

# بررسی اثر آلاینده‌های آلی بر روی خصوصیات تحکیمی خاک‌های ریزدانه

ایمان بیت‌اله پور\* و علی رئیسی استبرق

گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی و فن‌آوری، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۷

## چکیده

خصوصیات خاک‌های رسی در تماس با آلاینده‌های آلی کاملاً دستخوش تغییر می‌گردد و پارامترهایی مانند نوع ماده آلاینده آلی و تاریخچه تنش خاک، کاملاً در تعیین رفتار آن تأثیرگذار است. لذا در این پژوهش به بررسی خصوصیات تحکیم‌پذیری دو نوع خاک رسی با پلاستیسیته بالا و پایین پرداخته شده است. نمونه‌های خاک با استفاده از روش دوغابی و نمونه دوغابی فشرده شده تحت یک بار از پیش تعیین شده برای نشان دادن اثر تاریخچه تنش با آب و غلظت‌های مختلف (۱۰، ۲۵ و ۴۰٪) از دو ماده آلی گلیسرول و اتانول تهیه گردید. نتایج نشان می‌دهد که شاخص فشردگی (cc) در شرایط اسلازی با افزایش غلظت ماده آلاینده افزایش می‌یابد. اما در مورد نمونه با تاریخچه تنش، کاهش شاخص فشردگی در نمونه‌های خاک وجود دارد. فشار پیش تحکیمی در مورد خاک با پلاستیسیته پایین با افزودن ماده آلاینده افزایش پیدا می‌کند، اما برای خاک‌هایی با پلاستیسیته بالا هیچ تغییر قابل توجهی به وجود نمی‌آید. به عبارت دیگر تغییرات شاخص فشردگی وابسته به نوع خاک و مواد شیمیایی آلاینده می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** شاخص فشردگی، روش دوغابی، خاک رسی، گلیسرول و اتانول

## مقدمه

متخلخل کاملاً پیچیده است [۱]. هیدروکربن‌های نفتی عموماً تحت عنوان LNAPL بیان می‌شوند که چگالی کمتری نسبت به آب دارند و اغلب به‌عنوان آلودگی در لایه‌های بالایی محیط‌های متخلخل مانند آبخوان‌ها قرار می‌گیرند. اما در حالت مقابل DNAPL‌ها چگالی بالاتری از آب دارند و اغلب آلودگی به سطوح پایین‌تری از سفره‌های آبی می‌رسد، بنابراین شناسایی اثرات آنها بر محیط زیست ضروری است. انتقال مواد آلی یا هیدروکربنی در خاک‌های اشباع و غیر اشباع صورت

آلودگی‌ها عموماً به‌صورت یک ترکیب شیمیایی هستند که موجب اثرات کوتاه مدت و یا بلند مدت بر زندگی انسان یا محیط زیست می‌شوند. آلاینده‌ها در حالت کلی به دو گروه آلاینده‌های آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. بسیاری از ترکیبات آلی از قبیل روغن موتور، مواد شوینده، رنگ و ضد یخ از نفت خام به‌دست می‌آیند که عملکرد و رفتار برخی از این آلاینده‌ها در محیط‌های

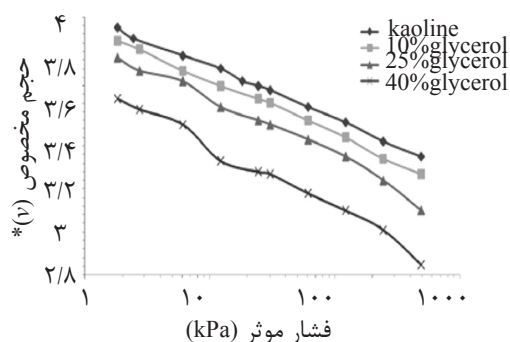
\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی:

iman.beytolahpour@gmail.com

آن ایجاد خرابی در ساختمان‌های صنعتی است [۶]. مباحث آلودگی در خاک‌ها توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های ریزدانه نسبت به خاک درشت دانه بیشتر تحت تاثیر آلودگی قرار می‌گیرد. فانگ در مطالعات خود پارامتری را تحت عنوان شاخص حساسیت معرفی کرد که این شاخص برای انواع مختلف خاک در محدوده ۰-۱ قرار دارد. این شاخص برای شن و ماسه در محدوده ۰/۱-۰/۱ و برای خاک رس در محدوده ۰/۶-۰/۹ تعریف شده است [۱]. هنگامی که خاک رس با مواد شیمیایی آلوده می‌گردد، فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی بین خاک و مواد شیمیایی رخ می‌دهد که سبب تغییر در ساختمان، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود [۳]. ساختار خاک رس بستگی به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده رس، خواص فیزیکی و شیمیایی مایع حفره‌ای بین ذرات خاک مانند غلظت الکترولیت، نوع یون، آنیون جذب، pH، ثابت دی الکتریک و دما دارد. میزان فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی در خاک را می‌توان توسط لایه مضاعف (DDL) بیان کرد. کاهش در ضخامت لایه دوگانه، یک ساختار فولوکوله و افزایش در ضخامت این لایه، یک ساختار پراکنده ایجاد می‌نماید. محققان مختلفی در خصوص اعتبار تئوری لایه دو گانه مضاعف در رابطه با تراکم‌پذیری خاک رس به تحقیق پرداختند. این محققین با انجام یکسری آزمایشات با مایعات مختلف شیمیایی بر روی کانی‌های مختلف خاک رس، به این نتیجه رسیدند که رفتار بنتونیت، با تئوری لایه دوگانه سازگار است. اما رفتار دو خاک دیگر، تحت تاثیر نوع مایع حفره‌ای بوده و سازگار با تئوری دوگانه نمی‌باشد. مور و میچل نشان دادند که نیروی جاذبه واندروالسی، نقش مهمی در رفتار تراکم‌پذیری خاک‌های آلوده شده از جمله نشست، مقاومت برشی، نفوذپذیری و پتانسیل متورم ایفا می‌کند [۷].

می‌گیرد و عواملی مانند نیروی ثقل و موینگی در انتقال آن موثر می‌باشد. هنگامی که حجم زیادی از این ماده روی سطح زمین قرار می‌گیرد، حرکت عمودی آن تحت نیروی ثقل صورت می‌پذیرد (شکل ۱). طی این فرآیند، ماده آلاینده ابتدا نقاط تماس ذرات خاک و سپس فضای کوچک بین ذرات را اشغال می‌کند و در ادامه، حرکت افقی و عمودی در داخل خاک تحت نیروی ثقل و موینگی صورت می‌گیرد [۲].

آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به مواد ارگانیک و سمی یک مشکل شایع محیط زیستی است. در این میان ترکیبات نفتی یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست محسوب می‌شود. مهم‌ترین نگرانی در مورد محصولات نفتی مربوط به اثرات مضر آنها بر سلامتی و همچنین اکولوژی خاک طی مراحل پالایش، حمل و نقل و بهره‌برداری می‌باشد. با این وجود مساله آلودگی خاک در اثر نشت مواد نفتی از لحاظ ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت است. میگوذا و راجا پاکش در سال ۱۹۹۳ اعلام کردند که به علت عملیات کشاورزی و صنعتی، آلودگی به شکل‌های مختلف از جمله مواد آلی، آفت کش، نفت خام، محصولات پتروشیمی و ... وارد خاک می‌شوند [۳]. السنند و اسماعیل در سال ۱۹۹۷ اعلام نمودند مساحت اراضی آلوده شده در کویت بر اثر نشت مواد هیدروکربنی (نفت) به چندین کیلومتر مربع می‌رسد [۴]. مطابق با اعلام USEPA, 1988 (سازمان حفاظت محیط زیست ایالت متحده آمریکا) تقریباً از ۲۵٪ مخازن نفتی احداث شده در آمریکا، مواد نفتی نشت می‌کند [۵]. تمامی موارد ذکر شده اهمیت موضوع بررسی آلاینده‌های آلی در محیط خاکی را مشخص می‌کند. از طرفی بر اثر نشت مواد آلاینده، سفره‌های آب زیرزمینی نیز در معرض آلودگی قرار خواهند گرفت که در نهایت زندگی افراد جامعه با مشکلاتی مواجه می‌گردد [۳]. به‌عنوان نمونه سریدهاران و همکاران (۱۹۸۱) در مورد افزایش نشست خاک به دلیل آلوده شدن محیط با مواد آلی گزارشی ارائه دادند که نتیجه



شکل ۲- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت و ماده گلیسرول (شرایط دوغابی)  
\* حجم مخصوص نسبت حجم حفره‌های خالی به حجم کلی خاک است

### روش آزمایش مواد

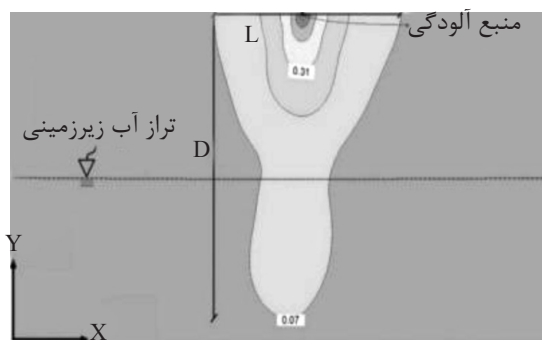
خاک، آب مقطر، گلیسرول و اتانول (به‌عنوان مایعات آلی) از جمله مواد اولیه‌ای هستند که برای تهیه نمونه‌های خاک آلوده مورد استفاده قرار گرفتند. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، گلیسرول و اتانول در ادامه توضیح داده می‌شود.

### خاک

دو نوع خاک در این کار تحقیقاتی به کار گرفته شد که عبارتند از کائولینیت و یک مخلوط از کائولینیت و بنتونیت (کائولینیت ۷۰٪ و بنتونیت ۳۰٪). این دو خاک به ترتیب به‌عنوان خاک‌های الف و ب معرفی شده‌اند. خواص فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. خاک (۱) و (۲) را می‌توان با توجه به سیستم طبقه‌بندی یونیفاید به‌عنوان CL (خاک رس با پلاستیسیته پایین) و CH (خاک رس با پلاستیسیته بالا) طبقه‌بندی کرد. آزمایش تراکم در این دو خاک مطابق با استاندارد ASTM D650-07 انجام گرفت. رطوبت بهینه دو خاک الف و ب به ترتیب ۱۷٪ و ۲۳٪ با وزن واحد حجم خشک ماکزیمم ۱۷/۰ و ۱۵/۸ kN/m<sup>3</sup> تعیین گردید.

### گلیسرول و اتانول

گلیسرول و اتانول به دلیل محلول بودن در آب به‌عنوان مواد شیمیایی آلی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت خلاصه‌ای از خواص این دو مایع آلی در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۱- مکانیسم انتشار ماده آلاینده در محیط متخلخل

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد تعداد قابل توجهی از پژوهش‌های صورت گرفته تنها به اثر شیمیایی ماده آلی در هدایت هیدرولیکی خاک‌ها پرداخته‌اند [۲ و ۸]. با این حال، تحقیقات بسیار محدودی در خصوص رفتار تحکیم‌پذیری خاک‌های آلوده [۹-۱۲] وجود دارد. همچنین خصوصیات دیگری نظیر پارامترهای مکانیکی و شیمیایی خاک‌های آلوده [۱۴-۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است که نتیجه کلی تحقیقات مذکور، کاهش در میزان چسبندگی و افزایش pH بیان شده است. اگرچه پارامترهای بیان شده در کنترل عملکرد سیستم‌های آلاینده زائد مهم هستند، اما مکانیسم تراکم‌پذیری برای ارزیابی تغییر شکل در این خاک‌ها نیز نقش مهمی دارد. بنابراین هدف این تحقیق، بررسی اثر مایع حفره‌ای و تاریخچه تنش بر رفتار تحکیم‌پذیری خاک‌های آلوده می‌باشد. در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های دو نوع خاک رس با پلاستیسیته بالا و پایین انجام شد. نمونه‌های خاک با استفاده از روش دوغابی با آب مقطر و غلظت‌های مختلف (۱۰، ۲۵ و ۴۰٪) از دو ماده آلی (گلیسرول و اتانول) آماده گردید. آزمایش تحکیم بر روی نمونه دوغابی و نمونه دوغابی فشرده شده تحت یک بار از پیش تعیین شده انجام گرفت و در نهایت نتایج به منظور بررسی اثرات فیزیک و شیمیایی و مکانیکی در تراکم‌پذیری خاک‌های آلوده به مواد آلی مختلف، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها

خاک (۲)	خاک (۱)	خصوصیات خاک
۲/۷۵	۲/۷۲	وزن مخصوص ( $G_s$ )
حدود اتربرگ		
۸۱/۰	(%) ۴۷/۰	حد روانی (LL)
۲۸/۰	(%) ۲۰/۰	حد خمیری (PL)
۱۶/۰	(%) ۱۲/۰	حد انقباض (SL)
CH	CL	طبقه‌بندی یونیفاید
مشخصات فشردگی		
(%) ۱۸/۰	(%) ۱۷/۰	رطوبت بهینه
۱۵/۸ ( $kN/m^3$ )	۱۷/۰ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{max}$
درصد مواد		
(%) ۲۰	(%) ۲۳	ماسه
(%) ۳۵	(%) ۵۲	سیلت
(%) ۴۵	(%) ۲۵	رس

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک‌ها

مشخصات شیمیایی	خاک (۱)	خاک (۲)
$SO_4^{2-}$ (meq/l)	۸۳/۰	۴۳/۱
$HCO_3^-$ (meq/l)	۴/۰	۳۶/۴
$CO_3^{2-}$ (meq/l)	۰/۶	۰/۱۱
$Cl^-$ (meq/l)	۶۰/۰	۲۹/۰
$Mg^{+2}$ (meq/l)	۱۰/۰	۳/۷
$Ca^{+2}$ (meq/l)	۲۴/۰	۷/۲
$K^{+1}$ (meq/l)	۰/۳۳	۰/۰۳
pH (meq/l)	۸/۰	۸/۳

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد آلی در دمای  $25^\circ C$ 

ماده آلی	چگالی جرمی ( $kg/m^3$ )	ویسکوزیته مطلق (cP)	ثابت دی الکتریک	هدایت الکتریکی (mhos/cm)
آب	۹۹۷/۰۵	۰/۸۹۴	۷۸/۵	$8/40 \times 10^{-3}$
گلیسرول	۱۲۵۸/۰۲	۱۵۰۰	۴۰/۱۰	$6/42 \times 10^{-5}$
۱۰٪ گلیسرول	۱۰۲۰/۷۰	۱/۳۱	۷۵/۸۰	$8/40 \times 10^{-3}$
۲۵٪ گلیسرول	۱۰۵۸/۰۰	۱/۷۵	۷۱/۴۵	$8/40 \times 10^{-3}$
۴۰٪ گلیسرول	۱۰۹۷/۱۰	۴/۳۱	۶۷/۱۰	$8/40 \times 10^{-3}$
اتانول	۷۸۹	۱/۰۷۴	۲۴/۳	$7/11 \times 10^{-3}$
۱۰٪ اتانول	۹۸۳/۵	۲/۵۳۲	۷۴/۱۰	$8/40 \times 10^{-3}$
۲۵٪ اتانول	۹۶۵/۶۵	۲/۳۲۱	۶۱/۱	$8/40 \times 10^{-3}$
۴۰٪ اتانول	۹۴۴/۸	۲/۱۴۸	۵۴/۸۲	$8/40 \times 10^{-3}$

تعدادی ظرف استیل انتقال داده شد و با قرار دادن یک پوشش پلی اتیلن برای بیش از یک هفته بر روی دوغاب‌ها، شرایط رسیدن به تعادل شیمیایی بین خاک و مایع آلی مهیا گردید. در طول این زمان، با نشست ذرات خاک، یک مایع روشن در بالای خاک رسوب شده، تشکیل گردید. این مایع از بالای خاک‌های رسوب یافته برداشته شد و سپس خاک رسوب یافته در قالب دستگاه تحکیم ریخته شد. در طول بارگذاری، نمونه‌ها توسط محلول آلی که در آماده‌سازی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، اشباع می‌گردند.

### روش ب

هدف از آماده‌سازی نمونه‌ها در این روش بررسی اثر تاریخچه تنش در رفتار تراکم‌پذیری نمونه‌های خاک آلوده می‌باشد. تعدادی از قالب‌های فلزی با قطر ۱۵۰ mm و ارتفاع ۳۰۰ mm (استوانه تراکم) با نمونه دوغابی پر شده و اختلاط دوباره تکرار گردید. به منظور دستیابی به یک تعادل یونی این مخلوط (خاک و مایع آلی) با پوشش نایلون پوشیده شده و برای بیش از هفت روز نگه داشته شد. خاک در قالب تحکیم، حین زه‌کشی از بالا و پایین قالب با استفاده از فشار سربار حداکثر ۸۰ kPa تحکیم داده شد. بارگذاری به صورت تدریجی و پس از حدود ۷ روز به پایان می‌رسد. پس از آن نمونه‌های مورد نظر از قالب استوانه‌ای مذکور توسط قالب تحکیم گرفته شده و در ادامه فرآیندی مشابه روش الف در دستگاه تحکیم انجام می‌پذیرد. همانند روش الف در طول بارگذاری، نمونه‌ها توسط محلول آلی که در آماده‌سازی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته، اشباع می‌گردند. به منظور جلوگیری از تبخیر، نمونه‌ها طی زمان مخلوط کردن و عمل‌آوری با پوشش پلی اتیلن پوشانده می‌شوند. نسبت تخلخل واقعی برای هر آزمایش با توجه به وزن واحد هر مایع قابل محاسبه است.

مایعات آلی با آب مقطر مخلوط می‌شود تا محلول‌هایی با طیف وسیعی از ثابت‌های دی الکتریک و غلظت‌های مختلف که بالاترین حد غلظت مایع آلاینده را پوشش می‌دهد، تولید شود. ثابت دی الکتریک گلیسرول (یا اتانول) مخلوط شده با آب مطابق با روش مورد استفاده توسط محققینی مانند میگودا به روش میانگین‌گیری وزنی ثابت دی الکتریک برای مخلوط آب مقطر و ماده آلی به دست آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. کلرید سدیم به مواد آلی مخلوط شده با آب مقطر اضافه گردید تا هدایت الکتریکی مخلوط در  $8.4 \text{ mmhos/cm}$  ثابت بماند. این عمل به منظور به حداقل رساندن تغییرات در ساختار خاک با توجه به تغییر در ترکیب مایع آلی به پیشنهاد رانتاورا و میگودا در سال ۲۰۰۵ انجام گرفت [۱۶].

### آماده‌سازی نمونه و روش آزمایش

نمونه‌های مورد نظر برای آزمایش، با مخلوط کردن مایعات آلی با خاک خشک برای رسیدن به توزیع یکنواخت از مایع آلی در سرتاسر نمونه و جلوگیری از شکل‌گیری بافت شبه پایدار خاک انجام گرفت [۱۶]. این روش آماده‌سازی نمونه در مقایسه با روش لیچینگ به زمان کمتری نیاز دارد. میگودا و همکاران نشان دادند که نمی‌توان از روش لیچینگ برای بررسی اثرات بلند مدت استفاده کرد. لذا نمونه‌ها به روش دوغابی تهیه گردید در روش دوغابی محلول مورد نظر به میزان چهار برابر حد روانی خاک مورد نظر به خاک اضافه شده و دوغاب حاصل به مدت ۴ ساعت با ماشین هم‌زن مخلوط می‌گردد. پس از آن دو روش برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش اصلی استفاده گردید که عبارتند از:

### روش الف

این روش آماده‌سازی نمونه تنها به منظور بررسی اثر مایعات آلی در رفتار تراکم‌پذیری خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوغاب آماده شده به

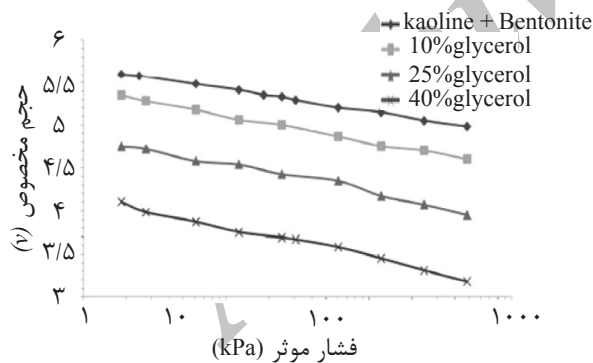
## نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های تحکیم برای خاک‌های (۱) و (۲) با آب و درصد‌های مختلف گلیسرول و اتانول (۲۵، ۴۰ و ۱۰٪) برای روش دوغابی بدون تاریخچه تنش در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.

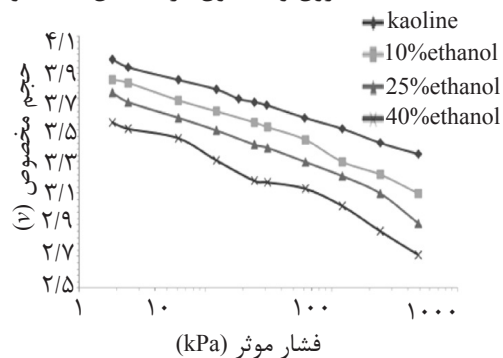
همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، تغییرات حجم ویژه  $v$  ( $v=1+e$ ) نسبت به بار اعمال شده (در مقیاس لگاریتمی) تقریباً یک خط راست است و حجم ویژه اولیه نمونه‌ها با افزایش بار اعمال شده کاهش یافته است. همچنین برای فشار اعمال شده یکسان، حجم ویژه با افزایش غلظت گلیسرول و اتانول برای هر دو خاک کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در غلظت ۱۰٪ گلیسرول، مقدار حجم ویژه در بار ۶ kPa برابر ۳/۷۵ است و برای غلظت ۱۰٪ اتانول در همان بار، برابر ۳/۷ می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که کاهش حجم ویژه در خاک (۱) برای مایعات آلی متفاوت در یک غلظت مشابه، یکسان نیست. این روند تغییرات حجم ویژه برای خاک (۲) با گلیسرول و اتانول در شکل‌های ۴ و ۵

دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اعمال بار ۶ kPa، حجم ویژه به ترتیب برای گلیسرول و اتانول برابر ۵/۱۸ و ۴/۷۸ می‌باشد. نتایج به دست آمده از شکل‌های ۲ تا ۵ (برای خاک و مایعات مختلف)، نشان می‌دهد که اثر اتانول در تراکم نمونه‌های خاک، بیشتر از گلیسرول است. مطابق شکل‌های ۲ تا ۵، مقادیر اولیه حجم ویژه برای خاک (۱) بیش از خاک (۲) می‌باشد. به عنوان مثال در بار ۶ kPa، حجم ویژه برای خاک (۱) و (۲) به ترتیب برابر ۳/۷۵ و ۵/۱۸ به دست آمده است. این اختلاف ناشی از تفاوت در ماهیت دو خاک (۱) و (۲) نسبت به هم می‌باشد. بررسی شکل‌ها مبین این مطلب است که با افزایش بار اعمال شده، حجم ویژه خاک به طور مداوم کاهش می‌یابد و منحنی حاصل تقریباً یک خط راست است که همان منحنی نرمال تحکیم برای این دو نوع خاک می‌باشد.

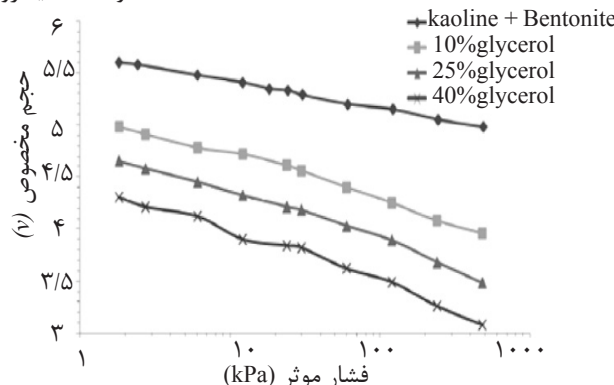
در شکل‌های ۶ تا ۹ تاثیر تاریخچه تنش در منحنی‌های تحکیم خاک‌های (۱) و (۲) با درصد‌های مختلف مایعات حفره‌ای آلی رسم شده است.



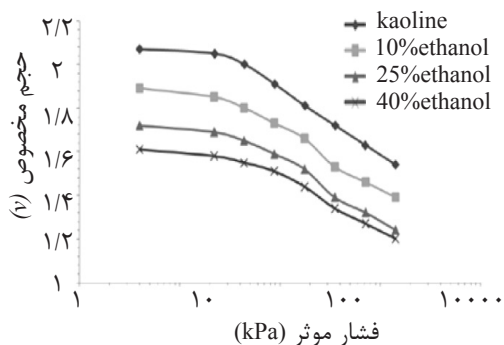
شکل ۴- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت و ماده گلیسرول (شرایط دوغابی)



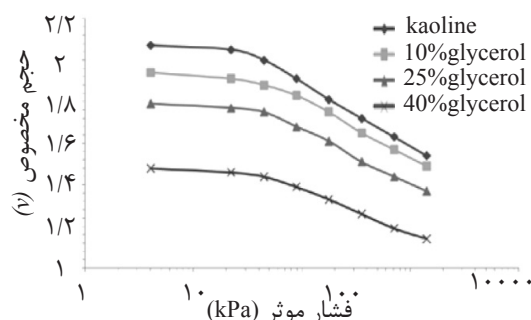
شکل ۵- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت و ماده اتانول (شرایط دوغابی)



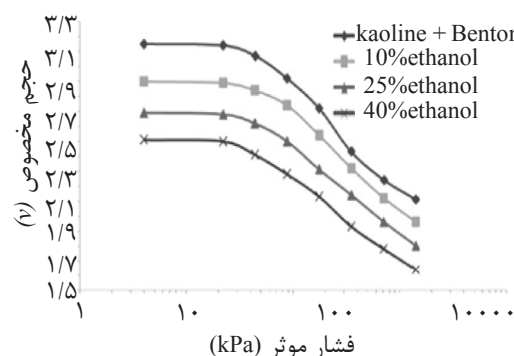
شکل ۶- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت و ماده اتانول (شرایط دوغابی)



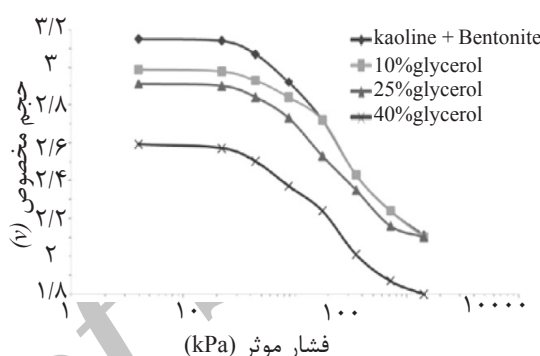
شکل ۷- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت و ماده اتانول (شرایط پیش بارگذاری)



شکل ۶- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت و ماده گلیسرول (شرایط پیش بارگذاری)



شکل ۹- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت و ماده اتانول (شرایط پیش بارگذاری)

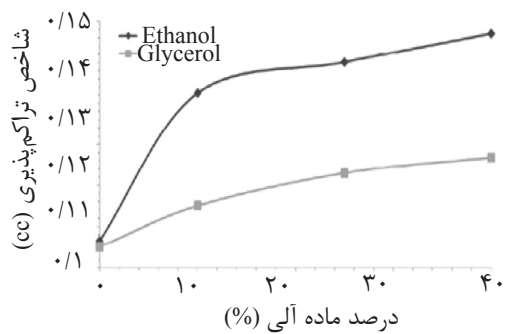


شکل ۸- منحنی تحکیم برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت و ماده گلیسرول (شرایط پیش بارگذاری)

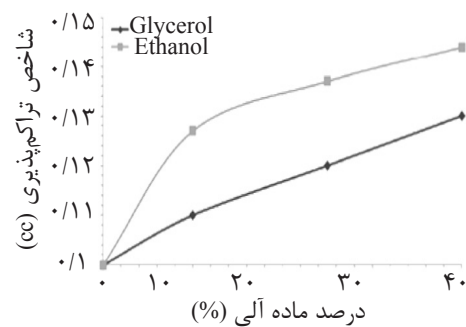
و منجر به کاهش حجم اولیه ویژه می‌شود. تراکم خاک رس را می‌توان با شاخص تراکم‌پذیری (cc) (شیب قسمت خطی نمودار تحکیم به صورت نسبت تخلخل بر روی لگاریتم فشار متناظر با آن) بیان کرد. نشست تحکیم به شاخص تراکم‌پذیری خاک وابسته است. مقدار (cc) برای منحنی تحکیم شکل‌های ۲ تا ۵ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. از این شکل‌ها نتیجه می‌شود که با افزایش غلظت مایع آلی، مقدار (cc) برای هر دو خاک افزایش یافته است. برای مایع آلی مشابه، تغییرات (cc) برای خاک (۲) بیشتر از خاک (۱) است. در غلظت یکسان از هر دو مایع آلی، اتانول در تغییر مقدار (cc) موثرتر از گلیسرول عمل می‌کند. علت این تفاوت، همان‌گونه که در جدول ۱ ارائه شده است، بیشتر بودن مقدار ذرات رس در خاک (۲) (۰.۴۵) نسبت به خاک (۱) (۰.۲۵) می‌باشد. نکته مهم این است که واکنش مایع آلی با ذرات خاک به درصد ذرات ریزدانه و سطح مخصوص ذرات وابسته است. فانگ (۱۹۹۷) شاخص حساسیت را برای ذرات رس بین ۰/۶ - ۰/۹ بیان کرده است.

این شکل‌ها نشان می‌دهد که حجم ویژه خاک در مقابل افزایش فشار، کاهش یافته است. برای هر دو نوع خاک، موقعیت قرارگیری منحنی تحکیم برگرفته از نوع و درصد ماده آلاینده موجود در نمونه می‌باشد. در حین تحکیم، حجم ویژه خاک (۲) بیشتر از خاک (۱) است که دلیل آن وجود بنتونیت در خاک (۲) می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است حجم ویژه اولیه نمونه با سیال حفره‌ای آب بیشتر از نمونه‌های تهیه شده با مایعات آلی است. دلیل این پدیده را می‌توان توسط نظریه لایه دو گانه گوی (۱۹۱۰) و چاپمن (۱۹۱۳) بیان نمود. کاهش در ضخامت لایه دو گانه منجر به فولوکوله شدن ذرات خاک می‌گردد. ضخامت این لایه متناسب با جذر ثابت دی الکتریک است [۶]. بنابراین برای مایعات آلی با دی الکتریک کمتر از آب، ضخامت دو گانه مضاعف پراکنده در اطراف ذرات رس کاهش می‌یابد و منجر به کاهش فضای بین ذرات می‌گردد. بنابراین، با افزایش غلظت مایع آلی این لایه منقبض شده



شکل ۱۱- تغییرات شاخص فشردگی با تغییر غلظت ماده آلاینده برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت (شرایط دوغابی)



شکل ۱۰- تغییرات شاخص فشردگی با تغییر غلظت ماده آلاینده برای خاک کائولینیت (شرایط دوغابی)

می‌دهد. این شرایط به خاطر عدم گستردگی بیش از حد ثابت دی الکتریک است. بنابراین می‌توان گفت که عوامل مکانیکی در این مورد نقش تاثیر گذارتری دارد. از آنجا که تمام نمونه‌ها توسط روش دوغابی آماده و اشباع شده‌اند، کشش سطحی مایع آلی هیچ اثری بر تشکیل ساختار خاک ندارد. بنابراین، عوامل اصلی موثر بر ساختار خاک، چگالی و ویسکوزیته مایعات حفره‌ای می‌باشد. ویسکوزیته نقش مهمی در جابه‌جایی و لغزش ذرات نسبت به یکدیگر دارد. به نحوی که هر تغییری در آن، سبب تغییرات اساسی در شاخص تراکم‌پذیری می‌گردد. مقادیر پایین ویسکوزیته می‌تواند شاخص تراکم‌پذیری را افزایش دهد. در حالی که مقادیر بالا ممکن است به جلوگیری از افزایش شاخص تراکم‌پذیری منجر شود. در جدول ۳ نشان داده شده است که غلظت‌های متفاوت از محلول اتانول، ویسکوزیته بالاتری نسبت به گلیسرول دارد و این امر می‌تواند در ایجاد شاخص تراکم بالاتر اتانول تاثیر مهمی بگذارد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که اتانول تراکم‌پذیری بالاتری در نمونه‌های آلوده شده نسبت به گلیسرول دارد. در جدول ۴ مقادیر ضریب تراکم‌پذیری خاک‌های (۱) و (۲) و همچنین ضرایب دی الکتریک آلاینده‌های متفاوت ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، مقدار Cc با افزودن غلظت ماده آلاینده و کاهش ضریب دی الکتریک، افزایش می‌یابد.

بنابراین، عمل متقابل واکنش شیمیایی برای خاک (۲) به دلیل مقدار رس بالاتر، بیشتر از خاک (۱) است. به عبارت دیگر، در خاک (۲) احتمال بیشتری برای اختلاط ذرات خاک آلاینده وجود دارد که این امر به توزیع اندازه ذرات خاک بستگی دارد [۱۷].

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شاخص تراکم‌پذیری، اثر اتانول بیش از گلیسرول است. محققینی مانند چن و همکاران در سال ۲۰۰۰ بیان نمودند که خواص مکانیکی خاک‌های رسی و چسبنده به ساختار آنها بستگی دارد. ساختار خاک رس به نوع کانی رس، خواص فیزیکی، خواص شیمیایی مایع حفره‌ای (جذب آنیون، pH، دما، غلظت، ثابت دی الکتریک و الکترولیت) و عوامل مکانیکی خاک (چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی) بستگی دارد. با توجه به تئوری لایه مضاعف دوگانه، ضخامت لایه مضاعف متناسب با جذر ثابت دی الکتریک است [۱۷]. با کاهش ضخامت لایه دو گانه، مقدار شاخص تراکم‌پذیری نمونه‌ها کاهش یافته و خاک سخت‌تر می‌گردد. در جدول ۳ کاهش ثابت دی الکتریک با افزایش غلظت مایع آلی (گلیسرول و اتانول) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است اختلاف بین مقادیر آن زیاد نمی‌باشد. مقدار ثابت دی الکتریک برای آب برابر ۷۸ و برای محلول ۴۰٪ گلیسرول و ۴۰٪ اتانول به ترتیب برابر ۶۲/۸ و ۵۶/۵ می‌باشد. طبق تئوری لایه دوگانه، شاخص تراکم‌پذیری باید با افزایش ماده آلاینده کاهش یابد، اما نتایج این تحقیق عکس این حالت را نشان



جدول ۴- شاخص فشردگی و ضریب دی الکتریک برای خاک‌های مختلف

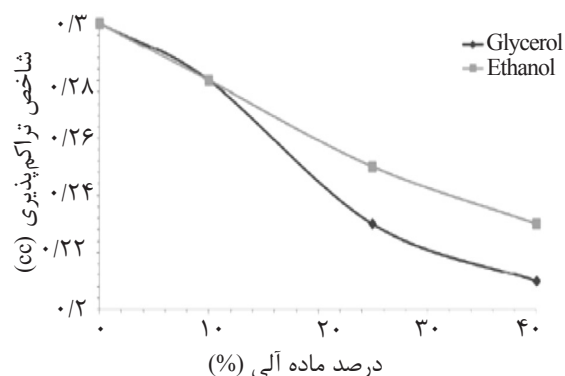
شاخص تراکم‌پذیری		ثابت دی الکتریک	درصد	آلاینده آلی
خاک (۲)	خاک (۱)			
۰/۱	۰/۱	۷۸/۵	۱۰۰	آب
۰/۱۳	۰/۱۱	۷۵/۸	۱۰	گلیسرول
۰/۱۴۶	۰/۱۲	۷۱/۴۵	۲۵	
۰/۱۵۴	۰/۱۳	۶۷/۱	۴۰	
۰/۱۸۵	۰/۱۲۷	۷۴/۱	۱۰	اتانول
۰/۲	۰/۱۳۷	۶۱/۱	۲۵	
۰/۲۱۴	۰/۱۴۴	۵۴/۸۲	۴۰	

نشست بالاتر خود را انجام داده است. با این حال، اگر خاک بیشتر از حداکثر بار گذشته خود تحکیم گردد، نشست خاک در این حالت بیشتر از سابق خواهد بود. زیرا ساختمان خاک در بارهای بالاتر، تغییرات بیشتری را در خود به نسبت بزرگ‌ترین فشار پیش تحکیمی می‌بیند [۱۴]. مقدار فشارهای پیش تحکیمی توسط روش تقاطع دو منحنی خطی و شارما برآورد شده است [۲]. در شکل ۱۴ تغییرات فشار پیش تحکیمی برای خاک (۱) با غلظت‌های مختلف گلیسرول و اتانول به‌عنوان مایعات حفره‌ای رسم شده است. مطابق این شکل، فشار پیش تحکیمی برای هر دو سیال حفره‌ای با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد. همچنین افزایش فشار پیش تحکیمی اتانول بیشتر از گلیسرول است. این نتایج نشان می‌دهد که هیچ افزایش قابل توجهی در فشار پیش تحکیمی برای خاک (۲) وجود ندارد و مقدار آن تقریباً برابر فشار پیش تحکیمی نمونه‌ها با آب به‌عنوان مایع آلی (۳۱ kPa) است. فشار پیش تحکیمی ثابت می‌تواند به دلیل تفاوت ماهیت خاک (۱) و (۲) و پیوندهای شیمیایی باشد که بین ذرات خاک ایجاد می‌گردد. ضروری است که تاثیر مایعات حفره‌ای آلی بر روی خصوصیات تحکیم خاک و شاخص فشردگی خاک آلوده بررسی شود. این امر به افزایش ایمنی ساخت ساختمان‌ها و جاده‌ها در خاک‌های آلوده کمک شایانی می‌نماید.

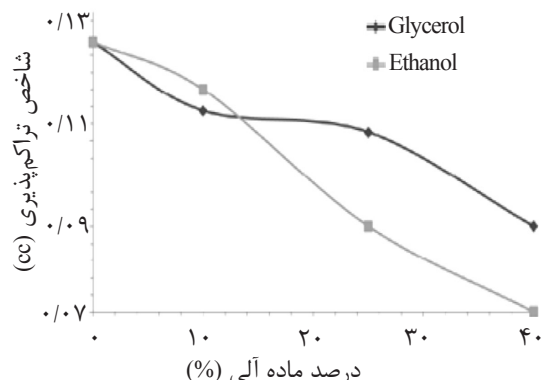
نتایج بیان شده کاملاً مشابه با نتایج تحقیق می‌گودا و راتنورا [۹] می‌باشد که بیان می‌کند با افزایش ماده آلاینده، مقدار ضریب تراکم‌پذیری افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات شاخص فشردگی (Cc) برای غلظت‌های مختلف گلیسرول و اتانول در شرایط فشار پیش تحکیمی از قبل اعمال شده، رسم شده است. مقادیر (Cc) با افزایش غلظت مایع آلی کاهش می‌یابد که منجر به سختی بیشتر خاک می‌گردد. این مورد برای هر دو نوع خاک (۱) و (۲) صدق می‌کند. با مقایسه نتایج حاصل از خاک‌های (۱) و (۲) با گلیسرول به‌عنوان مایع آلی خاک، دیده می‌شود که کاهش در شاخص تراکم‌پذیری برای خاک (۲) بیشتر از خاک (۱) است. مقایسه اثرات گلیسرول و اتانول نشان می‌دهد که کاهش شاخص تراکم‌پذیری برای ماده اتانول قابل توجه است. در حالی که مقدار این کاهش برای گلیسرول ناچیز می‌باشد. علت اساسی این روند، نقش مؤثر مکانیکی بر رفتار خاک آلوده در ویسکوزیته‌های مختلف دو مایع آلی می‌باشد.

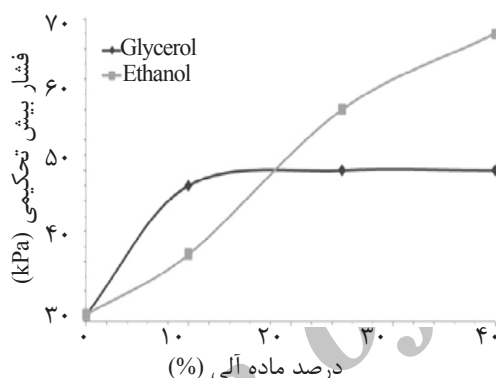
اثر تاریخچه تنش در ساختمان خاک محبوس می‌گردد و خاک همواره حافظه‌ای از حداکثر تنش موثر گذشته را در ساختار خود حفظ می‌کند. به گونه‌ای که اگر خاک تحت باری کمتر از حداکثر بار گذشته خود قرار گیرد، نشست نهایی آن کوچک می‌باشد، زیرا خاک در گذشته فشاری بالاتر و



شکل ۱۳- تغییرات شاخص فشردگی با تغییر غلظت ماده آلاینده برای خاک کائولینیت به همراه بنتونیت (شرایط پیش بارگذاری)



شکل ۱۲- تغییرات شاخص فشردگی با تغییر غلظت ماده آلاینده برای خاک کائولینیت (شرایط پیش بارگذاری)



شکل ۱۴- تغییرات فشار پیش تحکیمی با تغییر غلظت ماده آلاینده برای خاک کائولینیت

آلی در مورد نمونه‌های دارای تاریخچه تنش کاهش می‌یابد. سیر تکاملی cc در هر دو مورد وابسته به نوع خاک، مایعات آلی و غلظت آنها است.

- تغییرات فشار پیش تحکیمی نمونه‌های با تاریخچه تنش، بستگی به نوع خاک و مایع آلی دارد. به این صورت که با افزایش غلظت مایع آلی، روند افزایشی در فشار پیش تحکیمی به وجود می‌آید.

- هر دو عامل فیزیک و شیمیایی و مکانیکی، رفتار تحکیم‌پذیری خاک آلوده را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک‌سری از آزمایشات به منظور بررسی رفتار تحکیم‌پذیری خاک رس آلوده با غلظت‌های مختلف مایعات آلی گلیسرول و اتانول انجام شد. آزمایشات بر روی نمونه‌های دوغابی و نمونه‌ها با تاریخچه تنش مشخص انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- شاخص تراکم‌پذیری (cc) با افزایش غلظت مایعات آلی در مورد نمونه‌های دوغابی افزایش می‌یابد. افزایش در (cc) وابسته به نوع کانی خاک و مایعات آلی آلاینده است. مقدار (cc) با افزایش غلظت مواد

## مراجع

- [1]. Fretwell B. A., Burgess W. G., Jefferies N. L. and Dottridge J., "Distribution of volatile organic compounds in pore water of the seasonally unsaturated chalk aquifer," In: Contaminated land and Ground water: Future directions. Geology Society, (ed. By Lerner, D.N. and Walton, N.R.G.). London, Engineering Geology Special publication, 14, pp. 219-226, 1998.

- [2]. Abdul A. S., Gipson T. C., and Rai D. N., "Laboratory studies of the flow of some organic solvents and their aqueous solution through bentonite and kaolinite clays," *Ground Water* 28, pp. 524–530, 1990.
- [3]. Meegoda N. J. and Rajapakse R. A., "Short-term and long-term permeability of contaminated clay," *J. Environ. Eng.* 119 (4), pp. 725–743, 1993.
- [4]. Al sanad H. A., and Ismael N. F., "Aging effect on oil contaminated Kuwaiti sand," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(3), pp. 290-294, 1997.
- [5]. USEPA, 1988, "Must for USTs A Summary of the New Regulations for the Underground Storage Tank Systems," EPA/530/UST-88/008, Office of Underground Storage Tanks, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [6]. Sridharan A., Nagaraj T. S. and Sivapullaiah P. V., "Heaving of soil due to acid contamination," *Proceeding 10<sup>th</sup> International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm Publication Committee 10<sup>th</sup> ICSMFE, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 383-386, 1981.
- [7]. Moore C. A. and Mitchell J. K., "Electromagnetic forces and soil strength," *Geotechnique* 24 (4), pp. 627–640, 1974.
- [8]. Daniel .E, Anderson C., and Boyntons S. "Fixedwall versus flexible-wall permeameters," In *Hydraulic barriers in soil and rock*. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication No. 874, pp. 107-126, 1985.
- [9]. Meegoda N. J. and Ratnaweera P., "Compressibility of contaminated fine-grained soils," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.1, pp.101-112, 1994.
- [10]. Chen J., Anandarajah A. and Inyang H., "Pore fluid properties and compressibility of kaolinite," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 9, pp. 798-807, 2000.
- [11]. Singh S. K., Srivastava R. K. and John S., "Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons.," *Soil & Sediment Contamination*, Vol. 17, No. 3, pp. 290-300, 2008.
- [12]. Matteo L. D., Bigotti F. and Ricco R., "Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 9, pp. 846-849, 2011.
- [13]. Kermani M. and Ebadi T., "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils.," *Soil Sediment Contamination*, Vol. 21, pp. 655-671, 2012.
- [14]. Khosravi E., Ghasemzadeh H., Sabour M. R. and Yazdani H., "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite." *Engineering Geology*, Vol. 166, pp. 11-16, 2013.
- [15]. Ying W., Jiang F., Qianxin L., Xianguo L., Xiaoyu W., Guoping W., "Effects of crude oil contamination on soil physical and chemical properties in Momoge Wetland of China," *Chinese Geographical Science*, 23(6): pp. 708–715, 2013.
- [16]. Ratnaweera P. and Meegoda J. N., "Shear strength and stress–strain behavior of contaminated soils" *Geotech. Test. J.* 24 (2), pp. 1–8, 2005.
- [17]. Fang H. Y. . "Introduction to environmental geotechnology," CRC Press. FINE, 1997. Soil interactions with petroleum hydrocarbons: abiotic processes., *Soil Technology*, pp. 133-153, 1997.