

اثر آلاینده گازوئیل بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه رس دار

میلاد شهیدی^۱، فرهاد عاصمی^۲، فرهنگ فرخی^{۳*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان
^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

(دریافت: ۹۷/۱۱/۱۰، پذیرش: ۹۹/۷/۷، نشر آنلاین: ۹۹/۷/۷)

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی اثر آلاینده گازوئیل به عنوان آلاینده‌ای با وزن مخصوص کم‌تر از آب بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی رفتار خاک ماسه رس دار می‌باشد. به این منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ژئوشیمیایی (شامل آنالیزهای XRD و XRF)، ژئوتکنیکی (شامل توزیع اندازه دانه، میزان تبخیر گازوئیل، حدود اتربةرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری) و همچنین مشاهده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی خاک ماسه رس دار آلوده به سیال آلی گازوئیل انجام شد. نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها به صورت مصنوعی به گازوئیل آلوده شدند. مطابق با نتایج به دست آمده با افزایش میزان آلودگی خاک به گازوئیل، مدول درجه بندی و اندازه ذرات خاک افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش درصد گازوئیل، حد روانی و حد خمیری برای خاک آلوده به ۱۶ درصد گازوئیل به ترتیب ۲۸/۹ و ۵۴/۴۷ درصد نسبت به خاک تمیز کاهش یافته و شاخص خمیری برای نمونه‌های کم‌تر از ۸ درصد گازوئیل روند افزایشی داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج آزمایش تراکم پروکتور استاندارد (Standard Proctor Compaction Test) استاندارد ملاحظه شد که با افزایش درصد آلودگی خاک، دانسیته خشک حداکثر تا ۸ درصد گازوئیل کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد و همچنین مقدار آب بهینه با افزایش درصد گازوئیل کاهش می‌یابد. در این مطالعه، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در سه دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌ها انجام شد و مشاهده شد که برای هر سه دوره عمل‌آوری مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش گسیختگی کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقاومت فشاری برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به دست آمد، لیکن برای هر سه دوره عمل‌آوری نرخ کاهش کرنش ثابت است.

کلیدواژه‌ها: خاک آلوده، ماسه رس دار، گازوئیل، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مقاومت فشاری تک‌محوری.

۱- مقدمه

(USEPA, ۱۹۸۸). آلودگی خاک‌ها به مواد نفتی علاوه بر این که یک مسئله زیست‌محیطی است، خاک منطقه را نیز از نقطه نظر باربری دچار مشکل کرده و استفاده از این خاک را در پی سازه‌ها، روسازی جاده‌ها و دیگر سازه‌های بنا شده با تردید مواجه می‌کند. Sridharan و همکاران (۱۹۸۱)، گزارشی در زمینه افزایش نشست خاک به دلیل آلوده شدن خاک منطقه به مواد هیدروکربنی ارائه کردند که نتیجه آن ایجاد خرابی در ساختمان‌های صنعتی است. در دهه‌های اخیر به دلیل اهمیت مطالعه رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، مطالعات زیادی در ارتباط با مشخصات فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها انجام شده است. در زمینه ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه آلوده به فرآورده‌های نفتی تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است (Shin و Das, ۲۰۰۱؛ Ratnaweera و

آلودگی نفتی معمولاً با نشست ترکیبات نفتی از مخازن، خطوط انتقال قدیمی و پوسیده، انفجار، حوادث طبیعی همچون زمین‌لرزه و تصادف تانکرهای انتقال دهنده اتفاق می‌افتد. یکی از حوادثی که اخیراً منجر به نشست گسترده ترکیبات نفتی شده و از آن به عنوان یک فاجعه زیست‌محیطی در دنیا نام برده شده است، انفجار در یکی از چاه‌های نفتی در خلیج مکزیک است (Ramírez-León, ۲۰۱۲).

Ismael و Al-Sanad (۱۹۹۷) بیان کردند که مساحت اراضی آلوده شده در کویت بر اثر نشست مواد هیدروکربنی به چندین کیلومتر مربع می‌رسد. در سال ۱۹۸۸، سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا اعلام کرد که تقریباً از یک چهارم مخازن نفتی احداث شده در آمریکا، مواد نفتی نشست می‌کند

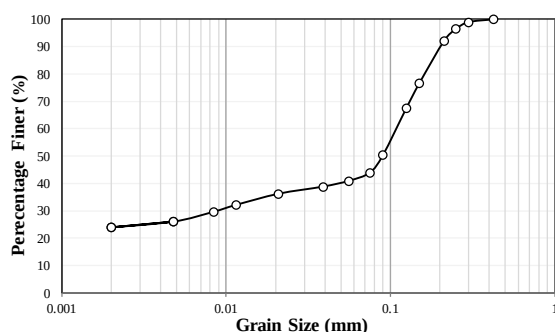
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۵۸۰

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- خاک مصرفی

در این پژوهش برای دستیابی به اهداف موردنظر، پس از برداشت خاک تهیه‌شده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و مطابق با استاندارد ASTM-D-422 دانه‌بندی بر روی آن‌ها انجام گردید. انجام گردید. در شکل (۱) مشاهده می‌شود که طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)^۲ خاک مورد استفاده از نوع خاک ماسه رس‌دار (SC)^۴ است.



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه دانه خاک مورد مطالعه
(خاک ماسه رس‌دار (SC))

برای شناخت دقیق‌تر و بررسی بهتر خاک استفاده‌شده و تعیین درصد حضور ترکیبات شیمیایی و کانی‌های موجود در خاک، آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF)^۵ و پراش اشعه ایکس (XRD)^۶ انجام شد. براساس نتایج مربوط به آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)، کانی کوآرتز با زاویه برگشت پرتو ایکس ۲۶/۶ به‌عنوان عمده‌ترین کانی و پس از آن آلبیت^۷، کلسیت^۸ و مونت‌موریلونیت^۹ با زوایای برگشت پرتو ایکس ۲۸/۲، ۲۹/۵ و ۱۰ کانی‌های تشکیل‌دهنده فاز جامد خاک ماسه رس‌دار مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۲)). همچنین عناصر تشکیل‌دهنده خاک ماسه رس‌دار مورد مطالعه براساس نتایج XRF در جدول (۱) آورده شده است. قبل از تهیه نمونه‌های آلوده به گازوئیل، ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد بررسی طبق استانداردهای ASTM تعیین گردید. وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک به ترتیب برابر ۱/۸۱ gr/cm³ و ۱۵/۴۹ درصد به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها، در جدول (۲) ارائه شده است.

Meegoda، ۲۰۰۶؛ Rahman و همکاران، ۲۰۱۰؛ Al-Aghbari، ۲۰۱۱؛ Kermani و Ebadi، ۲۰۱۲؛ Karpuzcu و همکاران، ۲۰۱۸).

اوحدی و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی تغییرات خمیری و نفوذپذیری نمونه رسی بنتونیت^۱ در اثر حضور آلاینده‌های آلی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی پرداختند که نتایج براساس تئوری لایه دوگانه گوی-چپمن^۲ حاکی از کاهش ضخامت لایه دوگانه در اثر کاهش ثابت دی‌الکتریک بود. از این‌رو کاهش ثابت دی‌الکتریک، کاهش لزجت سینماتیکی و افزایش اندازه مولکول‌ها، دامنه خمیری رس‌ها کاهش‌یافته و نفوذپذیری با افزایش مواجه شدند (اوحدی و همکاران، ۱۳۹۵). طاهری و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر توأم آلاینده فلز سنگین و آلاینده آلی گازوئیل از منظر ریزساختاری در رفتار ژئوتکنیکی در خاک مخلوط (۸۰ درصد ماسه و ۲۰ درصد بنتونیت) را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مربوط به آزمایش تراکم استاندارد کاهش مقدار رطوبت بهینه در مقابل افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها در اثر افزایش مقدار گازوئیل در نمونه‌ها را نشان داد. همچنین نتایج آزمایش برش مستقیم بیانگر افزایش چسبندگی خاک در اثر حضور گازوئیل بود (طاهری و همکاران، ۱۳۹۷).

از آنجاکه در خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب واکنش‌های شیمیایی و تعامل فیزیکی، خصوصیات و رفتار مکانیکی خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر این در هر دو نوع خاک، تغییر در مشخصات سیال منفذی سبب اثرگذاری بر مکانیزم‌های رفتار فیزیکی و مکانیکی می‌شود و از طرف دیگر به دلیل وجود تفاوت‌هایی که در خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک‌های آلوده در تحقیقات مختلف مشاهده شده است، لازم است مطالعات تکمیلی و گسترده‌تر دیگری نیز در این زمینه انجام گیرد. با این هدف و به منظور ارزیابی اثر توأمان واکنش‌های شیمیایی و تغییرات فیزیکی، مجموعه‌ای از آزمایشات ژئوشیمیایی و ژئوتکنیکی بر روی خاک ماسه رس‌دار آلوده به درصد‌های مختلف گازوئیل انجام شد. همچنین در این تحقیق، برای ارزیابی اثر دوره عمل‌آوری خاک‌های آلوده به گازوئیل بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری، در سه دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه آزمایش بر روی خاک‌های آلوده به ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل انجام شد.

6. X-ray diffraction
7. Albite
8. Calcite
9. Montmorillonite

1. Bentonite
2. Gouy-Chapman
3. Unified Soil Classification System
4. Clayey sand
5. X-ray fluorescence

۲-۱-۲- آلاینده مصرفی

با توجه به این که گازوئیل به عنوان فرآورده سوختی پرمصرف در موتورهای دیزلی و تأمین گرما به کار می رود و همچنین نسبت به سایر فرآورده های نفتی سنگین تر بوده و ماندگاری بیشتر دارد، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات گازوئیل مورد استفاده در این پژوهش، که از مرکز پخش فرآورده های نفتی شهر زنجان تهیه شد، در جدول (۳) ارائه شده است.

۲-۲- روش انجام تحقیق

۲-۲-۱- روش آماده سازی و ساخت نمونه ها

در این مطالعه، گازوئیل با ۶ درصد وزنی مختلف (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزن خشک خاک) به صورت مصنوعی با خاک ترکیب شدند و پس از پخش یکنواخت گازوئیل در توده خاک، نمونه ها به مدت دو هفته برای انجام واکنش های احتمالی و ایجاد تعادل بین خاک و گازوئیل درون کیسه های پلاستیکی در دمای اتاق نگهداری شدند. همچنین به منظور تعیین مدول درجه بندی در اثر آلودگی به درصد های مختلف گازوئیل و بررسی تغییر احتمالی در نحوه توزیع اندازه ذرات خاک ناشی از آلودگی، توزیع اندازه ذرات مطابق با استاندارد ASTM-D-422 برای هر دو نوع خاک طبیعی و آلوده به روش الک تعیین شد. لازم به ذکر است که انجام آزمایش هیدرومتری برای خاک های حاوی ترکیبات آلی امکان پذیر نمی باشد (Epps و Head، ۲۰۱۰).

برای تعیین توزیع دانه بندی به وسیله روش الک خشک ۳۰۰ گرم از خاک طبیعی و نمونه های آلوده به گازوئیل با درصد های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزن خشک خاک در گرم خانه استفاده شدند. علاوه بر این با توجه به حضور هم زمان دو سیال متفاوت در بافت خاک، برای تعیین درصد آب در طول تمامی آزمایشات، منحنی میزان تبخیر گازوئیل برای درصد های مختلف تعیین گردید. در ادامه، آزمایش های حدود اتربرگ براساس استاندارد ASTM-D-4318 انجام شدند.

در ادامه برای نمونه سازی، خاک در ۵ لایه (طول نمونه ۷۰/۱ میلی متر و قطر ۳۳/۳ میلی متر) و هر لایه با ۱۶ ضربه با استفاده از چکش مخصوص دستگاه تراکم هاروارد با حداکثر وزن مخصوص خشک به دست آمده از آزمایش تراکم پروکتور استاندارد متراکم گردید. لازم به ذکر است که دستگاه تراکم کوچک مقیاس هاروارد به دلیل استفاده از مصالح کم تر، نیاز به انرژی کم تر برای تراکم و صرفه جویی در کار و زمان و ارائه نتایج دقیق تر به دلیل همگن تر شدن نمونه، در کارهای پژوهشی بیشتر استفاده می شود. به این منظور در این تحقیق، از قالب و دستگاه جک نمونه درآور هاروارد برای ساخت نمونه های مخصوص آزمایش مقاومت فشاری تک محوری استفاده شد (شکل ۳).

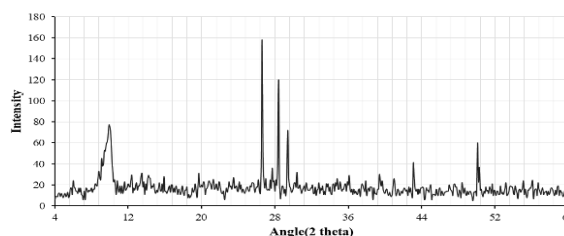
جدول ۱- ترکیبات شیمیایی خاک ماسه رس دار

(نتایج آنالیز XRF)

نوع اکسید	مقدار (%)	نوع اکسید	مقدار (%)
Si O ₂	۵۶/۱۸	Fe ₂ O ₃	۳/۸۲
Al ₂ O ₃	۱۵/۴۲	MgO	۳/۳۱
CaO	۱۲/۷۷	K ₂ O	۱/۱۶
Other	۲/۴۲	L.O.I (Loss on ignition)	۴/۹۲

جدول ۲- مشخصات خاک در حالت بدون آلودگی

مشخصه	استاندارد	مقدار
چگالی دانه های جامد (G _s)	ASTM-D-854	۲/۷۲
درصد مواد		
ماسه (%) (۰/۰۷۵-۴/۷۵ میلی متر)		۵۶
سیلت (%) (۰/۰۰۲-۰/۰۷۵ میلی متر)	ASTM-D-422	۲۰
رس (%) (>۰/۰۰۲ میلی متر)		۲۴
حدود اتربرگ		
حد خمیری (%)		۱۹
حد روانی (%)	ASTM-D-4318	۳۲
دامنه خمیری (%)		۱۳
مشخصات فشردگی		
رطوبت بهینه (ω _{opt}) (%)		۱۵/۴۹
وزن واحد حجم حداکثر (γ _{d max}) (gr/cm ³)	ASTM-D-698	۱/۸۳
طبقه بندی متحد (USCS)	ASTM-D-2487	SC

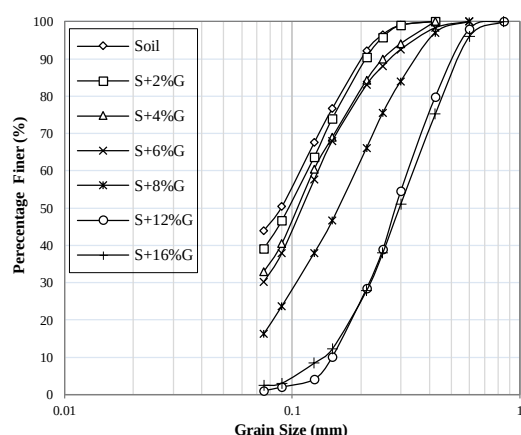


شکل ۲- نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) برای خاک ماسه رس دار مورد مطالعه

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی گازوئیل مصرفی

مشخصه	مقدار
وزن مخصوص در ۱۵/۵۶ °C (Kg/L)	۰/۸۶ - ۰/۸۲
ویسکوزیته در ۲۰ °C (mm ² /s)	۳
نقطه جوش (°C)	۱۵۰ - ۳۹۰
نقطه ریزش (°C)	-۳
نقطه اشتعال (°C)	۵۴
هیدروکربن اشباع (%)	۷۵
هیدروکربن آروماتیک (%)	۲۵
کربن (%)	۸۶/۵
هیدروژن (%)	۱۳/۴
فرمول شیمیایی متوسط	C ₁₂ H ₂₄

(حاوی ۸ درصد گازوئیل) در مقدار آب بهینه خود تهیه شد. در این تحقیق مشاهده شد که در تأیید آزمایش دانه‌بندی در حالت خاک بدون آلودگی، بخش ریزدانه ساختار نسبتاً پراکنده را از خود نشان می‌دهد. اما در مقابل آن، برای نمونه‌های آلوده به گازوئیل ساختار نسبتاً مجتمع و فلوکوله مشاهده می‌گردد. مطابق شکل (۵) خاک در حالت بدون آلودگی دارای بخش ریزدانه یکپارچه و پیوسته به یکدیگر بوده و دانه‌های بخش درشت‌دانه با حجم بیشتری از بخش خمیری خاک احاطه شده‌اند. در مقابل، نتایج مربوط به نمونه‌های آلوده نمایانگر ساختار مجتمع ذرات ریز در بین دانه‌های بزرگ‌تر می‌باشد.

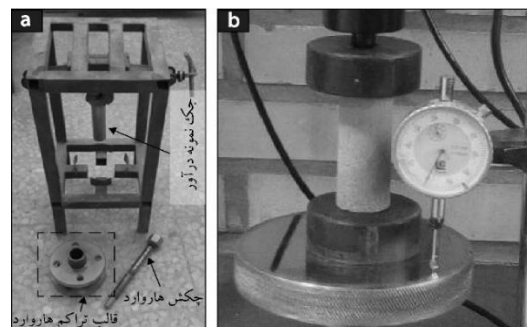


شکل ۴- منحنی توزیع اندازه دانه در خاک‌های مورد مطالعه

مشابه با این یافته Yildiz و Olgun (۲۰۱۰)، با استفاده از میکروسکوپ نوری به بررسی ساختار خاک رس پرداختند و ساختمان دانه‌ای خاک رس را در اثر حضور سیال آلی با ثابت دی‌الکتریک کم را گزارش کردند. در این تحقیق، به‌منظور تأیید کاهش دانه‌های ریز در خاک‌های آلوده از مدول درجه‌بندی (GM)^{۱۲} استفاده شد. مدول درجه‌بندی مطابق رابطه (۱) به‌صورت نسبت مجموع درصد ذرات خاک مانده بر روی الک ۲، ۴۲۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر بر ۱۰۰ تعریف می‌شود.

$$GM = (P_2 + P_{0.425} + P_{0.075}) / 100 \quad (1)$$

که در آن GM مدول درجه‌بندی و P_2 ، $P_{0.425}$ و $P_{0.075}$ به‌ترتیب درصد ذرات باقی‌مانده در الک‌های ۲، ۴۲۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر می‌باشد. مطابق دستورالعمل مهندسی روسازی جنوب آفریقا (۲۰۱۱) خاک‌هایی با مدول درجه‌بندی کم‌تر از مقدار ۲ به‌منظور استفاده در لاینر^{۱۳} مدفن زباله و خاک‌های با مدول درجه‌بندی بالای ۲ برای استفاده در سازه راه‌ها مناسب می‌باشند (SAPEM، ۲۰۱۱).



شکل ۳- قالب و چکش دستگاه تراکم هاروارد به‌همراه جک نمونه‌درآور و نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با این وسیله

۲-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

در این تحقیق، آزمایش فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های ساخته‌شده به قطر ۳۳/۳ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰/۱ میلی‌متر که در رطوبت بهینه خود قالب‌گیری شده بودند، انجام شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-D-2166 به‌روش کرنش کنترل و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. برای ارزیابی اثر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های آلوده، آزمایش در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع اندازه دانه و تعیین مدول درجه‌بندی

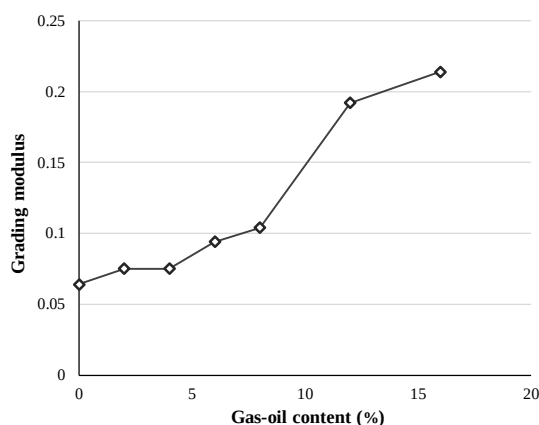
با توجه به این‌که امکان انجام آزمایش هیدرومتری برای خاک‌های آلوده به مواد نفتی وجود نداشت، منحنی دانه‌بندی برای بخش درشت‌دانه خاک تمیز و آلوده تعیین شد. همان‌طوری که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش میزان آلودگی خاک به گازوئیل منحنی توزیع اندازه دانه به سمت راست نمودار جابه‌جا شده و به عبارت دیگر با افزایش درصد گازوئیل اندازه ذرات خاک افزایش می‌یابد. پیش از این توسط Ijimdiya (۲۰۱۲) و Daka (۲۰۱۵) نتیجه‌ای مشابه با این تحقیق گزارش شده بود. با توجه به این‌که در خاک‌های آلوده ناشی از حضور گازوئیل بین ذرات خاک چسبندگی ایجاد شده و بخش ریزدانه ساختاری فلوکوله^{۱۱} یا مجتمع به خود می‌گیرد، این نتیجه قابل پیش‌بینی بود. مطابق با نتایج، برای خاک‌های آلوده به ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل ناشی از آلودگی تغییر در نوع خاک از نظر طبقه‌بندی یونیفاید اتفاق افتاده و در این دو نوع خاک، با انتقال خاک به بخش درشت‌دانه، خاک در طبقه‌بندی ماسه با دانه‌بندی ضعیف قرار می‌گیرد. برای روشن‌تر شدن اثر حضور آلاینده گازوئیل در خاک مورد مطالعه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^{۱۱} از نمونه خاک تمیز و

12. Silty gravel
13. Liner

10. Flocculate
11. Scanning Electron Microscopy

اگرچه این معیار به تنهایی نمی‌تواند تعیین‌کننده صلاحیت خاک‌ها به عنوان مصالح پایه‌ای باشد و مطمئناً دیگر خصوصیات خاک نیز بر رفتار خاک مؤثر هستند (Anderson و Somayajulu، ۱۹۷۱؛ Nasehi و همکاران، ۲۰۱۶). مطابق با این رابطه، مدول درجه‌بندی به دست آمده برای خاک‌های آلوده به ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدول درجه‌بندی از ۰/۰۶۴ برای خاک بدون آلودگی تا ۰/۲۱۴ برای خاک با بیش‌ترین میزان گازوئیل (۱۶ درصد) متغیر می‌باشد. با توجه به این که مدول درجه‌بندی در خاک‌های مطالعه شده کم‌تر از ۲ می‌باشند، از این رو از این خاک‌ها می‌توان در ساخت مدفن زباله با ارزیابی و در نظر گرفتن دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی تأثیرگذار در عملکرد مدفن زباله استفاده کرد. این مطالعه در تأیید یافته‌های Daka (۲۰۱۵)، برای خاک آلوده به نفت خام می‌باشد.

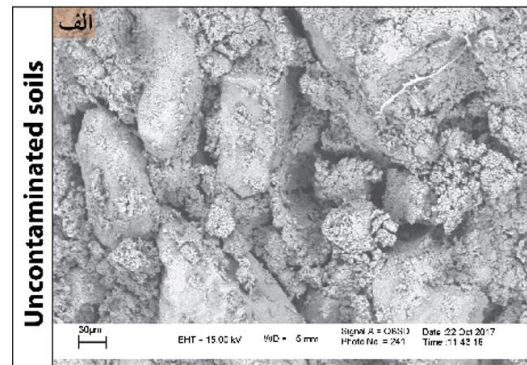
افزایش مقدار مدول درجه‌بندی که بیانگر کاهش درصد ریزدانه و افزایش درصد بخش درشت‌دانه در خاک می‌باشد، شاخص مناسبی برای ارزیابی فلوکولاسیون ذرات خاک به-دلیل پیوند ضعیف ایجادشده ناشی از حضور گازوئیل می‌باشد. باین وجود اثر آلاینده‌های نفتی در مدول درجه‌بندی خاک‌ها کم‌تر مورد توجه بوده است و لازم هست که در مطالعات آتی مورد توجه قرار بگیرد.



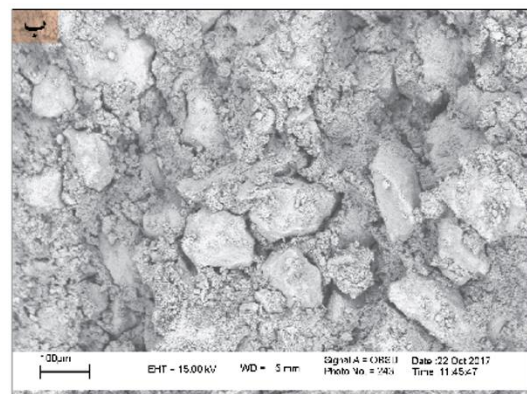
شکل ۶- مدول درجه‌بندی (GM) برای خاک بکر و آلوده به درصد‌های مختلف گازوئیل

۳-۲- آزمایش میزان تبخیر گازوئیل و تعیین مقدار آب در آزمایشات مربوط به مکانیک خاک مقدار آب موجود در بافت خاک به‌طور معمول از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

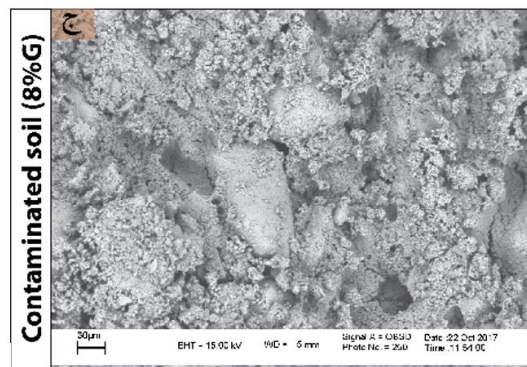
$$\omega\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2)$$



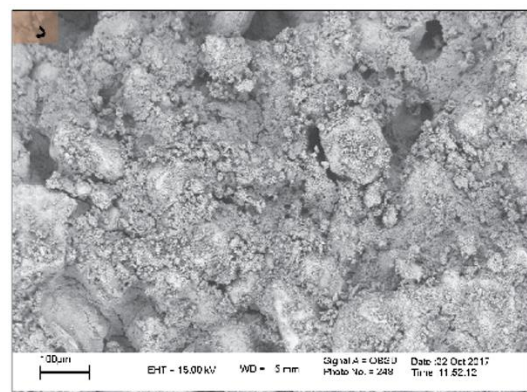
(الف)



(ب)



(ج)



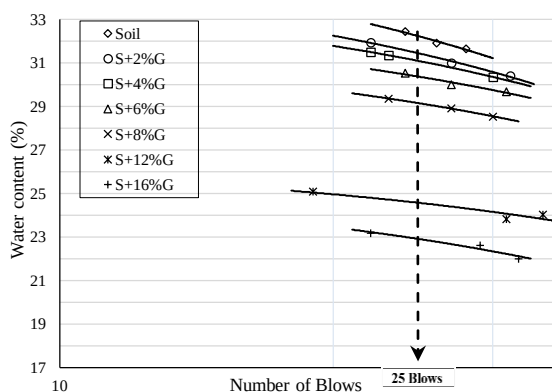
(د)

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از: (الف و ب) نمونه SC تمیز، (ج و د) نمونه خاک SC حاوی ۸ درصد گازوئیل

که در آن m و n به ترتیب مقدار گازوئیل باقی مانده پس از خشک شدن و قبل از خشک شدن بوده و W_D و W_T به ترتیب جرم خاک آلوده مرطوب و خشک می باشند.

۳-۳- حدود اتربرگ

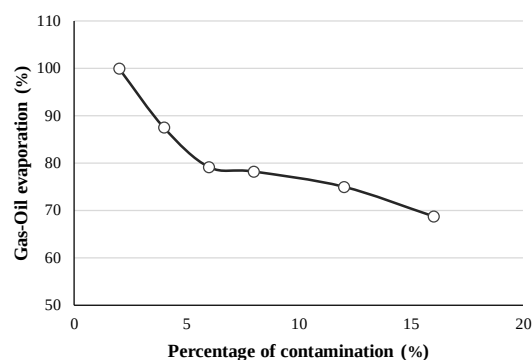
حدود اتربرگ به طور گسترده برای شناسایی، توصیف و طبقه بندی خاک های چسبنده مورد استفاده قرار می گیرد و به عنوان مبنای ارزیابی اولیه خصوصیات مکانیکی آن ها به شمار می رود. حد روانی و حد خمیری پایداری خاک ها را به هنگام تغییرات شرایط رطوبتی کنترل می کنند (Nasehi و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از آزمایش های حدود اتربرگ به صورت تغییرات حد روانی و خمیری و شاخص خمیری با درصد آلاینده گازوئیل در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. این شکل ها نشان می دهند که با افزایش گازوئیل حد روانی روندی کاهش داشته و برای خاک آلوده حاوی ۱۶ درصد گازوئیل، ۲۸/۹ درصد کاهش در حد روانی مشاهده می شود. وابستگی ویژگی های رفتاری خاک به خواص محیط و تغییر خصوصیات خاک در اثر تغییر مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیال اطراف ذره، با استفاده از نظریه لایه دوگانه تا حدودی قابل توصیف می باشد. در خاک های آلوده به دلیل حضور دو سیال منفذی (آب و گازوئیل) در ساختار خاک و با توجه به پایین بودن ثابت دی الکتریک گازوئیل در مقایسه با آب، انتظار می رود که حد روانی خاک تغییر کند. در واقع کاهش ثابت دی الکتریک ناشی از حضور گازوئیل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و کاهش نیروی دافعه بین ذرات شده و از آنجایی که نیروی جاذبه بین ذرات رسی مستقل از خصوصیات سیال می باشد، در نهایت باعث تشکیل ساختاری فلوکوله می گردد (Yong و Warkentin، ۱۹۷۵؛ Yong، ۲۰۰۱). لذا کاهش ثابت دی الکتریک و افزایش نسبت سیال آلی به آب باعث کاهش حد روانی می شود. به طوری که برای درصدهای پایین ماده اصلی امولسیون آب (فاز آبی) بوده ولی برای مقادیر بالاتر آلودگی، ماتریس اصلی سیال منفذی گازوئیل (فاز گازوئیلی) می باشد.



شکل ۸- روند تغییرات مقدار حد روانی خاک های مورد مطالعه

که در آن ω مقدار آب برحسب درصد، W_w وزن آب و W_s وزن خشک خاک می باشد. رابطه (۲) برای حالتی که در قسمت سیال منفذی تنها یک نوع سیال حضور داشته باشد، کاربرد دارد. به دلیل آلودگی خاک در اثر حضور گازوئیل و اشغال قسمتی از سطح ذرات و منافذ خاک توسط گازوئیل و آب، به منظور انجام آزمایش های مختلف تعیین مقدار آب موجود در سیال منفذی امری لازم و ضروری است. در حالت حضور سیال نفتی، Khamsehchiyan و همکاران (۲۰۰۷)، نشان دادند که بخشی از ترکیبات فرار نفت خام امکان تبخیر در دمای اتاق را دارند و بخشی نیز در خاک باقی می ماند و میزان تبخیر مواد نفتی بستگی به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آلاینده نفتی، دما و رطوبت محیط دارد. آن ها همچنین بیان کردند که میزان تبخیر آلاینده نفتی در اثر کاهش اندازه ذرات خاک افزایش یافته و با افزایش درصد آلودگی مقدار آلاینده بخار شده در شرایط یکسان کاهش می یابد.

در این تحقیق، به منظور تعیین میزان بخار گازوئیل، تعداد ۶ نمونه از خاک (هر کدام به وزن ۴۰ گرم) با گازوئیل به درصدهای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد از وزن خشک خاک ترکیب شدند و پس از وزن کردن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد درون گرم خانه قرار داده شده و پس از اندازه گیری وزن خشک شده نمونه ها، نمودار درصد تبخیر بخار گازوئیل حاصل شد. شکل (۷) منحنی درصد تبخیر گازوئیل را برای خاک های آلوده مورد مطالعه نشان می دهد. مطابق شکل با افزایش درصد گازوئیل، مقدار گازوئیل بخار شده کاهش می یابد.



شکل ۷- رابطه بین تبخیر گازوئیل و درصد گازوئیل در خاک

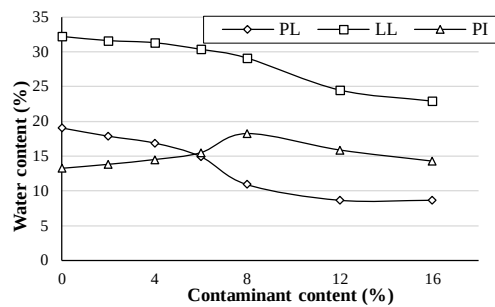
Khamsehchiyan و همکاران (۲۰۰۷)، دلیل تفاوت در میزان گازوئیل بخار شده برای درصدهای مختلف آلودگی در خاک را تغییر هدایت حرارتی آن ها بیان کرده اند. با توجه به این که مقداری از گازوئیل در طول خشکاندن نمونه ها در گرم خانه تبخیر می شود، در این تحقیق از رابطه (۳) برای تعیین درصد رطوبت خاک استفاده شد:

$$\omega\% = (1 + mn) \frac{W_T}{W_D} - (1 + n) \quad (3)$$

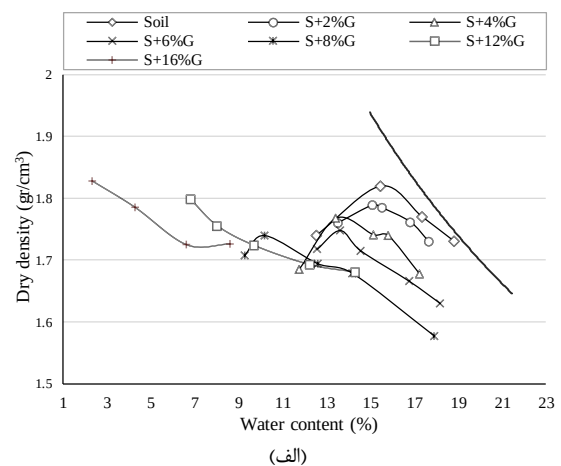
این نتایج با یافته‌های سایر محققان نظیر Rahman و همکاران (۲۰۱۱) و Liu و همکاران (۲۰۱۵)، تطابق دارد.

۳-۴- آزمایش تراکم استاندارد

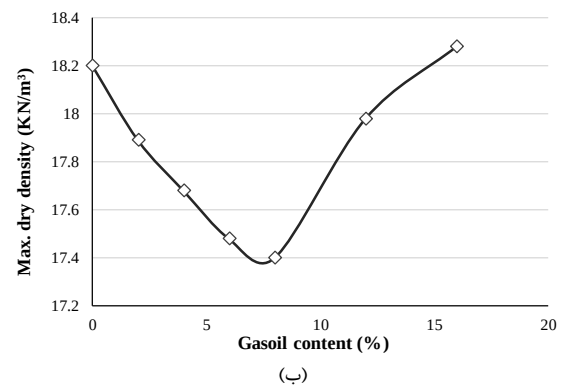
در شکل (۱۰)، نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک در مقابل درصد رطوبت به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد بر خاک مورد مطالعه نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۰-ب) با افزودن گازوئیل در خاک برای مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد از وزن خشک خاک، دانسیته خشک حداکثر نمونه‌ها کاهش یافته و در ادامه برای خاک‌های با ۱۲ و ۱۶ درصد آلاینده دانسیته خشک حداکثر روندی افزایشی دارد. اصولاً با افزایش درصد آلاینده انتظار می‌رود به دلیل این که ساختاری فلوکوله در خاک ایجاد می‌شود، دانسیته خشک حداکثر خاک کاهش یابد؛ لیکن در این تحقیق مشاهده شد که برای درصد گازوئیل ۱۲ و ۱۶ درصد دانسیته خشک حداکثر روندی افزایشی دارد که این مسئله را می‌توان به خاصیت روغن کاری گازوئیل ارتباط داد. در واقع برای مقادیر ۱۲ و ۱۶ درصد آلودگی، با وجود آن که مقدار آب بسیار کمی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها افزوده شده است، خاک سریعاً گازوئیل موجود در بافت خاک را آزاد کرده و از این رو بخش اصلی سیال موجود در نمونه‌ها را گازوئیل تشکیل می‌دهد. در نتیجه این عمل، گازوئیل نقش روغن کاری سطح ذرات خاک را ایفا کرده و باعث عدم اثرگذاری حضور هم‌زمان آب شده و در نتیجه منجر به افزایش دانسیته خشک حداکثر برای مقادیر ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل می‌گردد. هرچند در مورد اثر آلاینده نفتی بر روی نتایج آزمایش تراکم، محققین مختلف به نتایج متفاوتی دست یافته‌اند. برای مثال Ur-Rehman و همکاران (۲۰۰۷) و Rahman و همکاران (۲۰۱۱)، مشاهده کردند که با افزایش درصد آلودگی در خاک، دانسیته خشک حداکثر افزایش یافته و مقدار آب بهینه کاهش می‌یابد. اما Khomechiyan و همکاران در سال ۲۰۰۷ مشاهده کردند که افزایش آلاینده نفتی باعث کاهش دانسیته خشک حداکثر می‌گردد. در کنار این نتایج Al-Sanad و همکاران (۱۹۹۵) مشاهده کردند که دانسیته خشک حداکثر تا ۴ درصد آلاینده افزایش یافته و بعد از آن روندی کاهشی دارد. همچنین Nasehi و همکاران (۲۰۱۶) مشابه با تحقیق حاضر به این نتیجه رسیدند که دانسیته خشک حداکثر خاک با افزایش درصد آلاینده ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که منحنی تراکم مربوط به درصدهای بالای آلودگی (۱۲ و ۱۶ درصد) به طور کامل (شکل غیرمتعارف) حاصل نشد که علت آن را می‌توان حضور درصدهای بالای گازوئیل و زهکش شدن آن در اثر انرژی وارده از جانب چکش تراکم استاندارد دانست.



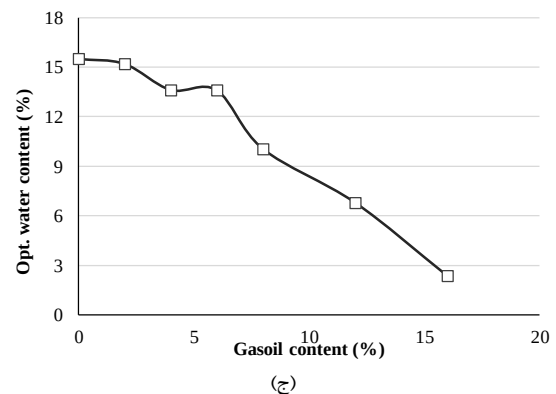
شکل ۹- تأثیر درصد گازوئیل بر روی حدود اتربرگ خاک ماسه رس‌دار



(الف)



(ب)



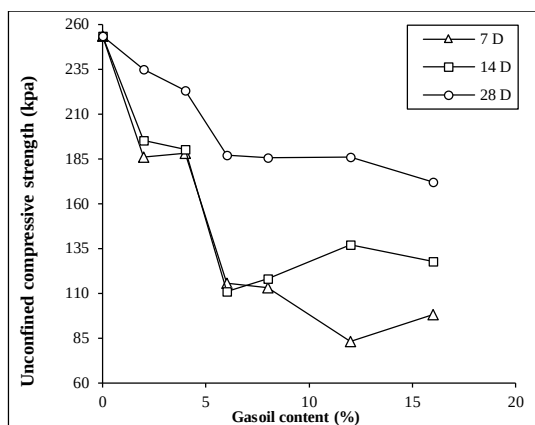
(ج)

شکل ۱۰- الف) منحنی تراکم استاندارد برای خاک مورد مطالعه،
ب) و ج) رابطه بین پارامترهای تراکم و درصد گازوئیل در
نمونه‌های خاک

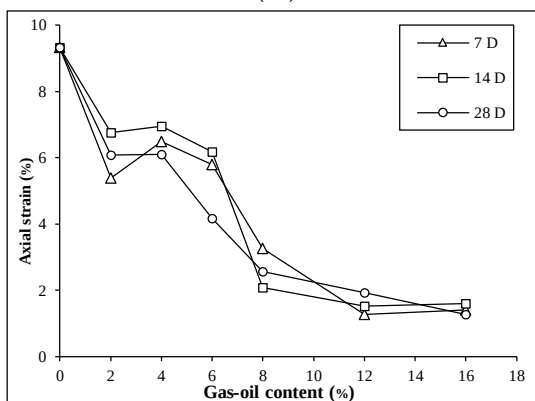
از آنجایی که در عمل تراکم به منظور خروج هوا از بخش منفذی خاک نیاز به حضور مقدار مشخصی از سیال در بافت خاک وجود دارد؛ در این پژوهش در اثر حضور گازوئیل، آب به تنهایی نقش روغن کاری و ایجاد کارایی لازم را ایفا نمی کند. از این رو با توجه به مشخص بودن درصد حضور گازوئیل در نمونه ها ملاحظه شد که مقدار آب بهینه در اثر افزایش درصد آلودگی کاهش می یابد (شکل ۱۰-ج).

۳-۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

همان طوری که پیش از این اشاره شد برای بررسی اثر آلاینده گازوئیل، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی خاک ماسه رس دار آلوده به ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل مطابق با استاندارد ASTM-D-2166 انجام شد. در جدول (۴)، شکل (۱۱) و (۱۲) نتایج آزمایش فشاری تک محوری ارائه شده است.



(الف)

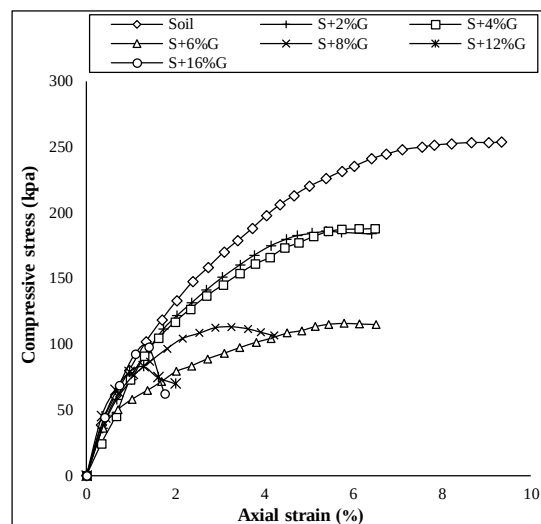


(ب)

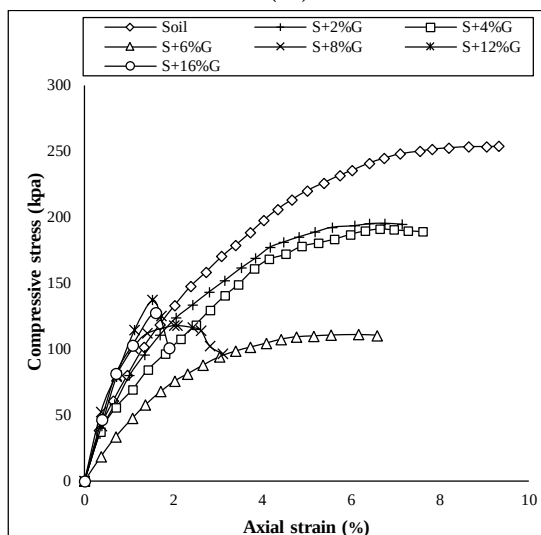
شکل ۱۲- الف) تغییرات مقاومت فشاری تک محوری،

ب) تغییرات کرنش محوری در مقابل درصد آلودگی خاک برای سه دوره عمل آوری

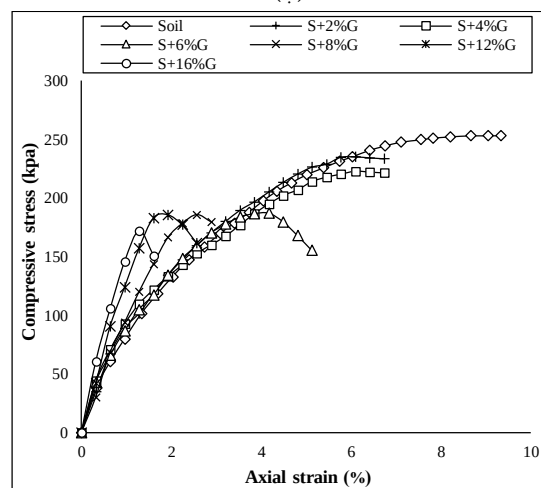
نتایج نشان می دهند که با افزایش درصد آلودگی خاک به گازوئیل در هر سه دوره عمل آوری، مقاومت فشاری محصور نشده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱- تأثیر درصد آلاینده گازوئیل بر روی مقاومت فشاری

تک محوری خاک ماسه رس دار با عمل آوری های: الف) ۷،

ب) ۱۴، ج) ۲۸ روزه

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک حاوی گازوئیل در سه دوره عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه

نمونه	زمان عمل آوری					
	روز ۷		روز ۱۴		روز ۲۸	
	ε (%)	q_u (kpa)	ε (%)	q_u (kpa)	ε (%)	q_u (kpa)
Soil	۹/۳۳	۲۵۳/۴	-	-	-	-
S+2%G	۵/۳۹	۱۸۵/۹	۶/۷۶	۱۹۵/۲	۶/۷۵	۲۳۵/۶
S+4%G	۶/۴۹	۱۸۸/۱	۶/۹۶	۱۹۰/۴	۶/۷۵	۲۲۲/۵
S+6%G	۵/۸	۱۱۵/۷	۶/۱۷	۱۱۰/۸	۴/۱۷	۱۸۷/۲
S+8%G	۳/۲۶	۱۱۳/۲	۲/۰۹	۱۱۷/۹	۲/۵۶	۱۸۵/۸
S+12%G	۱/۲۸	۸۳/۱	۱/۵۳	۱۳۷/۱	۱/۹۲	۱۸۵/۸
S+16%G	۱/۴	۹۸/۰۳	۱/۶۰	۱۲۷/۷	۱/۲۸	۱۷۲

۴- نتیجه گیری

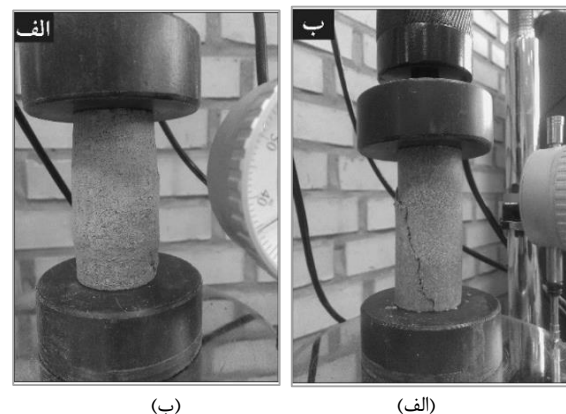
در این تحقیق، یک مجموعه منظم از آزمایش های ژئوشیمیایی، فیزیکی و مهندسی بر روی خاک ماسه رس دار آلوده به سیال آلی (گازوئیل) انجام شد و اثر آلاینده گازوئیل بر روی رفتار مکانیکی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه رس دار مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده در این پژوهش عبارت اند از:

- ۱) با افزایش درصد آلاینده گازوئیل، مدول درجه بندی و اندازه ذرات خاک افزایش می یابد.
- ۲) با افزایش مقدار گازوئیل در خاک، مقدار گازوئیل تبخیر شده کاهش می یابد.
- ۳) حد روانی و حد خمیری با افزایش درصد گازوئیل کاهش می یابد، همچنین شاخص خمیری تا مقدار ۸ درصد گازوئیل روند افزایشی داشته و به ازای مقادیر ۱۲ و ۱۶ درصد سیری نزولی به خود می گیرد.
- ۴) دانسیته خشک حداکثر برای ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد گازوئیل روندی کاهشی داشته و در ادامه با افزایش درصد گازوئیل افزایش می یابد. همچنین با افزایش درصد گازوئیل مقدار آب بهینه کاهش می یابد.
- ۵) برای هر سه دوره عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری تک محوری و کرنش در لحظه گسیختگی کاهش می یابد.

۵- مراجع

اوحدی و، فخیم جو م، امیدنائینی س ت، "مقایسه نحوه تغییرات رفتار خمیری و نفوذپذیری بنتونیت در حضور آلاینده های آلی و فلز سنگین"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۴۶ (۴)، ۳۶-۲۵.

و کرنش نهایی کاهش می یابد. این نتیجه را می توان به فلوکولاسیون و درشت شدن خاک با افزودن آلاینده گازوئیل ارتباط داد. به طور کلی افزایش در اندازه ذرات در خاک منجر به کاهش در مقاومت فشاری تک محوری می شود. پیش از این Khamsehchiyan و همکاران (۲۰۰۷)؛ Liu و همکاران (۲۰۱۵)؛ Nasehi و همکاران (۲۰۱۶)؛ Eissa (۲۰۱۶)، نیز با آزمایش بر روی خاک های مختلف به نتیجه مشابه با تحقیق حاضر رسیده بودند. مطابق شکل (۱۲) بیشترین مقاومت فشاری تک محوری در زمان عمل آوری ۲۸ روزه برای تمامی حالات درصد آلودگی مشاهده می شود. همچنین مطابق شکل (۱۲-الف) شیب کاهش مقاومت با افزایش درصد آلاینده در خاک برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه نسبت به ۷ و ۱۴ روز کمترین مقدار بوده و ملاحظه می شود که در دوره عمل آوری ۲۸ روزه افت مقاومت در بدترین حالت نسبت به خاک تمیز ۴۷ درصد است، در حالی که این مقدار برای دوره عمل آوری ۷ و ۱۴ روزه در بدترین حالت نسبت به خاک فاقد آلودگی به ترتیب برابر ۲۰۵ و ۱۲۹ درصد است. نتیجه دیگر این است که با وجود روند کاهشی کرنش محوری با افزایش درصد آلودگی نرخ افت کرنش برای هر سه دوره عمل آوری به ازای تمامی درصدهای آلودگی تقریباً ثابت است (شکل (۱۲-ب)). براساس منحنی تنش-کرنش محوری به دست آمده از آزمایش فشاری تک محوری مشخص شد که نمونه های با میزان آلودگی ۶ درصد و بیشتر از آن، رفتاری متفاوت نسبت به نمونه های بدون آلودگی و یا با آلودگی کم تر نشان می دهد. به طوری که رفتار نمونه ها از حالت کرنش-سخت شوندگی به حالت کرنش-نرم شوندگی تغییر می یابد. حضور گازوئیل منجر به کاهش خاصیت خمیری نمونه ها می گردد و ذرات رسی رفتار دانه ای را از خود نشان می دهند که در نتیجه رفتار نرم شوندگی نمونه ها را در درصدهای بالاتر آلودگی به دنبال دارد. شکل (۱۳) مکانیزم گسیختگی نمونه های آلوده به ۲ و ۱۲ درصد گازوئیل را نشان می دهد.



شکل ۱۳- رفتار نمونه ها در لحظه گسیختگی برای خاک ماسه رس دار حاوی: الف) ۲ درصد، ب) ۱۲ درصد گازوئیل

- metasedimentary soils", Sains Malaysiana, 2011, 40, 293-300.
- Ramírez-León H, "The Oil Spill in the Gulf of Mexico", In: Klapp J, Cros A, Velasco Fuentes O, Stern C, Rodriguez Meza M, (eds) *Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics*. Environmental Science and Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- Ratnaweera P, Meegoda J, "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29 (2), 133-140.
- SAPEM, "South African pavement engineering manual", South African National Roads Agency Limited, South Africa, 2011.
- Shin EC, Das BM, "Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2001, 11 (03).
- Somayajulu YP, Anderson KO, "Preliminary report on analysis of soil cement mixture", Alberta Co-operative Highway Research Programme. Department of Engineering, the University of Alberta, Edmonton, Alberta, 1971.
- Sridharan A, Nagaraj TS, Sivapullaiah PV, "Heaving of soil due to acid contamination", *Proc. 10th Int. Conf. on SM and FE*, Stockholm, 1981, 6, 383-386.
- Ur-Rehman H, Abduljawwad SN, Akram T, "Geotechnical behavior of oil contaminated fine-grained soils", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 1-12.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), "Must for USTs a summary of the new regulations for the underground storage tank systems", Office of Underground Storage Tanks, Washington, DC, US, 1988.
- Yong RN, "Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation", CRC Press, 2001.
- Yong RN, Warkentin BP, "Soil properties and behaviour", Elsevier Scientific, Amsterdam, 449, 1975.
- طاهری س، عبادی ت، مکنون ر، امیری م، "ارزیابی ریزساختاری تأثیر هم‌زمان آلاینده فلز سنگین سرب و گازوئیل بر پارامترهای مقاومتی مخلوط ماسه- بنتونیت"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۴۸ (۱)، ۳۵-۴۲.
- Al-Aghbari M, Dutta R, Mohamedzeini Y, "Effect of diesel and gasoline on the properties of sands a comparative study", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 5 (1), 61-68.
- Al-Sanad HA, Eid WK, Ismael NF, "Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121, 407-412.
- Al-Sanad HA, Ismael NF, "Aging effects on oil-contaminated Kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123 (3), 290-293.
- Daka MR, "Geotechnical properties of oil contaminated soil", PhD Thesis, University of Manchester, Manchester, UK, 2015.
- Eissa AM, "Effects of gasoline-contamination on geotechnical properties of clayey soil", *The African Young Geotechnical Engineers Conference (AYGEC'16)*, Ghana, 12 pages, 2016.
- Head KH, Epps RJ, "Manual of soil laboratory testing, volume 2: permeability, shear strength and compressibility tests", 3 Whittles Publishing, 2010.
- Ijimdiya TS, "Effect of oil contamination on particle size distribution and plasticity characteristics of lateritic soil", *Advanced Materials Research*, 2012, 367, 19-25.
- Karpuzcu M, Arbili MM, Ghaffoori F, Cabalar AF, "An assessment of the effects of light crude oil on the geotechnical properties of asoil", *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 2018, 5 (5).
- Kermani M, Ebadi T, "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of finegrained soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2012, 21, 655-671.
- Khamehchiyan M, Charkhabi AH, Tajik M, "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, 2007, 89, 220-229.
- Liu Z, Liu S, Cai YJ, "Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil", *Journal of Central South University*, 2015, 22, 4837.
- Nasehi SA, Uromehy A, Nikudel MR, "Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34, 333-345.
- Olgun M, Yildiz M, "Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil", *Applied Clay Science*, 2010, 48, 615-621.
- Rahman ZA, Hamzah U, Taha MR, Ithnain, NS, Ahmad N, "Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil", *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7 (7), 954-961.
- Rahman Z, Umar H, Ahmad N, "Engineering geological properties of oil-contaminated granitic and

EXTENDED ABSTRACT

Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clayey Sand

Milad Shahidi^a, Farhad Asemi^b, Farhang Farrokhi^{a,*}

^a Faculty of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

^b Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 31 January 2019; **Accepted:** 29 September 2020

Keywords:

Contaminated Soil, Clayey Sand, Gas Oil, Scanning Electron Microscope (SEM), Uniaxial Compression Strength (UCS).

1. Introduction

Contamination of soils with petroleum products, in addition to being an environmental problem, also makes it difficult from the point of view of geotechnical engineering and doubts the use of this soil following structures, road pavements, and other constructed structures. Sridharan et al. (1981) reported an increase in soil settlement due to contamination of the region's soil with hydrocarbons, resulting in damage to industrial buildings. In recent decades, due to the importance of studying the geotechnical behavior of contaminated soils with petroleum products, many studies have been conducted on the physical and chemical properties of these soils. Much research has been done on the geotechnical properties of fine-grained and coarse-grained soils contaminated with petroleum products (Shin and Das, 2001; Ratnaweera and Meegoda, 2006; Rahman et al., 2010; Al-Aghbari, 2011; Kermani and Ebadi, 2012; Karpuzcu et al., 2018). In this study, the emphasis is on the evaluation of the polluting effect of gas oil as a pollutant with a specific gravity less than water on the fine-grained and coarse-grained behavior of soil. For this aim, a set of geochemical (including XRD and XRF analyzes), geotechnical tests (including grain size distribution, gas evaporation, Atterberg limits, and unconfined compression strength), as well as observation by scanning electron microscopy on contaminated Clayey Sand by gas oil was done.

2. Methodology

In this study, Clayey Sand soil containing 56% coarse-grained and 44% fine-grained was used. Gas-oil with a specific weight of 0.84 kg/lit was selected as a contaminant at 2, 4, 6, 8, 12, and 16 percent. To prepare the samples, the soil was compressed into five layers (sample length 70.1 mm and diameter 33.3 mm) using 16 blows per layer of a special hammer for the Harvard compaction apparatus; the maximum dry weight was obtained from the standard Proctor density test. Grading modulus (GM), standard compaction, Atterberg limits the percentage of gas-oil evaporation, uniaxial compressive strength (UCS), and scanning electron microscopy imaging (SEM) tests were performed on the soil in uncontaminated and contaminated modes with different percentages of gas-oil.

* Corresponding Author

E-mail addresses: milad.shahidi@znu.ac.ir (Milad Shahidi), farhad.asemi@znu.ac.ir (Farhad Asemi), farrokhi@znu.ac.ir (Farhang Farrokhi).

3. Results and discussion

3.1. Grading modulus (GM)

In order to investigate the contaminated soil, the grading modulus was used to confirm the reduction of fine grains in contaminated soils. The grading modulus, according to Eq. 1 is defined as the ratio of the total percentage of soil particles remaining on sieve 2, 0.425, and 0.075 mm per 100.

$$GM = (P_2 + P_{0.425} + P_{0.075}) / 10 \quad (1)$$

The results show that the grading modulus varies from 0.064 for uncontaminated soil to 0.214 for soil with the highest amount of gas-oil (16%).

3.2. Atterberg limits

The results show that with increasing gas-oil, the liquid limit decreases, and for contaminated soil containing 16% gas-oil was observed 28.9% decrease. In addition, according to the results, the difference between the plastic limit and the liquid limit (plastic index) for gas-oil quantities up to 8% has an increasing trend and for the values of 12 and 16% gasoil takes a downward trend (Fig. 1). This can be attributed to the high viscosity of the gas-oil and the different emulsion formations in each of the ascending and descending trends.

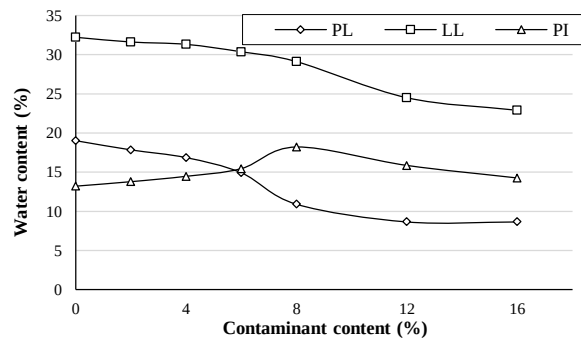


Fig. 1. The effect of gas-oil on the Atterberg limits of the Clayey Sand soil

3.3. Uniaxial compressive strength (UCS)

In order to evaluate the effect of curing time on the compressive strength of the contaminated soil samples, the testing was performed at three curing periods (7, 14, and 28 days). The results show that were reduced the compressive strength and the ultimate strain of the samples, for all three periods of curing, by increasing the percentage of contamination. Fig. 2 (a) shows that the highest uniaxial compressive strength at the 28-day curing period is observed for all cases of contamination percentage. Also, according to Fig. 2 (a), the slope of the reduction of strength with the increasing amount of contaminants in the soil for the 28-day compared to 7 and 14 days is the lowest value. Based on the stress-strain curve obtained from the compressive test, it was found that specimens with 6% or more contamination showed a different behavior than specimens without contamination or with less contamination. So that the behavior failure of the samples changes from strain-hardening to strain-softening.

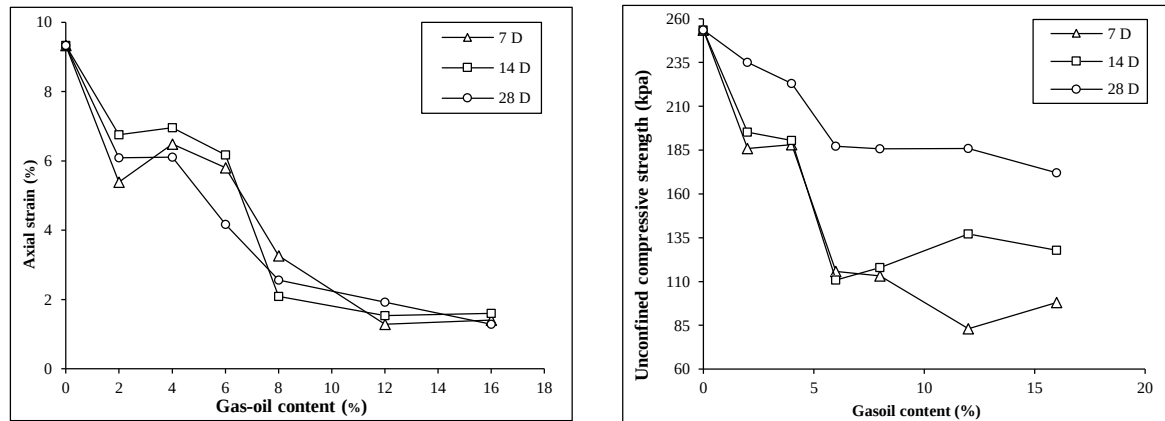


Fig. 2. Changes in: a) uniaxial compressive strength and, b) axial strain versus contaminant percentage for three curing periods

4. Conclusions

The results of the experiments performed in this study showed an increase in the grading modulus and particle size of the soil particles with an increase in the amount of pollutants. Also, the amount of evaporated gas-oil from the soil decreases as the amount of gas-oil increases. According to the results of Atterberg limits, the liquid limit and the plastic limit have a decreasing trend with increasing the amount of gas-oil. Maximum dry density has been declining to a minimum for the lower values contaminant but has increased in the following with the increasing amount of gas-oil. In addition, the optimum water content has decreased by increasing the percentage of diesel.

5. References

- Al-Aghbari M, Dutta R, Mohamedzeini Y, "Effect of diesel and gasoline on the properties of sands a comparative study", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 5 (1), 61-68.
- Karpuzcu M, Arbili MM, Ghaffoori F, Cabalar AF, "An assessment of the effects of light crude oil on the geotechnical properties of asoil", *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 2018, 5 (5).
- Kermani M, Ebadi T, "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of finegrained soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2012, 21, 655-671.
- Rahman ZA, Hamzah U, Taha MR, Ithnain, NS, Ahmad N, "Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil", *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7 (7), 954-961.
- Ratnaweera P, Meegoda J, "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29 (2), 133-140.
- Shin EC, Das BM, "Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2001, 11 (3).
- Sridharan A, Nagaraj TS, Sivapullaiah PV, "Heaving of soil due to acid contamination", *Proc. 10th Int. Conf. on SM and FE*, Stockholm, 1981, 6, 383-386.