



بررسی عدم قطعیت اثر آلاینده گازوئیل بر رفتار ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای بستر مخازن نفتی

محمد رضا صبور*، محسن قدردان، مریم خورشید احمدی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ شهریور ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۰ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۹ آبان ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

آلودگی خاک
گازوئیل
پایداری مخزن
عدم قطعیت
مونت کارلو

چکیده: نشت از مخازن نفتی باعث ایجاد حجم عظیمی از خاک آلوده می‌گردد. در اثر فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی که بین آلاینده و خاک رخ می‌دهد، رفتار مقاومتی خاک تغییر می‌کند. این امر می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری خاک گردد و پایداری مخزن نفتی را به خطر اندازد و به دنبال آن مشکلات زیست محیطی زیادی را بوجود آورد. با توجه به عدم آگاهی کافی نسبت به مقدار دقیق نشت مواد آلاینده از مخزن و مقدار اثر آن در کاهش ظرفیت باربری خاک آلوده زیر مخزن، از عدم قطعیت و احتمالات می‌توان جهت ارزیابی احتمال میزان کاهش ظرفیت باربری استفاده نمود. در این مقاله، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه خاک ماسه سیلیسی آلوده به گازوئیل با مقادیر آلودگی ۲، ۴، ۶ و ۱۲ درصد و ۱۶ درصد وزنی خاک انجام شده و در انتها برای بررسی احتمالاتی پایداری بستر آلوده زیر مخزن، از روش مونت کارلو استفاده گردیده است. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد با افزایش میزان آلاینده‌ها، میزان زاویه اصطکاک داخلی و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد که این میزان کاهش تا مقدار آلودگی ۶ درصد با شیبی نسبتاً ملایم و از آن به بعد با شیبی تندتر همراه است. همچنین با استفاده از روش مونت کارلو، دو پارامتر احتمالاتی قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی محاسبه گردیده و با ضریب اطمینان مقایسه شده است.

۱- مقدمه

آلودگی خاک به مواد نفتی به یکی از موضوعات مهم و مورد توجه محققین در سال‌های اخیر تبدیل شده است. آلودگی به آلاینده‌های نفتی در بسیاری از موارد به صورت اتفاقی صورت می‌گیرد، که برای مثال می‌توان به موارد نشت از لوله‌های انتقال آسیب دیده، تصادف تانکرها، تخلیه از تاسیسات نفتی داخل خشکی و دریاها، نشت از مخازن نگهداری، محل‌های حفاری و استخراج و یا حین مراحل مختلف پالایش اشاره نمود [۱].

نشت از مخازن باعث ایجاد حجم عظیمی از خاک آلوده می‌گردد. علاوه بر نگرانی‌های زیست محیطی در مورد آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی و دیگر اثرات احتمالی آن، تغییر در خواص ژئوتکنیکی خاک نیز مورد توجه می‌باشد. در اثر فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی که بین خاک و آلاینده‌ها رخ می‌دهد، خصوصیات مقاومتی، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک تغییر می‌کند [۱-۳]. تغییر پارامترهای مقاومتی خاک می‌تواند بر میزان نشست‌پذیری و ظرفیت باربری یک پی که بر خاک آلوده قرار گرفته، تاثیرگذار باشد و همچنین ممکن است منجر به ناپایداری بستر مخزن نفتی و ایجاد مشکلات محیط‌زیستی بیشتری شود. این در حالیست که طراحی فونداسیون مخازن و بقیه سازه‌هایی که در محل تاسیسات نفتی قرار دارند، بدون در نظر گرفتن

این پدیده صورت می‌پذیرد. در نتیجه ضروری است که اثرات مواد نفتی بر ویژگی‌های خاک بررسی شود تا بدین وسیله بتوان احتمال تامین پایداری مورد نظر توسط بستر مخازن یا بستر سازه‌های دیگری که آلوده به مواد نفتی است را تعیین نمود [۱ و ۶-۴].

در تحقیقات انجام گرفته با استفاده از آزمایش برش مستقیم محققان دریافته‌اند که افزایش آلاینده باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی ماسه می‌گردد [۷]. در مطالعه دیگر که به بررسی اثر نفت خام بر خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌ی آلوده پرداختند، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده به ۲ تا ۸ درصد از آلاینده انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها مکانیک خاک نشان می‌دهد زاویه اصطکاک داخلی ماسه در اثر آلودگی به نفت خام تا ۳ درصد کاهش می‌یابد. افزایش آلودگی به بیشتر از ۳ درصد تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر زاویه اصطکاک داخلی ندارد [۸]. پژوهشی دیگر با عنوان تأثیر میزان آلودگی خاک به نفت خام بر پارامترهای مقاومت برشی و تراکم‌پذیری آن انجام گرفته که نتایج بیانگر این امر است که برای ۱ درصد رطوبت ثابت، رابطه‌ی مستقیمی بین زاویه اصطکاک داخلی و درصد آلاینده وجود دارد. اما بین چسبندگی و درصد آلاینده، رابطه‌ی معکوس دیده می‌شود. در صورتی که درصد آلاینده ثابت باشد، با افزایش آب، زاویه اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد [۹].

در تحقیق انجام گرفته در مورد اثر آلاینده‌های نفتی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ماسه‌ای و رسی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sabour@kntu.ac.ir

این فرآورده‌ی نفتی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ماسه سیلیسی مطالعه‌ای انجام نشده بود، این محصول نفتی به عنوان آلاینده انتخاب گردیده است. قبل از آزمایش‌های اصلی که جزء اهداف این تحقیق بشمار می‌رود، ضروری است آزمایش‌هایی برای شناسایی خاک انجام شود. در جدول ۱ به صورت خلاصه به آزمایش‌های لازم برای شناسایی فیزیکی خاک اشاره شده است.

جدول ۱: آزمایش‌های شناسایی مصالح

Table 1. Soil particles determination tests

استاندارد	آزمایش
ASTM D ۴۲۲-۹۸	دانه بندی
ASTM D ۸۵۴-۰۲	تعیین چگالی ویژه
ASTM D ۴۲۵۳-۰۰	نسبت تخلخل حداقل
ASTM D ۴۲۵۴-۰۰	نسبت تخلخل حداکثر
ASTM D ۲۲۱۶	درصد رطوبت

نمونه‌های خاک آغاز می‌گردد. هرچه نمونه‌های ساخته شده از لحاظ مختلف به یکدیگر تشابه بیشتری داشته باشند درصد خطای نمونه‌سازی کاهش می‌یابد. اولین قدم در این زمینه افزایش یکنواختی نمونه‌ها است. جهت افزایش یکنواختی نمونه‌ها، مقادیری از خاک که در هر مرحله برای ساختن نمونه‌ها مورد نیاز است، از الک شماره ۴ رد شد تا کلوخه‌های موجود در آن جدا گردد. وجود کلوخه‌های ریز در هنگام مخلوط کردن خاک با گازوئیل باعث عدم یکنواختی می‌گردد. در مرحله‌ی بعد مقادیر خاکی که از الک عبور داده شد، به مدت ۲۴ ساعت در اون در دمای ۱۰۵ درجه گذاشته شد تا خشک گردد. خاک پس از خنک شدن مورد استفاده قرار گرفت.

برای ساختن نمونه‌ها، خاک‌های مهیا شده در مرحله قبل با گازوئیل مخلوط گردید. برای تشابه نمونه‌ها، مقدار مشخصی (۵۰۰ گرم) از خاک در سه کیسه‌ی پلاستیکی ریخته شده و سپس مقادیر مختلفی از گازوئیل بر روی آن افشانه شده است. مقدار گازوئیل اضافه شده بر اساس نسبت وزنی گازوئیل به خاک محاسبه شده است. درصد وزنی گازوئیل به خاک در این پژوهش ۲، ۴، ۶، ۱۶، ۱۲ می باشد. پس از آن سر کیسه‌ها بسته شده و با دست مخلوط گردید تا نمونه‌های همگن و یکنواختی بدست آید.

پس از آماده کردن نمونه‌های آلوده، در گرمخانه تحت دمای ۳۰°C به مدت ۱۰ روز نگهداری شدند و پس از آن مطابق برنامه‌های آزمایشگاهی تنظیم شده، آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های ۱۰ روزه انجام گردید.

درصد آلاینده زاویه اصطکاک داخلی خاک رسی مورد آزمایش (که از طبقه CL بوده است) افزایش، اما زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های ماسه‌ای (که از طبقه SP و SM بوده‌اند) کاهش می‌یابد. بین چسبندگی خاک رسی و میزان آلاینده، رابطه‌ی معکوسی برقرار است. این در حالی است که در نمونه‌های ماسه‌ای روند مشخصی مشاهده نشده و تنها مقدار کمی چسبندگی در نمونه‌های SP دیده شده است که آن را به چسبندگی ذاتی نفت نسبت می‌دهند. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که مقاومت برشی تمامی نمونه‌ها، با افزایش آلودگی کاهش می‌یابد [۱۰]. با توجه به تحقیق انجام گرفته بر روی رس کائولینیت آلوده شده با گازوئیل، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های تمیز و آلوده به ۲ تا ۱۶٪ از آلاینده‌ی گازوئیل انجام شده است. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد که با افزایش میزان آلاینده‌ها، میزان چسبندگی افزایش و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد [۱ و ۴].

بسیاری از پارامترهایی که در تحلیل‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای عدم قطعیت هستند. از این رو کار با عدم قطعیت، یکی از جنبه‌های مهم و اساسی مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌گردد. بطوری‌که هرچه میزان عدم قطعیت بیش‌تر باشد، شرایط بحرانی‌تر و نیاز به ارزیابی آن بر روی نتایج بیش‌تر خواهد بود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در اثر فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی که بین خاک و آلاینده رخ می‌دهد، ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن تغییر می‌کند. نتایج آزمایش‌ها، نشان‌دهنده‌ی این مهم هستند که درصدهای متفاوت از آلودگی، تاثیر متفاوتی بر پارامترهای مقاومتی خاک داشته و در نتیجه، تاثیر متفاوت بر ظرفیت باربری خاک زیر مخازن نشستی دارد. با توجه به انجام تعداد محدودی آزمایش بر روی نمونه خاک‌های آلوده، نمی‌توان در مورد ظرفیت باربری و همچنین ضریب اطمینان خاک آلوده برای دیگر درصدهای از آلاینده قضاوت قطعی نمود. از این رو با به‌کارگیری یک روش تحلیلی قطعی به همراه یک روش احتمالاتی مانند شبیه‌ساز مونت کارلو می‌توان نقص ناشی از این کمبود اطلاعات را پوشش داد.

با وجود انجام تحقیقات متعددی در زمینه خاک‌های آلوده، موضوع اثر آلاینده گازوئیل بر ماسه و همچنین بررسی اثر عدم قطعیت در تحلیل‌های ظرفیت باربری خاک‌های آلوده، هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه خاک ماسه سیلیسی آلوده به گازوئیل با مقادیر آلودگی ۲، ۴، ۶، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی خاک انجام شده و در نهایت برای بررسی احتمالاتی پایداری بستر مخازن، از روش مونت کارلو استفاده گردیده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از خاک ماسه سیلیسی معدن واقع در گرمسار استفاده گردیده است. این نوع ماسه که توسط شرکت تاوان سیلیس در اندازه‌های مختلف تهیه شده‌است، از نوع فرآورده‌های سیلیسی دانه‌بندی شده می‌باشد. همچنین به‌دلیل کاربرد زیاد گازوئیل و با توجه به اینکه تا کنون در مورد اثر

۲-۱- آزمایش برش مستقیم

$$N_q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) e^{\pi \tan \phi} \quad (3)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot(\phi) \quad (4)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (5)$$

پس از ترزاقی، دانشمندان دیگری از جمله مایرهوف^۱، درباره‌ی ظرفیت باربری پی‌های سطحی تحقیق نمودند.

در این تحقیق میزان ظرفیت باربری پی‌های قرار گرفته بر ماسه آلوده به مقادیر مختلف آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور فرض شده است که یک پی دایره‌ای به قطر ۵ متر و یک پی مربعی با ضلع ۴/۴۳ متر با عمق مدفون ۰/۵ متر به منظور باربری مخزن مورد نظر ساخته شده است. برای یک درصد تراکم و یک درصد آلودگی مشخص، مقدار تغییر ظرفیت باربری پی مورد نظر از رابطه ۶ محاسبه گردید. قابل ذکر است که به منظور مقایسه‌ی دو روش مایرهوف و ترزاقی، مقدار ظرفیت باربری با استفاده از هر دو روش محاسبه گردیده است. همچنین به منظور مقایسه‌ی نوع شکل پی، از دو شکل دایره‌ای و مربعی با مساحت یکسان استفاده گردیده است. که در آن، میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی، Q و Q_w به ترتیب مقدار ظرفیت باربری نهایی در درصد آلودگی ۰ و w می‌باشند.

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q - Q_w}{Q} \times 100 \quad (6)$$

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- نتایج آزمایش‌ها برش مستقیم نمونه‌های آلوده به گازوئیل

حداکثر تنش برشی در آزمایش‌های مختلف برای درصد غلظت متفاوت گازوئیل تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال بدست آورده شده و با رسم نمودار تنش برشی حداکثر در مقابل تنش قائم، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مختلف بدست آمده است. از آنجا که خاک مورد نظر ماسه می‌باشد، خاک تنها دارای زاویه اصطکاک داخلی بوده و مقدار چسبندگی آن، صفر به‌دست آمده است.

در شکل ۱، نمودار مقایسه‌ای میزان زاویه اصطکاک داخلی به ازای درصد آلودگی‌های متفاوت (w) در دو درصد تراکم ۴۵٪ و ۷۵٪ آمده است

معیارهای مقاومت برشی خاک که عبارتند از زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی، تعیین کننده‌ی ظرفیت باربری بستر مخازن هستند که با انجام آزمایش‌ها مربوطه تغییرات آن‌ها در اثر آلودگی مشخص می‌شود. در این راستا نمونه‌های متعددی از ترکیب خاک ماسه سیلیسی و مقادیر متفاوتی از گازوئیل که عبارتند از ۲، ۴، ۶، ۱۲، ۱۶ درصد وزنی دانه‌های جامد خاک، تهیه شده و مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. در اکثر مطالعات گذشته، میزان آلاینده در نمونه‌ها به ۶٪ محدود می‌شد اما در این تحقیق برای مطالعه و پیش بینی بهتر، نمونه‌هایی با درصد‌های بالاتری از آلاینده ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفته است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D3080-72 و با سرعت اعمالی نیروی برشی ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. برای جلوگیری از خروج آلاینده از نمونه، آزمایش به‌صورت زهکشی نشده انجام شده تا غلظت آلاینده در طی آزمایش تغییر نکند. ابعاد سطح جعبه ۶×۶ سانتی‌متر مربع و عمق آن ۲/۵ سانتی‌متر می‌باشد.

۲-۲- ظرفیت باربری

ظرفیت باربری بصورت کلی یک اصطلاح عمومی است که برای توصیف باری که یک پی خاکی یا سنگی، ظرفیت تحمل آن را دارد به کار می‌رود. ظرفیت باربری نهایی خاک برای پی‌ها (آن میزان بارگذاری که منجر به گسیختگی برشی خاک‌های تقویت‌شده می‌شود)، به ویژگی‌های خاک (که خود شامل تاریخچه‌ی تنش‌هایی که در گذشته به خاک وارد شده و میزان نزدیکی تراز آب زیرزمینی می‌شود) بستگی دارد. از سوی دیگر، مشخصات پی مانند اندازه، عمق، شکل و روش ساخت یا نصب آن نیز بر روی ظرفیت باربری نهایی خاک موثر است [۱۱]. ترزاقی، با یک روش تقریبی رابطه‌ی زیر را با فرض گسیختگی برشی کلی برای یک شالوده‌ی نواری پیشنهاد نمود. رابطه‌ی زیر، رابطه‌ی ظرفیت باربری ترزاقی نام دارد [۱۱].

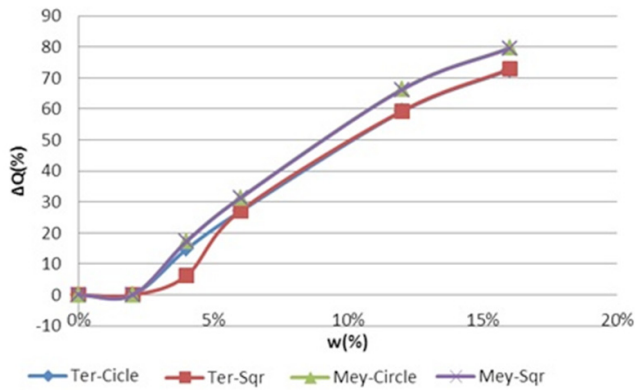
$$q_u = cN_c + qN_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (1)$$

N_c و N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری، c چسبندگی خاک، γ وزن واحد حجم خاک بالای شالوده و q بار وارده به شالوده است.

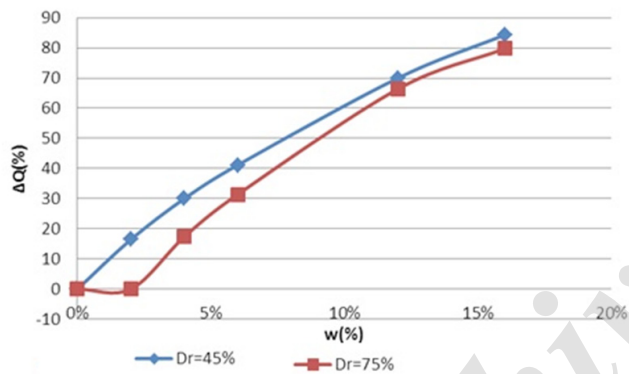
در حال حاضر، یک رابطه کلی برای تخمین ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی به صورت زیر وجود دارد:

$$q_u = s_c d_c c N_c + s_q d_q \gamma D_f N_q + s_\gamma d_\gamma 0.5\gamma BN_\gamma \quad (2)$$

N_c و N_q و N_γ ضرایب ظرفیت باربری، s_c و s_q و s_γ عوامل شکل شالوده، d_c و d_q و d_γ عوامل عمق هستند. c چسبندگی خاک، γ وزن واحد حجم خاک بالای شالوده، B و D_f نیز به ترتیب، عرض و عمق موثر شالوده است.

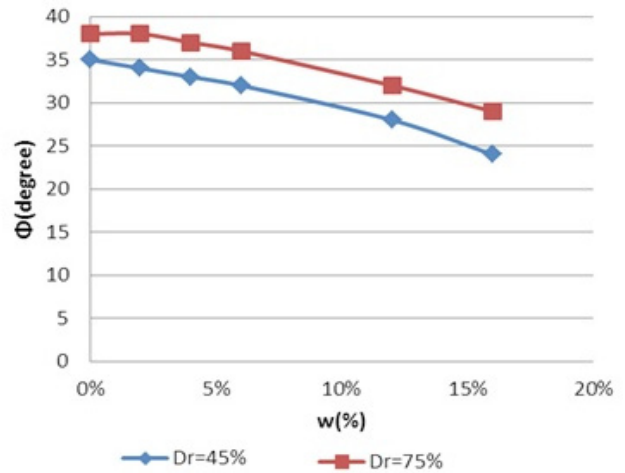


شکل ۳: نمودار درصد نسبی تغییر ظرفیت باربری برای درصد های آلودگی متفاوت در درصد تراکم ۷۵٪
Fig. 3. Relative reduction in ultimate bearing capacity in 75% compaction



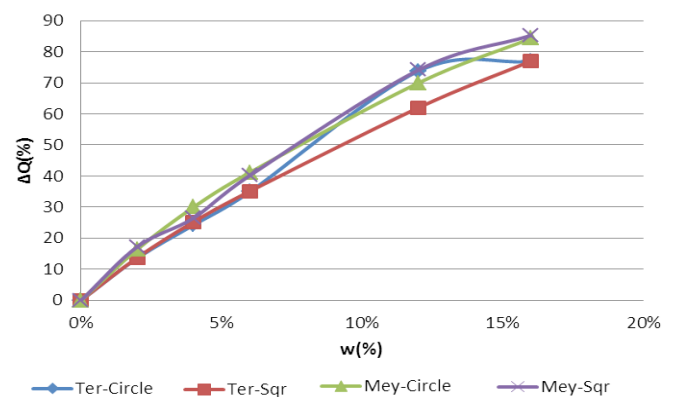
شکل ۴: نمودار مقایسه‌ای درصد نسبی تغییر ظرفیت باربری در درصد تراکم های مختلف
Fig. 4. Comparison of relative reduction in bearing capacity for different compaction

همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، روند تغییر ظرفیت باربری به صورت کاهشی است. به این ترتیب که شیب نمودار در درصد آلودگی‌های ۰ تا ۶٪ کند بوده و در ۱۲ و ۱۶٪ تندتر می‌شود. این بدان معناست که در درصد آلودگی‌های بالاتر میزان کاهش ظرفیت باربری بیشتر می‌شود. این روند با توجه به روند مشابه در کاهش زاویه اصطکاک داخلی، منطقی است. همچنین از نمودارها مشخص است که به‌طور کلی درصد کاهش ظرفیت باربری در روش مایرهورف بیش‌تر از روش ترزاقی می‌باشد و برای پی مربعی و دایره‌ای تفاوت چندانی ندارد. در شکل ۴ نیز مشاهده می‌گردد که برای یک نوع پی و با استفاده از یک روش محاسبه ظرفیت باربری یکسان، میزان درصد نسبی کاهش ظرفیت باربری برای درصد تراکم ۴۵٪ بیش‌تر از درصد تراکم ۷۵٪ می‌باشد.



شکل ۱: نمودار تغییر زاویه اصطکاک داخلی در درصد های آلودگی متفاوت
Fig. 1. Changes of internal friction angle in different gasoil content

همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش درصد آلودگی، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. این بدان معناست که به علت وجود آلاینده در میان حفرات خاک و آغستگی سطح دانه‌ها به آن و خاصیت روغن کاری گازوئیل، قفل و بند (اتصال داخلی) میان دانه‌ها کاهش یافته و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. روند کاهشی زاویه اصطکاک داخلی در ابتدا و تا درصد آلودگی ۶٪ کند است اما با افزایش میزان گازوئیل این روند کاهشی، تندتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که در درصد تراکم بالاتر (۷۵٪)، میزان زاویه اصطکاک داخلی، بیش‌تر است. در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نمودارهای مقایسه‌ای چگونگی درصد تغییر ظرفیت باربری در حالت آلوده نسبت به حالت خاک تمیز آمده است.



شکل ۲: نمودار درصد نسبی تغییر ظرفیت باربری برای درصد های آلودگی متفاوت در درصد تراکم ۴۵٪
Fig. 2. Relative reduction in ultimate bearing capacity in 45% compaction

۴- به کارگیری روش‌های احتمالاتی و نقش عدم قطعیت در

ژئوتکنیک

۴-۱- عدم قطعیت در مهندسی ژئوتکنیک

امروزه با ارائه روش‌های نوین در علم آمار و کاربرد این روش‌ها در علوم مهندسی، تحلیل‌های احتمالی در کنار تحلیل‌های قطعی محبوبیت یافته‌اند. در این اینگونه تحلیل‌ها در مهندسی خاک و پی، به همراه هر پارامتر، تغییرپذیری‌های هر پارامتر نیز در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه، مفهوم قابلیت اعتماد به ضریب اطمینان در کنار ضریب اطمینان بیان می‌گردد. بسیاری از پارامترهایی که در تحلیل‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای عدم قطعیت هستند. این عدم قطعیت باعث می‌شود که پراکندگی مشخصات خاک تبدیل به یک نگرانی بزرگ برای مهندسی خاک و پی شود. از این رو کار با عدم قطعیت، یکی از جنبه‌های مهم و اساسی مهندسی خاک و پی محسوب می‌گردد. این عدم قطعیت در این تحقیق بصورت نبود اطلاعات کافی در مورد میزان نشست آلاینده از مخزن و همچنین مقدار تغییر پارامترهای مقاومتی خاک در اثر آلوده شدن می‌باشد.

۴-۲- نظریه احتمالات و عدم قطعیت

قطعیت مربوط به حالت‌هایی است که در آن حاصل و نتیجه‌ی یک رویداد یا مقدار یک پارامتر با احتمال واحد مشخص می‌شود. برعکس، عدم قطعیت هنگامی اتفاق می‌افتد که مجموعه‌ای از مقادیر وابسته به شرایط غیر قطعی، در حالت عادی با احتمالات غیر منفی برای حداقل دو مقدار ممکن متفاوت رخ می‌دهد. تحلیل عدم قطعیت به‌عنوان یک رویکرد نوظهور، از روش‌های تخمین و شبیه‌سازی برای تعیین و محاسبه قابلیت تغییرپذیری اطلاعات موجود استفاده می‌نماید. از سوی دیگر، از این روش می‌توان برای تخمین آن دسته از فراوانی که در آن مقادیر مورد نظر به صورت محتمل از حد مجاز تجاوز می‌کنند نیز استفاده نمود. با وجود این که این روش هنوز به‌طور گسترده در کارهای مهندسی خاک و پی بکار نمی‌رود اما رویکرد نوینی در زمینه‌های اطلاعات موجود برای سیستم‌های خاک و پی ناهمگن ارائه می‌دهد [۱۳].

۴-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از روش‌های مخصوص می‌باشد که می‌توان از آن برای تولید تعدادی نتایج عددی بدون انجام آزمایش فیزیکی مجدد استفاده نمود. در واقع می‌توان از نتایج آزمایش‌های گذشته برای به‌دست آوردن توزیع احتمالاتی پارامترها استفاده نمود، و سپس از اطلاعات این توزیع برای تولید نمونه‌های عددی استفاده کرد. به عبارت دیگر، اگر اطلاعاتی راجع به N آزمایش، موجود و در یک بسته (پایگاه اطلاعاتی) گرفته شده باشد و به تعداد n نمونه از نتایج آزمایش مشابه نیاز باشد، به جای انجام n آزمایش جدید، می‌توان به صورت تصادفی و با استفاده از روش‌های مخصوص، n نتیجه از N آزمایش را از بسته‌های موجود انتخاب

نمود [۱۴].

در شبیه‌سازی مونت کارلو ابتدا یک عدد تصادفی معین شده و سپس احتمال انجام یک رخداد با مقدار عدد تصادفی تولید شده مقایسه می‌شود. در حالتی که عدد تولید شده، معیار احتمال را برآورده نماید، در مرحله‌ی بعدی یک فرآیند یا مجموعه‌ای از فرآیندها رخ می‌دهد. این روند می‌تواند چند بار تکرار شود و به ازای هر تکرار، یک خروجی قابل اندازه‌گیری تولید شود. در بخش نهایی، مجموعه آزمایش‌ها یا نتایج خروجی، تحت پردازش آماری قرار می‌گیرد. بخش فرآیند با رخدادها می‌تواند ساده یا بسیار پیچیده و حاوی حلقه‌ها و الگوریتم‌های متعدد و حتی حاوی تولیدکننده‌های تصادفی متعدد باشد. افزون بر این، می‌توان از هر نقطه الگوریتم یا فرآیند داده‌های کمی استخراج نمود و به‌عنوان متغیرهای خروجی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۱۵].

در حالت کلی، اجرای این روش در برگیرنده‌ی موارد زیر می‌باشد:

- انتخاب مدلی که یک راه حل قطعی برای یک مسئله ارایه خواهد نمود.
- تصمیمات مربوط به این که پارامترهای ورودی بصورت احتمالاتی مدل‌سازی شوند و نیز تغییرپذیری آن‌ها بر حسب توزیع‌های احتمالاتی نمایش داده شود.
- تکرار تخمین پارامترهای ورودی تا زمانی که توزیع‌های احتمال مناسب حاصل شود و نیز با همبستگی قطعی یا تخمین زده شده بین پارامترهای ورودی سازگار باشد.
- تکرار نمودن مرحله تعیین خروجی با استفاده از مدل قطعی.

۴-۴- تولید اعداد تصادفی

هسته‌ی اصلی هر روش شبیه‌سازی تصادفی یا روش‌های مونت کارلو، بر مبنای استفاده از اعداد تصادفی است. طبق تعریف ریاضی، عدد تصادفی عددی است که کاملاً شانس و بدون در نظر گرفتن قواعد خاصی معین می‌شود. در رایانه معمولاً اعداد تصادفی بر مبنای قواعد ماشین تهیه می‌شود. برای اطمینان از این که اعداد تصادفی جدید به ازای هر مرحله اجرا به وجود می‌آیند، تابع عدد تصادفی با زمان کنونی به عنوان یک ساعت رایانه‌ای بررسی می‌شود. اعداد تصادفی تولید شده از تابع به مقادیر بین ۰ و ۱ به طور یکنواخت توزیع می‌شوند.

در حالت کلی، این امر با استفاده از یک تابع مولد عدد تصادفی (با اعداد تصادفی تولید شده حین هر مرحله اجرای آنالیز) به انجام می‌رسد. به‌منظور استفاده از اعداد تصادفی به‌وجود آمده در محاسبات توزیع‌های دیگر، عدد تصادفی یکنواخت به یک عدد توزیع شده به شکل نرمال تبدیل می‌شود. برای توزیع نرمال، فرآیند نرمالیزه کردن با استفاده‌ی مجدد از معادله تبدیل پیشنهاد شده توسط مولر و باکس^۱ انجام می‌شود:

1 Box-Muller

که در آن، μ میانگین ضریب اطمینان، σ انحراف از معیار ضریب اطمینان و β شاخص قابلیت اعتماد می‌باشد. رابطه‌ی فوق به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزایش انحراف از معیار، قابلیت اعتماد کاهش می‌یابد.

۵- تحلیل احتمالاتی نتایج آزمایش‌ها با استفاده از روش مونت کارلو

در بیشتر موارد به‌منظور بررسی پایداری یک سازه، بحث ضریب اطمینان مورد بررسی قرار می‌گیرد که بر اساس یک روش حل قطعی و در نظر گرفتن مشخصات خاک بطور ثابت، ضریب اطمینانی برای سازه بدست می‌آید که پایداری سازه (و نه اطمینان به سازه) را بیان می‌کند. اکنون با بکارگیری عدم قطعیت میزان اعتماد به سازه تحت شرایط مختلف بررسی می‌شود. در ابتدا، با استفاده از روابط ارائه شده ظرفیت‌های باربری تصادفی و ضریب اطمینان‌های تصادفی پی اندازه‌گیری و سپس قابلیت اعتماد و احتمال شکست محاسبه می‌شود. قابل ذکر است که به منظور مقایسه‌ی بهتر، مقدار ظرفیت باربری به دو روش مایرهورف و ترزاقی محاسبه شده است. هم‌چنین به منظور مقایسه‌ی نوع شکل پی و انتخاب هندسه مناسب در طراحی پی، از دو شکل دایره‌ای و مربعی با مساحت یکسان استفاده گردید.

۵-۱- نتایج تحلیل احتمالاتی

با توجه به توضیحات داده شده در بخش‌های قبل، در جداول ۲ الی ۵، قابلیت اعتماد و احتمال شکست برای شالوده‌ی قرار گرفته بر نمونه‌ی ماسه آلوده به گازوئیل آورده شده است.

با توجه به این‌که تعداد متغیرها زیاد است، هربار یک پارامتر را به‌عنوان متغیر و بقیه را ثابت در نظر گرفته و به مقایسه پرداخته می‌شود.

• مقایسه روش بدست آوردن ظرفیت باربری:

به‌طور کلی در روش مایرهورف، قابلیت اعتماد بیش‌تر و احتمال گسیختگی کمتری نسبت به روش ترزاقی به‌دست آمده است.

• مقایسه درصد تراکم:

به‌طور کلی با افزایش مقدار تراکم از ۴۵٪ به ۷۵٪، میانگین ضریب اطمینان و قابلیت اعتماد، افزایش و احتمال شکست، کاهش می‌یابد. این امر نشانگر این مهم است که با افزایش درصد تراکم در ماسه آلوده، پایداری پی افزایش می‌یابد.

• مقایسه شکل پی:

مشاهده می‌شود که پی دایره‌ای نسبت به پی مربعی دارای قابلیت اعتماد بیش‌تر و احتمال گسیختگی کمتری است. اما این روند فقط در روش مایرهورف صحت دارد و در روش ترزاقی در برخی موارد پی دایره‌ای و در برخی موارد پی مربعی دارای قابلیت اعتماد بیش‌تر و احتمال گسیختگی کمتری است. این تفاوت ناشی از تفاوت در فرمول‌های ارائه شده برای انواع شکل هندسی پی توسط دانشمندان مربوطه می‌باشد. قابل ذکر است که مایرهورف برای انواع پی‌ها، روابط دقیق‌تری ارائه نموده است.

$$N = \sqrt{(-2 \ln r_1)} \sin 2\pi r_2 \quad (7)$$

در این معادله، N عدد تصادفی نرمالیزه شده، r_1 عدد تصادفی یکنواخت ۱ و ۲۲ عدد تصادفی یکنواخت ۲ می‌باشد. معادله تبدیل، نیازمند تولید دو عدد تصادفی یکنواخت برای تولید کردن یک عدد تصادفی پارامتری شده با یک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد [۱۴].

۴-۵- تخمین پارامتری ورودی

در ابتدای هر دنباله مونت کارلو، تمام پارامترهای ورودی غیر قطعی براساس توزیع مشخص شده دوباره ارزیابی می‌شوند. برای هر محاسبه، مقدار میانگین، انحراف استاندارد μ_x و σ_x عدد تصادفی نرمالیزه شده N استفاده می‌شوند. معادله کلی برای به‌روز رسانی پارامترها برابر است با:

$$X = \mu_x + N\sigma_x \quad (8)$$

بنابراین با استفاده از زبان برنامه‌نویسی و استفاده از رابطه زیر، X_i تولید می‌شود.

$$x_i = \mu_x + N_i\sigma_x \quad (9)$$

که در این رابطه، X_i مقدار دنباله جدید برای هر پارامتر مشخص شده با یک انحراف استاندارد با فرض توزیع نرمال می‌باشد. در نظر گرفتن پارامتر مورد نظر در حالت توزیع‌های احتمال رایج، مهم می‌باشد.

۴-۶- مفهوم قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی و اهمیت این دو پارامتر

ضریب اطمینان شاخصی است که پایداری پی را بیان می‌کند، اما میزان اطمینان به آن را مشخص نمی‌کند. مقدار ضریب اطمینان با تقسیم میزان ظرفیت نهایی بر میزان بار وارده بر پی محاسبه می‌شود. با استفاده از تحلیل آماری دو شاخصه‌ی مهم علاوه بر ضریب اطمینان، برای پایداری پی بدست می‌آید. این دو شاخصه قابلیت اعتماد و احتمال گسیختگی میباشند. با محاسبه ضریب قابلیت اعتماد، سطح خطر گسیختگی پی و یا میزان اطمینان به پی به‌دست می‌آید.

احتمال گسیختگی نیز عبارت است از احتمال این‌که ضریب اطمینان یک و کمتر از یک شود، یا به عبارت دیگر اگر این پی بارها ساخته شود نسبت تعداد دفعاتی که پی گسیخته می‌شود را بیان می‌کند. مقدار احتمال گسیختگی نیز با رسم نمودار تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان و محاسبه سطح زیر نمودار برای ضریب اطمینان یک و کمتر از یک محاسبه می‌گردد [۱۶].

برای محاسبه ضریب قابلیت اعتماد می‌بایست ابتدا میانگین و انحراف معیار برای ضریب اطمینان محاسبه گردد و سپس برای محاسبه ضریب قابلیت اعتماد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad (10)$$

جدول ۲: شالوده قرار گرفته بر نمونه ماسه آلوده به گازوئیل با درصد تراکم ۴۵ درصد (روش مایرهورف)

Table 2. Foundation based on gasoil contaminated sand with 45% compaction (Meyerhof)

نوع پی	میانگین ضریب اطمینان	انحراف از معیار ضریب اطمینان	احتمال شکست (%)	قابلیت اعتماد	حداقل ضریب اطمینان	حداکثر ضریب اطمینان
دایره	۳	۳/۴۵	۱۳/۸	۰/۶	۰/۲۷	۵۵/۹۸
مربع	۲/۶۸	۲/۸	۱۶/۸	۰/۵۸	۰/۳۱	۴۴/۵۹

جدول ۳: شالوده قرار گرفته بر نمونه ماسه آلوده به گازوئیل با درصد تراکم ۴۵ درصد (روش ترزاقی)

Table 3. Foundation based on gasoil contaminated sand with 45% compaction (Terzaghi)

نوع پی	میانگین ضریب اطمینان	انحراف از معیار ضریب اطمینان	احتمال شکست (%)	قابلیت اعتماد	حداقل ضریب اطمینان	حداکثر ضریب اطمینان
دایره	۱/۶۳	۱/۰۳	۲۷/۵۰	۰/۶۲	۰/۲۶	۸/۰۹
مربع	۱/۸۲	۱/۲۷	۲۳/۹۰	۰/۶۵	۰/۳۳	۱۳/۰۶

جدول ۴: شالوده قرار گرفته بر نمونه ماسه آلوده به گازوئیل با مقدار تراکم ۷۵ % (روش مایرهورف)

Table 4. Foundation based on gasoil contaminated sand with 75% compaction (Meyerhof)

نوع پی	میانگین ضریب اطمینان	انحراف از معیار ضریب اطمینان	احتمال شکست (%)	قابلیت اعتماد	حداقل ضریب اطمینان	حداکثر ضریب اطمینان
دایره	۶/۳۶	۵/۳۵	۰/۸	۱	۰/۸۵	۵۶/۹۹
مربع	۵/۴۳	۴/۲۵	۰/۲	۱/۰۴	۰/۵۲	۴۱/۸۱

جدول ۵: شالوده قرار گرفته بر نمونه ماسه آلوده به گازوئیل با مقدار تراکم ۷۵ % (روش ترزاقی)

Table 5. Foundation based on gasoil contaminated sand with 75% compaction (Terzaghi)

نوع پی	میانگین ضریب اطمینان	انحراف از معیار ضریب اطمینان	احتمال شکست (%)	قابلیت اعتماد	حداقل ضریب اطمینان	حداکثر ضریب اطمینان
دایره	۳/۲۲	۲/۳	۱/۷	۰/۹۶	۰/۴۶	۲۶/۶۵
مربع	۳/۵۳	۲/۷۵	۲/۰۰	۰/۹۲	۰/۶۵	۳۴/۲۱

۶- نتیجه گیری

۱. نتایج آزمایش‌ها برش مستقیم بر روی ماسه آلوده به گازوئیل نشان داده است که با افزایش میزان آلاینده از صفر تا ۱۶٪، زاویه اصطکاک داخلی حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد. به طوری که میزان کاهش در درصد آلاینده‌گی بالاتر، بیش‌تر است.
۲. با افزایش آلودگی، ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای کاهش می‌یابد و روند کاهش در درصد‌های آلودگی بیش‌تر با شیب تندتری است (حدود ۷۵٪). این در حالی است که در مقایسه با رس آلوده به گازوئیل در دیگر تحقیقات، با افزایش آلاینده‌گی تا ۱۶٪، ظرفیت باربری کاهش یافته و از آن به بعد افزایش یافته است.
۳. هیچ رابطه‌ی مستقیمی بین ضریب اطمینان و ضریب قابلیت اعتماد وجود ندارد. به عبارت دیگر، پی با ضریب اطمینان بالاتر بدین معنی نیست که از پی با ضریب اطمینان پایین‌تر، مطمئن‌تر است. پس ضریب اطمینان به‌تنهایی برای اطمینان به پی کافی نیست و قابلیت اعتماد نقش تعیین‌کننده‌ای در اطمینان به پی دارد.
۴. با توجه به این‌که مایرهورف، ضرایب شکل را در معادله‌ی ارائه شده خود به‌صورت دقیق آورده و در واقع راه‌حل اصلاح شده‌تری نسبت به ترزاقی ارائه نموده است، می‌توان به نتایج آن بیش‌تر

- kaolinite, Engineering Geology, 166 (2013) 11-16.
- [5] A. Rahimi, MS Thesis, Shahrood University of Technology, (2005) (In Persian)
- [6] E.C. Shin, B.M. Das, Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand, International Journal of offshore and polar Engineering, 11(03) (2001).
- [7] M. Zanjari Farahani, A. Hamidi, Consolidation Behavior and Geotechnical Parameters of Oil Contaminated Kaolinite Clay, Iranian journal of petroleum Geology, 4(8) (2014) (In Persian)
- [8] M. Sadghiani, M. Jiriyayi, Laboratory Study of Contamination on Strength, Settlement and Compressibility of Sand, First Congress of Civil Engineering, (2004) (In Persian)
- [9] M. Kermani, Effect of oil contamination on shear strength and compressibility of soil, MS thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2009) (In Persian)
- [10] M. Khomehchiyan, H.A. Charkhabi, M. Tajik, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, Engineering Geology, 89(3-4) (2007) 220-229.
- [11] O. Oyegbile, G. Ayininuola, Laboratory Studies on the Influence of Crude Oil Spillage on Lateritic Soil Shear Strength: A Case Study of Niger Delta Area of Nigeria, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, 3(2) (2013) 73-83.
- [12] B.M. Das, Fundamentals of Geotechnical Engineering, (1999).
- [13] A. Jones, S. Kramer, P. Arunio, Estimation of uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-Based Earthquake Engineering, University of California, Berkeley, (2002).
- [14] A. Salami, Review of Monte-Carlo simulation method, Economics Research, 3(8) (2003) 117-138 (In Persian)
- M. Ghias, Introduction on Monte-Carlo simulation method, Polymerization, 4(1) (2004) 67-77 (In Persian)
- [15] M. Fadayi, Calculation of reliability using Monte-Carlo and Geoslope software and stability analysis of Latiyan dam, Forth International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, (2010) (In Persian)

اطمینان نمود. از آن جایی که برای پی دایره‌ای نسبت به پی مربعی با مساحت یکسان، قابلیت اطمینان بالاتر و احتمال گسیختگی کمتری به دست داده است، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از پی دایره‌ای منطقی‌تر است.

۵. با توجه به نتایج موجود در جداول ۲، ۳، ۴ و ۵ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار تراکم، از ۴۵٪ به ۷۵٪، میانگین ضریب اطمینان و قابلیت اعتماد، افزایش و احتمال شکست، کاهش می‌یابد.

۶. در مقایسه روش تحلیل قطعی و احتمالاتی در بررسی رویداد گسیختگی بر روی یک مورد عملی، مشخص می‌گردد که ممکن است ضریب اطمینان حاصله از روش قطعی عدم گسیختگی را نشان دهد، در حالی که در تحلیل احتمالاتی، گسیختگی محتمل است. به دلیل نامعینی‌های موجود در موارد آلودگی خاک، مانند تغییرپذیری خصوصیات خاک در اثر آلودگی و عدم اطلاع دقیق از چگونگی آن و فرضیات ساده کننده در معادلات تحلیلی روش‌های مختلف، معمولاً مهندسی با استفاده از روش‌های قطعی و محاسبه یک عدد بعنوان ضریب اطمینان، قادر به ارزیابی و محاسبه میزان خطر موجود نمی‌باشند. اما از آن جایی که در روش احتمالاتی، برای ضریب اطمینان توزیع احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود، امکان احتمال وقوع ضرایب اطمینان مختلف و محاسبه‌ی احتمال گسیختگی در هر حالت فراهم می‌گردد. بنابراین لزوم رویکرد جامعه مهندسی به انجام تحلیل‌های احتمالاتی جهت رسیدن به طرح‌های بهینه و ایمن به خوبی مشخص می‌گردد.

مراجع

- [1] E. Khosravi, Effect of contaminants on stability of clay beds in oil storage tanks, MS thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, (2010) (In Persian)
- [2] S. Gitipour, G. Nabi Bidhendi, M. Gorji, Soil contamination in vicinity of Tehran refinery due to petroleum leakage, Journal of Environmental Studies, 30(34) (2004) (In Persian)
- [3] M. Akbarabadi, S. Yasrebi, M. Khoshneshin, Effect of crude oil contamination of geotechnical properties of sandy soil, Fifth National Congress on Civil Engineering, Mashhad, Iran, (2010) (In Persian)
- [4] E. Khosravi, H. Ghasemzadeh, M.R. Sabour, H. Yazdani, Geotechnical properties of gas oil-contaminated

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R. Sabour, M. Ghadrdan, M. Khorshid Ahmadi, The Study of Uncertainty in the Effect of Oil Contamination on Geotechnical Behavior of Sandy Soil beneath Oil Storage Tanks. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 813-820.

DOI: 10.22060/ceej.2016.854

