

بررسی تجربی اثر آلاینده‌های نفتی در سختی خاک‌های ماسه‌یی (مطالعه‌ی موردی: ماسه‌ی انزلی)

ایمان طالبزاده (کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

علیرضا حاجیانی بوشهریان* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایوان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۵۴-۴۷)

حضور مواد نفتی در توده‌ی خاک ایجاد تغییر در ارتباط بین ذرات خاک و زیرسازه‌های موجود، باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، ظرفیت باربری و کرنش‌های حجمی خاک در مقایسه با خاک غیرآلوده می‌شود. تغییرات مذکور، اغلب در جهت عدم اطمینان است و امکان دارد منجر به ناپایداری و تغییرشکل بیش از اندازه‌ی سازه‌ی مستقر شوند. در پژوهش حاضر، با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه در حالت کوچک‌مقیاس، تأثیر انتشار مواد نفتی در زمین‌های ماسه‌یی ساحل بندر انزلی در ۳ شرایط تراکمی مختلف در مدول عکس‌العمل بسترپی‌های سطحی مستقر بر آن‌ها ارزیابی شده است. تأثیر آلودگی با استفاده از ۳ آلاینده‌ی نفتی و در ۳ درصد مختلف اختلاط آزمایش شده است. نتایج مدل‌سازی فیزیکی به‌صورت روابط تجربی ارائه شده نشان می‌دهد که آلودگی ناشی از انتشار مواد نفتی، تأثیر قابل توجهی در مدول عکس‌العمل بستر و سختی خاک خواهد گذاشت.

واژگان کلیدی: ماسه‌ی آلوده به نفت، ضریب عکس‌العمل بستر، مدل‌سازی فیزیکی.

۱. مقدمه

مدت‌هاست که مواد نفتی و مشتقات آن در اثر اکتشاف، حمل و نقل یا ذخیره‌سازی، موجب آلودگی خاک می‌شوند. آلودگی نفتی یک پیامد اجتناب‌ناپذیر از افزایش سریع جمعیت و فرایند صنعتی شدن است که به دنبال آن آلودگی خاک توسط مواد هیدروکربنه‌ی نفتی به شکل وسیع در اطراف تأسیسات اکتشاف و پالایش و به شکل موضعی در مسیرهای انتقال مواد نفتی قابل مشاهده است. آلودگی نفتی زمین فقط برای حوزه‌ی آب‌های زیرزمینی مضر نیست بلکه یک هشدار برای ساختمان‌ها و سازه‌های روی آن نیز است، بدین صورت که هرگونه تغییر در مشخصات مهندسی و رفتار لایه‌های خاک ممکن است منجر به یک کاهش در ظرفیت باربری و افزایش در نشست‌های کلی یا نسبی فونداسیون سازه‌ها شود. برای اینکه بتوان در مورد خاک‌های آلوده به مواد نفتی قضاوت کرد، باید اطلاعاتی در مورد خواص ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به نفت جمع‌آوری کرد.

با انجام آزمایش‌های تراکم، نفوذپذیری، سه محوری، تحکیم و برش مستقیم روی ماسه‌ی تمیز و آلوده به نفت خام در شرایط تراکم نسبی یکسان (۱۹۹۵) نتیجه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۱۳، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۲۳.

DOI: 10.24200/J30.2019.1430

iman.talebzadeh@yahoo.com
ahajjani@gmail.com

گرفته شد که به علت آلودگی نفتی، مقاومت و نفوذپذیری ماسه به مقدار ناچیزی، کاهش و قابلیت تراکم آن تا یک میزان خاص از آلودگی افزایش می‌یابد.^[۱] همچنین در سال ۲۰۰۱، بعضی از خواص فیزیکی ماسه‌ی نفتی آلوده‌ی غیراشباع بررسی و تأثیر چسبناکی جنبشی (ویسکوزیته) مواد نفتی در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مطالعه شد. براساس نتایج به‌دست آمده، آلودگی نفتی، قابلیت تراکم ماسه را افزایش و قابلیت هدایت هیدرولیکی و مقاومت برشی را کاهش می‌دهد.^[۱] در سال ۲۰۱۲، نیز مجموعه‌ی وسیعی از آزمون‌های آزمایشگاهی روی خاک‌های ریزدانه‌ی تمیز و آلوده به درصد‌های متفاوت از نفت خام، جهت بررسی خواص ژئوتکنیکی آن انجام و تأثیر گذر زمان و اثر کهنگی در برخی خواص خاک بررسی شده است. نتایج مطالعه نشان داده است که با افزایش درصد نفت، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، بیشینه‌ی تراکم خشک، شاخص تراکم و حدود آتربرگ افزایش می‌یابد. همچنان که با بالا رفتن میزان نفت، درصد بهینه‌ی رطوبت و چسبندگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اثر کهنگی باعث کاهش بیشتر در چسبندگی می‌شود، ولی تأثیر خاصی در زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمی‌گذارد.^[۳] در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی و ماسه‌یی آلوده به مواد نفتی انجام شده است. برخی پژوهشگران در مطالعه‌ی خود (۲۰۱۱) به این نتیجه رسیدند

که افزایش آلودگی منجر به افزایش حد خمیری و روانی و ضریب فشردگی خاک می‌شود.^[۴]

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال نشان داده شد که آلاینده‌ی روغن موتور منجر به افزایش نفوذپذیری پس از ۳ ماه می‌شود.^[۵] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۳) نیز مشخص شد که وجود نفت در خاک رسی کاتولینت دار، باعث کاهش چسبندگی و افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و تراکم‌پذیری خاک می‌شود.^[۶] همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۱۵)، مطالعاتی روی خاک رسی کاتولینت انجام دادند و متوجه شدند که افزایش میزان نفت دیزل، منجر به کاهش مقاومت تک‌محوری خاک می‌شود.^[۷] در پژوهش دیگری در همان سال نیز نتیجه گرفته شد که میزان کم آلودگی نفتی در ماسه‌های ریزدانه نمی‌تواند تأثیر نامناسبی در رفتار ساختمان‌های مستقر بر آن‌ها داشته باشد.^[۸] همچنین در یک مطالعه‌ی صحرایی (۲۰۱۶)، نتیجه گرفته شد که افزایش آلودگی گازی باعث کاهش چسبندگی و افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه می‌شود.^[۹] برخی پژوهشگران (۲۰۱۶) نیز دریافتند که اضافه کردن ۵٪ نانوایدات آهک به خاک رسی آلوده به نفت گاز، بعد از ۲۴ ساعت منجر به افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، وزن مخصوص خشک بیشینه، درصد رطوبت بهینه و پارامترهای مقاومت برشی می‌شود.^[۱۰] همچنین در مطالعه‌ی دیگری در همان سال نتیجه‌گیری شد که به دلیل نفوذپذیری مختلف خاک‌ها، تأثیر آلودگی در خصوصیات مختلف آن‌ها به زمان بستگی دارد.^[۱۱]

در سال ۲۰۰۹ نیز رفتار پی نواری روی ماسه‌ی آلوده به مواد نفتی بررسی شد و آزمایش‌های مدل کرنش مسطح روی ماسه‌ی تمیز و آلوده به مواد نفتی که با یک پی نواری صلب بارگذاری شده بودند، با تغییر عمق و طول لایه‌ی ماسه‌ی آلوده و نوع آلودگی نفتی انجام شدند و براساس نتایج به‌دست آمده نشان داده شد که رفتار بارگذاری - نشست به شکل مؤثری توسط آلودگی نفتی می‌تواند تأثیرپذیر باشد. به گونه‌ی که با افزایش عمق و طول لایه‌ی ماسه‌ی آلوده، ظرفیت باربری کاهش یافته و نشست شالوده افزایش پیدا کرده است.^[۱۱] همچنین در یک بررسی آزمایشگاهی (۱۹۹۲)، در مورد تراکم، فشردگی و مشخصه‌های مقاومت ماسه‌های با دانه‌بندی یکنواخت و آلوده‌شده به نفت خام گزارش شده است که هر چند آلودگی نفتی تأثیر قابل توجهی در مشخصه‌های تراکم نمی‌گذارد، با این حال باعث کاهش زاویه‌ی اصطکاک می‌شود و به شکل قابل توجهی قابلیت فشردگی ماسه را افزایش می‌دهد.^[۱۲] در همان سال، آزمایش‌های سه محوری دیگری روی ماسه‌ی تمیز و نفت آلوده انجام شد و نتیجه گرفته شد که اشباع کامل با روغن موتور، کاهش چشم‌گیری در زاویه‌ی اصطکاک ماسه در هر دو حالت شل و متراکم و افزایش شدیدی در کرنش‌های حجمی ایجاد می‌کند. و علاوه بر آن، آنالیز اجزاء محدود نشان داد که نشست فونداسیون به علت آلودگی نفتی افزایش می‌یابد.^[۱۳] یک برنامه‌ی آزمون‌های آزمایشگاهی گسترده (۲۰۰۷) نیز برای تعیین تأثیر آلودگی نفت خام در برخی از خواص ژئوتکنیکی خاک‌های رسی و ماسه‌ی نظیر SM، CL و SP که از خاک‌های ساحلی خلیج فارس (سواحل بوشهر) نمونه‌برداری شد، انجام شده و براساس نتایج به‌دست آمده، مقاومت، نفوذپذیری، بیشینه‌ی تراکم خشک، درصد رطوبت بهینه و حدود آتربرگ تحت تأثیر آلودگی نفتی کاهش یافته‌اند. شایان ذکر است که تأثیر آلودگی نفتی در پارامترهای مقاومت برشی یکنواخت نبوده و به نوع خاک بستگی داشته است و لیکن باعث کاهش مقاومت برشی بیشینه در همه‌ی نمونه‌های مطالعاتی شده است.^[۱۵] در پژوهش حاضر، با استفاده از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی آزمایش بارگذاری صفحه در مقیاس کوچک، تأثیر انتشار مواد نفتی در زمین‌های ماسه‌ی در مدل عکس‌العمل بستر k_s شالوده‌ی سطحی مستقر بر آن‌ها ارزیابی شده است. همچنین پژوهشگران متعددی در رابطه با تعیین ضریب عکس‌العمل خاک و نیز نشست خاک

با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه مطالعاتی انجام داده‌اند.^[۱۶-۲۲] در پژوهشی در سال ۱۹۸۵، نیز نشان داده شده است که فشار سربار و مصالح تشکیل‌دهنده‌ی پی، کم‌تر از عوامل دیگر نظیر: ابعاد پی و خصوصیات خاک بر نمودار بار - نشست خاک‌های ماسه‌ی کویت دارد.^[۲۳] همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۹۳) دریافتند که مؤثرترین عامل سیمانی شدن خاک‌های ماسه‌ی، کاهش در میزان تراکم‌پذیری خاک‌هاست؛ لذا با انجام آزمایش بارگذاری صفحه روی خاک‌های ماسه‌ی در شرایط اشباع، خشک و مرطوب نتیجه گرفتند که اشباع شدن خاک باعث کاهش ظرفیت باربری و مدول تغییرشکل خاک می‌شود.^[۲۴] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)، نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی، یک رابطه‌ی همبستگی مناسب‌تر نسبت به مدل‌های سنتی آماري موجود بین ضریب واکنش بستر و مقدار تغییرشکل یک سازه‌ی مستقر بر خاک‌ریز ارائه شده است.^[۲۵] همچنین روشی مناسب (۲۰۱۳) در مقابل آزمایش بارگذاری صفحه‌ی مرسوم برای تعیین ضریب واکنش بستر در ماسه‌سنگ‌ها و لایه‌سنگ‌های ضعیف در یک تونل ۲ کیلومتری ارائه شده است.^[۲۶] در آزمایش بارگذاری صفحه، نحوه‌ی آزمایش و ابعاد صفحه‌ی به‌کار رفته در تعیین مقدار k_s ، تأثیر بسزایی دارد و عموماً در آزمایش‌های صحرایی از صفحات نسبتاً صلب با قطر ۱۵ تا ۷۵ سانتی‌متر استفاده می‌شود. اگر از صفحاتی به قطرهای ۳۰، ۴۵، ۶۰ یا ۷۵ سانتی‌متر استفاده شود، با توجه به صلبیت صفحه تحت بارگذاری، نشست یکنواخت در تمام بخش‌های صفحه ایجاد می‌شود. با بزرگ‌تر شدن ابعاد صفحه و افزودن ضخامت صفحه‌ی بارگذاری جهت رسیدن به صلبیت کافی، بارگذاری مشکل‌تر خواهد شد. در چنین حالتی از چند صفحه‌ی هم‌مرکز، که قطر آن‌ها از پایین به بالا کاهش می‌یابد، استفاده می‌شود.^[۲۷]

با توجه به مطالعات انجام‌شده و مرور اجمالی نتایج به‌دست آمده می‌توان متوجه شد که بیشتر مطالعات پیشین در مورد خاک‌های آلوده به آلاینده‌های مختلف نفتی و بررسی تغییرات ایجادشده در مشخصات فیزیکی و ژئومکانیکی آن‌هاست و مابقی مطالعات در ارتباط با رفتار بار - نشست روی پی‌های مستقر بر خاک آلوده است. به این ترتیب تاکنون مطالعات اندکی در مورد تغییرات ایجادشده بر میزان سختی خاک و ضریب واکنش بستر آن بر آلاینده‌های گازوئیل، نفت خام و نفت سفید انجام شده است. در پژوهش حاضر، اثر آلاینده‌های مذکور با درصدهای مختلف در اندازه‌ی ضریب واکنش بستر به کمک انجام آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ی کوچک مقیاس بررسی شده است.

۲. مشخصات مصالح

به منظور بررسی اثر آلاینده‌های نفتی در مدل عکس‌العمل بستر خاک، در مطالعه‌ی حاضر از ماسه‌ی انزلی به‌صورت مطالعه‌ی موردی استفاده شده است. بندر انزلی واقع در استان گیلان با طول جغرافیایی $37^{\circ}27'30''$ و عرض جغرافیایی $49^{\circ}28'00''$ و در شهرستان بندر انزلی، در شمال استان گیلان و در مجاورت دریای خزر بر روی ماسه‌های کناره‌ی دریا قرار گرفته و به‌صورت یک نوار باریک در امتداد خط ساحلی کشیده شده است. به همین دلیل خصوصیات و ویژگی‌های لایه‌های خاک در شهر انزلی، اغلب همان خصوصیات کناره‌ی ساحل خزر است. بدین صورت که عمده‌ی خاک‌های تشکیل‌دهنده‌ی خط ساحلی، ماسه‌های بسیار ریزدانه و یکنواخت هستند. خصوصیات شاخص و پوش نمودار دانه‌بندی که حاصل از ۳ منحنی دانه‌بندی مختلف از ماسه‌ی انزلی است به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده است. در ضمن در پژوهش حاضر،

جدول ۱. خصوصیات شاخص دانه‌بندی ماسه‌ی مورد آزمایش.

نمونه	طبقه‌بندی	درصد ریس ولای	درصد ماسه	(Gs)	D ₅₀
ماسه‌ی انزلی	SP	٪۰٫۵	٪۹۹٫۵	۲٫۶۷	۰٫۲۵ mm



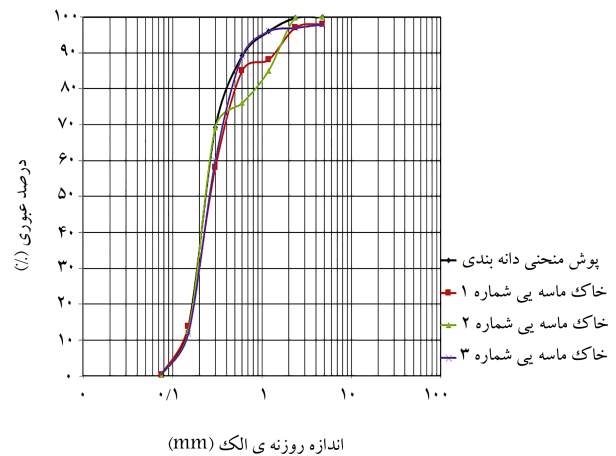
شکل ۲. دستگاه مدل‌سازی بارگذاری صفحه‌ی مورد استفاده.

هموار پهن شد تا رطوبت طبیعی آن بعد از مدتی در معرض آفتاب گرفته شود و پس از آن خاک تحت شرایط استاندارد در کوره قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. در مرحله‌ی بعد با استفاده از آزمایش‌های چگالی بیشینه ($\gamma_d(\max)$) و کمینه ($\gamma_d(\min)$) به ترتیب مقادیر چگالی خشک بیشینه و کمینه به دست آمده است.^[۲۹]

با توجه به ابعاد ذکر شده برای مدل‌سازی نمونه‌ی خاک در دستگاه برای رسیدن به تراکم مد نظر، نمونه در ۵ لایه‌ی ۱۰ سانتی‌متری متراکم شد. بدین ترتیب برای چگالی‌های نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ و با توجه به مقادیر محاسبه‌شده‌ی وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه (۱۵٫۱ و ۱۴٫۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب) و با استفاده از رابطه‌ی ۱، برای هر مقدار تراکم نسبی انتخاب شده (D_r)، یک مقدار وزن مخصوص خشک به دست آمد و با توجه به حجم هر لایه به میزان $۱۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر مکعب، وزن خاکی که باید در هر لایه‌ی ۱۰ سانتی‌متری و هر کدام از شرایط تراکمی قرار گیرد، به دست آمد:

$$D_r = \frac{\gamma_d(\max)}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_d(\min)}{\gamma_d(\max) - \gamma_d(\min)} \quad (1)$$

برای چگالی نسبی ۳۰٪، وزن هر لایه‌ی ۱۰ سانتی‌متری ماسه‌ی خشک ۵۲٫۸ کیلوگرم، برای چگالی نسبی ۵۰٪، مقدار ۵۳٫۵ کیلوگرم، و همچنین برای چگالی نسبی ۷۰٪، مقدار ۵۴٫۲ کیلوگرم ماسه‌ی خشک حاصل شد که این مقادیر در هر لایه دقیقاً جای داده شدند. برای این منظور از روش بارش جهت تراکم خشک استفاده شده است، بدین ترتیب که مقدار خاک مد نظر برای هر شرایط تراکمی، به تدریج و از ارتفاع حدود ۱۰ سانتی‌متری و به شکل یکنواخت درون جعبه‌ی دستگاه ریخته شد (تکنیک بارش) و در صورتی که ارتفاع لایه‌ی خاک مورد نظر از ۱۰ سانتی‌متر تجاوز می‌کرد، توسط یک کوبه‌ی چوبی شامل یک صفحه‌ی صاف و یک دستگیره، ارتفاع لایه تنظیم می‌شد. این عمل برای هر ۵ لایه انجام شد تا نمونه‌ی $۱۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ سانتی‌متری به دست آمد.



شکل ۱. نمودارهای دانه‌بندی ماسه‌ی انزلی و پوش انتخابی آن‌ها.

از گازوئیل، نفت خام و نفت سفید با درصد‌های آلاینده‌ی ۲، ۴ و ۶ به عنوان مواد آلاینده‌ی نفتی استفاده شده است.

۳. روش کار

به منظور انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی، از دستگاهی جهت مدل‌سازی فیزیکی با مقیاس کوچک برای آزمایش بارگذاری صفحه استفاده شده است. ابعاد دستگاه مذکور ۶۰×۶۰ سانتی‌متر بود، به گونه‌ی که نمونه‌ی خاک ساخته‌شده‌ی موجود در آن ۵۰ سانتی‌متر ارتفاع داشت (شکل ۲). ماسه‌ی مورد نظر در سه نوع شرایط تراکمی شل، متوسط، و متراکم (تراکم نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) آزموده شده است، بنابراین بسته به تراکم نسبی نمونه‌های ماسه‌ی ساخته‌شده، در هر آزمایش حدود ۲۷۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم ماسه استفاده شد. با توجه به ۳ درصد آلاینده‌ی نفتی (۲، ۴ و ۶ درصد)، نوع آلاینده‌ی نفتی (گازوئیل، نفت خام و نفت سفید) و یک حالت ماسه‌ی کاملاً تمیز، مجموعاً ۱۰ آزمایش بارگذاری مطابق استاندارد ASTM D ۱۱۹۴ برای هر یک از شرایط تراکمی و در مجموع ۳۰ آزمایش مدل‌سازی انجام شده است.^[۲۸]

بر روی دستگاه، جک بارگذاری هیدرولیکی جهت اعمال بارگذاری قائم نصب شد. یک صفحه‌ی فولادی نیز برای اعمال تنش یکنواخت به خاک و به عنوان مدل یک پی سطحی، به صورت مربعی و به ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر روی سطح خاک مستقر شد. همچنین یک اندازه‌گیر جابه‌جایی‌سنج دیجیتال LVDT^۱ برای اندازه‌گیری مقدار تغییر شکل‌های ایجاد شده در سطح نمونه‌ی خاک روی صفحه‌ی مسطح شالوده نصب شد. برنامه‌ریزی اعمال نیرو طوری صورت گرفته است که امکان انجام آزمایش هم به صورت کنترل تنش و هم به صورت کنترل کرنش وجود داشته باشد. دستگاه مذکور شامل ثبت‌کننده‌ی اطلاعات دیجیتال^۲ است که می‌تواند مقادیر بار و تغییر شکل‌ها را به صورت هم‌زمان ثبت کند.

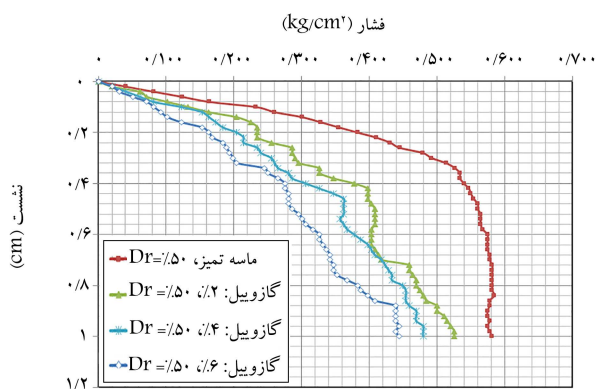
در ابتدای امر، جهت آماده‌سازی شرایط خاک برای آزمایش، خاک روی سطح

۴. نتایج آزمون بارگذاری

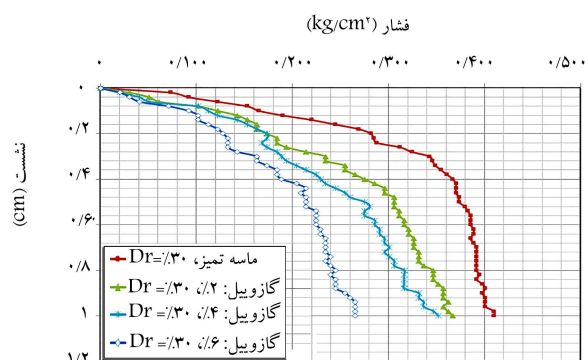
نتایج آزمایش بارگذاری برای نمونه‌های ساخته شده با چگالی نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، به ترتیب در شکل‌های ۳ الی ۵ برای ماسه‌های آلوده به گازوئیل، نفت خام و نفت سفید نشان داده شده است. لازم به ذکر است که آلودگی به کل لایه‌ی خاک تعمیم داده شده است. صرف نظر از خطاهای ناشی از شرایط خاک در برخی فشارها، همان‌گونه که در شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد با افزایش مقدار آلاینده‌ی خاک، از شیب نمودارهای فشار - نشست و مقادیر نهایی ظرفیت باربری پی کاسته شده است. مطابق شکل‌های مذکور، با افزایش درصد تراکم خاک، ظرفیت باربری خاک‌ها با میزان آلودگی یکسان افزایش یافته است.

۵. بررسی نتایج

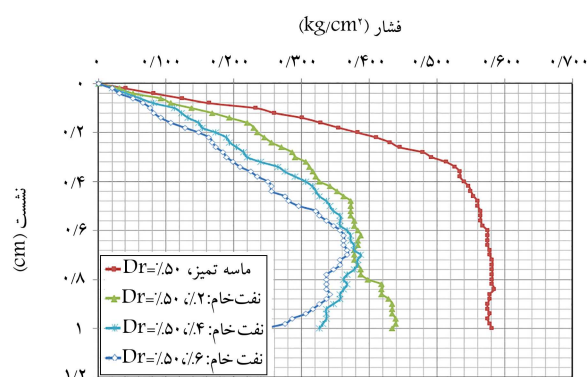
یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مدول عکس‌العمل بسترخاک، تراکم نسبی خاک است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، از طریق شیب نمودارهای فشار - نشست اندازه‌گیری شده توسط اندازه‌گیرهای قرانت نیرو و تغییرمکان، می‌توان مدول عکس‌العمل بستر را در شرایط مختلف تعیین کرد. در مطالعه‌ی حاضر، همان‌گونه که ذکر شد، ماسه در ۳ تراکم نسبی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد به ترتیب به عنوان ماسه‌ی شل، متوسط و متراکم تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفته است. مدول عکس‌العمل بستر در شرایط تمیز براساس آزمایش‌های مذکور در تراکم‌های نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد، به ترتیب حدود ۲۱/۳ و ۶۵/۸ درصد نسبت به حالت شل (تراکم نسبی ۳۰٪) افزایش یافته



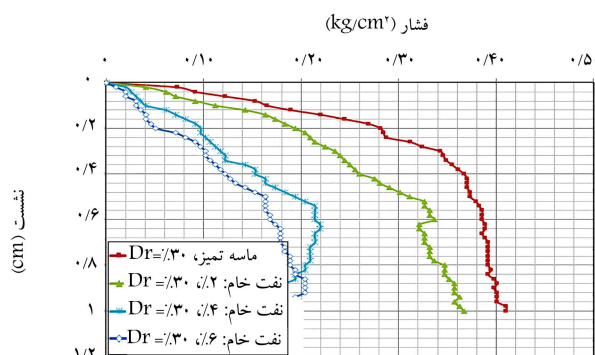
الف) نمودار فشار نشست برای آلاینده گازوئیل؛



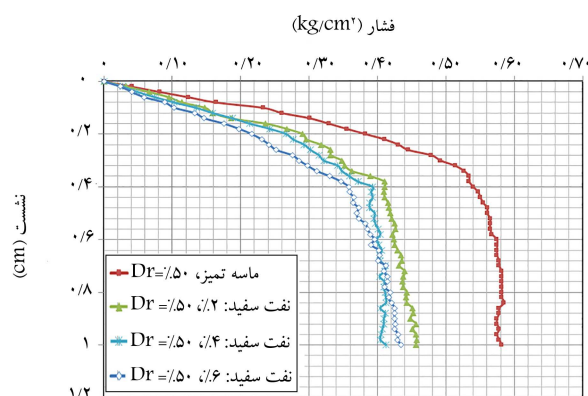
الف) نمودار فشار - نشست برای آلاینده گازوئیل؛



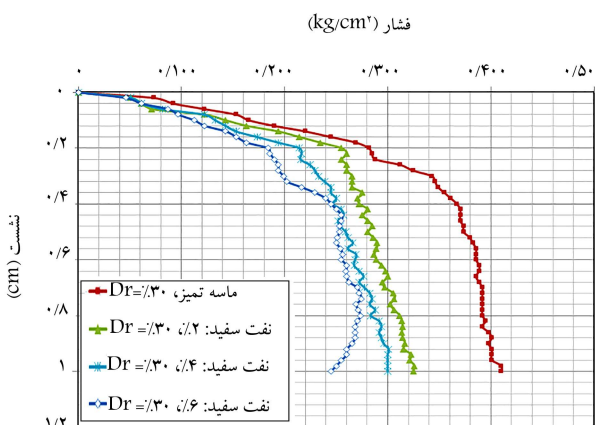
ب) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت خام؛



ب) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت خام؛



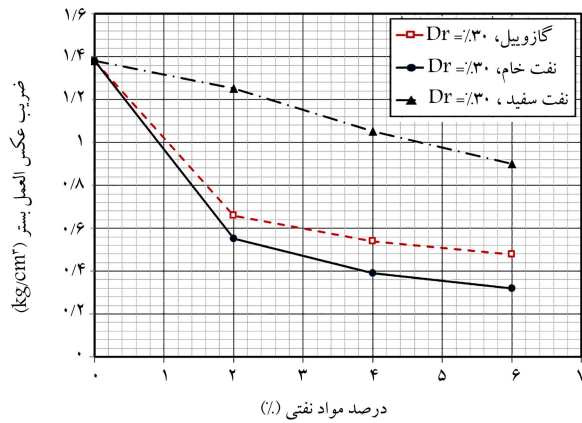
ج) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت سفید.



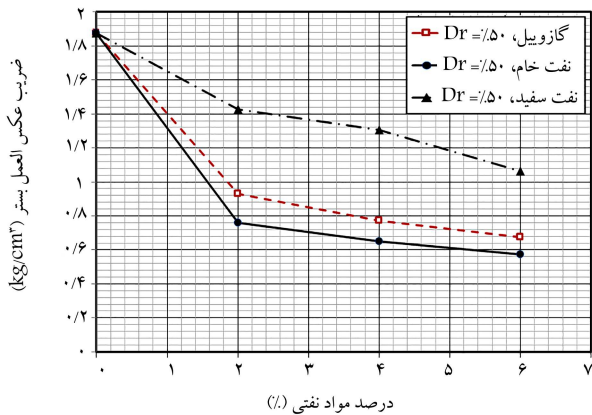
ج) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت سفید.

شکل ۴. نتایج آزمایش بارگذاری برای نمونه‌های ساخته شده با چگالی نسبی ۵۰٪.

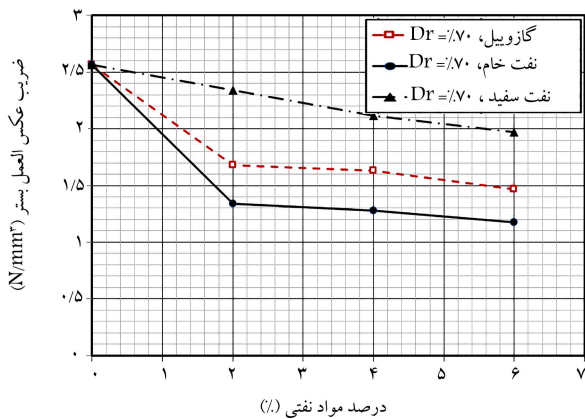
شکل ۳. دستگاه مدل‌سازی بارگذاری صفحه‌ی مورد استفاده.



شکل ۶. تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده برای ماسه‌های با چگالی نسبی ۳۰٪.



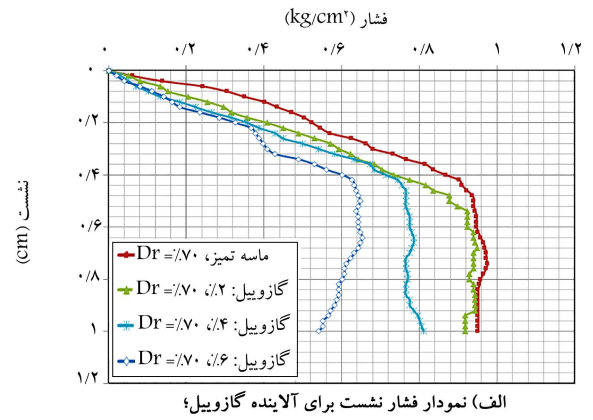
شکل ۷. تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده برای ماسه‌های با چگالی نسبی ۵۰٪.



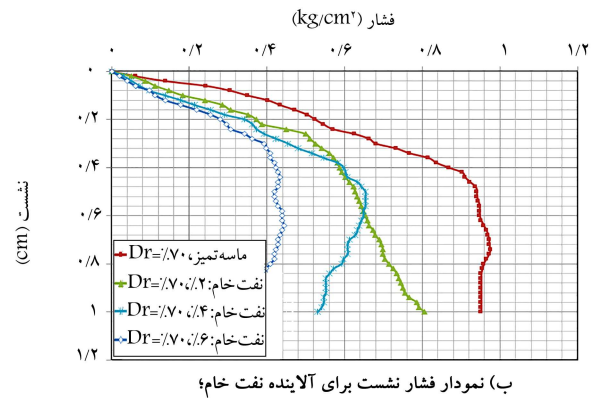
شکل ۸. تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده برای ماسه‌های با چگالی نسبی ۷۰٪.

بین دانه‌بی می‌شود و مقدار k_s ، آفت بیشتری پیدا خواهد کرد. مقایسه‌ی تغییرات مدول عکس العمل بستر برای درصدهای مختلف آلودگی به مواد نفتی در جدول ۲ به صورت کمی ارائه شده است.

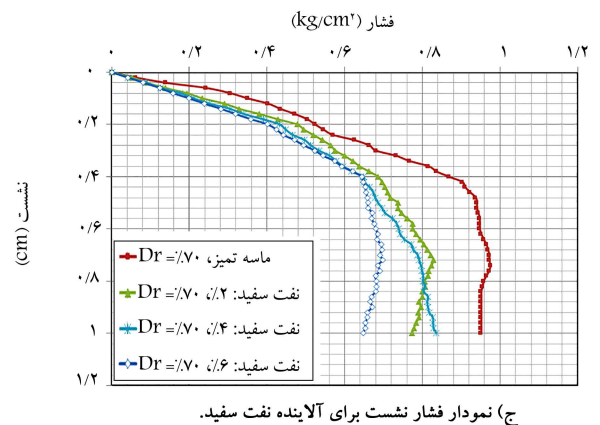
مطابق با نتایج به دست آمده با کاهش تراکم نسبی خاک، انتظار تأثیر زیادی در k_s ناشی از انتشار مواد نفتی در ماسه وجود دارد. به طوری که در تراکم نسبی



الف) نمودار فشار نشست برای آلاینده گازوئیل؛



ب) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت خام؛



ج) نمودار فشار نشست برای آلاینده نفت سفید.

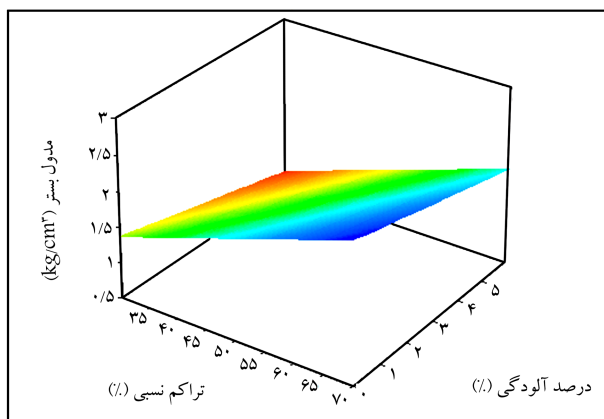
شکل ۵. نتایج آزمایش بارگذاری برای نمونه‌های ساخته شده با چگالی نسبی ۷۰٪.

است. مقادیر مدول عکس العمل بستر و همچنین مقایسه‌ی تغییرات مقادیر مدول عکس العمل بستر بر حسب درصدهای مختلف آلودگی، در شکل‌های ۶ الی ۸ به ترتیب برای ماسه‌های با ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ چگالی نسبی ارائه شده است.

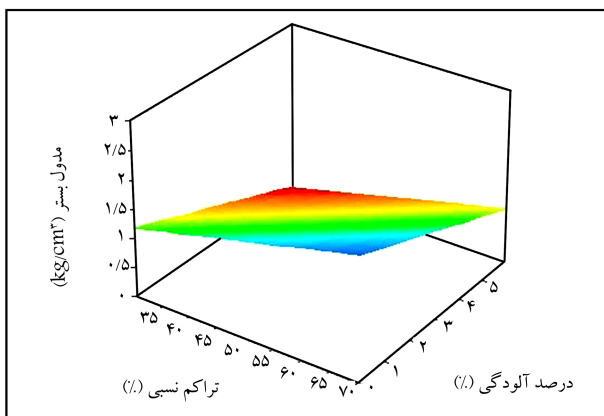
مطابق شکل‌های ۶ الی ۸، با افزایش درصد مواد نفتی از مقدار مدول عکس العمل بستر ماسه کاسته خواهد شد. منتها این کاهش در شرایط ابتدایی شدت بیشتری دارد و پس از آغشته شدن سنگ‌دانه‌های ماسه به مواد نفتی، افزایش درصد آلودگی با وجود اینکه همچنان سبب کاهش k_s می‌شود، شیب نزولی کمتری را طی می‌کند. همچنین براساس شکل‌های مذکور به نظر می‌رسد که آهنگ کاهش مدول عکس العمل بستر برای ۳ نوع مواد نفتی (گازوئیل، نفت خام و نفت سفید) نسبتاً مشابه است، ولی با توجه به اینکه نفت خام مواد روغنی بیشتری دارد، سبب تسهیل حرکت

جدول ۲. مقادیر مدول عکس‌العمل بستر در حالت‌های مختلف.

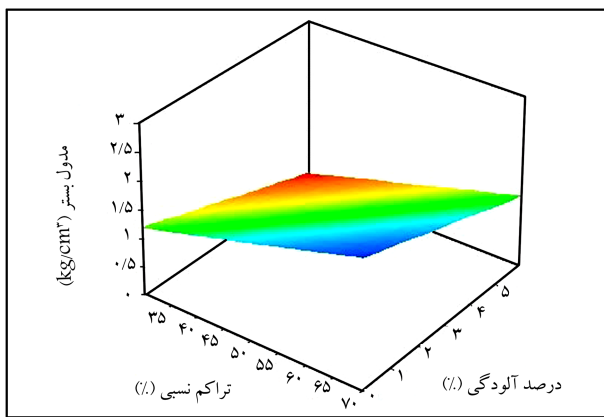
چگالی نسبی (%)	نوع آلاینده	درصد مواد آلاینده	درصد کاهش نسبت به حالت تمیز (K_s)
	تمیز	۰	۰
	گازوئیل	۲	۵۲٫۲
		۴	۶۰٫۹
		۶	۶۵٫۴
۳۰	نفت خام	۲	۶۰٫۱
		۴	۷۱٫۸
		۶	۷۶٫۸
	نفت سفید	۲	۹٫۴
		۴	۲۳٫۹
		۶	۳۴٫۸
	تمیز	۰	۰
	گازوئیل	۲	۵۰٫۵
		۴	۵۸٫۸
		۶	۶۴
۵۰	نفت خام	۲	۵۹٫۴
		۴	۶۵٫۴
		۶	۶۹٫۵
	نفت سفید	۲	۲۴
		۴	۳۰٫۴
		۶	۴۳٫۵
	تمیز	۰	۰
	گازوئیل	۲	۳۴٫۷
		۴	۳۶٫۴
		۶	۴۲٫۹
۷۰	نفت خام	۲	۴۷٫۷
		۴	۵۰٫۱
		۶	۵۴٫۱
	نفت سفید	۲	۸٫۸
		۴	۱۷٫۵
		۶	۲۳٫۲



شکل ۹. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده و درصد تراکم خاک برای ماسه‌های آلوده به نفت سفید.



شکل ۱۰. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده و درصد تراکم خاک برای ماسه‌های آلوده به نفت خام.



شکل ۱۱. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر بر حسب درصد مواد آلاینده و درصد تراکم خاک برای ماسه‌های آلوده به گازوئیل.

کاهش، آهنگ ملایم‌تری داشته و در مراحل بعدی، مدول عکس‌العمل بستر با شدت کمتری تنزل یافته است. بر مبنای نتایج به دست آمده، می‌توان شکل‌های ۹ الی ۱۱ را ارائه کرد. در نمودارهای مذکور، بهترین و ساده‌ترین برآزش بر مدول واکنش بستر داده‌های حاصل از آزمایش‌های بارگذاری انجام شده روی خاک‌های آلوده به نفت خام، نفت سفید، و گازوئیل انجام شده است. بر مبنای نمودارهای ذکر شده، روابط ۲

پایین (حالت شل)، با افزودن ۶٪ نفت خام، مقدار k_s بیش از ۷۰٪ کاهش یافته است. در این شرایط k_s تقریباً به ۰٫۲۳ برابر حالت تمیز رسیده است، در حالی که شرایط مشابه در حالت نسبتاً متراکم، k_s تقریباً به ۰٫۴۶ برابر حالت تمیز است. همچنین مقدار کاهش مدول عکس‌العمل بستر به دلیل ایجاد آلودگی ناشی از انتشار نفت خام بیشتر از کاهش ناشی از انتشار گازوئیل و نفت سفید است. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که آلودگی ناشی از انتشار آلاینده‌های با مواد روغنی بیشتر، تأثیر بیشتری در کاهش سختی خاک از خود نشان داده است. کاهش سختی در آغاز آلوده شدن خاک به مواد نفتی شدت بیشتری دارد و به نظر می‌رسد اثر روغنی شدن سطح سنگ‌دانه‌ها سبب کاهش اصطکاک و سختی آن‌ها می‌شود. منتها با افزایش بیشتر مواد آلاینده، هر چند روند کاهش k_s ادامه یافته است، ولی شیب

ریزدانه و یکنواخت دانه‌بندی شده، استفاده شده است. ماسه‌ی مورد نظر در ۳ شرایط تراکمی شل، متوسط، و متراکم مدل‌سازی شده است. آلودگی با استفاده از نفت خام، گازوئیل، و نفت سفید و در ۳ نوع درصد مختلف اختلاط (۲، ۴ و ۶ درصد) به خاک اضافه شده است. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده به این صورت است:

۱. نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان می‌دهد که آلودگی ناشی از انتشار مواد نفتی، تأثیر شدیدی در مدول عکس‌العمل بستر و در نتیجه سختی خاک خواهد گذاشت. به گونه‌ی که بیشینه‌ی کاهش ایجاد شده در ضریب عکس‌العمل بستر در خاک‌های آلوده به نفت خام، گازوئیل و نفت سفید به ترتیب برابر است با ۶۵٫۴ و ۳۴٫۸.

۲. آلودگی ناشی از انتشار نفت خام، نسبت به آلودگی ناشی از انتشار گازوئیل و نفت سفید تأثیر بیشتری در کاهش سختی خاک از خود نشان داده است. به نظر می‌رسد شرایط روغنی در نفت خام نسبت به دو آلاینده‌ی دیگر علت آن باشد.

۳. کاهش سختی در آغاز انتشار مواد نفتی در خاک شدت بیشتری دارد و به نظر می‌رسد اثر روغنی شدن سطح سنگ‌دانه‌ها سبب کاهش اصطکاک و سختی آن‌ها می‌شود. منتها با افزایش بیشتر مواد آلاینده، مقدار کاهش مدول عکس‌العمل بستر، آهنگ ملایم‌تری یافته و در مراحل بعدی k_s با شدت کمتری آفت کرده است.

۴. مقدار تراکم نسبی ماسه‌ها، در میزان تأثیر انتشار آلودگی بر مدول عکس‌العمل بستر مؤثر است. به طوری که نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان داده است، هر چه خاک متراکم‌تر باشد، حساسیت کمتری به انتشار مواد آلاینده از خود نشان خواهد داد.

۵. در پژوهش حاضر روابطی ارائه شده است که بر مبنای آن می‌توان با اطلاع از درصد آلودگی و تراکم خاک، ضریب واکنش بستر پی‌ها با ابعاد مختلف را پیش‌بینی کرد.

الی ۴ ارائه شده است که به کمک آن‌ها می‌توان با داشتن نوع و درصد آلودگی خاک و درصد تراکم خاک آلوده، مدول واکنش بستر پس از آلودگی را پیش‌بینی کرد.

$$k_s = 0.5357 + 0.267D_r - 0.1040P_p \quad (2)$$

$$k_s = 0.4873 + 0.233D_r - 0.1935P_p \quad (3)$$

$$k_s = 0.3783 + 0.268D_r - 0.1655P_p \quad (4)$$

که در روابط ۲ الی ۴، D_r تراکم نسبی، P_p درصد مواد آلاینده و k_s ضریب واکنش بستر بر حسب نیوتن بر میلی‌مترمکعب است. از آنجایی که روابط مذکور برای مدل آزمایشگاهی مربعی با عرض صفحه‌ی ۱۰ سانتی‌متر حاصل شده است، جهت عمومی‌تر کردن روابط مذکور و قابلیت استفاده از آن‌ها در تعیین مدول واکنش بستر پی‌های با ابعاد واقعی و بزرگ‌تر روی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، می‌توان پس از محاسبه‌ی ضریب واکنش بستر در روابط مذکور با استفاده از نتایج مطالعات ترقاقی (۱۹۵۵)، مقادیر ضریب واکنش بستر برای پی با ابعاد بزرگ‌تر B را با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد.^[۱۶]

$$k_s = k_1 \left(\frac{B_1 + B}{2B} \right)^2 \quad (5)$$

که در آن، B_1 و k_1 به ترتیب عرض و ضریب واکنش بستر پی مدل آزمایشگاهی و B و k_s به ترتیب عرض و ضریب واکنش بستر پی واقعی هستند.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از دستگاه مدل‌سازی فیزیکی آزمایش بارگذاری صفحه در دستگاه کوچک‌مقیاس به ابعاد حدود 60×60 سانتی‌متر و به ارتفاع 50 سانتی‌متر، تأثیر انتشار مواد نفتی در زمین‌های ماسه‌ی در مدول عکس‌العمل بستر آن‌ها ارزیابی شده است. بدین منظور از ماسه‌ی سواحل بندر انزلی، که به صورت

پانویس‌ها

1. linear variable differential transformer
2. data logger

منابع (References)

1. Al-Sanad, Hasan A., Eid, Walid K. and et al. "Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(5), pp. 407-412 (1995).
2. Shin, E.C. and Das, B.M. "Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand", *Advances in Unsaturated Geotechnics*, *ASCE* (2001).
3. Kermani, M. and Ebadi, T. 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 (2012).
4. Jia, Y.G., Wu, Q., Shang, H. and et al. "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 (2011).
5. Nazir, A.K. "Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay", *Alexandria Engineering Journal*, **50**(4), pp. 331-335 (2011).
6. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R. and et al. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite", *Engineering Geology*, **166**, pp. 11-16 (2013).
7. Liu, Z.B., Liu, S.Y. and Cai, Y. "Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil", *Journal of Central South University*, **22**(12), pp. 4837-4843 (2015).

8. Abousnina, R.M., Manalo, A., Shiau, J. and et al. "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 (2015).
9. Nasehi, S.A., Uromeihy, A., Nikudel, M.R. and et al. "Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, **34**(1), pp. 333-345 (2016).
10. Nasehi, S.A., Uromeihy, A., Nikudel, M.R. and et al. "Use of nanoscale zero-valent iron and nanoscale hydrated lime to improve geotechnical properties of gas oil contaminated clay: A comparative study", *Environmental Earth Sciences*, **75**(9), pp. 1-20 (2016).
11. Harsh, G., Patel, A., Himanshu, B. and et al. "Effect of rate of crude oil contamination on index properties and engineering properties of clays and sands", *Indian Journal of Science and Technology*, **9**(30), pp.1-4 (2016).
12. Nasr, Ahmed M.A. "Experimental and theoretical studies for the behavior of strip footing on oil-contaminated sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(2), pp. 1814-1822 (2009).
13. Cook, E.E., Puri, V.K. and Shin, E.C. "Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands", *The Second International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers* (1992).
14. Evgin, E. and Das, B.M. "Mechanical behavior of an oilcontaminated sand", *Proc., Mediterranean Conf., Usmen and Acar, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands*, pp. 101-108 (1992).
15. Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M. "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, **89**(3), pp. 220-229 (2007).
16. Terzaghi, K.V. "Evaluation of coefficient of subgrade reaction", *Geotechnique*, **5**(4), pp. 297-326 (1955).
17. Bond, D. "The influence of foundation size on settlement", *Geotechnique*, **11**(2), pp. 121-143 (1961).
18. Teng, W.C.Y., *Foundation Design* (1962).
19. Bjerrum, L. and Eggestad, A. "Interpretation of loading test on sand", *Proceedings of European Conference in Soil Mechanics* (1963).
20. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design* (1977).
21. Parry, R.H.G. "Estimating foundation settlements in sand from plate bearing tests", *Geotechnique*, **28**(1), pp. 107-118 (1978).
22. Ground Arnold, M. "Prediction of footing settlements on sand", *Engineering*, **13**(2), pp. 40-49 (1980).
23. Ismael, N.F. "Allowable pressure from loading tests on Kuwaiti soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **22**(2), pp. 151-157 (1985).
24. Ismael, N.F. and Al-Sanad, H.A. "Plate loading tests on weakly cemented surface desert sands", *Geotechnical Engineering*, **24**(2), pp. 133-150 (1993).
25. Dincer, I. "Models to predict the deformation modulus and the coefficient of subgrade reaction for earth filling structures", *Advances in Engineering Software*, **42**(4), pp. 160-171 (2011).
26. Kog, Y.C., Kho, C. and Loh, K.K. "Tunnel design and modulus of subgrade reaction", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **29**(2), pp.1-8 (2013).
27. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, New York, McGraw-Hill (1988).
28. ASTM D1194-94, "Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings (Withdrawn 2003)", ASTM International, West Conshohocken, PA (www.astm.org) (1994).
29. ASTM D4254-16, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", ASTM International, West Conshohocken, PA, (www.astm.org) (2016).
30. ASTM D4253-16, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", ASTM International, West Conshohocken, PA (www.astm.org) (2016).