشار همه جانبه می باشد. همچنین نمونه ی تمیز نسبت به سایر نمونه ها با درصد های مختلف آلودگی دارای کمترین نقاط تماسی در اثر افزایش فشار همه جانبه و در نتیجه کمترین مقدار سرعت موج برشی در تمامی فرکانس های مورد مطالعه می باشد. اما تغییرات آلودگی تأثیرات متفاوتی با افزایش فشار همه جانبه بر سرعت موج برشی داشته است؛ به طوری که تغییرات سرعت موج برشی در نمونه ی تمیز و در فشار ۵۰ کیلو پاسکال کم بوده اما با افزایش فشار همه جانبه به ۵۰۰ کیلو پاسکال و در نمونه ی با ۱۰ درصد آلودگی به طور محسوسی افزایش می یابد.

در شکل (۱۰)، تأثیرات فشار همه جانبه بر مدول برشی حداکثر خاک رس آلوده به نفت خام و خاک تمیز در فرکانس های متفاوت و تحت فشارهای همه جانبه ی ۵۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال آورده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده می توان نتیجه گرفت که افزایش فشار همه جانبه به طور قابل توجهی باعث افزایش مدول برشی حداکثر در همه ی نمونه های آلوده به نفت خام و تمیز می شود. همچنین واضح است که افزودن آلودگی هیدروکربن می تواند مدول برشی حداکثر رس را به طور قابل توجهی تغییر دهد؛ که نشان دهنده ی وابستگی شدید درجه ی تغییرات ناشی از هیدروکربن به مقدار فشار همه جانبه است؛ به طوری که در فشار بالاتر مدول برشی حداکثر بیشتر بود. علاوه بر این، نمونه ی تمیز نسبت به سایر نمونه ها با درصد های مختلف آلودگی دارای کمترین نقاط تماسی در اثر افزایش فشار همه جانبه و در نتیجه کمترین مقدار مدول برشی حداکثر در تمامی فرکانس های مورد مطالعه می باشد؛ زیرا که افزایش آلودگی نفتی، باعث افزایش خاصیت روان کاری و لغزنده تر شدن سطوح دانه های خاک و در نتیجه ایجاد قفل و بست های بیشتر و تراکم بهتر نمونه های خاک رس با افزایش فشار همه جانبه می شود. بنابراین با افزایش فشار همه جانبه در همه ی نمونه ها شاهد افزایش مدول برشی حداکثر هستیم که کمترین مقدار آن در فشار ۵۰ کیلو پاسکال و در نمونه ی تمیز و بیشترین آن در فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال و برای نمونه ی با



شکل (۱۲): تغییرات مدول برشی حداکثر با درصد‌های مختلف آلودگی برای فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال در فرکانس‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوهرتز.

همچنین در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که روند نتایج مدول برشی حداکثر مشابه روند نتایج سرعت موج برشی در فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف است و افزایش درصد آلودگی به خاک نتایج متفاوتی در مدول برشی حداکثر نشان می‌دهد؛ به این صورت که مدول برشی حداکثر با افزایش درصد آلودگی تا ۴ درصد روند صعودی، از ۴ درصد تا ۸ درصد روند نزولی دارد و با رسیدن میزان آلودگی به ۱۰ درصد افزایش قابل توجهی می‌یابد و با افزایش آلودگی به ۱۲ درصد مجدداً کاهش یافت. این تغییرات در همه فرکانس‌های مورد مطالعه مشاهده شد. به عبارتی دیگر، افزودن ۱۰ درصد وزنی از نفت خام در نمونه‌های رس بالاترین مدول برشی حداکثر را در میان تمام نمونه‌ها نشان داد و علاوه بر این، در هر سطح از فشار همه‌جانبه مدول برشی حداکثر رس تمیز کمتر از سایر نمونه‌های آلوده بود.



شکل (۱۱): تغییرات سرعت موج برشی با درصد‌های مختلف آلودگی برای فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال در فرکانس‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوهرتز.

در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب تأثیرات درصد‌های مختلف آلودگی نفت خام بر روی تغییرات سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر خاک رس در فرکانس‌های متفاوت و تحت فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال آورده شده است. همانطور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود؛ در تمام فرکانس‌های مورد مطالعه روند تغییرات سرعت موج برشی در فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف مشابه است؛ به طوری که افزایش درصد آلودگی به خاک نتایج متفاوتی در سرعت موج برشی نشان می‌دهد؛ به این صورت که با افزایش درصد آلودگی تا ۴ درصد سرعت موج برشی روند صعودی، از ۴ درصد تا ۸ درصد سرعت موج برشی روند نزولی دارد و با رسیدن میزان آلودگی به ۱۰ درصد سرعت موج برشی افزایش قابل توجهی می‌یابد و با افزایش آلودگی به ۱۲ درصد سرعت موج برشی کاهش یافت.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی اثرات آلودگی نفت خام بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر خاک رس با استفاده از سیستم المان خمشی است. در این راستا، تمام نمونه‌های رس تمیز و آلوده‌ی مورد آزمایش، دارای رطوبت حداکثر کمتر از رطوبت بهینه بودند از نفت خام به عنوان آلوده کننده هیدروکربنی به میزان ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی خاک رس خشک برای تهیه‌ی نمونه‌های آلوده در نظر گرفته شد. هر آزمون در چند فرکانس تحریک (۵-۲۰ کیلوهرتز) و تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال با گام‌های ۵۰ کیلوپاسکال انجام شد. به طور خلاصه، نتیجه‌گیری اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

۱. روش شروع تا شروع برای محاسبه‌ی زمان سفر موج در تمامی نمونه‌ها، نمی‌تواند گویای صحیح زمان سفر موج باشد. با توجه به نتایج، روش همبستگی متقابل و روش قله به قله می‌تواند نتایج معقول تری از سرعت موج برشی ارائه دهد.
۲. مقادیر سرعت موج برشی محاسبه شده با استفاده از بعضی از روش‌های تخمین زمان سفر موج برشی، وابسته به فرکانس است. به طوری که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت برآورد شده افزایش می‌یابد.
۳. زمان سفر موج برشی در المان خمشی نسبت به فرکانس تحریک حساس بود، به طوری که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج برشی بسته به مقدار افزایش درصد آلودگی نفت خام تغییر می‌کند، به عبارتی این میزان تغییرات برای درصدهای مختلف آلودگی نفت خام، متفاوت است.
۴. مقادیر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر به دست آمده بسیار حساس به آلودگی نفت خام و فشار همه‌جانبه است.
۵. سرعت موج برشی محاسبه شده با افزایش فشار همه‌جانبه افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات سرعت موج برشی محاسبه شده در فشارهای همه‌جانبه از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال در تمام نمونه‌های مورد مطالعه از رابطه‌ی وابستگی سرعت موج برشی به فشار همه‌جانبه $V_s = A(P)^n$ تبعیت می‌کند.

۶. تحت تمامی فشارهای همه‌جانبه و فرکانس‌های تحریک، افزودن مقدار نفت خام به میزان ۱۰ درصد وزنی تغییرات مهمی در مقدار مدول برشی حداکثر در اثر تأثیرات هیدروکربن بر رفتار ذرات رس ایجاد می‌شود. درجه‌ی تغییرات ناشی از هیدروکربن به شدت وابسته به مقدار فشار همه‌جانبه است به طوری که در فشار بالاتر مدول برشی حداکثر بیشتر است.

۷. افزودن ۱۰ درصد وزنی از نفت خام در نمونه‌های رس بالاترین سرعت موج برشی و در نتیجه بالاترین مدول برشی حداکثر را در میان تمام نمونه‌ها نشان داد و علاوه بر این، در هر سطح از فشار همه‌جانبه، مدول برشی حداکثر رس تمیز کمتر از سایر نمونه‌های آلوده بود.

۸. نتایج تحقیق حاضر با برخی از یافته‌های رجبی و شریفی پور [۱۸-۲۰] مطابقت داشته به طوری که افزایش سطح فشار همه‌جانبه موجب افزایش سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر در نمونه‌های آلوده به نفت خام و نمونه‌ی تمیز به علت بیشتر شدن نقاط تماسی و اصطکاک میان دانه‌های خاک می‌شود.

برای محاسبه‌ی نتایج دقیق‌تر و روند کلی پژوهش، در آینده می‌توان تأثیرات آلودگی نفت خام و سایر آلودگی‌ها را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، با استفاده از دستگاه ستون تشدید^{۱۱} و سانتریفیوژ^{۱۲} نیز بررسی کرد.

مراجع

1. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New York.
2. Meegoda, N.J. and Ratnaweera, P. (1994) Compressibility of contaminated fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, **17**, 101-112.
3. Ratnaweera, P. and Meegoda, N.J. (2006) Shear Strength and Stress-Strain behavior of Contaminated Soils. *Geotechnical Testing Journal*, **29**(2), 1-8.
4. Khamechian, M., Charkhabi, A.H., and Tajik, M.

15. Safehian, H., Rajabi, A.M., and Ghasemzadeh, H. (2017) Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Eng. Geol.*, **241**, 55-63.
16. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2017) An Experimental Characterization of Shear Wave Velocity (V_s) in Clean and Hydrocarbon-Contaminated Sand. *Geotech. Geol. Eng.*, **35**, 2727-2745.
17. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2017) Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooch sand. *Eur. J. Environ. Civil Eng.*, **8189**, 1-17.
18. Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2018) Influence of weathering process on small-strain shear modulus (G_{max}) of hydrocarbon-contaminated sand. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **107**, 129-140.
19. Dyvik, R. and Madhus, C. (1985) Lab Measurements of G_{max} Using Bender Elements. In: *Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions*, ASCE, 186-196.
20. Viggiani, G. and Atkinson, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, **45**(1), 145-154.
21. Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., and Shibuya, S. (2009) Interpretation of international parallel test on the measurement of G_{max} using bender elements. *Soils and Foundations*, **49**(4), 631-650.
22. Arroyo, M., Muir Wood, D., Greening, P.D., Medina, L., and Rio, J. (2006) Effects of sample size on bender-based axial G_0 measurements. *Géotechnique*, **56**(1), 39-52.
23. Brignoli, E.G., Gotti, M., and Stokoe, K.H. (1996) Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, **19**(4), 384-397.
24. Jovičić, V., Coop, M., and Simić, M. (1996) Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests. *Géotechnique*, **46**(2), 357-362.
25. Lo Presti, D., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A., and Pedroni, S. (1998) Shear modulus and damping of soils. *Géotechnique*, **47**, 603-617.
- (2007) Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, **89**(3-4), 220-229.
5. Singh, S.K., Srivastava, R.K., and John, S. (2008) Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil Sediment Contam Int. J.*, **17**, 290-300.
6. Singh, S.K., Srivastara, R.K., and Siby, J. (2009) Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**, 1077-1083.
7. Di Matteo, L., Bigotti, F., and Ricco, R. (2011) Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Eng.*, **137**, 846-849.
8. Nazir, A.K. (2011) Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Engineering Journal*, **50**, 331-335.
9. Kermani, M. and Ebadi, T. (2012) The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination*, **21**, 655-671.
10. Elisha, A.T. (2012) Effect of crude oil contamination on the geotechnical properties of soft clay soils of niger delta region of Nigeria. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17**, 1929-1938.
11. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R., and Yazdani, H. (2013) Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, **166**, 11-16.
12. Akinwumi, I.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), 816-824.
13. Estabragh, A.R., Beytollahpour, I., Moradi, M., and Javadi, A.A. (2015) Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, **20**, 503-519.
14. Trzciński, J., Williams, D.J., and Zbik, M.S. (2015) Can hydrocarbon contamination influence clay soil grain size composition? *Appl. Clay Sci.*, **109-110**, 49-54.

واژه‌نامه

Bender Element	۱- المان خمشی
Piezoelectric	۲- پیزوالکتریک
Oscilloscope	۳- اسیلوسکوپ
Temporal Methods	۴- روش‌های زمانی
Mathematical Methods	۵- روش‌های ریاضی
Frequency Methods	۶- روش‌های فرکانسی
Start-to-Start	۷- فاصله‌ی زمانی شروع موج ارسالی تا شروع موج دریافتی
Peak-to-Peak	۸- فاصله‌ی زمانی نقطه‌ی اوج موج ارسالی تا نقطه‌ی اوج موج دریافتی
Near-Field Effect	۹- پدیده‌ی حوزه‌ی نزدیک
Cross-Correlation	۱۰- تابع همبستگی متقابل
Column Resonant	۱۱- ستون تشدید
Centrifuge	۱۲- سانتریفیوژ

26. Sanchez-Saliner, I. (1987) Analytical Investigation of Seismic Methods Used for Engineering Applications. University of Texas at Austin.
27. Leong, E.C., Cahyadi, J., and Rahardjo, H. (2009) Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**(7), 792-812.
28. Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005) Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(9), 1063-1070.
29. Mancuso, C., Simonelli, A., and Vinale, F. (1989) Numerical analysis of in situ S-wave measurements. *Proc., 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 277-280.
30. Kumar, J. and Madhusudhan, B. (2010) A note on the measurement of travel times using bender and extender elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(7), 630-634.
31. Murillo, C., Sharifipour, M., Caicedo, B., Thorel, L., and Dano, C. (2011) Elastic parameters of intermediate soils based on bender-extender elements pulse tests. *Soils and Foundations*, **51**(4), 637-649.
32. Arulnathan, R., Boulanger, R., and Riemer, M. (1998) Analysis of bender element tests. *Geotech Test J.*, **21**, 120-131.
33. Leong, E.C., Cahyadi, J., and Rahardjo, H. (2009) Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**(7), 792-812.
34. Kawaguchi, T., Mitachi, T., and Shibuya, S. (2001) Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, Balkema Publishers, Istanbul.
35. Sharifi, A., Sharifipour, M., and Rizvandi, A. (2020) Laboratory investigation into the effect of particle sizes on shear wave parameters using bender elements test results. *Geotechnical Testing Journal*, **43**(5), 1216-1232.

Characterizing the Shear Modulus Variations of Crude Oil-Contaminated Clay on Small-Strain Range

Sheyda Karimi¹ and Mohammad Sharifipour^{2*}

1. M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran,
*Corresponding Author, email: sharifipour@razi.ac.ir

The environment is constantly exposed to various pollutants. Petroleum products may contaminate soils located next to industrial areas and other facilities. Oil pollution is one of the pollutions that can cause irreparable damage to the environment. Every day, a large amount of petroleum products enters the environment in various ways. Oil pollution affects the mechanical, chemical and dynamic properties of the soil. Changing the geotechnical properties of the soil is an important issue for structures adjacent to or on oil contaminated soil that can cause collapsing or variation in soil resistance. Since the behavior of many structures and foundations during dynamic loads is in the range of small strains, investigating and evaluating the velocity of waves in the soil skeleton can provide researchers and engineers with useful and significant information about the small-strain behavior of the soil. The importance and value of oil industry structures in Iran, as one of the active countries among oil exporting countries and as a country with a high level of seismicity, has made the research a vital way to improve the design level and accuracy of the behavior of structures exposed to pollution. Despite the wide range of oil industry structures in Iran and the other countries, there is limited literatures on oil-contaminated soil behaviors. Heretofore, the effects of diverse kinds of hydrocarbon contaminants on majority of geotechnical properties of clay soils such as grain size, hydraulic conductivity, plasticity, compressibility, internal friction, cohesion, and shear strength have been investigated. However, there has not been a concentrated research study examining shear wave velocity of hydrocarbon-contaminated clay soils as an important geotechnical property of soil due to the fact that, in small/very small strain levels, the maximum shear modulus of soils can be determined using shear wave velocity. This study aimed to measure the shear wave velocity and consequently, identify the shear modulus of clay soils in oil-contaminated condition with different percentages of contamination, and to compare them with non-oil-contaminated clay soils on small-strain range, using a Bender Element system. In order to prepare comparable clean and contaminated samples (containing 2, 4, 6, 8, 10 and 12 weight percent (wt%) of crude oil, respectively), it was performed similar to the density test method. In this regard, all the clean and contaminated clay samples were tested with a minimum moisture content equal to the optimal moisture content. Bender element tests were conducted on the identically prepared clean and contaminated clay samples at various amounts of frequency (5–20 kHz) and under various confining pressure (50–500 kPa) to find the best method for accurately determining shear wave travel time in the Bender Elements tests. Thereafter, Bender Elements placed in triaxial cell in Razi university laboratory. Bender Elements test conducted to examine shear wave velocity in the clean and contaminated specimens. As a contribution to the literature and potential engineering application, the experimental test results indicated that whilst adding 10wt% of crude oil in clay samples with an increase in the confining pressure, it correspondingly increase the shear wave velocity and consequently increase the shear modulus among of all samples. In addition, at each level of confining pressure, the shear modulus of clean clay was lower than the other contaminated samples. Moreover, under all confining pressures and excitation frequencies, the addition of 10wt% of crude oil caused significant changes in the maximum shear modulus, which was due to the effects of hydrocarbons on the behavior of clay particles. The degree of change due to hydrocarbons is highly dependent on the amount of confining pressure, so that the more the confining pressure is increased; the shear waves velocity an then the shear modulus is increased.

Keywords: Crude Oil, Contaminated Clay, Shear Wave Velocity, Shear Modulus, Bender Elements Test.