



## بررسی اثر شوینده آنیونی سدیم دودسیل سولفات بر پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه سست آلوده به نفت خام

نعیم غلامپور، سید ابوالحسن نائینی\*، رضا ضیائی مؤید

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۵

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱

### کلمات کلیدی:

شوینده آنیونی

نفت خام سبک

مقاومت برشی زهکشی نشده

آزمایش سه محوری

ماسه سست

**خلاصه:** آلودگی خاک با فرآورده‌های نفتی به دلیل نشت مخازن سوخت و خطوط انتقال، محیط زیست انسان و سایر موجودات زنده را با مشکل مواجه می‌کند و علاوه بر خطرات زیست محیطی شدید، بسته به نوع خاک، باعث تغییر در خصوصیات مقاومتی آن می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های رفع آلودگی نفتی، خاک‌شویی می‌باشد که علاوه بر حذف آلاینده‌های نفتی، بر مقاومت خاک آلوده و همچنین خاک فاقد آلودگی نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد. در این تحقیق سعی شده است تا با انجام یک سری آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)، تأثیر استفاده از روش خاک‌شویی با شوینده آنیونی سدیم دودسیل سولفات در غلظت‌های مختلف بر فرآیند حذف نفت خام و همچنین پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده خاک ماسه‌ای آلوده به غلظت‌های مختلف نفت خام سبک مورد بررسی قرار گیرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در کلیه فشارهای محصورکننده، مقاومت برشی خاک ماسه‌ای با افزایش غلظت نفت خام تا حدود ۵ درصد، کاهش و در درصدهای بالاتر افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی با افزایش غلظت نفت خام از نتایج این تحقیق می‌باشند. شستشوی خاک با استفاده از محلول شوینده سدیم دودسیل سولفات در کلیه غلظت‌ها، مقاومت برشی خاک آلوده به نفت خام را افزایش می‌دهد، ولی نرخ این افزایش در غلظت‌های نفت خام بالاتر از ۵ درصد و فشارهای محصورکننده بالا کمتر است. در حالت کلی، مقاومت برشی خاک آلوده به نفت خام و خاک شستشو شده با محلول شوینده کمتر از خاک تمیز می‌باشد.

### ۱- مقدمه

بر روی خاک‌های ریزدانه رسی انجام شده است که غالباً، کاهش رطوبت بهینه و چسبندگی و افزایش نسبی حدود اتربرگ، زاویه اصطکاک داخلی، حداکثر وزن مخصوص خشک، نشست و تراکم‌پذیری را در اثر آلودگی با هیدروکربن‌های نفتی گزارش داده‌اند [۳-۱۵]. در مواردی نیز، بخصوص خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد (CH)، کاهش زاویه اصطکاک و حدود اتربرگ گزارش شده است [۲، ۱۶-۲۰].

در این میان مطالعات معدودی نیز در خصوص رفتار خاک‌های ماسه‌ای آلوده به نفت خام و مشتقات آن صورت گرفته است که یافته‌های همگی حاکی از کاهش مقاومت برشی و زاویه اصطکاک خاک‌های ماسه‌ای و بسته به نوع و درصد ریزدانه موجود در خاک و همچنین غلظت آلودگی نفتی، افزایش یا کاهش چسبندگی می‌باشند [۴، ۲۱-۳۳].

السند و همکاران<sup>۱</sup> [۲۲] با مطالعه ماسه کویت آلوده به نفت خام دریافتند که با افزایش میزان آلودگی نفتی تا ۴ درصد مقدار CBR افزایش می‌یابد

ایران به عنوان یک کشور نفت‌خیز و با توجه به دارا بودن حدود ۱۰ درصد از منابع نفتی جهان، به میزان زیادی در معرض آلوده شدن خاک به نفت و فرآورده‌های آن قرار دارد. آلودگی خاک به آلاینده‌های نفتی می‌تواند از منابع متعددی صورت گیرد. در این میان نشت از لوله‌های انتقال آسیب دیده، تصادف تانکرها، تخلیه از تأسیسات نفتی داخل خشکی و دریاها، نشت از مخازن نگهداری، صفحه‌های حفاری و استخراج و نشت طبیعی از اهمیت بیشتری برخوردارند [۱-۳].

تاکنون مطالعات زیادی پیرامون تأثیر آلودگی نفتی و مشتقات آن بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های مختلف صورت گرفته است که بسته به نوع خاک و خاصیت خمیری آن نتایج متفاوتی به دست آمده است. اختلافات موجود در نتایج این تحقیقات عمدتاً به دلیل واکنش‌های متفاوتی است که انواع خاک‌ها در مقابل آلودگی‌های نفتی نشان می‌دهند. تحقیقات بسیاری



جهت پاک سازی خاک استفاده شده باشد، در دسترس می‌باشد، ولی اساس کار به این نحو است که پس از به دست آوردن اطلاعات فیزیکی و شیمیایی خاک آلوده، چاهک‌هایی جهت ورود مواد شوینده حفاری می‌گردد و با توجه به نفوذپذیری خاک، از طریق نیروی ثقل و یا توسط پمپ مواد شوینده به درون خاک وارد می‌شود. بسته به موقعیت انجام پروژه، مواد حاصل از تصفیه یا از طریق پمپاژ و یا از طریق ورود به آب زیرزمینی و سپس جمع آوری آب زیرزمینی خارج گردیده و مورد تصفیه قرار می‌گیرد [۳۹].

تعداد ناچیزی از تحقیقات انجام شده پیرامون شستشوی خاک آلوده با استفاده از شوینده‌ها به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی این خاک‌ها پرداخته‌اند. سینگ و همکاران<sup>۲</sup> [۴۳] به بررسی تأثیر استفاده از شوینده آنیونی سدیم دودسیل سولفات<sup>۳</sup> (SDS) بر رفتار ماسه بد دانه‌بندی شده و خاک رسی با خاصیت خمیری کم و زیاد آلوده به روغن موتور سوخته در حالت متراکم پرداختند. نتایج کار ایشان نشان داد که اختلاط هر سه نوع خاک آلوده با محلول SDS باعث نزدیک شدن مقدار خصوصیات به حالت خاک تمیز می‌شود. طبق نتایج به دست آمده اختلاط با محلول SDS باعث کاهش مقاومت فشاری محدود نشده و چسبندگی و افزایش تراکم‌پذیری، نشست و زاویه اصطکاک داخلی هر دو نوع خاک رسی آلوده می‌شود. افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با اضافه کردن محلول SDS به خاک ماسه‌ای آلوده نیز مشاهده شده است. در تحقیق دیگر، رحمان و همکاران [۲۷] به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی رس سیلتی آلوده به فلزات سنگین کروم و منیزیم در ترکیب با محلول SDS پرداختند و افزایش تراکم‌پذیری و کاهش مقاومت برشی زهکشی نشده ( $C_u$ ) خاک آلوده را در حضور شوینده SDS گزارش دادند.

مرور تحقیقات پیشین، فقدان مطالعات پیرامون رفتار مقاومتی خاک‌های ماسه‌ای سست آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و همچنین، تأثیر استفاده از شوینده‌ها بر رفتار این‌گونه خاک‌ها را نمایان می‌سازد. از سوی دیگر، در کلیه تحقیقات انجام شده پیرامون تأثیر استفاده از شوینده‌ها جهت حذف آلودگی نفتی از روش اختلاط آزمایشگاهی استفاده شده است که خیلی کاربردی به نظر نمی‌رسد. بر این اساس، در این تحقیق ضمن مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف نفت خام سبک بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای سست، بررسی اثر حذف آلودگی نفتی بر رفتار خاک مورد مطالعه از طریق تزریق محلول شوینده آنیونی SDS در غلظت‌های مختلف انجام می‌شود.

و در ۶ درصد آلودگی اُفت بسیار شدیدی دارد. همچنین با بیشتر شدن درصد آلودگی، مقادیر رطوبت بهینه و زاویه اصطکاک داخلی کاهش و مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر، نشست و تراکم‌پذیری افزایش می‌یابند [۲۲، ۲۵].  
خامه چیان و همکاران [۴] معتقدند رفتار تراکمی ماسه‌های سیلتی و ماسه‌های بد دانه‌بندی شده در مواجهه با آلودگی نفتی متفاوت است. قابلیت تراکم نمونه‌های ماسه SP بر خلاف ماسه‌های SM بهبود قابل توجهی نمی‌یابد. همچنین، افزایش میزان آلودگی نفتی در نمونه‌های SM و SP موجب کاهش مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی و عدم تغییر در میزان چسبندگی خاک می‌شود.

ابوسینا و همکاران<sup>۱</sup> [۲۸] با انجام آزمایش‌های برش مستقیم در فشارهای نرمال کم (۵۰ کیلوپاسکال) روی ماسه ریز صحرا به این نتیجه رسیدند که با افزایش آلودگی تا ۱ درصد، مقاومت برشی و همچنین چسبندگی خاک افزایش و در آلودگی‌های بیشتر، کاهش می‌یابد. همچنین، زاویه اصطکاک داخلی با افزایش میزان آلودگی کاهش می‌یابد.

مهدی زاده و همکاران [۲۹] و استوار و همکاران [۳۰] با انجام آزمایش‌های برش مستقیم روی چهار نمونه خاک ماسه‌ای شامل ماسه خوب دانه‌بندی شده، ماسه بد دانه‌بندی شده، ماسه لای‌دار و ماسه رس‌دار آلوده به نفت خام، کاهش زاویه اصطکاک داخلی کلیه نمونه‌ها و چسبندگی نمونه‌های ماسه‌ای رس‌دار و افزایش چسبندگی دیگر نمونه‌ها در اثر افزایش درصد آلودگی نفتی را گزارش دادند.

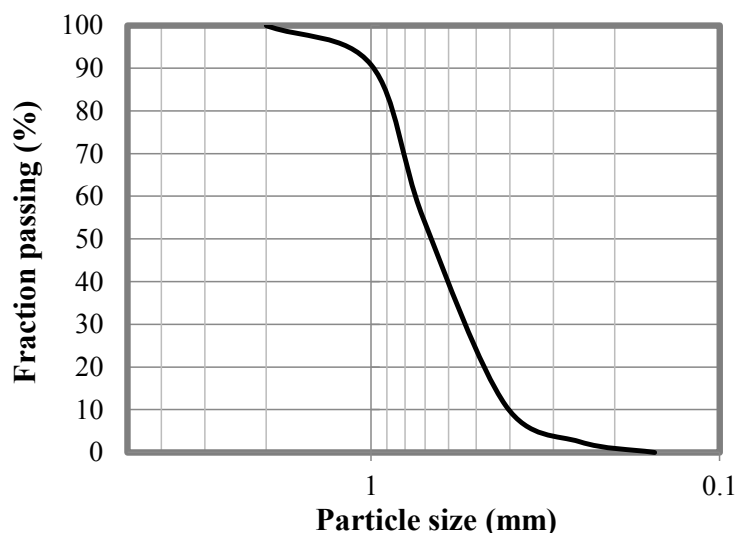
عسکریوکی و همکاران [۳۱] با انجام آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده روی ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل به این نتیجه رسیدند که با افزایش آلودگی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش میزان آلودگی باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در تراکم‌پذیری و فشرده‌گی خاک می‌شود.

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی پیرامون تأثیر استفاده از شوینده‌های زیستی و مصنوعی بر حذف آلودگی نفتی در خاک‌های مختلف صورت گرفته است که نتایج همگی بیانگر افزایش قابل ملاحظه بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی از خاک می‌باشد. بازدهی حذف آلودگی نفتی با استفاده از شوینده‌های مصنوعی با توجه به خصوصیات چون غلظت آلودگی نفتی، غلظت شوینده، زمان شستشو، دانه‌بندی، نفوذپذیری، اسیدیته و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک آلوده در حدود ۴۰ تا ۹۵ درصد می‌باشد [۳۴-۴۲].  
اطلاعات کمی در مورد پروژه‌های عملی که از روش خاک‌شویی در محل

2 Singh et al.

3 Sodium dodecyl sulphate

1 Abousnina et al.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد مطالعه

Fig. 1. Grain size distribution curve of studied sand

جدول ۲. مشخصات نفت خام خوزستان تهیه شده از پالایشگاه نفت تهران

Table 1. Specifications of Khuzestan crude oil provided from Tehran oil refinery

مقدار	ویژگی
۴۱/۲	ویسکوزیته (cp)
۰/۸۹۵	چگالی (g/cc)
۲۶/۸	جاذبه API <sup>۱</sup> (در ۶۰ درجه فارنهایت)
۴۴/۲	نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)
۰/۸۹	چگالی ویژه (در ۲۵ درجه فارنهایت)

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه ۱۳۱

Table 1. Physical properties of 131 Firoozkooch sand

مقدار	ویژگی
۰/۶۸	$D_{50}$ (میلی‌متر)
۱/۸۸	$C_u$
۰/۹۷	$C_c$
۲/۶۲	$G_s$
۰/۸۹۷	$e_{max}$
۰/۵۸۰	$e_{min}$
SP	طبقه‌بندی خاک

## ۲-۲- نفت خام

آلاینده مورد استفاده در این تحقیق نفت خام سبک خوزستان می‌باشد که از مخازن ذخیره‌سازی پالایشگاه نفت تهران تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نفت خام مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۲-۳- شوینده آنیونی

شوینده مورد نظر جهت انجام آزمایش‌ها سدیم دودسیل سولفات (SDS) انتخاب گردیده که از شوینده‌های مصنوعی آنیونی بوده و تولیدی

## ۲- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱- ماسه

خاک استفاده شده در این تحقیق ماسه فیروزکوه ۱۳۱ می‌باشد، که منحنی دانه‌بندی آن طبق استاندارد ASTM D۴۲۲-۶۳ در شکل ۱ و خصوصیات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طبق سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) این خاک از نوع ماسه یکنواخت و بد دانه‌بندی شده (SP) با متوسط اندازه سنگدانه برابر با ۰/۶۷ میلی‌متر می‌باشد.

<sup>۱</sup> API gravity is a measure comes from American Petroleum Institute. if its API gravity is greater than 10, it is lighter and floats on water; if less than 10, it is heavier and sinks

جدول ۳. مشخصات شوینده آنیونی SDS تهیه شده از شرکت مرک آلمان

Table 3. Characteristics of anionic surfactant of SDS provided from Merc Company in Germany

ویژگی	مقدار
نوع شوینده	آنیونی
فرمول شیمیایی	C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> NaO <sub>4</sub> S
CMC (%)	۰/۱۷۳ - ۰/۲۳
چگالی (g/cc)	۱/۱ (۲۰ °C)
pH	۶-۹ (۱۰ g/L, H <sub>2</sub> O, ۲۰ °C)
وزن مولکولی (g/mol)	۲۸۸/۳۷
نقطه ذوب (سانتی‌گراد)	۲۰۴-۲۰۷
انحلال در آب (g/L)	۱۵۰ (۲۰ °C)

است؛  $U_{nj}$  درصد کاهش تراکم برای لایه آخر (معمولاً صفر) و  $j$  تعداد کل لایه‌ها (در این تحقیق برابر با ۵ لایه) می‌باشد. پس از تعیین  $U_{ni}$ ، با استفاده از رابطه (۲) میزان ضخامت مصالح متراکم شده در هر لایه تعیین می‌شود.

$$h_n = \frac{h_t}{j} \left[ (n_i - 1) + \left( 1 + \frac{U_{ni}}{100} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن،  $h_t$  ارتفاع کل نمونه می‌باشد.

به منظور تهیه نمونه‌های آلوده، نفت خام در پنج غلظت ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد (برحسب وزن خشک خاک) از طریق اختلاط به خاک طبیعی اضافه و به مدت ۷ روز در داخل کیسه‌های پلاستیکی هوا بند نگهداری می‌شود. پس از گذشت ۷ روز، نمونه‌های ماسه آلوده با روش تراکم کاهشی بیان شده در ۵ لایه و رطوبت ۶ درصد ساخته شده و تحت آزمایش سه محوری قرار گرفتند. در مورد نمونه‌های پاکسازی شده، پودر شوینده آنیونی SDS در سه غلظت مختلف ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ ppm، در مقدار لازم آب حل شده و محلول حاصل تحت اختلاف هد یک متر به داخل نمونه خاک آلوده تزریق می‌گردد و از انتهای نمونه محلول شوینده و نفت خارج می‌گردد. فرآیند تزریق و شستشوی خاک با این روش تا زمانی که حجم مخلوط خروجی به ۱۰ برابر حجم حفرات خاک (P.V) برسد، ادامه پیدا می‌کند و طی شستشو، مقدار TPH<sup>۴</sup> محلول خروجی اندازه‌گیری و مقدار حذف آلاینده

شرکت مرک آلمان می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی شوینده مورد نظر در جدول ۳ ارائه شده است. CMC مهم‌ترین پارامتر برای هر شوینده می‌باشد و رفتار شوینده را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این نقطه همچنین متناظر با زمانی است که شوینده کم‌ترین کشش سطحی را دارد.

### ۳- نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها

#### ۳-۱- نمونه‌سازی

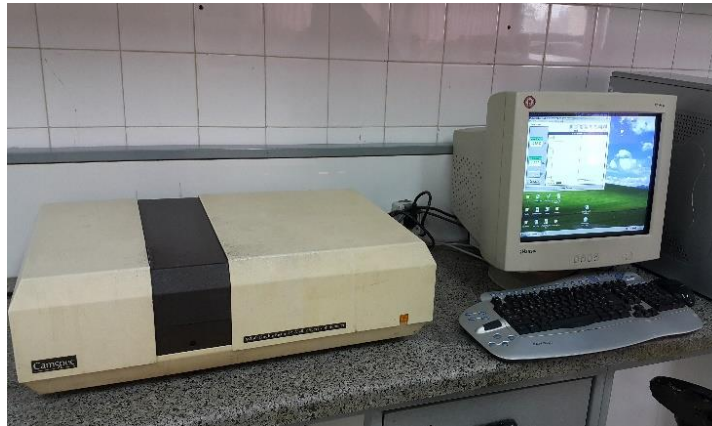
همان‌طور که پیش از این بیان شد، خاک اولیه و تمیز مورد استفاده در این تحقیق ماسه فیروزکوه ۱۳۱ می‌باشد. در این تحقیق از روش تراکم کاهشی یافته<sup>۱</sup> طبق روابط لد<sup>۲</sup> [۴۴] و بین و همکاران<sup>۳</sup> [۴۵] برای ساخت نمونه‌های همگن استوانه‌ای سست به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است (رابطه (۱)).

$$U_n = U_{n1} - \left[ \frac{U_{n1} - U_{nj}}{j - 1} \right] (n_i - 1) \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $U_{ni}$  درصد کاهش تراکم برای هر لایه؛  $U_{n1}$  درصد کاهش تراکم برای لایه اول (در این تحقیق با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به نمونه همگن از طریق تزریق ژلاتین به داخل نمونه و اندازه‌گیری نسبت تخلخل در سگمنت‌های مختلف نمونه، ۷ درصد در نظر گرفته شده

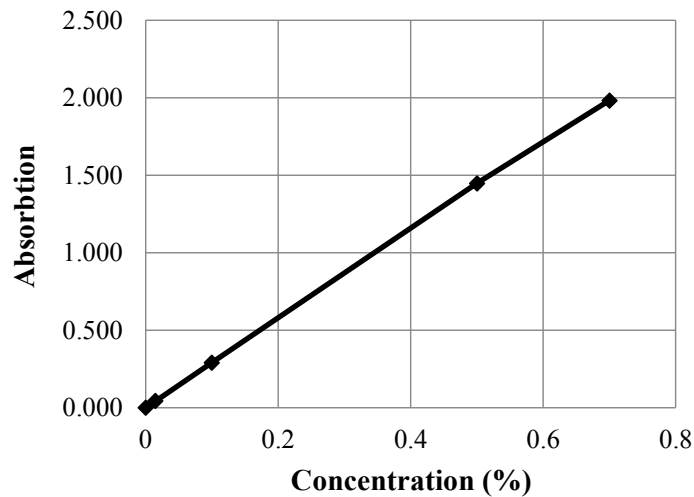
- 1 Under-compaction
- 2 Ladd
- 3 Been *et al.*

4 Total Petroleum Hydrocarbons



شکل ۲. دستگاه طیف سنج ماوراء بنفش مورد استفاده در تعیین TPH

Fig. 2. The UV spectrophotometer set used for determination of TPH



شکل ۳. نمودار کالیبراسیون عدد جذب در مقابل غلظت نفت خام در محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm

Fig. 3. Calibration curve of absorption value versus crude oil content for SDS solution with 30000 ppm concentration

تعیین غلظت نفت خام در محلول خروجی، نیاز به منحنی کالیبراسیون محلول SDS-نفت خام می‌باشد. برای این منظور، محلول‌هایی از ترکیب محلول SDS و نفت خام با غلظت‌های مشخص ساخته و درون دستگاه اسپکتروفوتومتر قرار داده شد. با تنظیم طول موج دستگاه بر روی ۳۸۰ نانومتر، نمودار کالیبراسیون دستگاه مطابق با غلظت مشخص محلول SDS-نفت خام و طول موج جذب ترسیم گردید. به عنوان نمونه، تغییرات عدد جذب در مقابل غلظت نفت خام در محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm در شکل ۳ ارائه شده است. همچنین، به منظور مقایسه عملکرد شوینده SDS در حذف نفت خام از خاک، محلول صفر درصد SDS (آب هوازدایی شده<sup>۲</sup>) نیز

نفتی محاسبه می‌گردد. در ادامه، نمونه پاکسازی شده تحت آزمایش سه محوری قرار می‌گیرد. به منظور یکسان سازی شرایط اولیه نمونه‌ها پیش از بارگذاری، مقدار تراکم نسبی ( $D_p$ ) نمونه‌سازی به گونه‌ای انتخاب شده است که پس از تحکیم نمونه در کلیه فشارهای تحکیمی ( $\sigma_v$ )، تراکم نسبی آن در محدوده ۳۰ تا ۳۲ درصد قرار بگیرد.

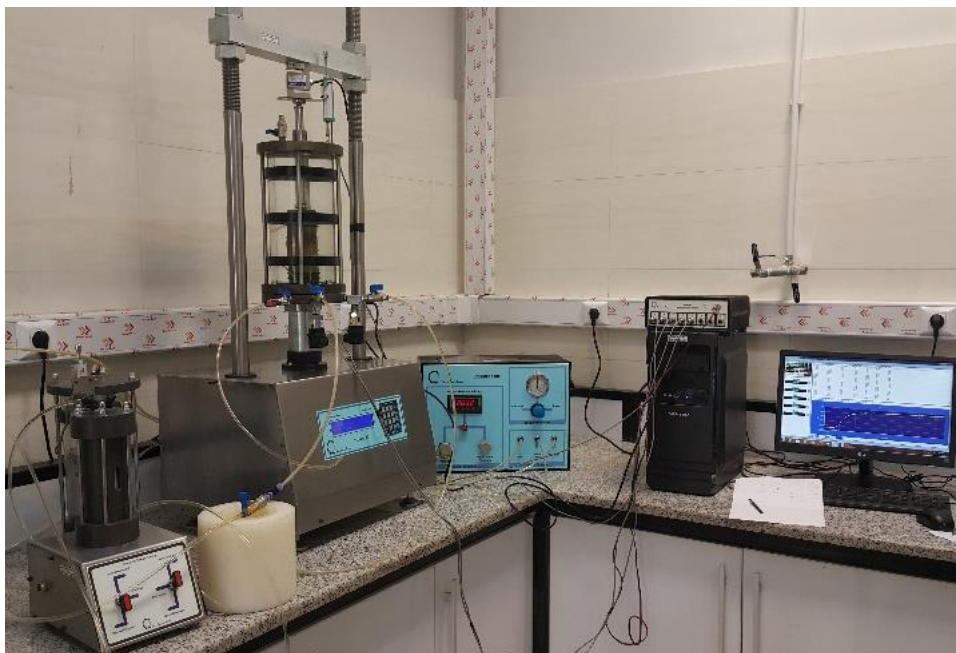
### ۳-۲- تعیین بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی

در این تحقیق از محلول SDS-نفت خام خروجی در مرحله شستشوی خاک، به منظور تعیین TPH خاک شسته شده و بازدهی حذف آلودگی نفتی به وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر<sup>۱</sup> (شکل ۲) استفاده شده است. برای

2 De-aired water

1 Spectrophotometer





شکل ۴. دستگاه سه محوری استاتیکی مورد استفاده

Fig. 4. Used monotonic triaxial set

به عنوان شوینده استفاده شده است.

#### ۳-۴- تزریق پذیری

همان طور که پیش از این بیان شد، در این تحقیق هدف از تزریق محلول SDS بجای اختلاط آن با خاک ماسه‌ای آلوده به نفت خام، قابلیت استفاده از آن در پروژه‌های میدانی می‌باشد. بر این اساس عملیات تزریق محلول SDS با غلظت  $50000 \text{ ppm}$  با استفاده از مجموعه نشان داده شده در شکل ۵ روی نمونه‌های ماسه آلوده با ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد نفت خام در درصد تراکم نسبی‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد انجام شده است. سیستم تزریق متشکل از مخزن و قالب استوانه‌ای افقی به طول یک متر و قطر ۵ سانتی‌متر برای ساخت و تزریق نمونه‌ها می‌باشد. جنس قالب‌ها و مخزن از نوعی پلاستیک فشرده شفاف می‌باشد، به نحوی که در حین انجام تزریق، روند کار قابل مشاهده باشد. فشار تزریق از طریق کمپرسور و رگلاتور تعبیه شده روی مخزن تأمین می‌گردد.

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی

همان طور که پیش از این بیان شد، در این تحقیق از محلول SDS با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ ppm جهت شستشوی خاک آلوده به غلظت‌های مختلف نفت خام استفاده شده است. تغییرات بازدهی حذف

#### ۳-۳- تعیین مقاومت برشی خاک

در این تحقیق مجموعه‌ای از ۷۲ آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده طبق استاندارد ASTM D4767-04 با استفاده از دستگاه سه محوری استاتیکی موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) جهت تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های ماسه تمیز، آلوده به نفت خام و پاکسازی شده با استفاده از محلول SDS استفاده شده است. برای این منظور، پس از ساخت نمونه‌ها با روش بیان شده در بخش‌های قبلی، نمونه‌ها در داخل سلول سه محوری تا رسیدن به پارامتر B برابر با حداقل ۹۵ درصد اشباع می‌شوند. پس از عملیات اشباع‌سازی نمونه‌های خاک اشباع تحت تنش‌های محصورکننده ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال تحکیم شدند. پس از تحکیم کامل نمونه‌ها و بستن شیرهای متصل به آن، نمونه با کرنش ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری تا گسیختگی کامل نمونه و رسیدن به حالت پایدار<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. نمایی از دستگاه آزمایش سه محوری مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

1 Steady state



شکل ۵. شمایی از مخزن و استوانه تزریق مورد استفاده

Fig. 5. Schematic view of used supply and injection cylinder

جدول ۴. تغییرات TPH در فرآیند شستشوی خاک آلوده با غلظت‌های مختلف نفت خام با استفاده از محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm

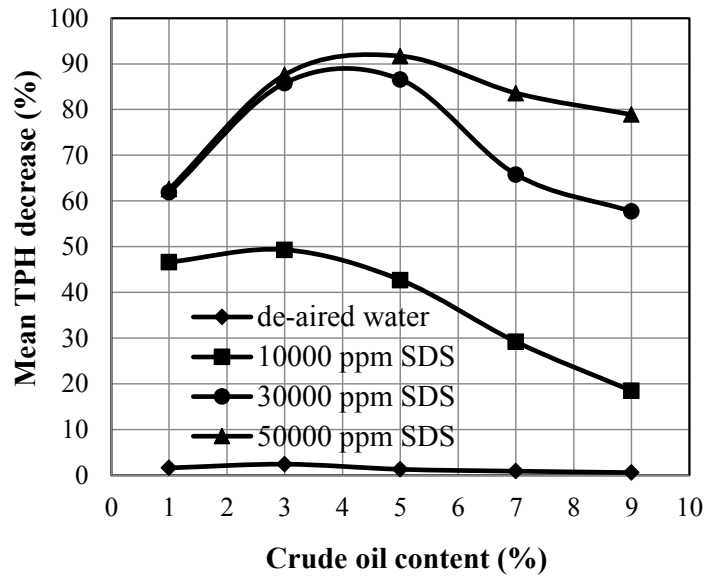
Table 4. Variation of TPH in washing crude oil contaminated soil process by SDS solution with 30000 ppm concentration

حجم محلول خروجی (P.V)	TPH محلول خروجی (ppm)					مقدار حذف نفت از خاک آلوده (%)				
	۱	۳	۵	۷	۹	۱	۳	۵	۷	۹
۲	۵۵۷۰	۳۱۱۱۷	۳۳۳۲۲	۳۲۱۳۰	۳۰۲۸۴	۳۴/۱	۶۳/۵	۴۰/۸	۲۸/۱	۲۰/۶
۴	۳۴۸۷	۱۸۸۴۲	۲۵۱۱۴	۲۳۸۴۰	۱۹۱۸۵	۴۲/۷	۷۶/۹	۶۱/۵	۴۱/۷	۲۶/۱
۶	۲۵۷۵	۱۳۴۷۶	۲۰۲۵۵	۱۹۲۸۶	۱۷۴۹۴	۴۷/۳	۸۲/۵	۷۴/۴	۵۰/۶	۳۵/۷
۸	۲۳۴۸	۱۰۴۰۱	۱۶۹۶۸	۱۶۸۰۸	۱۷۳۴۷	۵۷/۵	۸۴/۹	۸۳/۱	۵۸/۸	۴۷/۲
۱۰	۲۰۲۲	۸۴۰۹	۱۴۲۵۹	۱۵۰۴۷	۱۶۹۶۵	۶۱/۹	۸۵/۸	۸۶/۶	۶۵/۸	۵۷/۷

مقایسه رنگ نمونه‌های آلوده با ۵ درصد نفت خام و شسته شده با محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm مشخص می‌باشد. همچنین، با توجه به جدول ۴ و شکل ۶، با افزایش غلظت نفت خام تا ۵ درصد، حداکثر بازدهی حذف نفت خام در انتهای فرآیند شستشو (حجم محلول SDS-نفت خام خروجی برابر با ۱۰ P.V) افزایش و در مقادیر نفت خام بیش از ۵ درصد، کاهش می‌یابد. علت کمتر بودن بازدهی حذف در غلظت‌های نفت خام کمتر از ۵ درصد را می‌توان عدم توانایی محلول SDS در پاکسازی نفت خام جذب شده توسط سنگدانه‌ها بیان نمود. در مورد غلظت‌های بیشتر از ۵ درصد نیز عدم کفایت غلظت محلول SDS دلیل کاهش بازدهی حذف می‌باشد، به گونه‌ای که همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، با افزایش غلظت محلول شوینده SDS، غلظت بهینه نفت خام جهت دستیابی به حداکثر

آلودگی نفتی از خاک با غلظت‌های مختلف نفت خام با استفاده از محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان شستشو و متعاقب آن حجم محلول SDS-نفت خام خروجی، بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد.

به طور کلی شستشوی خاک آلوده به نفت خام با استفاده از محلول SDS بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی را نسبت به آب هوازداپی شده افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶ مشهود است، شستشوی خاک با استفاده از محلول SDS با غلظت ۳۰۰۰۰ ppm به جای آب هوازداپی شده، بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی را تا ۹۱/۷ درصد افزایش می‌دهد. این بازدهی بالای حذف هیدروکربن‌های نفتی بصورت عینی در شکل ۷ و



شکل ۶. تغییرات بازدهی حذف در مقابل غلظت نفت خام برای محلول SDS با غلظت‌های مختلف

Fig. 6. Variation of degradation efficiency versus crude oil content for different SDS solution concentrations



شکل ۷. نمایی از نمونه‌های (الف) آلوده با ۵ درصد نفت خام و (ب) شسته شده با محلول SDS با غلظت ۵۰۰۰۰ ppm

Fig. 7. Schematic view of (a) contaminated specimen with 5% crude oil content and (b) washed by SDS solution of 50000 ppm concentration



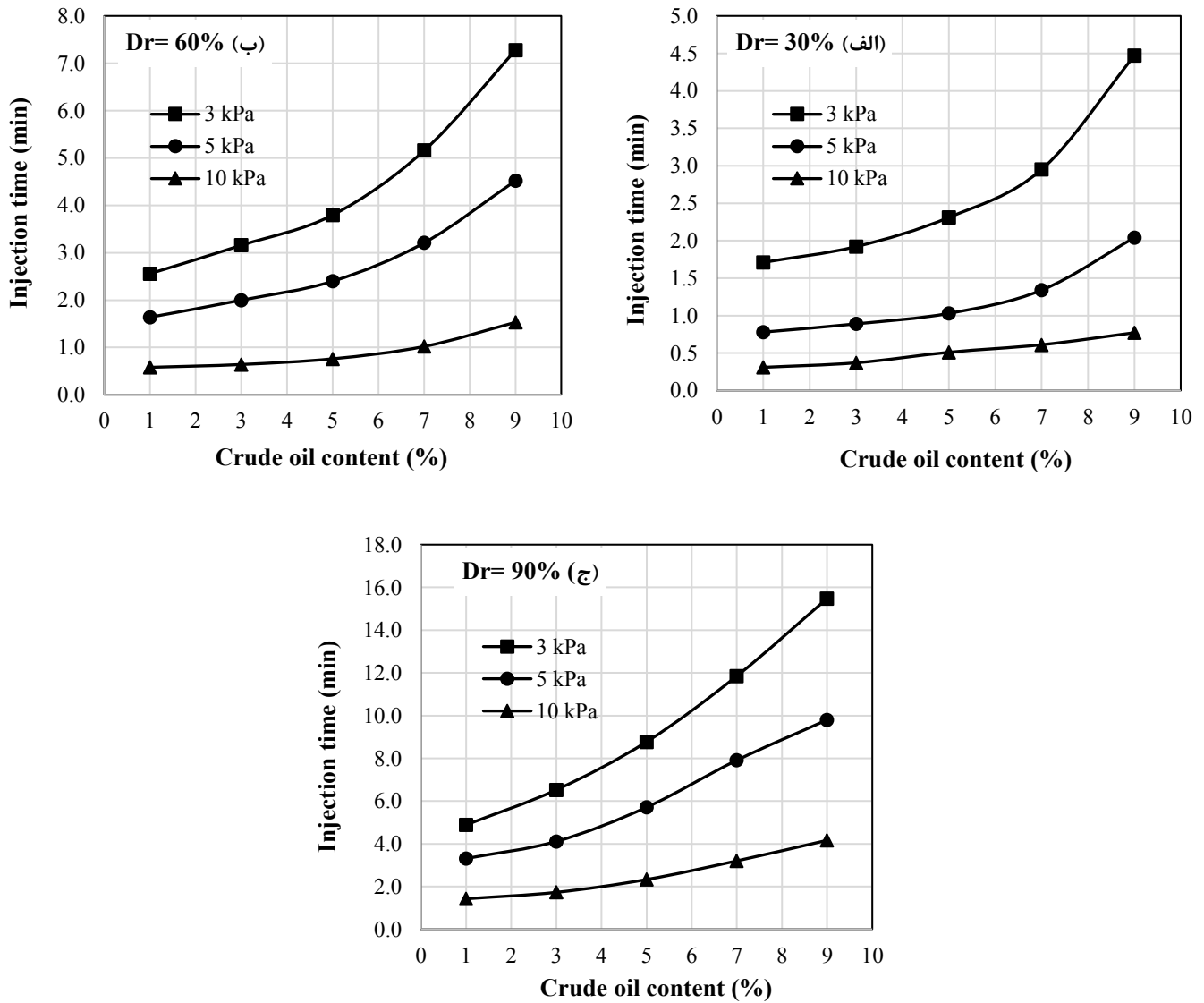
#### ۴-۳- مقاومت برشی خاک

همان‌طور که پیش از این بیان شد، در این تحقیق به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های ماسه تمیز، آلوده به نفت خام و پاکسازی شده با استفاده از محلول SDS از آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) استفاده شده است. شکل ۹ تغییرات تنش انحرافی، اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش  $q-p$  را برای ماسه تمیز و ماسه آلوده به ۵ درصد نفت خام سبک تحت فشار محصورکننده ۱۰۰ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. در حالت کلی می‌توان دریافت که، آلودگی خاک ماسه‌ای سست با نفت خام باعث کاهش مقاومت برشی زهکشی نشده آن می‌شود. علت کاهش مقاومت برشی با اضافه شدن نفت خام خاصیت روان‌کنندگی نفت خام می‌باشد که باعث سهولت لغزش بین دانه‌های خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای می‌شود. نتیجه بدست آمده با یافته‌های مطالعات خامه چپان و همکاران [۴]، مهدی زاده و همکاران [۲۹] و استوار و همکاران [۳۰] روی ماسه بد دانه‌بندی شده و ابوسینا و همکاران [۲۸] روی ماسه ریز متراکم در حالت مرطوب با استفاده از آزمایش برش مستقیم مطابقت دارد. به عنوان مثال، مقایسه شکل ۹ نشان می‌دهد که آلودگی خاک ماسه‌ای با ۵ درصد نفت خام علاوه بر کاهش ۷۷ درصدی مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، رفتار برشی آن را از حالت غیر روانگرا (No-flow) به حالت روانگرایی محدود (Limited liquefaction) تغییر می‌دهد. علت تغییر رفتار برشی خاک از حالت غیر روانگرا به روانگرایی محدود را می‌توان در تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی بررسی کرد. همان‌طور که در شکل ۹ (ب) مشاهده می‌شود، تغییرات فشار آب حفره‌ای در خاک تمیز به دلیل دانه‌بندی یکنواخت ماسه مورد مطالعه به صورت اتساعی بوده و نمونه خاک در لحظه رسیدن به حالت پایدار دارای اضافه فشار آب حفره‌ای منفی می‌باشد که به نوعی باعث ایجاد مکش در داخل خاک می‌شود. در حالی که در نمونه آلوده به ۵ درصد نفت خام فشار آب حفره‌ای اضافی مثبت به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و باعث کاهش تماس‌های بین دانه‌های خاک و متعاقب آن کاهش تنش مؤثر و مقاومت برشی خاک می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، این رفتار در کلیه فشارهای محصورکننده و غلظت‌های نفت خام صادق می‌باشد. در واقع، بسته به غلظت نفت خام موجود در خاک آلوده، کشش سطحی بین آب و سطح دانه‌های ماسه کاهش و در نتیجه آن فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۰ در غلظت‌های نفت خام بیش از ۵ درصد، به دلیل حاکم شدن رفتار نفت خام در ایجاد فشار منفی اضافی به جای آب و کشش سطحی بالای بین دانه‌های خاک و نفت خام،

بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، حداکثر بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی برای محلول SDS با غلظت‌های ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ ppm، به ترتیب، در غلظت‌های نفت خام حدود ۲/۸، ۴/۱ و ۴/۸ درصد به دست می‌آید.

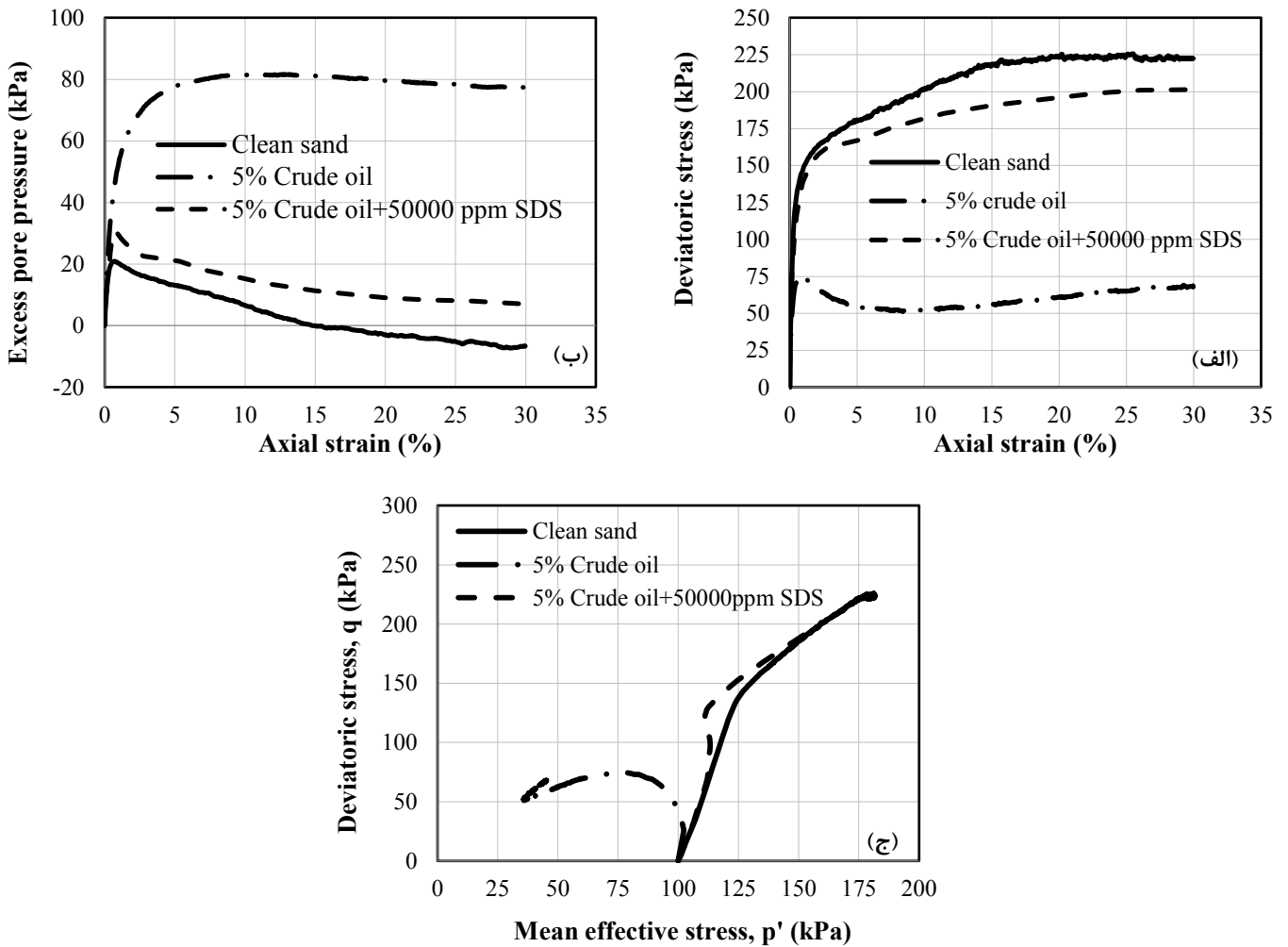
#### ۴-۲- تزریق‌پذیری خاک

پس از بررسی عملکرد شستشوی خاک آلوده به نفت خام با استفاده از تزریق محلول SDS در حذف هیدروکربن‌های نفتی، می‌بایست امکان‌پذیری این روش در پروژه‌های میدانی نیز ارزیابی گردد. برای این منظور، همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد، عملیات تزریق محلول SDS با غلظت ۵۰۰۰ ppm روی نمونه‌های ماسه آلوده به درصد‌های مختلف نفت خام در درصد تراکم نسبی‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ انجام شده است. شکل ۸ تغییرات زمان تزریق در مقابل غلظت نفت خام را به ازای نفوذ محلول SDS در یک متر طول از خاک ماسه آلوده با تراکم‌های مختلف تحت فشارهای تزریق متفاوت نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان دریافت که، از آنجایی که زمان تزریق محدودیتی برای عملکرد محلول SDS در شستشوی خاک آلوده ایجاد نمی‌کند، تزریق محلول SDS در کلیه غلظت‌های نفت خام و درصد تراکم‌های نسبی در فشارهای تزریق کم قابل انجام می‌باشد. با توجه به شکل ۸، با افزایش غلظت نفت خام، به دلیل پر شدن فضای خالی بین دانه‌های خاک از نفت و متعاقب آن کاهش سرعت نفوذ محلول SDS در نتیجه واکنش با نفت خام و افزایش ویسکوزیته آن، زمان رسیدن محلول SDS تزریقی به شعاع یک متری نقطه تزریق افزایش می‌یابد. همچنین، نرخ افزایش زمان تزریق در اثر افزایش غلظت نفت خام، در نمونه‌های با تراکم نسبی بالاتر بیشتر می‌باشد. به عنوان مثال، افزایش غلظت نفت خام از ۱ تا ۹ درصد در نمونه‌های آلوده با تراکم نسبی‌های ۳۰ و ۹۰ درصد تحت فشار تزریق ۳ کیلوپاسکال، به ترتیب، باعث افزایش ۱۶۱ و ۲۱۷ درصدی زمان تزریق می‌شود. در واقع، نمونه‌های با تراکم بالا، به دلیل کمتر بودن حجم حفراتشان، در غلظت‌های نفت کمتری نسبت به نمونه‌های با تراکم کم اشباع می‌شوند. کاهش زمان تزریق با افزایش فشار تزریق در کلیه غلظت‌های نفت خام و درصد‌های تراکم نسبی نیز در شکل ۸ کاملاً مشهود می‌باشد. البته، نرخ این کاهش با افزایش غلظت نفت خام در خاک افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش فشار تزریق از ۳ تا ۱۰ کیلوپاسکال، زمان تزریق محلول SDS در نمونه‌های آلوده به ۱ و ۹ درصد نفت خام با تراکم نسبی ۶۰ درصد، به ترتیب، ۷۵ و ۷۹ درصد کاهش می‌یابد.



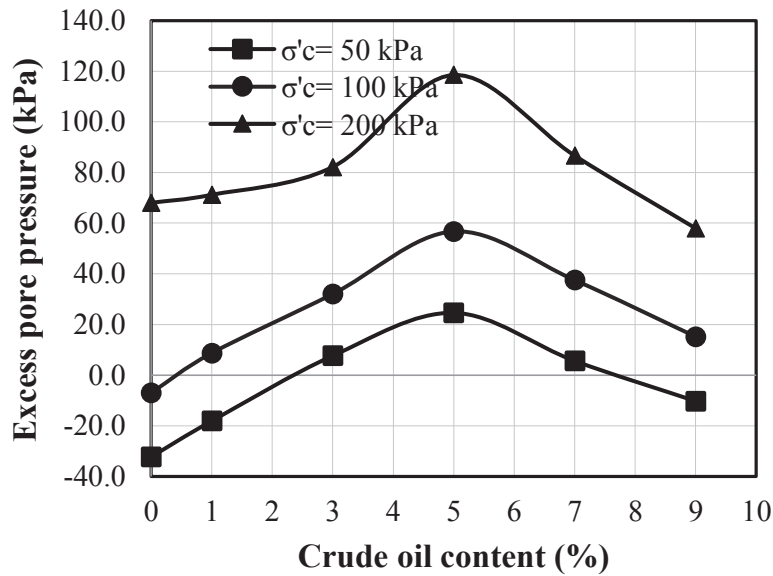
شکل ۸. تغییرات زمان تزریق محلول SDS در مقابل غلظت نفت خام در خاک آلوده با تراکم نسبی‌های (الف) ۳۰، (ب) ۶۰ و (ج) ۹۰ درصد تحت فشارهای تزریق مختلف

Fig. 8. Variation of injection time versus crude oil content for specimens with relative densities of (a) 30, (b) 60 and (c) 90 percent under different injection pressures



شکل ۹. تغییرات (الف) تنش انحرافی، (ب) فشار آب حفره‌ای اضافی و (ج) مسیر تنش  $q-p'$  برای ماسه تمیز، آلوده به ۵ درصد نفت خام و شسته شده با محلول SDS با غلظت ۵۰۰۰۰ ppm تحت فشار محصورکننده ۱۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 9. Variation of (a) deviatoric stress, (b) excess pore pressure and (c)  $q-p'$  stress path for clean sand, contaminated sand with 5% crude oil content and washed contaminated sand by SDS solution of 50000 ppm concentration under 100 kPa confining pressure



شکل ۱۰. تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی در مقابل غلظت نفت خام برای خاک تمیز و آلوده تحت فشارهای محصورکننده مختلف

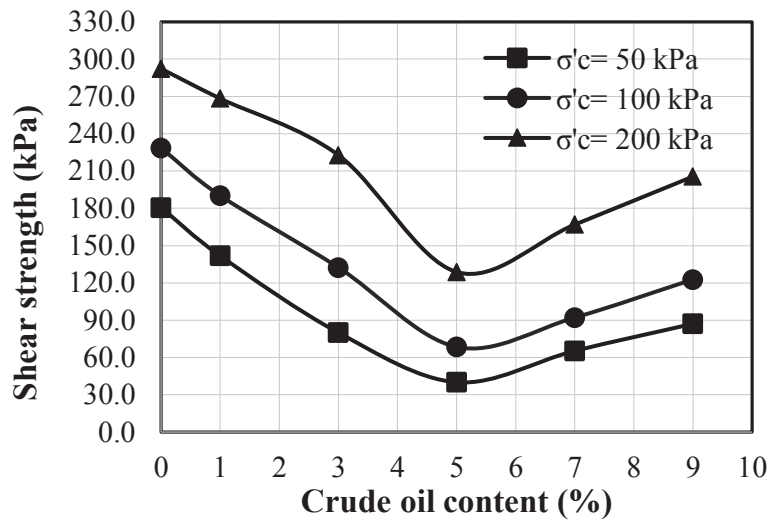
Fig. 10. Variation of excess pore pressure versus crude oil content for clean and contaminated specimens under different confining pressures

این افزایش و کاهش مقاومت برشی با تغییر غلظت نفت خام را می‌توان در تغییرات زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $c$ ) که از ترسیم مسیر تنش  $p$ - $q$  در فشارهای محصورکننده مختلف به دست آمده‌اند، بررسی کرد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، آلودگی خاک ماسه‌ای با نفت خام باعث کاهش قابل ملاحظه زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی آن می‌شود. با افزایش غلظت نفت خام تا ۵ درصد زاویه اصطکاک داخلی خاک، به دلیل خاصیت روغن‌کاری نفت بین دانه‌های خاک، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش و چسبندگی خاک به واسطه گرانروی بالای نفت خام و همچنین وجود مشتقات پلیمری در آن و متعاقب آن افزایش کشش سطحی بین دانه‌های خاک و نفت، افزایش می‌یابد، ولی باتوجه به این نکته که مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای به شدت تحت تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و تماس‌های بین دانه‌ای می‌باشد، کاهش می‌یابد. ولی در مقادیر بیش تر از ۵ درصد نفت خام، کل سطح دانه‌های ماسه از نفت خام پوشیده می‌شود و در نتیجه آن نرخ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به شدت کاهش پیدا کرده و تا حدودی ثابت می‌شود. این درحالی است که چسبندگی حاصل از وجود نفت خام در غلظت‌های بالای ۵ درصد نیز با نرخ تقریباً ثابتی افزایش می‌یابد. با افزایش چسبندگی و تا حدودی ثابت شدن زاویه اصطکاک داخلی،

اضافه فشار منفذی مثبت کاهش می‌یابد و حتی در فشارهای محصورکننده کم، منفی نیز می‌شود. در ادامه به بررسی تأثیر غلظت نفت خام و همچنین غلظت محلول شوینده SDS بر پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده خاک ماسه‌ای سست پرداخته خواهد شد. با توجه به اینکه کلیه نمونه‌ها در کرنش ۳۰ درصد به حالت پایدار مقاومتی خود رسیده‌اند، در ادامه مقدار تنش انحرافی در این درصد کرنش به عنوان مقاومت برشی نمونه در نظر گرفته می‌شود.

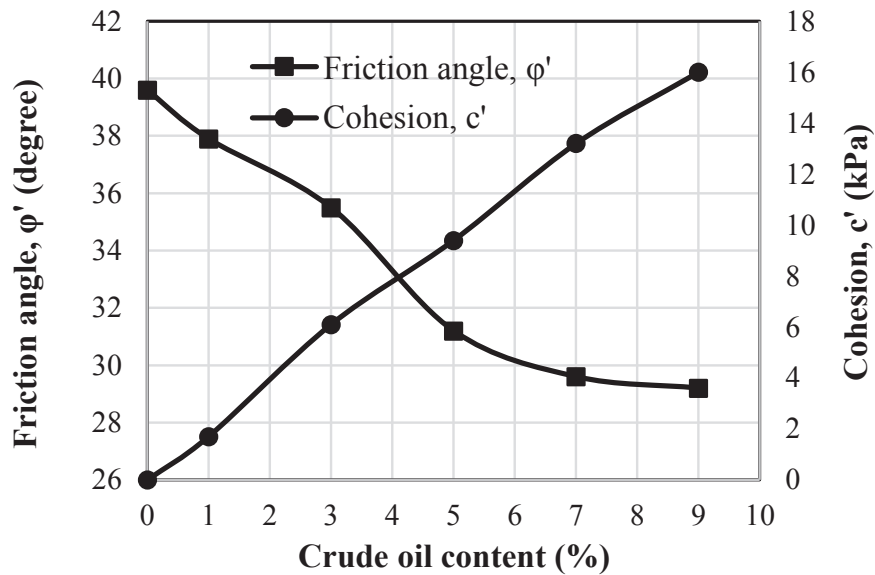
#### ۴-۳-۱- تأثیر غلظت نفت خام

در این تحقیق از نفت خام سبک در غلظت‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد به عنوان آلاینده در خاک ماسه‌ای استفاده شده است. شکل ۱۱ تغییرات مقاومت برشی خاک تمیز و آلوده را در مقابل غلظت نفت خام تحت فشارهای محصورکننده مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در کلیه فشارهای محصورکننده، با افزایش غلظت نفت خام تا حدود ۵ درصد مقاومت برشی خاک ماسه‌ای کاهش و در غلظت‌های بیشتر از ۵ درصد افزایش می‌یابد، ولی در حالت کلی مقاومت برشی خاک آلوده کمتر از خاک تمیز می‌باشد. علت



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت برشی در مقابل غلظت نفت خام برای خاک تمیز و آلوده تحت فشارهای محصورکننده مختلف

Fig. 11. Variation of shear strength versus crude oil content for clean and contaminated specimens under different confining pressures



شکل ۱۲. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ماسه‌ای در غلظت‌های مختلف نفت خام

Fig. 12. Variation of internal friction angle and cohesion for clean and contaminated sandy soil at various crude oil content



اصطکاک داخلی خاک را حدود ۱۱ درصد افزایش می‌دهد و از ۳۱/۲ به ۳۴/۶ درجه می‌رساند. این در حالی است که استفاده از محلول SDS، همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، چسبندگی خاک آلوده به نفت خام را کاهش می‌دهد، ولی از آنجایی که رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای بیشتر تحت تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و تماس‌های بین دانه‌ای می‌باشد، مقاومت برشی نمونه شستشو شده افزایش می‌یابد.

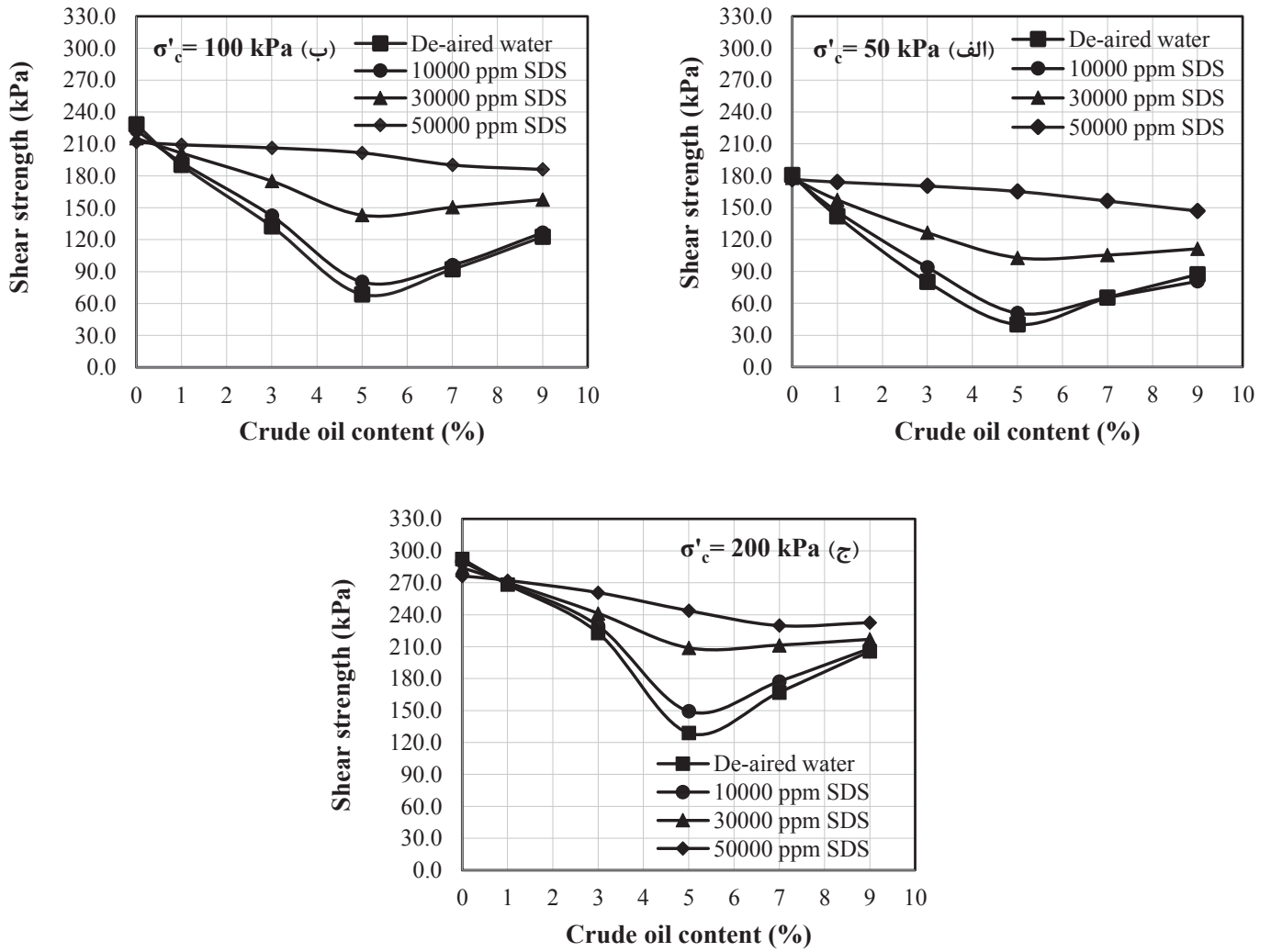
نرخ افزایش مقاومت برشی در خاک آلوده در اثر شستشو با محلول SDS، تا حدود زیادی به غلظت نفت خام وابسته است، به طوری که با افزایش غلظت نفت خام تا ۵ درصد نرخ افزایش مقاومت برشی در کلیه غلظت‌های محلول SDS افزایش و در غلظت‌های نفت بالاتر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، تحت فشار محصورکننده ۱۰۰ کیلوپاسکال، با افزایش غلظت نفت خام از ۱ تا ۵ درصد، نرخ افزایش مقاومت برشی در اثر شستشو با محلول SDS با غلظت ppm ۵۰۰۰۰ از ۱۰ به ۱۹۴ درصد می‌رسد. در حالی که با افزایش غلظت نفت خام تا ۹ درصد، نرخ افزایش مقاومت برشی به حدود ۵۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در کلیه فشارهای محصورکننده و غلظت‌های نفت خام، با افزایش غلظت محلول SDS نرخ افزایش مقاومت برشی خاک آلوده، به دلیل افزایش بازدهی حذف نفت از خاک، افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، با افزایش بازدهی حذف نفت خام در اثر افزایش غلظت محلول SDS، نرخ افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک آلوده افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، مقاومت برشی خاک آلوده به ۵ درصد نفت خام تحت فشار محصورکننده ۱۰۰ کیلوپاسکال طی فرآیند شستشو با محلول SDS با غلظت ppm ۱۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰، به ترتیب، ۱۷ و ۱۹۴ درصد افزایش می‌یابد. از مقایسه اشکال ۱۳ (الف) تا ۱۳ (ج) می‌توان دریافت که با افزایش فشار محصورکننده نرخ افزایش مقاومت برشی در اثر شستشوی خاک با محلول SDS کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، شستشوی خاک آلوده به ۵ درصد نفت خام با استفاده از محلول SDS با غلظت ppm ۵۰۰۰۰ تحت فشارهای محصورکننده ۵۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب، ۳۱۱ و ۸۹ درصد افزایش می‌یابد. علت این کاهش در نرخ افزایش مقاومت برشی در اثر شستشوی خاک آلوده، افزایش محصورشدگی و تماس‌های بین دانه‌ای در اثر افزایش فشار محصورکننده و در نتیجه آن کاهش تأثیر شوینده SDS در افزایش مقاومت خاک آلوده می‌باشد.

همچنین، با توجه به شکل ۱۳، مقاومت برشی خاک ماسه‌ای تمیز در اثر شستشو با محلول SDS کاهش می‌یابد. علت این کاهش در مقاومت برشی ماسه تمیز، لزج بودن محلول SDS نسبت به آب (محلول صفر درصد)

مقاومت برشی نمونه‌های آلوده در غلظت‌های نفت خام بیش از ۵ درصد افزایش می‌یابد. با این حال، در حالت کلی با توجه به اینکه در خاک‌های ماسه‌ای مقاومت برشی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و تماس‌های بین دانه‌ای می‌باشد، مقاومت برشی ماسه آلوده به نفت خام تحت کلیه فشارهای محصورکننده کمتر از خاک تمیز می‌باشد. کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های ماسه‌ای در اثر افزایش غلظت نفت خام در مطالعات خامه چیان و همکاران [۴]، ابوسینا و همکاران [۲۸]، مهدی زاده و همکاران [۲۹] و استوار و همکاران [۳۰] با انجام آزمایش برش مستقیم روی خاک‌های ماسه‌ای متراکم مشاهده شده است، ولی با توجه به تفاوت در نوع و دانه‌بندی خاک، درصد تراکم نمونه‌ها، روش بارگذاری و شرایط اشباع نمونه‌ها نتایج مطالعات قبلی پیرامون تغییرات چسبندگی تا حدودی متفاوت می‌باشد. ولی در حالت کلی کاهش زاویه اصطکاک و افزایش چسبندگی در اثر آلودگی خاک ماسه‌ای با نفت خام در کلیه مطالعات مذکور مشاهده شده است.

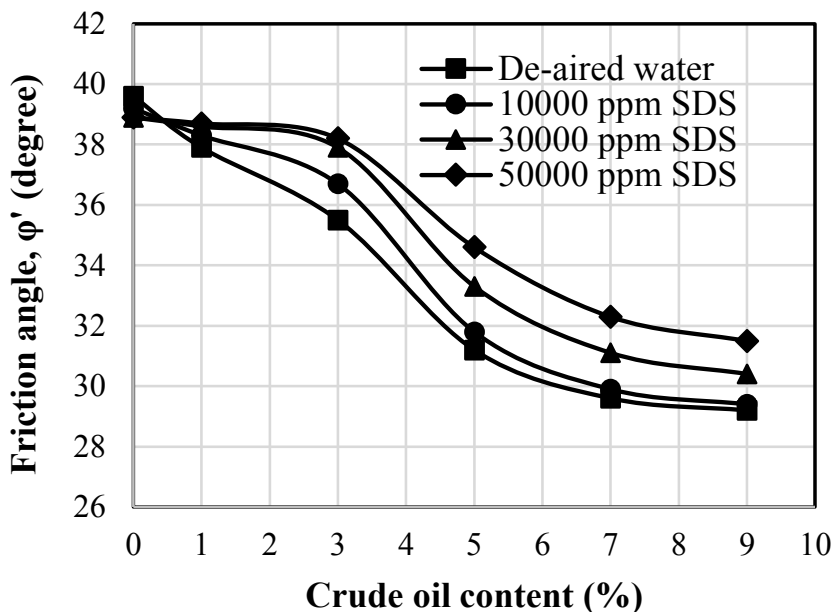
#### ۴-۳-۲- تأثیر شوینده آنیونی SDS

در این تحقیق از شوینده آنیونی SDS در غلظت‌های ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ppm ۵۰۰۰۰ جهت پاکسازی خاک ماسه‌ای آلوده به غلظت‌های مختلف نفت خام استفاده و نتایج آن در قالب تغییرات مقاومت برشی در مقابل غلظت نفت خام تحت فشارهای محصورکننده مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در کلیه فشارهای محصورکننده، شستشوی خاک آلوده به غلظت‌های مختلف نفت خام با استفاده از شوینده آنیونی SDS باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود، ولی در حالت کلی مقاومت برشی خاک شستشو شده کمتر از خاک تمیز می‌باشد. به عنوان مثال، مقاومت برشی خاک آلوده به ۵ درصد نفت خام تحت فشار محصورکننده ۵۰ کیلوپاسکال، در اثر شستشو با محلول SDS با غلظت ppm ۵۰۰۰۰ به میزان ۳۱۱ درصد افزایش می‌یابد و از ۴۰/۲ به ۱۶۵/۳ کیلوپاسکال می‌رسد. علت این رفتار را می‌توان در تأثیر محلول SDS در بازدهی حذف ۹۱/۷ درصدی نفت از خاک آلوده به ۵ درصد نفت خام بررسی کرد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، حذف نفت خام از خاک از طریق شستشوی آن با محلول SDS باعث کاهش خاصیت روغن کاری نفت بین دانه‌های خاک ماسه‌ای و در نتیجه آن، افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. به عنوان مثال، شستشوی خاک آلوده به ۵ درصد نفت خام با استفاده از محلول SDS با غلظت ppm ۵۰۰۰۰، زاویه



شکل ۱۳. تغییرات مقاومت برشی خاک ماسه‌ای تمیز و آلوده به نفت خام در اثر شستشو با غلظت‌های مختلف محلول SDS تحت فشارهای محصورکننده (الف) ۵۰، (ب) ۱۰۰ و (ج) ۲۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 13. Variation of shear strength for clean and crude oil contaminated sandy soil due to washing by SDS solution with different concentrations under (50), (b) 100 and (c) 200 kPa confining pressures



شکل ۱۴. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای تمیز و آلوده به نفت خام در اثر شستشو با غلظت‌های مختلف محلول SDS

Fig. 14. Variation of internal friction angle for clean and contaminated sandy due to washing by SDS solution with different concentrations

کلیه غلظت‌های نفت خام و درصد تراکم‌های نسبی در فشارهای تزریق کم قابل انجام می‌باشد.

- آلودگی خاک ماسه‌ای سست با نفت خام در حالت اشباع مقاومت برشی زهکشی نشده را کاهش و بسته به میزان نفت خام موجود در خاک رفتار برشی آن را از حالت غیر روانگرا به حالت روانگرایی تغییر می‌دهد.

- در کلیه فشارهای محصورکننده، با افزایش غلظت نفت خام تا حدود ۵ درصد مقاومت برشی خاک ماسه‌ای کاهش و در غلظت‌های بیشتر از ۵ درصد افزایش می‌یابد، ولی در حالت کلی مقاومت برشی خاک آلوده کم‌تر از خاک تمیز می‌باشد.

- آلودگی خاک ماسه‌ای با نفت خام تا ۵ درصد باعث کاهش قابل ملاحظه زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی آن می‌شود. در غلظت‌های بیش‌تر از ۵ درصد نفت خام، نرخ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی به شدت کاهش پیدا کرده و تا حدودی ثابت می‌شود. این درحالی است که چسبندگی حاصل از وجود نفت خام با نرخ تقریباً ثابتی افزایش می‌یابد.

- حذف نفت خام از خاک از طریق شستشوی آن با محلول SDS باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک آلوده به نفت خام می‌شود، ولی از آنجایی که رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای بیشتر تحت

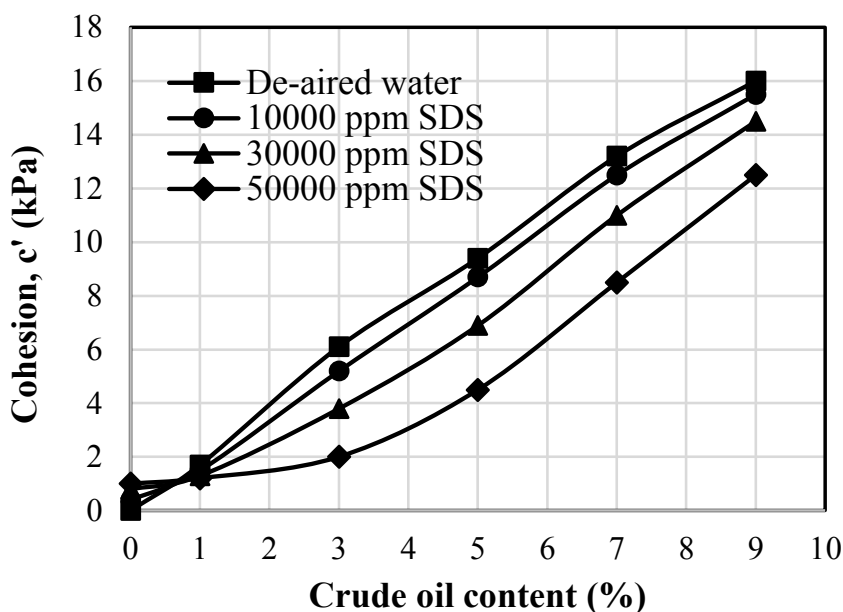
می‌باشد، که همان‌طور که در اشکال ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ناچیز چسبندگی می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اثر شستشوی خاک آلوده به نفت خام بر پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده آن از آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بر روی نمونه‌های ماسه سست آلوده به غلظت‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد نفت خام سبک و نمونه‌های آلوده شسته شده با شوینده آنیونی SDS تحت فشارهای محصورکننده ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. اهم نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

- شستشوی خاک آلوده به نفت خام با استفاده از محلول SDS بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی را نسبت به آب هوازدایی شده افزایش می‌دهد. نرخ این افزایش برای محلول SDS با غلظت ۵۰۰۰۰ ppm حدود ۹۱/۷ درصد می‌باشد.

- با توجه به اینکه زمان تزریق محدودیتی برای عملکرد محلول SDS در شستشوی خاک آلوده ایجاد نمی‌کند، تزریق محلول SDS در



شکل ۱۵. تغییرات چسبندگی خاک ماسه‌ای تمیز و آلوده به نفت خام در اثر شستشو با غلظت‌های مختلف محلول SDS

Fig. 15. Variation of cohesion for clean and contaminated sandy due to washing by SDS solution with different concentrations

### ۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
$c'$	چسبندگی خاک
$C_c$	ضریب انحناء دانه‌بندی
$C_u$	ضریب یکنواختی دانه‌بندی
$D_{50}$	اندازه متوسط سنگدانه‌ها، mm
$D_r$	تراکم نسبی نمونه، درصد
$e_{max}$	حداکثر نسبت تخلخل خاک
$e_{min}$	حداقل نسبت تخلخل خاک
$h_t$	ارتفاع نمونه، cm
علائم یونانی	
$\rho$	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$\sigma'_c$	فشار محصورکننده یا تحکیمی، kPa
$\varphi'$	زاویه اصطکاک داخلی خاک

تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و تماس‌های بین دانه‌ای می‌باشد، مقاومت برشی نمونه شستشو شده افزایش می‌یابد.

- با افزایش غلظت نفت خام تا ۵ درصد نرخ افزایش مقاومت برشی در کلیه غلظت‌های محلول SDS افزایش و در غلظت‌های نفت بالاتر کاهش می‌یابد.

- در کلیه فشارهای محصورکننده و غلظت‌های نفت خام، با افزایش غلظت محلول SDS نرخ افزایش مقاومت برشی خاک آلوده، به دلیل افزایش بازدهی حذف نفت از خاک، افزایش می‌یابد.

در انتها باتوجه به گستردگی و تنوع مواد شیمیایی و طبیعی با قابلیت از بین بردن آلودگی نفتی و فقدان مطالعات پیرامون تأثیر این مواد بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها، تأثیر استفاده از شویندهای طبیعی و روش‌های پاکسازی میکروبی بر بازدهی حذف هیدروکربن‌های نفتی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به نفت خام پیشنهاد می‌گردد. همچنین، با توجه به خصوصیات الکتروشیمیایی خاک‌های رسی و احتمال واکنش شیمیایی علاوه بر حذف فیزیکی آلودگی نفتی در اثر استفاده از شویندهای مصنوعی، تحقیق روی این‌گونه خاک‌ها نیز می‌تواند نتایج کاربردی به همراه داشته باشد.

- Water Science, 7(2) (2017) 543-568.
- [11] M. Karkush, Z. Kareem, Investigation The Impacts of Fuel Oil on The Geotechnical Properties of Cohesive Soil, *Engineering Journal*, 21 (2017) 127-137.
- [12] M. Karpuzcu, M. Arbili, F. Ghaffoori, A. Cabalar, An Assessment of The Effects of Light Crude Oil on The Geotechnical Properties of A Soil, *Proceedings of Researchfora 23rd International Conference, Istanbul, Turkey*, 5 (2018) 1-4.
- [13] M. Hasanloordad, H. Khabbazi, Oil Contaminats Effect on the Dispersivity Potential and Shear Strength of Dispersive Clay Soils, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(2) (2018) 401-408.
- [14] R.A.J. Al-Adhamii, M.Y. Fattah, M.Th. Al-Hadidi, Crude Oil Effect on the Clayey Soil Mechanical and Physical Properties, 2018, 7(4.20) (2018) 453-458.
- [15] M. Ghadyani, A. Hamidi, M. Hatambeigi, Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(1) (2019) 112-135.
- [16] N. Meegoda, P. Ratnaweera, Compressibility of Contaminated Fine-Grained Soils, *Geotechnical Testing Journal*, 17(1) (1994) 101-112.
- [17] A.K. Nazir, Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay, *Alexandria Engineering Journal*, 50(4) (2011) 331-335.
- [18] G. Akpabio, I. Udoinyang, B.S, Effect of Used Motor Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clay Soil on Uyo-Akwa Ibom, *International Journal of Natural Sciences Research*, 5 (2017) 22-30.
- [19] M.O. Karkush, A.G. Jihad, Impacts of kerosene contamination on the geotechnical characteristics of cohesive soil, 2019, 7(4) (2019) 5444-5448.
- [20] S.M. Roshanghiyas, M.H. Bagheri Puor, Effect of Crude Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Kaolinite Clay soil in the Road, *Journal of Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, 5(2) (2019) 101-111.
- [21] E. Evgin, B.M. Das, Mechanical behavior of an oil
- [1] J. Welch, F. Yando, Worldwide Oil Spill Incident Data Base: Recent Trends, *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1993(1) (1993) 811-814.
- [2] S.K. Singh, R.K. Srivastava, S. John, Settlement Characteristics of Clayey Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(3) (2008) 290-300.
- [3] M. Kermani, T. Ebadi, The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(5) (2012) 655-671.
- [4] M. Khamchayan, A. Hossein Charkhabi, M. Tajik, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, 89(3) (2007) 220-229.
- [5] H.U.R. Ahmed, S. Abduljawwad, T. Akram, Geotechnical Behavior of Oil-Contaminated Fine-Grained Soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12 (2007).
- [6] A. Hamidi, C. Jedari, Investigating The Consolidation Behavior of Contaminated Clay, *Sharif Journal of Science and Technology*, 29-2 (2011) 29-35.
- [7] L. Tong, W. Chen, X. Zheng, M. Li, Effect of Oil Contamination on Atterberg Limits of Soil, *Advanced Materials Research*, 374-377 (2011) 336-338.
- [8] Akinwumi, U. Maiyaki, S. Adubi, S. Daramola, B. Ekanem, Effects of Waste Engine Oil Contamination on The Plasticity, Strength and Permeability of Lateritic Clay, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3 (2014) 331-335.
- [9] A.R. Estabragh, I. Beytolahpour, M. Moradi, A.A. Javadi, Mechanical Behavior of A Clay Soil Contaminated With Glycerol and Ethanol, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5) (2016) 503-519.
- [10] A.A. Adeyemo, I.O. Adeoye, O.S. Bello, Adsorption of Dyes Using Different Types of Clay: A Review, *Applied*



- Mining and Environment, 10(2) (2019) 389-399.
- [32] S.S. AbdelSalam, A.M.M. Hasan, Characterization of Shear Strength and Compressibility of Diesel Contaminated Sand, Recent Thoughts in Geoenvironmental Engineering, (2020) 39-48.
- [33] S. Aghajani, H. Katebi, S. Davari Algoo, Effect of Crude Oil Spill on Geotechnical Properties of Silty Sand Soil by Using Taguchi Method, Advance Researches in Civil Engineering, 2(2) (2020) 1-14.
- [34] K. Urum, T. Pekdemir, M. Gopur, Optimum Conditions for Washing of Crude Oil-Contaminated Soil with Biosurfactant Solutions, Process Safety and Environmental Protection, 81(3) (2003) 203-209.
- [35] M. Nedjhioui, N. Moulai-Mostefa, A. Morsli, A. Bensmaili, Combined effects of polymer/surfactant/oil/alkali on physical chemical properties, Desalination, 185(1) (2005) 543-550.
- [36] S. Paria, Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water, Advances in Colloid and Interface Science, 138(1) (2008) 24-58.
- [37] E. Moradabadi, H. Ganjidoost, S. Javadian, Study on Mobilization And Desorption Effects of Biosurfactant Produced in Biodegradation of Hydrocarbon-Contaminated Soils, Amirkabir Journal of Civil Engineering (Amirkabir), 41(2) (2010) (in persian)
- [38] S.N. Seyed Razavi, A. Khodadadi, H. Ganjidoust, Treatment of soil contaminated with crude oil using biosurfactants, Journal of environmental studies, 37(60) (2012) 107-116. (In Persian)
- [39] A. Vincent, S. Osakwe, F. Egharevba, W.O. Medjor, A. Imohimi, O. Ize-Iyamu, Surfactant enhanced soil washing technique and its kinetics on the remediation of crude oil contaminated soil, PJST, 13 (2012) 443-456.
- [40] B. Thapa, A. Kc, A. Ghimire, A Review On Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants In Soil, Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology, 8 (2012) 164-170.
- [41] M. Babalar, A.R. Estabragh, J. Abdolahi, Remediation contaminated sand, Environmental Geotechnology, (1992) 101-108.
- [22] H.A. Al-Sanad, W.K. Eid, N.F. Ismael, Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand, Journal of Geotechnical Engineering, 121(5) (1995) 407-412.
- [23] H.A. Al-Sanad, N.F. Ismael, Aging Effects on Oil-Contaminated Kuwaiti Sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(3) (1997) 290-293.
- [24] S. Aiban, The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands, Environment International, 24 (1998) 153-161.
- [25] V.K. Puri, Geotechnical Aspects of Oil-Contaminated Sands, Journal of Soil Contamination, 9(4) (2000) 359-374.
- [26] A. Jamrah, A. Al-Futaisi, H. Hassan, S. Al-Oraimi, Petroleum contaminated soil in Oman: Evaluation of bioremediation treatment and potential for reuse in hot asphalt mix concrete, Environmental monitoring and assessment, 124 (2007) 331-341.
- [27] Z. Ali Rahman, S. Abd Rahim, T. Lihan, W. Idris, M. Sakina, Effects of Surfactant on Geotechnical Characteristics of Silty Soil, Sains Malaysiana, 42 (2013) 881-891.
- [28] R.M. Abousnina, A. Manalo, J. Shiau, W. Lokuge, 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) 833-845.
- [29] M.J. Mehdizadeh, R. Ghiassi, K. Behnia, Evaluation of oil contamination effect on permeability and shear strength of sandy soils, Journal of petroleum research, 26(89) (2017) 45-56. (in Persian)
- [30] M. Ostovar, M.J. Mehdizadeh, R. Ghiassi, N. Shariatmadari, Effects of Crude Oil on Geotechnical Specification of Sandy Soils, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, (2020) 1-16.
- [31] M.H. Askarbioki, F. Kargaran Bafghi, M. Mokhtari, M. Khaleghi, Impact of gasoline contamination on mechanical behavior of sandy clay soil, Journal of

- contamination due to used motor oil and its remediation, Canadian Geotechnical Journal, 46(9) (2009) 1077-1083.
- [44] R. Ladd, Preparing Test Specimens Using Undercompaction, Geotechnical Testing Journal, 1(1) (1978) 16-23.
- [45] K. Been, M.G. Jefferies, J. Hachey, The critical state of sands, Géotechnique, 41(3) (1991) 365-381.
- of Cohesive Clay Contaminated to Gasoline Using Thermal Method and Surfactants Journal of Engineering Geology, 12(2) (2018) 213-236.
- [42] M. Hosnani, H. Amini, M.R. Sarmasti Emami, Ex-situ removal of crude oil from a contaminated soil using Sodium Dodecyl Sulfate (SDS), Journal of environmental science and technology, 21(3) (2019) 38-46. (In Persian)
- [43] S.K. Singh, S. John, R.K. Srivastava, Studies on soil

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*N. Gholampoor, S. A. Naeini, R. Ziaie Moayed, Evaluation of the Effect of Anionic Surfactant of Sodium Dodecyl Sulfate on Undrained Shear Strength Parameters of Crude Oil Contaminated Loose Sand, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4931-4950.*

DOI: 10.22060/ceej.2020.18637.6914

