مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۷۷-۸۲

Original Article

بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس بنتونیتی آلوده به گازوئیل

سید محمدعلی زمردیان* **(دانشیار)**
دانشکده‌ی مهندسی آب، دانشگاه شیراز
وحیدرضا رحیمی حقیقی (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان

تمیزکردن خاک‌های آلوده به مشتقات نفتی هزینه‌بر است و یک راه هوشمندانه برای حل مشکل مذکور، استفاده از خاک‌های آلوده در پروژه‌های عمرانی است. آلودگی، ویژگی تحکیمی خاک را تغییر می‌دهد و باعث افزایش نشست کل و نشست غیریکسان سازه‌ی مستقر بر آن می‌شود. در نوشتار حاضر، به بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک آلوده به گازوئیل پرداخته و برای هدف مذکور، خاک رس بنتونیتی با ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزن خشک‌شان به‌صورت مصنوعی با گازوئیل ترکیب شده است. نتایج حاصل، نشان‌دهنده‌ی افزایش حد روانی به میزان ۱۱٪ و کاهش ۱، ۵ و ۴۰ درصدی بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه بوده و نیز مقاومت فشاری و چسبندگی با افزایش آلودگی بیش از ۶۰٪ کاهش یافته است. همچنین با افزایش آلودگی تا میزان ۴٪، شاخص فشردگی افزایش یافته است؛ اما با افزایش میزان آلودگی تا میزان ۱۲٪، شاخص مذکور کاهش و سپس با افزایش میزان آلودگی تا میزان ۱۶٪، مجدداً شاخص فشردگی افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: رس بنتونیتی، ضریب فشردگی‌پذیری، خاک آلوده، تحکیم.

mzomorod@shirazu.ac.ir
vahid_6193@yahoo.com

۱. مقدمه

نشت مشتقات نفتی باعث آلودگی خاک و تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن می‌شود. این اتفاق ممکن است از مخازن قدیمی و فرسوده، خطوط انتقال، سیستم‌های حمل و نقل زمینی، دریایی یا ریلی، آتش‌سوزی چاه‌ها در اثر سهل‌انگاری یا جنگ، و یا حوادث تروریستی رخ دهد. میزان آلودگی به مقدار نفت و ویژگی‌های خاک بستگی دارد. این نوع آلودگی نه فقط پیامدهای فوری و آسیب‌هایی در آینده به خاک وارد می‌سازد، بلکه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک را تغییر می‌دهد. برای تمیزکردن خاک‌های آلوده، روش‌های مختلفی مانند: استخراج در شرایط خلاء و جداسازی با استفاده از سانتریفیوژ، روش‌های بیولوژیکی و شستشوی خاک استفاده می‌شود. ولی عملاً به کارگیری آنها به دلیل وسعت مناطق آلوده و پرهزینه بودن آنها محدود است. یک راه هوشمندانه استفاده از خاک‌های آلوده‌ی ذکرشده در پروژه‌های عمرانی مانند: سدسازی، راه‌سازی، و خاک‌ریزی است. بنابراین ضروری است که علاوه بر مسائل زیست‌محیطی و دیگر تأثیرات مواد آلوده‌کننده‌ی مذکور در مورد تغییر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده، مطالعات و پژوهش‌هایی انجام شود.

در سال ۱۹۹۲، در محیط آزمایشگاه به بررسی ویژگی‌های تراکمی و مقاومت ماسه‌های آلوده به نفت پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که اگرچه آلودگی نفتی، تأثیر چندانی در تراکم ماسه‌های آلوده ندارد، ولی زاویه‌ی اصطکاک را کاهش و تراکم‌پذیری آن را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.[۱] در مطالعاتی در سال ۱۹۹۴، نتایج مشابهی به ترتیب برای ماسه و خاک رس به‌دست آمده است.[۲و۳] علاوه بر این، ویژگی‌های ژئوتکنیکی ماسه‌های آلوده به نفت درکویت (۱۹۹۵) بررسی شده است، که مجدداً نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش اندک مقاومت و نفوذپذیری و افزایش تراکم‌پذیری ماسه‌ها بوده است.[۴] در سال ۱۹۹۷، افزایش مقاومت و استحکام ماسه‌های آلوده به نفت کویت با گذشت زمان و کاهش میزان نفت گزارش شده است.[۵] در بررسی ژئوتکنیکی ماسه و خاک رس آلوده به نفت (۲۰۰۷)، کاهش مقاومت، نفوذپذیری، بیشینه‌ی چگالی خشک، درصد رطوبت و حدود اتربرگ خاک‌های مذکور گزارش شده است.[۶] در سال ۲۰۰۸، نیز افزایش ۳۵ الی ۵۰ درصدی در نشست تراکمی خاک‌های نرم آلوده به هیدروکربن‌های نفتی مشاهده شده[۷] و همچنین یک عامل اصلاحی به رابطه‌ی اسکمپتون و جونز (۱۹۴۴) اضافه شده است تا با استفاده از حد روانی، شاخص فشردگی محاسبه شود.[۸] سپس مدل مذکور (۲۰۱۱) توسعه داده شده و با استفاده از آن، شاخص فشردگی خاک کائولین آغشته به اتانول-بنزین پیش‌بینی شده است.[۹] در سال ۲۰۱۲ نیز افزایش زاویه‌ی اصطکاک، بیشینه‌ی چگالی خشک، شاخص تراکمی و حدود اتربرگ و همچنین کاهش درصد رطوبت و چسبندگی خاک‌های نرم در صورت وجود نفت گزارش شده است.[۱۰] همچنین در سال ۲۰۱۳ به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی کائولینیت آلوده به گازوئیل،[۱۱] و رفتار شمع‌های موجود در ماسه‌های آغشته به نفت،[۱۲] پرداخته شده است.

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که بین نتایج مطالعات انجام‌شده بر روی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۴/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۲۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱۱/۱۱.

Archive of SID
www.SID.ir

ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های نرم آغشته به مشتقات نفتی به علت استفاده از خاک‌های موجود در طبیعت که شامل درصدهای متفاوتی از کانی‌های رسی مانند مونتوریلونیت، کائولینیت و ... می‌شود و نه یک کانی خاص هم‌خوانی وجود ندارد. لذا در پژوهش حاضر از رس بنتونیتی که در مهندسی عمران کاربردهای فراوانی از جمله: پوشش مخازن ذخیره‌ی فاضلاب، باتلاق‌های آب‌های صنعتی، جاسازی زباله‌های اتمی در زیرزمین، احداث سدها، کانال، مخازن، و ترانشه دارد و عموماً حاوی کانی مونتوریلونیت است، استفاده شده است که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی رابطه‌ی خاک نرم و آلودگی آن با مشتقات نفتی در اختیار ما قرار می‌دهد.

۲. مصالح مصرفی

۱.۲. خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

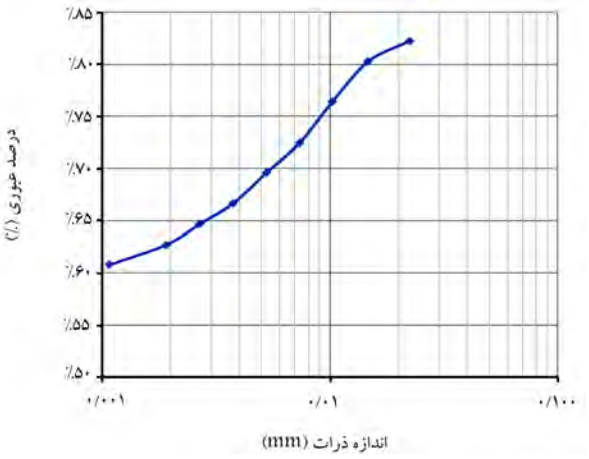
خاک رس بنتونیتی از شرکت باریت سفارش داده شده که این خاک از معادن یزد، اصفهان و مشهد بدست می‌آید. نمودار دانه‌بندی (هیدرومتری) و چگالی مخصوص و مشخصات حالت خمیری در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. طبق طبقه‌بندی متحد، خاک مورد استفاده‌ی رس با حالت خمیری بالا (CH) است.

۲.۲. گازوئیل مورد استفاده در پژوهش حاضر

گازوئیل مورد استفاده در پژوهش حاضر از پالایشگاه نفت شیراز تهیه شده است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه

برای تهیه‌ی نمونه، ابتدا خاک موردنظر درگرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و سپس با توجه به وزن خشک خاک، درصدهای مختلف گازوئیل ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ به خاک اضافه و با هم مخلوط شده‌اند. برای عمل‌آوری خاک، دست‌کم یک هفته مخلوط به‌دست آمده در ظرف‌های سربسته نگهداری و سپس برای انجام آزمایش



شکل ۱. نمودار دانه بندی.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه.

نوع خاک	G_s	LL	PL	PI
رس بنتونیتی	۲/۷۲	۱۳۸	۴۱	۹۷

جدول ۲. مشخصات گازوئیل پالایشگاه شیراز (سایت پالایشگاه).

Recovered@150 °C	T.B.R	٪Vol
Recovered@300 °C	T.B.R	٪Vol
Recovered@357 °C	۹۰	٪Vol
F.B.P (max)	۳۸۵	°C
Density@150 °C	۰/۸۲۰-۰/۸۶۰	kg/L
Color (max)	۳	-
Flash point (min)	۵۴	°C
Sulphur Total (max)	۱	٪Mass
Viscosity kinematic @ ۳۷/۸°C	۲/۰-۵/۵	mm^۲/s
Cloud point (max)	۱/۵	°C
Pour point (max)	-۴	°C
Carbon residue (max)	۰/۱	٪Mass
Ash (max)	۰/۰۱	٪Mass
Water & sediment	۰/۰۵	٪VOL
Cetan index (min)	۵۰	-

تراکم بین ۱۵ تا ۴۰ درصد و جهت انجام آزمایش حدود اتربرگ بین ۹۰ تا ۱۵۰ درصد آب اضافه شده و دست‌کم پس از گذشت یک روز از ترکیب با آب (جهت یک‌دست شدن نمونه‌ها و نفوذ کامل آب) آزمایش بر روی نمونه‌ها انجام شده است.

به منظور تهیه‌ی نمونه جهت آزمایش تحکیم و تک‌محوری، پس از آنکه نمونه‌ها به مدت یک هفته مانند آزمایش تراکم عمل‌آوری شدند، با توجه به رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم برای درصدهای مختلف آلودگی، به هر نمونه به همان میزان آب اضافه و پس از گذشت دست‌کم یک روز، اقدام به ساخت نمونه‌ی تحکیم در تراکم نسبی ۶۰٪ شده است.

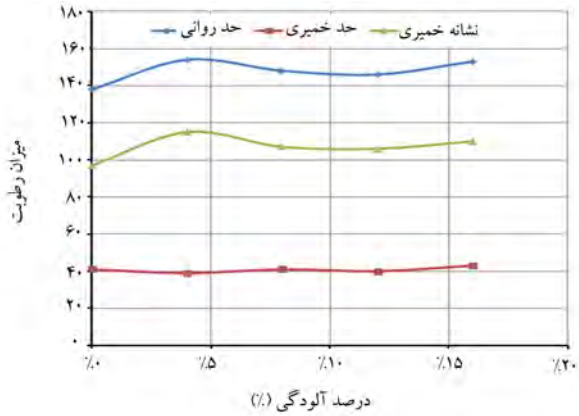
۴. نتایج آزمایشگاهی

۱.۴. حدود اتربرگ (ASTM D۴۳۱۸)

حد روانی و حد خمیری خاک‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر براساس استاندارد ASTM D۴۳۱۸ تعیین شده است. نتایج آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری در شکل ۲ ارائه شده است. از آنجا که حد روانی به‌دست آمده، بالای ۱۰۰٪ است، می‌توان دریافت که خاک خاصیت خمیری بسیار بالایی دارد. اضافه کردن گازوئیل به میزان ۴٪ باعث افزایش حد روانی می‌شود، اما افزایش بیشتر گازوئیل تا ۱۲٪ باعث کاهش حد روانی و در آلودگی ۱۶٪، مجدداً حد روانی افزایش یافته است.

در همین حال ملاحظه می‌شود که تغییر درصد آلودگی تأثیر چندانی در حد خمیری ندارد. با استفاده از تئوری لایه‌ی دوگانه می‌توان افزایش و سپس کاهش حد روانی را توضیح داد، برعکس مولکول‌های آب، مولکول‌های گازوئیل قطبی نبوده‌اند و قادر به تشکیل لایه‌ی دوگانه با خاک نیستند. بنابراین لایه‌ی دوگانه نمی‌تواند تشکیل شود و درصد رطوبت در ابتدا افزایش می‌یابد، اما در ادامه با توجه به خاصیت روان‌کنندگی گازوئیل درصد رطوبت کاهش و در انتها به دلیل میزان زیاد گازوئیل و کشش سطحی موجود در آن مجدداً درصد رطوبت افزایش می‌یابد. یافته‌های موجود با یافته‌های خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) مغایرت داشته است، زیرا در پژوهش مذکور این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش آلودگی، حدروانی و حد

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. تأثیر درصد های مختلف آلودگی در حدود اتربرگ.

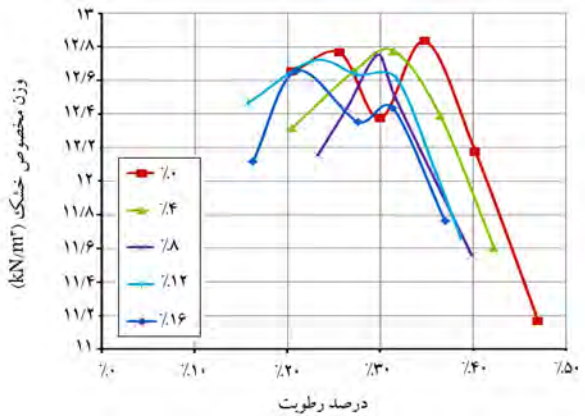
خمیری کاهش می‌یابد.[۶] در مورد یافته‌های خسروی و همکاران (۲۰۱۳) با افزایش آلودگی به میزان ۴٪، حد روانی افزایش یافته است که در این قسمت انطباق وجود دارد.[۱۱] در ادامه نیز با افزایش آلودگی تا ۱۲٪، حد روانی افزایش یافته است؛ اما در ۱۶٪ آلودگی کاهش یافته است، که در این قسمت انطباق وجود ندارد. در حد خمیری نیز با اضافه شدن آلودگی تا ۴٪، حد خمیری کاهش یافته است که در این قسمت هر دو یافته یکسان هستند. در ادامه، حد خمیری با افزایش آلودگی تا ۱۲٪، کاهش و در آلودگی تا ۱۶٪، افزایش یافته است که در این قسمت فقط در آلودگی ۸٪ مغایرت وجود دارد.

مطالعات لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۱) و خوش‌نشین لنگرودی و همکاران (۲۰۱۰)[۱۲] با یافته‌های خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در حد روانی کاملاً مطابقت داشته‌اند، به‌گونه‌یی که با افزایش آلودگی حد روانی کاهش پیدا کرده است که یافته‌های مذکور با یافته‌های موجود فقط در آلودگی ۸٪ و ۱۲٪ انطباق دارد.[۶،۱۳و۱۴] در حد خمیری یافته‌ی لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۱) با افزایش آلودگی حد خمیری کاهش یافته است، اما برعکس در یافته‌های خوش‌نشین لنگرودی و همکاران (۲۰۱۰) حد خمیری افزایش یافته است.[۱۳و۱۴]

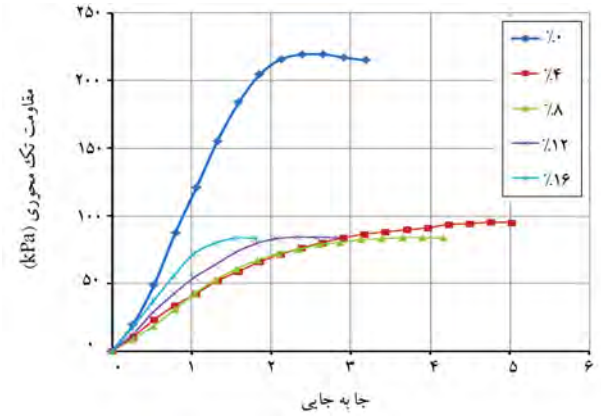
۲.۴. آزمایش تراکم (ASTM D698)

آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک که به‌صورت مصنوعی با گازوئیل ترکیب شده‌اند براساس استاندارد ASTM D698 انجام شده است. با توجه به شکل ۳ با افزایش درصد آلودگی، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه کاهش یافته است، که این به دلیل عدم تشکیل لایه‌ی دوگانه به دلیل غیر قطبی‌بودن گازوئیل و همچنین خاصیت روان‌کنندگی آن است. این نتایج با مطالعات میگودا و همکاران (۱۹۹۸) و ال‌سناد و همکاران (۱۹۹۵) در مورد بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک متفاوت است، به گونه‌یی که در مطالعات آنها با افزایش آلودگی، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک افزایش یافته است، اما در مورد کاهش رطوبت هماهنگی وجود دارد[۳و۴]

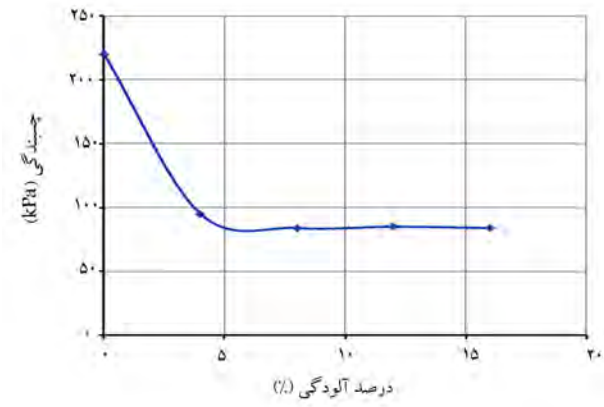
در یافته‌های خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) و لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۱) در مورد کاهش وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه با افزایش آلودگی با یافته‌های تحقیق حاضر انطباق کامل وجود دارد.[۶،۱۳] این هماهنگی در یافته‌های صدقیانی و جیریایی شراهی (۲۰۰۶) به جز در آلودگی ۴٪ نیز مشاهده می‌شود، به صورتی که فقط در آلودگی ۴٪ بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک افزایش و با افزایش آلودگی کاهش می‌یابد.[۱۵]



شکل ۳. تأثیر درصد های مختلف آلودگی در بیشینه‌ی چگالی خشک و رطوبت بهینه.



شکل ۴. تأثیر درصدهای متفاوت گازوئیل در مقاومت تک‌محوری.



شکل ۵. تأثیر درصدهای متفاوت گازوئیل در چسبندگی.

۳.۴.آزمایش مقاومت تک‌محوری(فشاری ساده) (ASTM D2166)

آزمایش تک‌محوری براساس استاندارد ASTM D2166 جهت تعیین مقاومت تک‌محوری خاک‌ها استفاده شده است که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با اضافه شدن گازوئیل، مقاومت خاک به میزان چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است، به گونه‌یی که مقاومت خاک با آلودگی ۱۶٪ و خاک بدون

www.SID.ir

آلودگی بیش از ۶۰٪ اختلاف دارد که بیشترین میزان کاهش در آلودگی به میزان ۵۷٪ است. در ادامه، با افزایش آلودگی، مقاومت خاک با شیب بسیار کمی کاهش یافته است. به نظر میزان مقاومت خاک با درصد آلودگی رابطه‌ی معکوس دارد.

دلیل این کاهش مقاومت عدم تشکیل لایه‌ی دوگانه و کاهش چسبندگی و تغییر رفتار خاک به سمت خاک‌های دانه‌یی است. مطابق شکل ۴، با اضافه شدن آلودگی اگرچه مقاومت کاهش یافته است، اما شکل‌پذیری افزایش یافته و در ادامه با افزایش آلودگی، شکل‌پذیری نیز کاهش یافته است. این نتایج با یافته‌های حد روانی نیز انطباق دارد، به گونه‌یی که در آلودگی ۴٪ حد روانی افزایش یافته و در اینجا نیز شکل‌پذیری افزایش یافته است. یافته‌های به‌دست‌آمده از خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در مورد چسبندگی با اطلاعات موجود کاملاً تطبیق دارد،[۶] به گونه‌یی که با افزایش آلودگی چسبندگی کاهش پیدا کرده است، البته این مطالعات با نتایج خسروی و همکاران (۲۰۱۳) کاملاً بر عکس بوده و با افزایش آلودگی چسبندگی افزایش یافته است، دلیل این تفاوت رفتار متفاوت رس مونتوریلونیت با کائولینیت است.[۱۱]

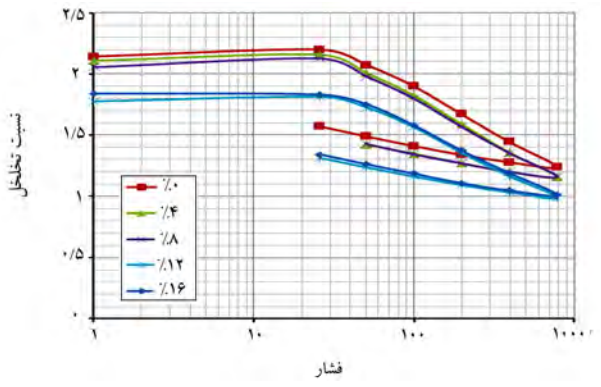
۴.۴. آزمایش تحکیم (ASTM D۲۴۳۵)

برای شناسایی فشردگی‌پذیری و تورم‌پذیری نمونه‌های خاک آلوده، آزمایش تحکیم یک بعدی استاندارد ASTM D۲۴۳۵ انجام شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش آلودگی تا ۴٪ شاخص فشردگی افزایش و پس از آن با افزایش آلودگی تا ۱۲٪ کاهش و مجدداً در آلودگی ۱۶٪ شاخص فشردگی افزایش یافته است. تغییرات شاخص تورم نیز به همین شکل اما به نسبت کمتر است. این یافته‌ها با اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش حدود اتربرگ و تک‌محوری هم‌خوانی دارد.

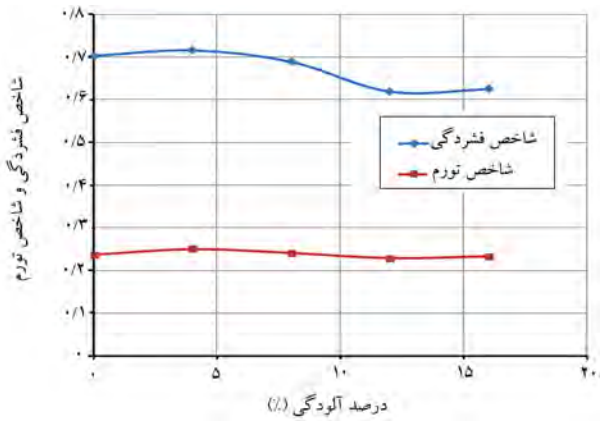
با توجه به غیرقطبی بودن گازوئیل نسبت به آب، این موضوع باعث عدم ایجاد لایه‌ی دوگانه شده است و شاخص فشردگی افزایش یافته است. در ادامه، با توجه به تغییر حالت خاک به سمت ماسه به علت افزایش گازوئیل و از طرفی چون رس بسیار آب‌دوست است و تمایل به جذب آب دارد و گازوئیل قبل از اضافه کردن آب به آن افزوده شده است، این موضوع باعث عدم تورم رس می‌شود، پس شاخص فشردگی آن کاهش پیدا می‌کند، در پایان نیز به علت وجود درصد بالای گازوئیل و به دلیل خاصیت روغن‌کاری آن، باعث لغزش راحت‌تر دانه‌های خاک شده و شاخص فشردگی افزایش یافته است. در مطالعات سینگ و همکاران (۲۰۰۸) و ال‌سناد و همکاران (۱۹۹۵) با افزایش آلودگی، شاخص فشردگی افزایش یافته است، اما این یافته‌ها با تحقیقات خسروی و همکاران (۲۰۱۳) کاملاً در تضاد است؛ به گونه‌یی که با افزایش آلودگی، شاخص فشردگی کاهش یافته است.[۴،۷و۱۱] نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های سینگ و همکاران (۲۰۰۸) و ال‌سناد و همکاران (۱۹۹۵) در آلودگی تا ۴٪ و با یافته‌های خسروی و همکاران (۲۰۱۳) در آلودگی تا ۸٪ و ۱۲٪ هم‌خوانی دارد (شکل ۷).[۴،۷و۱۱]

۵. معادله جهت پیش‌بینی شاخص فشردگی

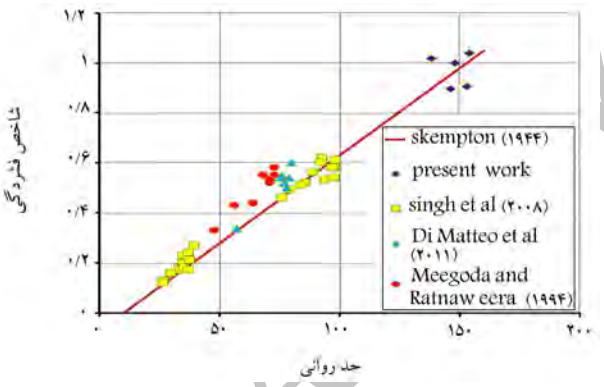
در پایان با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌های میگودا و راتناویرا (۱۹۹۴)، سینگ و همکاران (۲۰۰۸)، ماتئو و همکاران (۲۰۱۱) و پژوهش حاضر، اقدام به به‌دست آوردن معادله‌یی جهت پیش‌بینی شاخص فشردگی براساس حد روانی شده است (شکل ۸).[۳،۷و۹] همان‌گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، معادله‌ی خطی به‌دست آمده، ضریب رگرسیون ۰٫۹۴۴ دارد.



شکل ۶. تغییرات نسبت تخلخل با فشار در درصدهای متفاوت گازوئیل.



شکل ۷. تأثیر درصدهای متفاوت گازوئیل در شاخص فشردگی و شاخص تورم.



شکل ۸. میزان شاخص فشردگی در برابر حد روانی توسط پژوهشگران مختلف در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی.

۶. بررسی آمار استنباطی جهت تأیید اعتبار داده‌های پژوهش

به منظور تأیید اعتبار داده‌ها و بررسی این نکته که آیا اولاً بین متغیر وابسته و مستقل رابطه‌یی وجود دارد و ثانیاً متغیر مستقل تا چه اندازه می‌تواند در متغیر وابسته مؤثر باشد، از آزمون‌های استنباطی در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است، آنچه در ادامه ارائه شده است، نتایج حاصل از آزمون‌های مختلفی همچون: آزمون همبستگی، تحلیل میانگین، و آزمون رگرسیون است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۳. همبستگی داده‌ها.

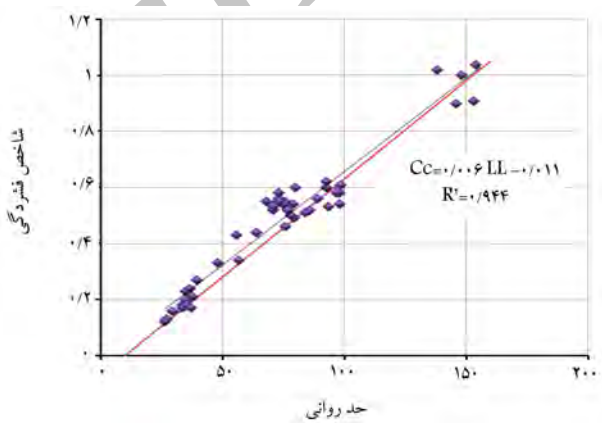
			LL	CC
ضریب همبستگی اسپیرمن *	LL	ضریب همبستگی **	۱/۰۰	۰/۸۹۴**
		خطای معناداری دو دامنه ***		۰/۰۰۰
		تعداد داده‌ها (N)	۴۵	۴۵
	CC	ضریب همبستگی	۰/۸۹۴**	۱/۰۰۰
		خطای معناداری دو دامنه	۰/۰۰۰	
		تعداد داده‌ها (N)	۴۵	۴۵

*Spearmans rho ** Correlation Coefficient *** sig.(2-tailed)

جدول ۴. خلاصه‌ی مدل رگرسیون.

مدل	ضریب رگرسیون (R)	مجذور همبستگی (R Square)	ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted R Square)	خطای استاندارد برآورد (Std. Error of the Estimate)
۱	۰/۹۷۲[a]	۰/۹۴۴	۰/۹۴۳	۰/۵۶۴۶

a. LL: (Predictor) متغیر پیش‌بینی کننده b. CC: (Dependent Variable) متغیر وابسته



شکل ۹. معادله‌ی خطی ارائه‌شده جهت شاخص فشردگی.

۱.۶. آزمون همبستگی

با توجه به جدول ۳، همبستگی بین دو متغیر نزدیک به ۹۰٪ است (۸۹/۴٪) و از طرفی درصد معناداری کمتر از ۰/۰۵ نیز این همبستگی را تأیید می‌کند.

۲.۶. آزمون رگرسیون خطی

در این بخش هدف آن بوده است که اثر متغیر مستقل در وابسته مشخص شود و همچنین میزان اعتبار این اثرگذاری تعیین شود و از سوی دیگر مشخص شود چه میزان از تغییرات متغیر وابسته به تغییرات متغیر مستقل باز می‌گردد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشخص است، ضریب تأثیر متغیر وابسته در مستقل ۰/۹۷۲ و ضریب تعیین نیز معادل ۹۴٪ است. در واقع این یافته نشان می‌دهد که ۹۴٪ از تغییرات متغیر وابسته به تغییرات متغیر مستقل باز می‌گردد.

۷. نتایج

۱. اضافه شدن گازوئیل به میزان ۴٪، حد روانی را افزایش و افزایش آلودگی تا میزان ۱۲٪، حد روانی را کاهش داده و در آخر با افزایش آلودگی تا ۱۶٪، مجدداً حد روانی افزایش یافته است.

۲. حد خمیری در خاک آلوده و غیرآلوده تقریباً ثابت است.

۳. میزان آلودگی با بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه نسبت معکوس دارد، به‌گونه‌یی که با افزایش آلودگی، رطوبت بهینه و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد، که این به دلیل غیرقطبی بودن گازوئیل است.

۴. مقاومت تک‌محوری و چسبندگی با درصد آلودگی نسبت معکوس دارد، به گونه‌یی که با افزایش آلودگی، میزان آن کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش در آلودگی ۴٪ به میزان ۵۷٪ بوده است.

۵. با اضافه شدن گازوئیل به خاک به مقدار ۴٪، شاخص فشردگی افزایش یافته است؛ اما در ادامه، با افزایش آلودگی تا ۱۲٪، شاخص فشردگی کاهش و مجدداً با افزایش آلودگی به ۱۶٪، شاخص فشردگی افزایش یافته است.

منابع (References)

1. Cook, E.E., Puri, V.K. and Shin, E.C. "Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands", International Society of Offshore and Polar Engineers, San Francisco, California, USA (14-19 June 1992).

2. Puri, V.K. and Das, B.M., *Geotechnical Properties of Crude Oilcontaminated Sand*, In: O'Shay, T.A. and Hoddinott, K.B. (Eds.), Analysis of Soils Contaminated with

Archive of SID
www.SID.ir

Petroleum Constituents, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 75-88 (1994).

3. Meegoda, N.J. and Ratnaweera, P. "Compressibility of contaminated fine-grained soils, *Etch. Test. J.*, **17**(1), pp. 101-112 (1994).
4. Al-Sanad, H., Eid, W. and Ismael, N. "Geotechnical properties of oil-contaminated kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(5), pp. 407-412 (1995).
5. Al-Sanad, H.A. and Ismael, N.F. "Aging effects on oil-contaminated kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(3), pp. 290-293 (1997).
6. Khamehchiyan, M.A., Charkhabi, H. and Tajik, M. "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, **89**(3-4), pp. 220-229 (2007).
7. Singh, S.K. and Srivastava, R.K. "Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **17**(3), pp. 290-300 (2008).
8. Skempton, A.W. and Jones, O.T. "Notes on the compressibility of clays", *J. Geol. Soc.*, **100**, pp. 119-135 (1944).
9. Di Matteo, L. and Bigotti, F. "Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(9), pp. 846-849 (2010).
10. 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).
11. Khosravi, E. and Ghasemzadeh, H. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite", *Engineering Geology*, **166**(0), pp. 11-16 (2013).
12. Nasr, A. "Uplift behavior of vertical piles embedded in oil-contaminated sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(1), pp. 162-174 (2013).
13. Lashkaripoor, G., Rajaei, F. and Ghafoori, M. "Impact oil pollution on the mechanical properties of sand, silt and clay", *4th National Conference of Geology PNU* (2011).
14. Khoshneshin Langroodi, M., Yasrebi, S. and Mohamadie akbarabadi, M. "Effect of oil pollution parameters resistance of clay soil", *5th National Congress of Civil Engineering* (2010).
15. Sedghyani, M. and Jiriaee, Sharahi, M. "Effect of oil pollution on strength parameters, settlement and compressibility of sand", *1st National Congress of Civil Engineering* (2004).

Archive of SID

www.SID.ir