

## ارزیابی ریزساختاری تأثیر هم‌زمان آلاینده فلز سنگین سرب و گازوئیل بر پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه- بنتونیت

سپیده طاهری<sup>۱</sup>، تقی عبادی<sup>۲</sup>، رضا مکنون<sup>۳</sup> و محمد امیری<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

(دریافت: ۹۶/۷/۱۵، پذیرش: ۹۷/۲/۱، نشر آنلاین: ۹۷/۲/۲)

### چکیده

امروزه آلودگی خاک‌ها توسط آلاینده‌های آلی و غیرآلی، به عنوان یک معضل زیست‌محیطی در گستره وسیعی مطرح شده است. گازوئیل به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین آلاینده‌های نفتی و سرب به عنوان یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین به شمار می‌آید که حضور آن‌ها تهدید بزرگی برای اکوسیستم منطقه است. حضور این آلاینده‌ها در خاک علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، از نظر ژئوتکنیکی نیز دارای اهمیت زیادی بوده و موجب تغییر رفتار خاک می‌شود، به همین دلیل ساختار خاک‌ها در حضور این آلاینده‌ها باید مورد ارزیابی قرار گیرند. از این‌رو هدف از این پژوهش بررسی تأثیر توأم آلاینده فلز سنگین سرب و آلاینده آلی گازوئیل از منظر ریزساختاری در رفتار ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک است. در این مقاله پارامترهای مقاومتی خاک از طریق آزمایش‌های تراکم و برش مستقیم بر روی نمونه‌های آلوده و غیرآلوده مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای ریزساختاری از طریق بررسی ریخت‌شناسی خاک (از طریق آزمایش SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته نشان‌دهنده افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه در نمونه‌های آلوده به هریک از آلاینده‌های گازوئیل و سرب است. پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز در نمونه‌های آلوده به گازوئیل به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند، در حالی که در نمونه‌های آلوده به سرب، کاهش در چسبندگی و عدم تغییر محسوس زاویه اصطکاک داخلی مشاهده شد.

**کلیدواژه‌ها:** آلودگی خاک، پارامترهای مقاومتی، ضخامت لایه دوگانه، ریزساختار.

### ۱- مقدمه

کشورهای صنعتی استفاده از مخلوط‌های متراکم شده ماسه- بنتونیت (SEM)<sup>۱</sup> به دلیل نفوذپذیری پایین و عدم آسیب‌پذیری ناشی از ترک‌های انقباضی، می‌توانند جایگزین مناسبی برای آسترهای رسی در مدفن‌های مهندسی باشند (Alston و همکاران، ۱۹۹۷). نتایج آزمایش‌های محققان پیشین در بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه با درصدهای مختلف بنتونیت نشان داد که ترکیبات حاوی ۲۰ تا ۳۰ درصد بنتونیت و ۸۰ درصد ماسه، بهینه‌ترین ترکیب به عنوان جایگزین آستر رسی در کف مدفن زباله است (Ada، ۲۰۰۷؛ Cyrus، ۲۰۱۲).

فعالیت در بخش‌های مختلف صنعتی، طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی و غیرآلی را به محیط‌زیست وارد کرده و منجر به آلودگی سایت‌های بسیاری شده است (Wang و همکاران، ۲۰۱۵). آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب در اکثر نقاط جهان است که ممکن است به دلیل نشت شیرابه از مراکز دفن زباله دستخوش تغییرات نامطلوبی شود (Uddin، ۲۰۱۷). احداث محل‌های دفن مهندسی زباله یکی از راهکارهای حل مشکلات زیست‌محیطی است تا بتوان از انتقال آلودگی به لایه‌های زیرین خاک و آلودگی آب‌های زیرزمینی جلوگیری کرد. در

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این مطالعه از مخلوط ۸۰ درصد وزنی ماسه ۱۶۱ شرکت "تأمین ماسه ریخته‌گری فیروزکوه" و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت سدیمی شرکت "اراک پودر"، تهیه شد. در جدول (۱) برخی مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش بر مبنای استاندارد ASTM 1994 آورده شده است. چگالی و pH نمونه‌های مورد استفاده به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM, D854 و ASTM, D4972 تعیین شده است (ASTM, ۱۹۹۴). برای تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)، از محلول باریم کلراید استفاده شد. به این منظور ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)، با افزودن محلول کلرید باریم ۰/۱ مولار تعیین شده است. سوسپانسیون ۱ به ۱۰ (۴ گرم خاک خشک به ۴۰ میلی‌لیتر محلول کلرید باریم)، توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شده است. پس از ۷۲ ساعت نگهداری، توسط سانتریفیوژ با سرعت rpm ۳۰۰۰، فاز مایع و جامد از هم جدا شده است. مقادیر کاتیون‌های سدیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم موجود در فاز مایع، به وسیله دستگاه جذب اتمی<sup>۲</sup> (AAS) اندازه‌گیری شده است. مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی از جمع مقادیر کاتیون‌های اندازه‌گیری شده در فاز مایع به دست آمده است (Duquette و Hendershot, ۱۹۸۶). برای تعیین سطح مخصوص خاک از محلول EGME و برای تعیین درصد کربنات خاک از روش تیتراسیون استفاده شده است (Arnold و Eltantawy, ۱۹۷۳; Hesse, ۱۹۷۱).

### ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، گازوئیل تهیه شده از پالایشگاه تهران با دانسیته ۰/۸۲۳ kg/L، ویسکوزیته سینماتیک ۲/۵-۲ mm<sup>2</sup>/s و نقطه جوش ۳۸۵ درجه سلسیوس به عنوان آلاینده نفتی و همچنین نمک نیترات سرب با خلوص ۹۹/۹٪ تولید شده توسط شرکت مرک آلمان به عنوان آلاینده فلز سنگین انتخاب شدند. جهت آماده‌سازی نمونه‌های آلوده به سرب، خاک به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، خشک و سپس از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) عبور داده شد. همچنین به منظور بررسی اندرکنش نمونه‌ها با آلاینده فلز سنگین سرب از آزمایش تعادل مخلوط اشباع استفاده شد. به همین دلیل تعدادی آزمایش نگهداری فلز سنگین، به روش تعادل سوسپانسیون اشباع خاک (EPA, ۱۹۸۳) در غلظت‌های مختلف آلاینده فلز سنگین سرب به شرح ذیل انجام شد. ابتدا محلول‌های شامل نیترات سرب Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> در غلظت‌های ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ cmol/kg-soil تهیه شد.

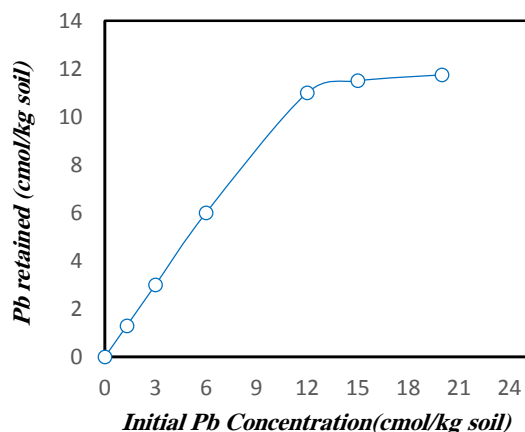
همچنین آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین منجر به تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی خاک می‌شوند؛ بنابراین اطلاع از ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده ضروری است. از این رو پژوهشگران با مطالعه روی ماسه‌های آلوده به نفت خام دریافتند که مقاومت فشاری، نفوذپذیری، وزن مخصوص خشک بیشینه، درصد رطوبت بهینه و حدود اتربرگ نمونه‌ها کاهش می‌یابد (khamehchiyan, ۲۰۰۷). از سوی دیگر مطالعات محققین حاکی از افزایش زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خشک بیشینه، شاخص فشرده‌پذیری و حدود اتربرگ و همچنین کاهش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد آلاینده در خاک‌های ریزدانه بود (Ebadi و Kermani, ۲۰۱۲). خواص مکانیکی کاتولینیت آلوده به گازوئیل نشان داد که در اثر آلودگی، چسبندگی خاک افزایش یافته در حالی که زاویه اصطکاک داخلی و فشرده‌پذیری خاک کاهش می‌یابد (Khosravi و همکاران, ۲۰۱۳). بررسی تأثیر مشتقات نفتی روی خواص ژئوتکنیکی ماسه‌های ریز نشان داد که چسبندگی خاک تا حدود ۱٪ آلودگی به نفت خام افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین کاهش زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری خاک نیز مشاهده شد (Abousnina و همکاران, ۲۰۱۵). مطالعات دیگر روی تأثیر شیمی سیال حفره‌ای نشان داد که مواد شیمیایی آلی تمایل به انقباض لایه دوگانه داشته که در پی آن نیروهای دافعه کاهش یافته و فلاک شدن ذرات اتفاق می‌افتد (Daniel و Bowders, ۱۹۸۷). با انجام آزمایش روی خاک‌های رس تهران آلوده به سه ماده غیر آلی NaCl, CaCl<sub>2</sub> و MgCl<sub>2</sub> مشخص شد که وزن مخصوص خشک بیشینه و هدایت هیدرولیکی افزایش یافته در حالیکه درصد رطوبت بهینه، شاخص فشرددگی، تورم‌پذیری و حد روانی کاهش پیدا می‌کند (Shariatmadari و همکاران, ۲۰۱۲). تأثیر شیرابه مراکز دفن زباله بر روی رس استانبول نشان داد که ضریب نفوذپذیری افزایش و مقاومت خاک کاهش می‌یابد. همچنین نتایج بررسی خاک‌های آلوده به سرب حاکی از افزایش هدایت هیدرولیکی و وزن مخصوص خشک بیشینه و کاهش حدود اتربرگ و درصد رطوبت بهینه با افزایش غلظت آلودگی بود که علت این امر را می‌توان با توجه به تئوری لایه دوگانه توضیح داد (Li و همکاران, ۲۰۱۵). در مناطق نفت‌خیز و مراکز صنعتی تولیدکننده فرآورده‌های نفتی، خاک می‌تواند بصورت هزمان در معرض آلودگی‌های نفتی و فلزات سنگین قرار گیرد. هرچند مطالعات گسترده‌ای بر روی تأثیر آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین بر روی خاک انجام شده است، اما اثر توأم این دو آلاینده بر روی خاک به صورت محدود مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از انجام این تحقیق بررسی رفتاری خواص مکانیکی خاک‌های آلوده از منظر ریزساختاری به ترکیب آلاینده‌های آلی و فلز سنگین است.

تهیه شد. در این پژوهش، آزمایش تراکم پروکتور استاندارد و برش مستقیم به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM D698 و ASTM 3080 انجام شد. همچنین برای مطالعه ساختار و مرفولوژی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل (TESCAN-510) SEM-01 استفاده شد و نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفتند.

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

#### ۳-۱- بررسی اندرکنش خاک با آلاینده سرب

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱)، تا غلظت حدود ۱۲ cmol/kg soil آلاینده فلز سنگین سرب ترکیب ماسه- بنتونیت توانایی نگهداری تمام آلاینده‌های فلز سنگین ورودی را دارد. از آنجایی که ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک حاوی ۲۰٪ بنتونیت، معادل یک پنجم ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک حاوی ۱۰۰٪ بنتونیت است، غلظت ۱۲ cmol/kg soil به عنوان بالاترین غلظت در این تحقیق در نظر گرفته شد. لذا با افزایش غلظت آلاینده سرب به بیش از ۱۲ cmol/kg soil (تا سطح ظرفیت تبادل کاتیونی خاک)، توانایی خاک برای جذب کاهش یافته و شیب منحنی جذب کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد.



شکل ۱- منحنی جذب و نگهداری آلاینده فلز سنگین سرب در غلظت‌های مختلف

#### ۳-۲- بررسی تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه و

##### درصد رطوبت بهینه

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲)، حضور سرب منجر به افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه خاک از ۱/۷۵ gr/cm<sup>3</sup> به ۱/۸۴ gr/cm<sup>3</sup> شده است. بر اساس نتایج ارائه شده حضور ۶ cmol/kg soil آلاینده فلز سنگین سرب وزن مخصوص خشک بیشینه را حدود ۰/۴٪ افزایش و به ۱/۸۲ gr/cm<sup>3</sup> رسیده است. در حضور ۱۲ cmol/kg soil آلاینده فلز سنگین سرب وزن مخصوص خشک بیشینه به ۱/۸۴ gr/cm<sup>3</sup> افزایش یافته است. از سوی دیگر

یک گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. سپس ۵۰ میلی‌لیتر از الکترولیت مورد نظر به خاک اضافه شد این سوسپانسیون الکترولیت- خاک به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شد. آنگاه پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف ایجاد شرایط تعادل، این سوسپانسیون مجدداً به مدت سه ساعت توسط لرزاننده الکتریکی کاملاً هم زده شده و نمونه‌ها حدود ۱۲۰ ساعت دیگر نگهداری شده تا سیستم کاملاً همگن شده و تبادل کاتیونی لازم صورت گیرد. سپس فاز مایع نمونه از فاز جامد خاک به وسیله سانتریفیوژ نمودن با سرعت ۳۰۰۰ rpm جدا شده و غلظت یون سرب در فاز مایع جدا شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی<sup>۳</sup> ساخت شرکت Varian استرالیا مدل 220z آنالیز شد. با تفاضل مقدار غلظت سرب باقی‌مانده در فاز مایع از غلظت سرب اولیه اضافه شده به نمونه، مقدار سرب نگهداری شده در خاک تعیین و گزارش شده است. پس از این مدت خاک آلوده به سرب با استفاده از سانتریفیوژ از محلول خارج شده، خشک شده و پس از خرد کردن از الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) عبور داده شد.

#### جدول ۱- برخی از خواص ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست-

محیطی خاک مورد استفاده		
پارامتر	بنتونیت	ماسه
مقدار (%)	۲۰	۸۰
حد روانی (%)	۳۱۸	--
حد خمیری (%)	۳۶	--
شاخص خمیری (%)	۲۸۲	--
G <sub>s</sub>	۲/۸	۲/۶۴
طبقه بندی خاک	CH	SP
e <sub>max</sub>	---	۰/۸۱۶
e <sub>min</sub>	---	۰/۵۲۵
D <sub>50</sub> (mm)	---	۰/۲۶
D <sub>10</sub> (mm)	---	۰/۱۵
ضریب یکنواختی (C <sub>u</sub> )	---	۱/۶
ضریب انحنای (C <sub>s</sub> )	---	۱/۱۴
pH	۹/۶	۷/۲
درصد کربنات	۲	---
سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /g)	۴۱۵±۵	---
Na <sup>+</sup>	۴۱/۳	---
Ca <sup>2+</sup>	۶/۸	---
Mg <sup>2+</sup>	۱/۵۸	---
K <sup>+</sup>	۰/۸۵	---
مجموع	۵۰/۵۳	---

همچنین نمونه‌های آلوده به گازوئیل نیز در درصدهای وزنی مشخص صفر، ۴، ۸ و ۱۲ درصد از خاک غیر آلوده و آلوده به سرب

Vermeera, ۱۹۹۶؛ Das, ۲۰۱۳). همچنین زاویه اصطکاک داخلی با افزایش غلظت آلاینده سرب، تغییرات چشمگیری نداشته است. شایان ذکر است نتایج ارائه شده با یافته‌های پیشین سازگاری مناسبی دارد (Li و همکاران، ۲۰۱۵).

از سوی دیگر طبق نتایج ارائه شده در شکل (۳)، در نمونه‌های آلوده به ۱۲٪ آلودگی گازوئیل، چسبندگی از  $0.45 \text{ kg/cm}^2$  به  $0.53 \text{ kg/cm}^2$  یعنی در حدود ۱۸٪ افزایش و زاویه اصطکاک داخلی نیز به میزان ۱۴٪ کاهش یافته است. تحقیقات انجام شده روی خاک رس آلوده به درصد‌های وزنی مختلف گازوئیل نشان داد که میزان چسبندگی خاک بر اثر فرایند مکش افزایش می‌یابد. وجود مواد آلی از جمله هیدروکربن‌های نفتی باعث کاهش دافعه بین ذرات رس می‌شود؛ اما این کاهش دافعه به هیچ عنوان نمی‌تواند منجر به افزایش چسبندگی خاک شود.

از آنجایی که نمونه‌ها در اثر آلودگی به گازوئیل ساختار فلوکوله‌ای پیدا می‌کنند، به دلیل بالا بودن پتانسیل سطحی مونت موریلونیت، اثر فلوکوله شدن غالب است، بنابراین افزایش چسبندگی ناچیز نمونه‌ها را می‌توان ناشی از مکش بافتی دانست (Khosravi و همکاران، ۲۰۱۳). از سوی دیگر گازوئیل، ثابت دی-الکترونیک کمی را در مقایسه با آب دارد. با کاهش ثابت دی‌الکترونیک در سیال منفذی، چسبندگی خاک افزایش می‌یابد (Sridharan و Rao, ۱۹۷۹؛ Kaya و Fang, ۲۰۰۰). از سوی دیگر ویسکوزیته گازوئیل بیشتر از آب است، بنابراین توانایی بیشتری را برای مقاومت در برابر نیروهای برشی دارد. در حقیقت به همین دلیل است که گازوئیل می‌تواند به طور جداگانه در مقابل نیروهای برشی مقاومت کند و منجر به افزایش چسبندگی ظاهری خاک شود (Naeshi و همکاران، ۲۰۱۶).

همچنین بر اساس نتایج اخذ شده از شکل (۴) می‌توان بیان نمود که در اثر افزایش آلودگی به گازوئیل از صفر تا ۱۲٪، زاویه اصطکاک داخلی حدود  $14/5$ ٪ کاهش یافته و از  $29/4$  به  $25/2$  درجه رسیده است. در حقیقت این کاهش را می‌توان به این دلیل دانست که گازوئیل سطح ذرات خاک را پوشانده و همچون یک روان‌کننده عمل کرده و در نتیجه باعث می‌شود دانه‌ها روی هم لغزیده و قفل و بست بین آن‌ها کمتر شود. این مشاهدات با نتایج به دست آمده از تحقیقات سایر محققین مطابقت دارد (Khosravi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Shin و همکاران، ۲۰۰۲). از آنجایی که خاک در اثر آلودگی به غلظت‌های مختلف سرب، بر زاویه اصطکاک داخلی تأثیر محسوسی نداشت، لذا می‌توان تغییرات این پارامتر را در اثر آلودگی به گازوئیل به خاصیت روان‌کنندگی گازوئیل نسبت داد. همچنین طبق نتایج ارائه شده در شکل (۳)، در هر نمونه آلوده به غلظت مشخص سرب، با افزایش درصد آلودگی به گازوئیل، زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۴ درجه کاهش می‌یابد.

افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین سرب موجب کاهش درصد رطوبت بهینه شده است، به نحوی که حضور  $12 \text{ cmol/kg soil}$  آلاینده فلز سنگین سرب درصد رطوبت بهینه را به ۱۳٪ کاهش داده است.

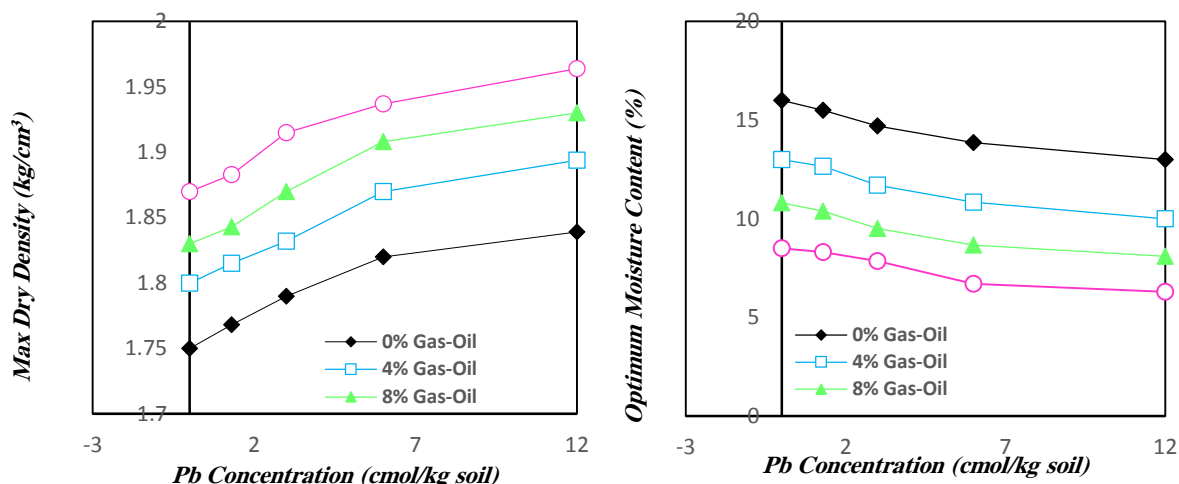
در حقیقت به دلیل فعل و انفعالات شیمیایی بین خاک و سرب، ضخامت لایه دوگانه کانی رسی کاهش یافته که در پی آن، ذرات بهم نزدیک‌تر شده و ساختار خاک فلاک می‌شود. این مسئله باعث انسجام<sup>۴</sup> بهتر ذرات تحت انرژی یکسان تراکم می‌شود. از این رو وزن مخصوص خشک بیشینه افزایش می‌یابد. نزدیک شدن ذرات بهم باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب شده و درصد رطوبت بهینه از ۱۶٪ به ۱۳٪ کاهش می‌یابد. شایان ذکر است نتایج آزمایش‌های تراکم با مطالعات دیگر پژوهشگران تطابق مناسبی دارد (Singh و Prasad, ۲۰۰۷؛ Nayak و همکاران، ۲۰۱۰؛ Li و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۲)، با افزایش درصد آلودگی به گازوئیل، وزن مخصوص خشک بیشینه از  $1/75 \text{ gr/cm}^3$  به  $1/87 \text{ gr/cm}^3$  افزایش و درصد رطوبت بهینه از ۱۶٪ به ۸/۵٪ کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند به دلیل خاصیت روان‌کنندگی گازوئیل باشد که منجر به تسهیل تراکم می‌شود (Al-Sanad و همکاران، ۱۹۹۵). علاوه بر این، از آنجایی که گازوئیل آب‌گریز است، اطراف ذرات خاک را احاطه کرده و مانع از تماس آب با خاک می‌شود، بنابراین مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می‌یابد (Akinwumi و همکاران، ۲۰۱۴).

طبق نتایج ارائه شده، در غلظت‌های مشخص از فلز سنگین سرب، با افزایش درصد آلودگی گازوئیل از صفر تا ۱۲٪، مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه در حدود ۶ تا ۷ درصد افزایش و درصد رطوبت بهینه در حدود ۴۶ تا ۵۱ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به دلایل ذکر شده این روند منطقی به نظر می‌رسد.

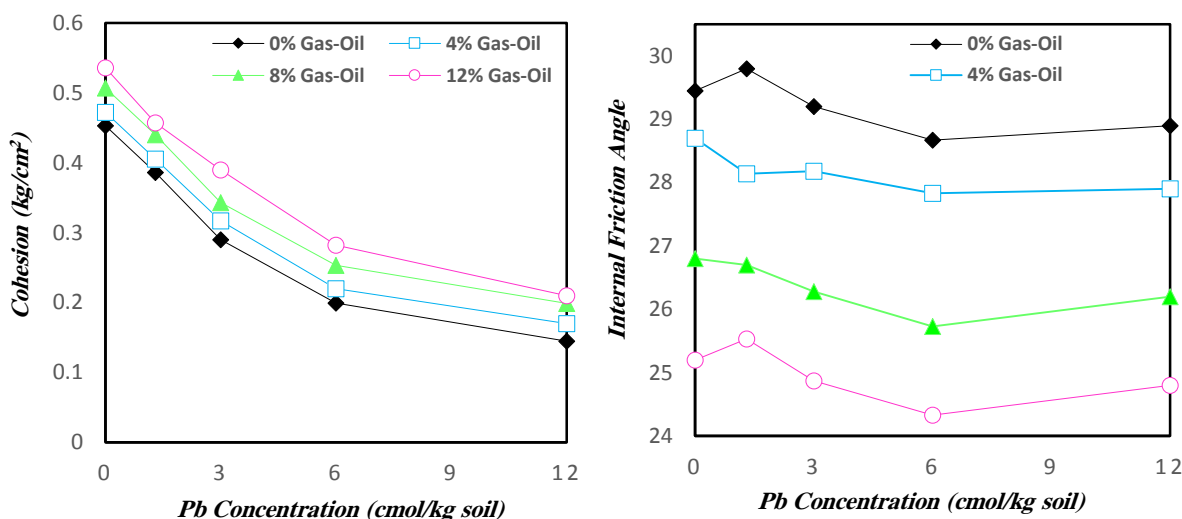
### ۳-۳- بررسی پارامترهای مقاومتی خاک

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳) با افزایش  $12 \text{ cmol/kg soil}$  غلظت آلودگی سرب در خاک، چسبندگی خاک از  $0.45 \text{ Kg/cm}^2$  حدود  $0.68$ ٪ کاهش یافته و به مقدار  $0.14 \text{ Kg/cm}^2$  رسیده است. در حقیقت وجود بار منفی کانی‌های رسی منجر به جذب کاتیون‌های موجود در آب حفره‌ای می‌شود. با افزایش آلودگی، میزان بار منفی سطح رس کاهش یافته و سطح خاک به حالت خنثی نزدیک می‌شود. به همین دلیل تمایل به جذب آب کم شده و ضخامت لایه دوگانه کاهش می‌یابد. در پی این فرایند، چسبندگی هم روند کاهشی خواهد داشت.

زاویه اصطکاک داخلی با توجه به اندازه دانه‌ها، چگالی، شکل ذرات و آرایش هندسی ذرات کنترل می‌شود (Schanza و



شکل ۲- تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های فاقد آلودگی، آلوده به فلز سنگین سرب، گازوئیل و ترکیب آلاینده فلز سنگین سرب و گازوئیل

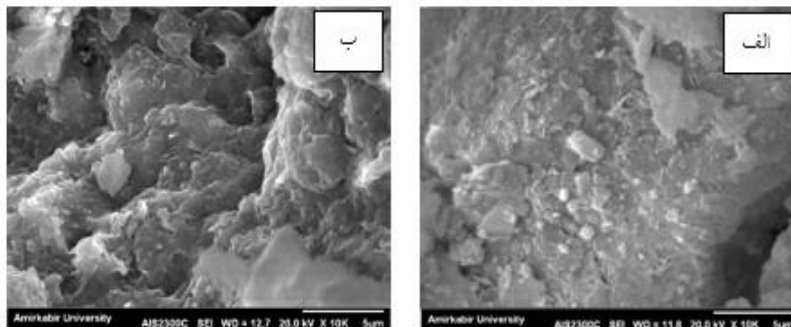


شکل ۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های فاقد آلودگی، آلوده به فلز سنگین سرب، گازوئیل و ترکیب آلاینده فلز سنگین سرب و گازوئیل

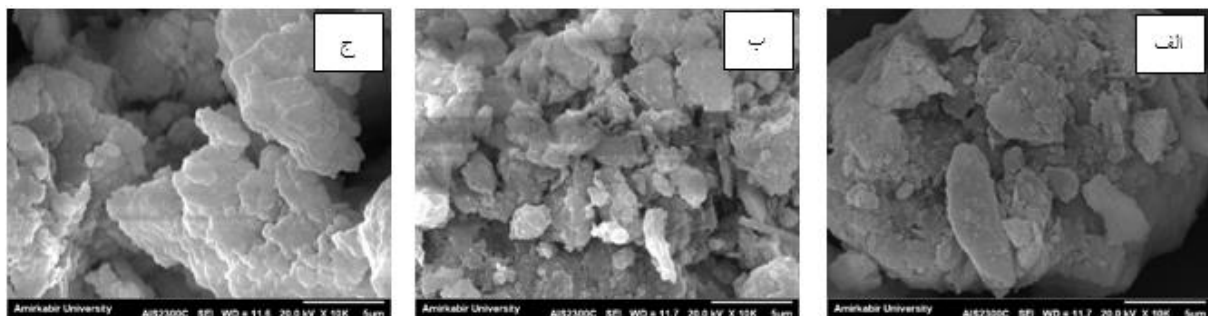
علت این امر پوشش اطراف ذرات رسی با گازوئیل است که منجر به توده‌ای شدن ذرات می‌شود. این توده‌ها اندازه‌ای در حد سیلت یا ماسه دارند (Rehman و همکاران، ۲۰۰۷). در حقیقت، هنگامی که سرب و گازوئیل به‌طور جداگانه به خاک اضافه می‌شوند، ساختار خاک دستخوش تغییراتی از جمله تغییرات اندازه دانه‌ها، توده‌ای شدن و ایجاد فضاهای خالی بزرگ‌تر می‌شوند. بنابراین ترکیب این دو آلاینده در خاک منجر به تشدید تغییرات ریزساختاری خاک می‌شوند. شکل (۶) تأثیر ۳ cmol/kg soil آلاینده فلز سنگین سرب را به همراه درصدهای مختلف گازوئیل نشان می‌دهد. در این حالت شدت توده‌ای شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد در حالی که فضاهای خالی به بزرگی حالت قبل نیستند، چرا که گازوئیل موجود فضاهای خالی را با پوشاندن اطراف ذره‌ها پر می‌کند.

### ۳-۵- بررسی ریخت‌شناسی خاک آلود

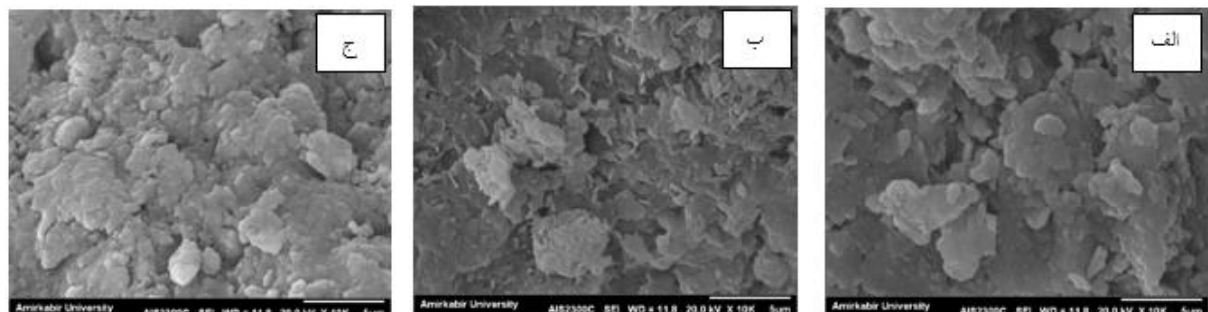
تصاویر ریخت‌شناسی خاک‌های تمیز و آلوده به سرب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی تهیه شد. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، نمونه‌های بدون آلودگی ساختار ورقه‌ای دارند. با افزایش غلظت سرب به ۳ cmol/kg soil ساختار خاک حالت درهم به خود گرفته و ساختار مجتمع و حفرات بزرگ‌تری پیدا می‌کنند (شکل ۴-ب). این مشاهدات با نتایج سایر محققین تطبیق دارد (اوحدی و همکاران، ۱۳۹۴). بر طبق نظریه گوی چپمن (Li و همکاران، ۲۰۱۵) علت این امر، کاهش ضخامت لایه دوگانه و نیروهای دافعه است که منجر به لخته شدن ذرات رسی خاک می‌شود. بر اساس تصاویر ارائه شده در شکل (۵) مشاهده می‌شود، اندازه ذرات در نمونه‌های آلوده به گازوئیل به‌طور چشمگیری بزرگ‌تر از نمونه بدون آلودگی است.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر برای نمونه‌های خاک: الف) فاقد آلودگی، ب) آلوده به  $3 \text{ cmol/kg soil}$  آلاینده فلز سنگین سرب



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر برای نمونه‌های خاک حاوی: الف) ۴ درصد وزنی گازوئیل، ب) ۸ درصد وزنی گازوئیل و ج- ۱۲ درصد وزنی گازوئیل



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی پویشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر برای نمونه‌های خاک آلوده به: الف)  $3 \text{ cmol/kg soil}$  آلاینده فلز سنگین سرب و ۴ درصد وزنی گازوئیل، ب)  $3 \text{ cmol/kg soil}$  آلاینده فلز سنگین سرب و ۸ درصد وزنی گازوئیل، ج)  $3 \text{ cmol/kg soil}$  آلاینده فلز سنگین سرب و ۱۲ درصد وزنی گازوئیل

#### ۴- نتیجه‌گیری

به طور کلی آلوده شدن خاک به گازوئیل و آلاینده فلز سنگین سرب، باعث تغییر رفتار در مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی خاک می‌شود که این تغییر رفتار برای خاک مورد مطالعه در این پژوهش به شرح زیر است:

میزان آلودگی سرب از صفر تا  $3 \text{ cmol/kg soil}$ ، ۱۲ درصد رطوبت بهینه از ۱۶٪ به ۱۳٪ کاهش و وزن مخصوص خشک بیشینه از  $1.75 \text{ gr/cm}^3$  به  $1.84 \text{ gr/cm}^3$  افزایش می‌یابد.

- در غلظت‌های مشخص آلودگی فلز سنگین سرب (از صفر تا  $3 \text{ cmol/kg soil}$ )، با افزایش درصد گازوئیل از صفر تا ۱۲٪، ۱۲ درصد رطوبت بهینه حدود ۴۶ تا ۵۰ درصد کاهش و وزن مخصوص خشک بیشینه حدود ۶ تا ۷ درصد افزایش می‌یابد.

- با افزایش میزان آلودگی گازوئیل از صفر تا ۱۲ درصد وزنی خاک خشک، درصد رطوبت بهینه از ۱۶٪ به ۸/۵٪ کاهش و وزن مخصوص خشک بیشینه از  $1.75 \text{ gr/cm}^3$  به  $1.87 \text{ gr/cm}^3$  افزایش می‌یابد؛ بنابراین خصوصیات تراکم‌پذیری خاک بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش

- mechanical properties of fine sand", *Soil Sediment Contamination*, 2015, 24 (8), 833-845.
- Ada MAHR, "Performance assessment of compacted bentonite/sand mixtures utilized as isolation material in underground waste disposal repositories", Master Thesis, Middle East technical university, 2007.
- Akinwumi II, Diwa D, Obianigwe N, "Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay", *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 2014, 3(4), 816-824.
- Al-Sanad HA, Eid WK Ismael NF, "Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand. *Journal of geotechnical engineering*", 1995, 121(5), 407-412.
- Alston C, Daniel DE Devroy DJ, "Design and construction of sand-bentonite liner for effluent treatment lagoon, Marathon, Ontario", *Canadian geotechnical journal*, 1997, 34(6), 841-852.
- ASTM, "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 4 (8), Philadelphia, US, 1994.
- Bowders Jr JJ, Daniel DE, "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987, 113(12), 1432-1448.
- Cyrus S, "Studies on the development and control of desiccation cracks in compacted clay liner soils", 2012.
- Das BM "Advanced soil mechanics", CRC Press, 2013.
- Eltantawy IM, Arnold PW, "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether (EGME) method for surface area estimations of clays", *Journal of Soil Science*, 1973, 24(2), 232-238.
- EPA, Process design manual, land application of municipal sludge. Municipal Environmental Research Laboratory. EPA-625/1-83 016, 1983.
- Hendershot WH Duquette M, "A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations", *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3), 605-608.
- Hesse PR, "A textbook of soil chemical analysis", 1971.
- Kashif Uddin M, "A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade", *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308, 438-462.
- Kaya A, Fang HY, The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(5), 943-950.
- Kermani M, Ebadi T, "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils", *Soil and Sediment Contamination*", 2012, 21(5), 655-671.
- Khamehchiyan M, Charkhabi AH, Taji kM, "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*", 2007, 89(3), 220-229.
- Khosravi E, Ghasemzadeh H, Sabour MR, Yazdani H, "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite", *Engineering Geology*, 2013, 166, 11-16.
- Li JS, Xue Q, Wang P, Li ZZ, "Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay", *Applied Clay*
- نتایج آزمایش برش مستقیم روی خاک آلوده به گازوئیل نشان داد که چسبندگی خاک با افزایش درصد آلودگی گازوئیل به میزان ۱۸/۳٪ افزایش می‌یابد. افزایش چسبندگی ظاهری را می‌توان با توجه به ویسکوزیته دینامیکی بیشتر گازوئیل نسبت به آب و چسبندگی ذاتی گازوئیل دانست. همچنین چسبندگی خاک با افزایش غلظت آلودگی سرب در حدود ۶۸٪ کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش آلودگی، میزان بار منفی سطح رس کاهش یافته و سطح خاک به حالت خنثی نزدیک می‌شود. به همین دلیل تمایل به جذب آب کم شده و ضخامت لایه دوگانه کاهش می‌یابد که در پی آن، چسبندگی هم روند کاهشی خواهد داشت. در نمونه‌های آلوده به هر دو آلاینده، در هر غلظت مشخص از فلز سنگین سرب از صفر تا ۱۲ cmol/kg soil، با افزایش درصد آلودگی گازوئیل، چسبندگی افزایش می‌یابد.
  - زاویه اصطکاک داخلی با افزایش درصد وزنی گازوئیل در حدود ۱۴/۵٪ کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل اثر روان‌کنندگی گازوئیل در بین ذرات خاک است. همچنین افزایش غلظت سرب، تغییرات مشخصی روی زاویه اصطکاک داخلی ندارد. بر اساس نتایج ارائه شده در هر غلظت مشخص آلودگی به فلز سنگین سرب (از صفر تا ۱۲ cmol/kg soil)، با افزایش درصد آلودگی به گازوئیل، زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۴ درجه کاهش می‌یابد.
  - بررسی ریخت‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که حضور فلز سنگین سرب باعث تغییر ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت درهم و توده‌ای می‌شود. این امر به دلیل کاهش ضخامت لایه دوگانه ذرات رسی و در پی آن کاهش نیروی دافعه بین ذرات است. همچنین در اثر آلودگی به گازوئیل، دانه‌های خاک توسط گازوئیل پوشانده شده و ذرات بنتونیت بهم چسبیده و حالت فلوکوله پیدا کرده و به ساختاری همچون سیلت و حتی ماسه شبیه می‌شوند.
- ### ۵- مراجع
- اوحدی و، حمیدی ص، امیری م، "اثر آلاینده فلز سنگین بر ضریب تغییرات مقادیر شاخص تراکم، شاخص انبساط، و ضریب نفوذپذیری بنتونیت از منظر ریزساختاری"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، تبریز، ۱۳۹۴، ۴۵ (۴)، ۷-۱۷.*
- Sarpkaya T, Isaacson M, "Mechanics of wave forces on offshore structures", Van Nostrand Reinhold Co. Inc., US, 1981, 165-170.
- Abousnina RM, Manalo A, Shiau J, Lokuge W, "Effects of light crude oil contamination on the physical and

- Science, 2015, 105, 192-199.
- Nasehi SA, Uromeihy A, Nikudel MR, Morsali A, "Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(1), 333-345.
- Nayak S, Sunil BM, Shrihari S, Sivapullaiah PV, "Interactions between soils and laboratory simulated electrolyte solution", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(6), 899-906.
- Rehman H, Abduljawwad SN, Akram T, "Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 12, 1-12.
- Schanza T, Vermeera P, "Angles of friction and dilatancy of sand", 1996.
- Shariatmadari N, Salami M Fard MK, "Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers", *International Journal of Civil Engineering*, 2011, 9(2), pp.103-110.
- Shin EC, Omar MT, Tahmaz AA, Das BM, Atalar C, "Shear strength and hydraulic conductivity of oil-contaminated sand", *Proceedings of Environmental Geotechnics IV (ICEG)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002, 11-15.
- Singh S, Prasad A, "Effects of chemicals on compacted clay liner", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 12(D), 1-15.
- Sridharan A, Venkatappa Rao G, "Shear strength behavior of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechnique*, 1979, 29(2), 177-193.
- Wang F, Wang H, Jin F, Al-Tabbaa A, "The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilization/ solidification of a contaminated site soil", *Journal of hazardous materials*, 2015, 285, pp.46-52.



## EXTENDED ABSTRACT

# Microstructural Assessment of the Simultaneous Impact of Hydrocarbon Material and Heavy Metal on Sand-Bentonite Mixture Behavior

Sepideh Taheri<sup>1</sup>, Taghi Ebadi<sup>1</sup>, Reza Maknoon<sup>2</sup>, Mohammad Amiri<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Hormozgan

Received: 07 October 2017; Accepted: 21 April 2018

---

### Keywords:

Soil Contamination, Strength Parameter, Double Layer Thickness, Microstructure.

---

## 1. Introduction

Adsorption has been proved to be the best process of water treatment because of its significant advantages. Clays and their minerals are abundant and cheap material successfully used for decades as an adsorbent for removing toxic heavy metals from aqueous solutions (Kashif Uddin., 2017). Environmental pollutants and their toxicity cause a major problem worldwide. New pollutants keep emerging and pose severe health and scientific challenges. Water pollution is one of the biggest environmental issue causing serious problems to living beings. The removal of various toxic substances from water and wastewater has been a core interest of many scientists and researchers around the globe over the past decades. Dyeing, battery, printing, mining, metallurgical engineering, electroplating, pigment, PVC stabilizers, nuclear power operations, electric appliances manufacturing, semiconductor, cosmetics, and so on belong to industries that generate various types of pollutants in wastewater effluent [Ali et al., 2007; Gupta et al., 2009]. By construction of engineered landfills, we can prevent the groundwater pollution. In industrialized countries, the use of compacted sand-bentonite mixture (SEB) alternatives to clay Liners due to low permeability and lack of vulnerability caused shrinkage cracks (Alston et al., 1997).

Li et al. (2015) studied the effect of lead (II) on the mechanical and microstructural changes of Chinese clay. They stated that the maximum dry density and hydraulic conductivity increased while the atterberg limits and optimum water content decreased as the concentration of the solution increased. They explained these effects by diffused double layer theory. Dutta and Mishra (2016) compared the bentonite behavior in the presence of  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  and  $Cu^{2+}$ . Previous studies are confined to detecting the effect of just one type of contaminant (organic or inorganic compounds) on the soil. Since in oil-rich areas soils may have been subjected to both heavy metals and oil contamination simultaneously, so the aim of this study is to investigate the changes in microstructure and mechanical behavior of contaminated soils when they are co-exist. The laboratory program included compaction and direct shear tests.

## 2. Methodology

### 2.1 Soil

In this research, the SEB mixtures were artificially prepared by mixing 80% sand and 20% bentonite. The utilized sandy soil was uniformly graded Firoozkooch silica sand (No.161) which is available in Firoozkooch mine in north-east of Tehran and was purchased from Silica Sand MFG company, Iran. The sodium bentonite was also provided by Arak Powder Company, Iran. The tests conducted in the study were mostly on the basis of

---

\* Mohammad

E-mail addresses: sepideh.taheri68@gmail.com (Sepideh Taheri), tebadi@aut.ac.ir (Taghi Ebadi), rmaknoon@yahoo.com (Reza Maknoon), amirii@hormozgan.ac.ir (Mohammad Amiri).

ASTM standard and the geo-environmental tests directions issued by McGill University of Canada. The soil carbonate percentage was defined by titration method (Hendershot and Duquette, 1986). The specific surface area (SSA) was determined using the ethylene glycol-monoethyl ether (EGME) method described by Elthantany and Arnold. CEC was determined by the BaCl<sub>2</sub> replacement method (Hendershot and Duquette, 1986) (Table 1).

**Table 1. Geotechnical and Geo-environmental properties of soil sample**

Soil Sample properties	Bentonite	Sand
Liquid Limit (%)	318	----
Plastic Limit (%)	36	----
Plasticity index (%)	282	----
G <sub>s</sub>	2.8	2.64
e <sub>max</sub>	----	0.916
e <sub>min</sub>	----	0.525
CEC (cmol/kg-soil)	50.53	----
SSA (cm <sup>2</sup> /gr)	415±5	----
pH	9.6	7.2
Soil Classification	CH	SP

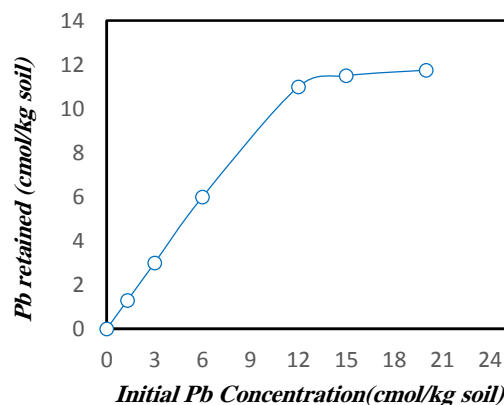
## 2.2 Sample preparation

The diesel oil and was acquired from Tehran oil refinery with a density of 0.823 cm<sup>3</sup>, Kinematic viscosity of 2-5.5 mm<sup>2</sup>/s and a boiling point of 385 °C. Also, the lead (II) nitrate was taken from Merck chemical company with a 99.9% precision. In order to prepare Pb contaminated samples, the soil samples were oven dried at 110 °C for 24 hours, then passed through a 2-mm mesh. Also to investigate the interaction of samples with different concentrations of lead contaminant a series of batch equilibrium tests were performed according to EPA (1983). The following procedure was pursued. First the solutions of lead Nitrate Pb (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> were provided in 1, 3, 6, 12, 15 & 20 cmol/kg soil. 1 gr of dry soil was weighted with the accuracy of 0.001 g and was accumulated in a 50 ml centrifugal tubes. Then 50 ml of the lead nitrate contamination solution was added to soil. The soil suspension samples (prepared by the aforementioned method) were stirred for 3 hours by an electrical mixer.

## 3. Results and discussion

### 3.1 Investigation the interaction of soil with lead contaminant

Sand has no cation exchange capacity; therefore, the retention of lead pollutant is carried out only by bentonite. Based on the results presented in Fig. 1, for concentration around 12 cmol/kg soil, all of the heavy metal ions inside the electrolyte maintained in the soil approximately. Since the CEC of 20% bentonite is one fifth of 100% bentonite, 12 cmol/kg-soil was selected as a maximum concentration. By increasing the concentration of lead contaminant above than CEC level of the soil, the sample ability to retain all of the heavy metal ions decreased; therefore, the slope of the graph decreases.



**Fig. 1.** Lead retention in the soil from batch equilibrium test

### 3.2 Compaction test

The comparative impact of lead and diesel oil contamination on compaction properties of the soil samples is shown in Fig. 2. It was evident that the presence of Pb up to 12 cmol/kg soil causes an increase in maximum

dry density from 1.75 gr/cm<sup>3</sup> to 1.84 gr/cm<sup>3</sup>. Increasing the amount of maximum dry density reflects the chemical interaction between Pb and soil. Subsequently, the thickness of diffused double layer reduces, particles became closer and flocculation developed (Nayak et al., 2010). This phenomenon caused better packing of particles under the same amount of energy; hence the maximum dry density increased (Singh and Prasad, 2007). Approaching soil particles caused the decrease of water holding ability, thus the optimum water content decreased from 16% to 13%. These results are in agreement with previous studies (Li et al., 2015).

Furthermore, an increase in the level of diesel contamination up to 12% dry weight of soil, increases maximum dry density from 1.75 gr/cm<sup>3</sup> to 1.87 gr/cm<sup>3</sup> and decreases optimum moisture content from 16% to 8.5%. This is clearly obvious by the moving upward and left side shift of the contaminated compaction curves from the clean soil's curve. This is probably due to the lubricating property of diesel which leads to the facilitation of compaction test (Al-Sanad et al., 1995). Since diesel is hydrophobic, it coats soil particle and prevents interaction of water with clay particles; therefore, the amount of water required by the soil to reach its maximum dry density is reduced (Akinwumi et al., 2014).

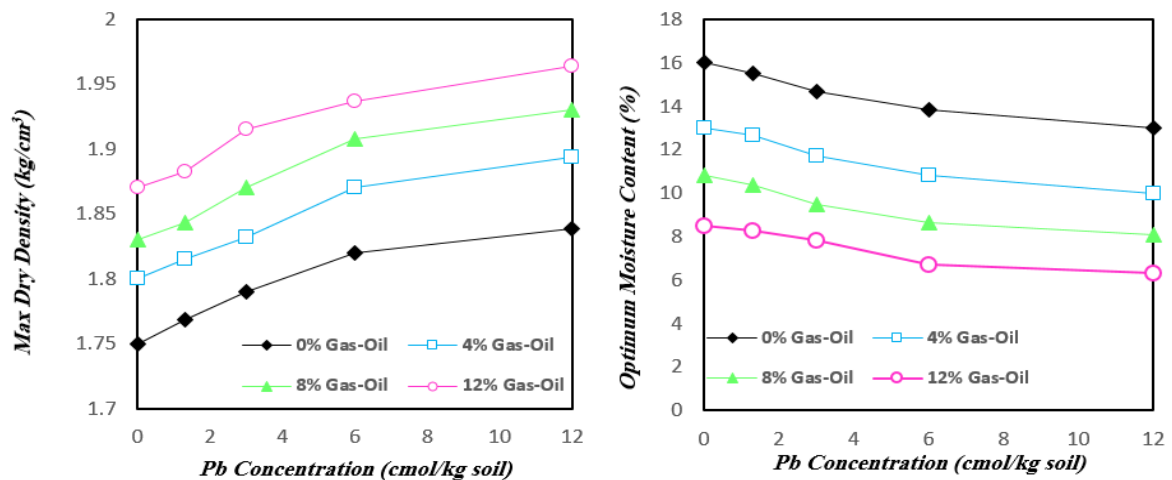


Fig. 2. Effect of Pb and diesel contamination on compaction properties

#### 4. Conclusion

An experimental testing program has been conducted to determine the effect of Pb (II) and diesel contamination on geotechnical and micro-structural behavior of sand-bentonite mixtures. The following conclusions could be drawn based on the test results:

1. Both diesel and lead contaminants caused an increment of maximum dry density while the optimum moisture content reduced; therefore, the combined effect of these pollutants have a severe impact on samples compared with those single contaminated specimens.
2. Direct shear tests indicated an 18.3% increase in cohesion and 14% decrease in the internal friction angle due to diesel contamination. On the other hand, the samples cohesion decreased about 68% as the lead concentration increased from 0 to 12 cmol/kg soil.

#### 5. References

- Abousnina RM, Manalo A, Shiao J, Lokuge W, Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 24(8), 2015, pp.833-845.
- Akinwumi II, Diwa D Obianigwe N, 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), 2014, pp.816-824.
- Al-Sanad HA, Eid WK, Ismael NF, Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand *Journal of geotechnical engineering*, 121(5), 1995, pp.407-412.
- American Society for Testing and Materials, ASTM, 1994. *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, vol. 4 p. 08.
- Cyrus S, Studies on the development and control of desiccation cracks in compacted clay liner soils, 2012.
- Kashif Uddin M, A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308 2017, pp. 438-462.
- Wang F, Wang H, Jin F, Al-Tabbaa A, The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilisation/solidification of a contaminated site soil. *Journal of hazardous*, 2015.