

# بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس بنتونیتی آلوده به گازوئیل

سید محمدعلی زهردیان\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی آب، دانشگاه شیراز

وحیدرضا رحیمی حقیقی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسنهبان

مهندسی عمران شیراز، (پاییز ۱۳۹۶)  
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۸۳-۷۷

تمیز کردن خاک‌های آلوده به مشتقات نفتی هزینه‌بر است و یک راه هوشمندانه برای حل مشکل مذکور، استفاده از خاک‌های آلوده در پروژه‌های عمرانی است. آلودگی، ویژگی‌های 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 به صورت 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.

mzomorod@shirazu.ac.ir  
vahid\_6193@yahoo.com

واژگان کلیدی: رس بنتونیتی، ضریب فشردگی پذیری، خاک آلوده، تحکیم.

## ۱. مقدمه

نشست 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 تمیز کردن 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 ذکر شده 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 به دست آمده است که اگرچه آلودگی نفتی، تأثیر چندانی در تراکم ماسه‌های آلوده ندارد، ولی زاویه‌ی اصطکاک را کاهش رفتار شمع‌های موجود در ماسه‌های آغشته به نفت،<sup>[۱]</sup> پرداخته شده است.

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که بین نتایج مطالعات انجام شده بر روی

نشست 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 تمیز کردن 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 ذکر شده 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 به دست آمده است که اگرچه آلودگی نفتی، تأثیر چندانی در تراکم ماسه‌های آلوده ندارد، ولی زاویه‌ی اصطکاک را کاهش

\* نویسنده مسئول

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

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 <sup>۲</sup> /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 ۰٫۶۰ شده است.

#### ۴. نتایج آزمایشگاهی

##### ۴.۱. 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، حد روانی و حد

ویزگی‌های 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 بتونیتی که در مهندسی عمران کاربردهای فراوانی از جمله: پوشش مخازن ذخیره‌ی فاضلاب، بانلاق‌های آب‌های صنعتی، جاسازی زباله‌های اتمی در زیرزمین، احداث سدها، کانال، مخازن، و ترانسه 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

##### ۲.۱. خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر

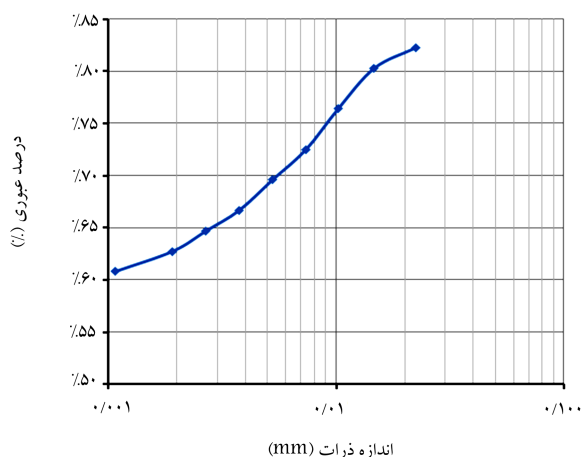
خاک رس بتونیتی از شرکت باریت سفارش داده شده که این خاک از معادن یزد، اصفهان و مشهد بدست می‌آید. نمودار دانه‌بندی (هیدرومتری) و چگالی مخصوص و مشخصات حالت خمیری در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. طبق طبقه‌بندی متحد، خاک مورد استفاده‌ی رس با حالت خمیری بالا (CH) است.

##### 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

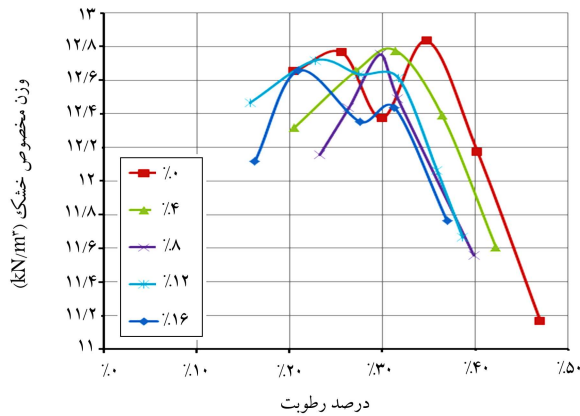
برای تهیه‌ی نمونه، ابتدا خاک موردنظر در گرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و سپس با توجه به وزن خشک خاک، درصد‌های مختلف گازوئیل ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ به خاک اضافه و با هم مخلوط شده‌اند. برای عمل‌آوری خاک، دست‌کم یک هفته مخلوط به‌دست آمده در ظرف‌های سربسته نگهداری و سپس برای انجام آزمایش



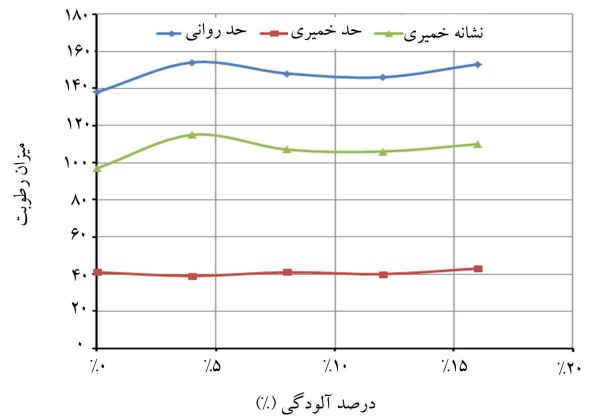
شکل ۱. نمودار دانه بندی.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه.

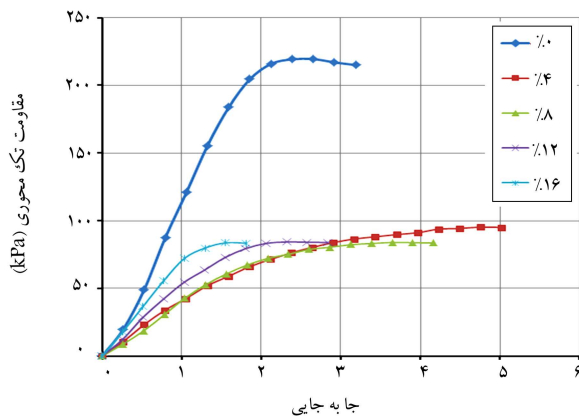
نوع خاک	PI	PL	LL	G <sub>s</sub>
رس بتونیتی	۹۷	۴۱	۱۳۸	۲٫۷۲



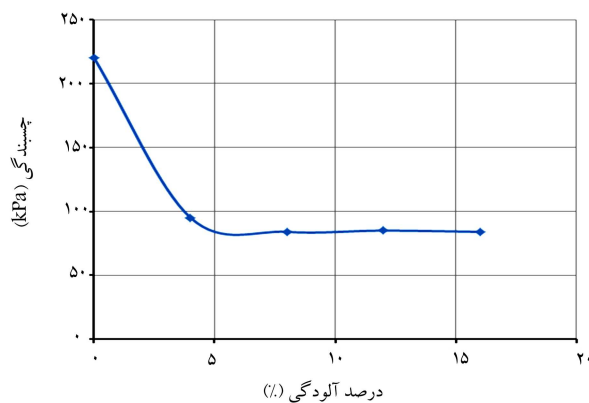
شکل ۳. تأثیر درصد های مختلف آلودگی در بیشینه‌ی چگالی خشک و رطوبت بهینه.



شکل ۴. تأثیر درصد های مختلف آلودگی در حدود اتربرگ.



شکل ۴. تأثیر درصدهای متفاوت گازوئیل در مقاومت تک محوری.



شکل ۵. تأثیر درصدهای متفاوت گازوئیل در چسبندگی.

### ۳.۴. آزمایش مقاومت تک محوری (فشاری ساده) (ASTM D۲۱۶۶)

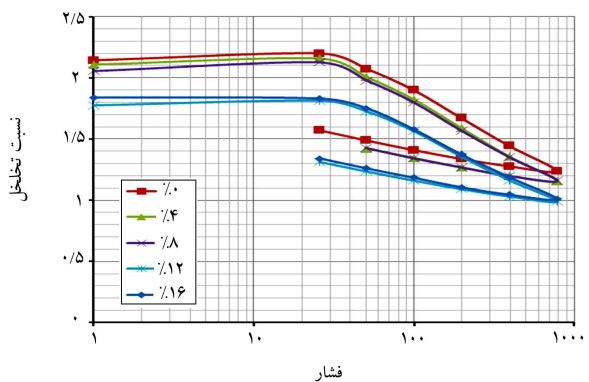
آزمایش تک محوری براساس استاندارد ASTM D۲۱۶۶ جهت تعیین مقاومت تک محوری خاک‌ها استفاده شده است که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با اضافه شدن گازوئیل، مقاومت خاک به میزان چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است، به گونه‌ی که مقاومت خاک با آلودگی ۱۶٪ و خاک بدون

خمیری کاهش می‌یابد.<sup>[۶]</sup> 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.<sup>[۱۱]</sup> 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.

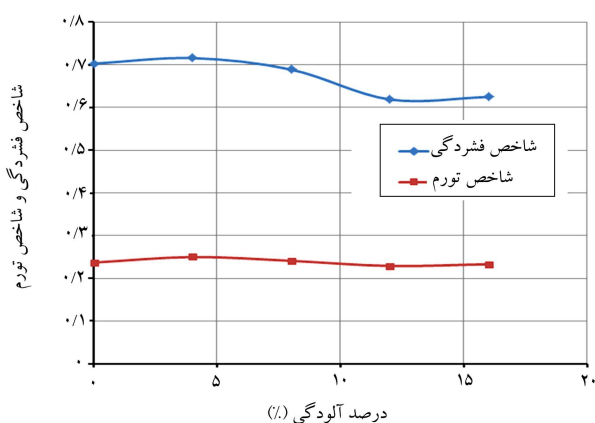
مطالعات لشکری پور و همکاران (۲۰۱۱) و خوش‌نشین لنگرودی و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۱۲]</sup> با یافته‌های خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در حد روانی کاملاً مطابقت داشته‌اند، به گونه‌ی که با افزایش آلودگی حد روانی کاهش پیدا کرده است که یافته‌های مذکور با یافته‌های موجود فقط در آلودگی ۸٪ و ۱۲٪ انطباق دارد.<sup>[۱۳، ۱۴]</sup> در حد خمیری یافته‌ی لشکری پور 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.<sup>[۱۳، ۱۴]</sup>

### ۲.۴. آزمایش تراکم (ASTM D۶۹۸)

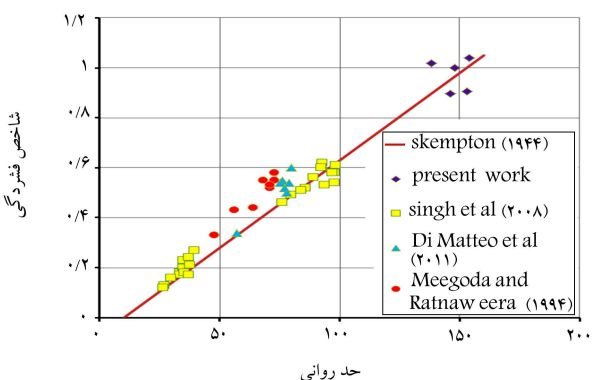
آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های خاک که به صورت مصنوعی با گازوئیل ترکیب شده‌اند براساس استاندارد ASTM D۶۹۸ انجام شده است. با توجه به شکل ۳ با افزایش درصد آلودگی، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه کاهش یافته است، که این به دلیل عدم تشکیل لایه‌ی دوگانه به دلیل غیر قطبی بودن گازوئیل و همچنین خاصیت روان‌کنندگی آن است. این نتایج با مطالعات میگوذا و همکاران (۱۹۹۸) و ال‌سناد و همکاران (۱۹۹۵) در مورد بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک متفاوت است، به گونه‌ی که در مطالعات آنها با افزایش آلودگی، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک افزایش یافته است، اما در مورد کاهش رطوبت هماهنگی وجود دارد.<sup>[۳، ۴]</sup> در یافته‌های خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) و لشکری پور و همکاران (۲۰۱۱) در مورد کاهش وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه با افزایش آلودگی با یافته‌های تحقیق حاضر انطباق کامل وجود دارد.<sup>[۱۳، ۱۴]</sup> 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.<sup>[۱۵]</sup>



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



شکل ۷. تأثیر درصدهای متفاوت گازوتیل 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 رابطه‌ی 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.

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 دانه‌ی است. مطابق شکل ۴، با اضافه شدن آلودگی اگرچه مقاومت کاهش یافته است، اما شکل پذیری افزایش یافته و در ادامه با افزایش آلودگی، شکل پذیری نیز کاهش یافته است. این نتایج با یافته‌های حد روانی نیز انطباق دارد، به گونه‌ی که در آلودگی ۴٪ حد روانی افزایش یافته و در اینجا نیز شکل پذیری افزایش یافته است. یافته‌های به دست آمده از خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) در مورد چسبندگی با اطلاعات موجود کاملاً تطبیق دارد،<sup>[۶]</sup> به گونه‌ی 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 کاتولینیت است.<sup>[۱۱]</sup>

## ۴.۴. آزمایش تحکیم (ASTM D۲۴۳۵)

برای شناسایی فشردگی پذیری و تورم پذیری 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 به دست آمده از آزمایش حدود اتربرگ و تک‌محوری هم‌خوانی دارد.

با توجه به غیرقطبی بودن گازوتیل 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 گازوتیل و از طرفی چون رس بسیار آب‌دوست است و تمایل به جذب آب دارد و گازوتیل 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 گازوتیل 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 گونه‌ی که با افزایش آلودگی، شاخص فشردگی کاهش یافته است.<sup>[۱۱،۷،۴]</sup> 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).<sup>[۱۱،۷،۴]</sup>

## ۵. معادله جهت پیش‌بینی شاخص فشردگی

در پایان با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های میگوذا و راتنویرا (۱۹۹۴)، سینگ و همکاران (۲۰۰۸)، ماتو و همکاران (۲۰۱۱) و پژوهش حاضر، اقدام به به دست آوردن معادله‌ی جهت پیش‌بینی شاخص فشردگی براساس حد روانی شده است (شکل ۸).<sup>[۹،۷،۴]</sup> همان‌گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، معادله‌ی خطی به دست آمده، ضریب رگرسیون ۰/۹۴۴ دارد.

جدول ۳. همبستگی داده‌ها.

CC	LL	
۰٫۸۹۴**	۱٫۰۰	ضریب همبستگی **
۰٫۰۰۰		خطای معناداری دو دامنه *** LL
۴۵	۴۵	تعداد داده‌ها (N)
		ضریب همبستگی اسپیرمن *
۱٫۰۰۰	۰٫۸۹۴**	ضریب همبستگی
	۰٫۰۰۰	خطای معناداری دو دامنه CC
۴۵	۴۵	تعداد داده‌ها (N)
* Spearmans rho		** Correlation Coefficient *** sig.(2-tailed)

جدول ۴. خلاصه‌ی مدل رگرسیون.

مدل	ضریب رگرسیون (R)	مجدور همبستگی (R Square)	ضریب تعیین تعدیل شده (Adjusted R Square)	خطای استاندارد برآورد (Std. Error of the Estimate)
۱	۰٫۹۷۲ <sup>a</sup>	۰٫۹۴۴	۰٫۹۴۳	۰٫۵۶۴۶

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

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 ۰٫۹۴ است. در واقع این یافته نشان می‌دهد که ۰٫۹۴٪ از تغییرات متغیر وابسته به تغییرات متغیر مستقل باز می‌گردد.

## ۷. نتایج

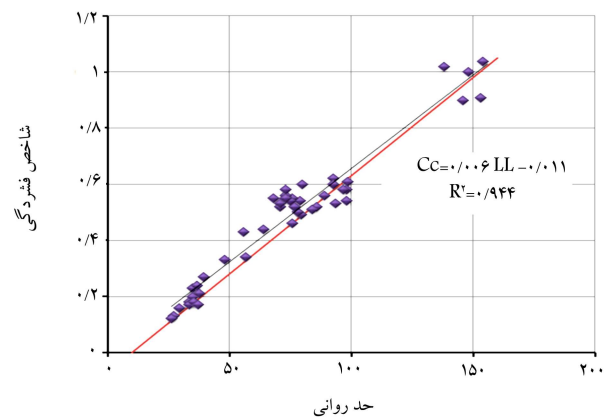
۱. اضافه شدن گازوتیل به میزان ۰٫۴٪، حد روانی را افزایش و افزایش آلودگی تا میزان ۰٫۱۲٪، حد روانی را کاهش داده و در آخر با افزایش آلودگی تا ۰٫۱۶٪، مجدداً حد روانی افزایش یافته است.

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، به‌گونه‌ی که با افزایش آلودگی، رطوبت بهینه و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد، که این به دلیل غیرقطبی بودن گازوتیل است.

۴. مقاومت تک‌محوری و چسبندگی با درصد آلودگی نسبت معکوس دارد، به گونه‌ی که با افزایش آلودگی، میزان آن کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش در آلودگی ۰٫۴٪ به میزان ۰٫۵۷٪ بوده است.

۵. با اضافه شدن گازوتیل به خاک به مقدار ۰٫۴٪، شاخص فشردگی افزایش یافته است؛ اما در ادامه، با افزایش آلودگی تا ۰٫۱۲٪، شاخص فشردگی کاهش و مجدداً با افزایش آلودگی به ۰٫۱۶٪، شاخص فشردگی افزایش یافته است.



شکل ۹. معادله‌ی خطی ارائه‌شده جهت شاخص فشردگی.

## ۱.۶. آزمون همبستگی

با توجه به جدول ۳، همبستگی بین دو متغیر نزدیک به ۰٫۹۰ است (۰٫۸۹/۴) 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

## منابع (References)

1. Cook, E.E., Puri, V.K. and Shin, E.C. "Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands", Inter-

national 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 Hod-dinott, K.B. (Eds.), *Analysis of Soils Contaminated with*

- 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. Khamsehchiyan, 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).