تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۴ (ص ۱۴۹- ۱۴۱)

بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی خاک سیمان تهیه‌شده از خاک رسی آلوده به مواد هیدروکربنی

مهدی خطیبی*[۱]، علی رئیسی استبرق[۲]، نادر عباسی[۳]، جمال عبداللهی عیلی‌بیک[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. دانشیار سازمان تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

۴. مربی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۸/۲۴)

چکیده

خاک سیمان یکی از مصالح ساختمانی است که در جاده‌سازی، پوشش کانال‌های آبیاری و غیره کاربرد زیادی دارد. در این تحقیق، خواص مکانیکی خاک رسی آلوده به مادهٔ آلی (۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول) و خاک سیمان تهیه‌شده از خاک رسی و خاک رسی حاوی مادهٔ آلی (گلیسرول) با ۳ و ۶ درصد سیمان بررسی شد. نمونه‌های آزمایشگاهی به روش تراکم استاتیکی تهیه شدند و مقاومت خاک طبیعی و خاک آلوده به مادهٔ هیدروکربنی تعیین شد. همچنین مقاومت نمونه‌های خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی یا خاک آلوده به گلیسرول در زمان‌های عمل‌آوری مختلف تعیین شد. نتایج نشان داد مقاومت خاک رسی آلوده به گلیسرول نسبت به خاک رسی معمولی کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش درصد آلاینده همراه است. از طرف دیگر، خاک سیمان تهیه‌شده از خاک رسی حاوی درصد کم (۳ درصد) مادهٔ آلاینده نسبت به خاک سیمان تهیه‌شده از خاک رسی طبیعی مقاومت بیشتری دارد؛ در صورتی که در درصدهای بیشتر آلاینده (۶ و ۹ درصد) نسبت به خاک سیمان متناظر تهیه‌شده از خاک رسی طبیعی مقاومت کمتر است.

کلیدواژگان: خاک سیمان، زمان عمل‌آوری، گلیسرول، مقاومت

مقدمه

آلودگی را می‌توان ناشی از وجود یک عنصر یا ترکیب شیمیایی در خاک دانست که قادر خواهد بود در کوتاه‌مدت یا بلندمدت اثری نامطلوب بر زندگی انسان و محیط زیست بگذارد. آلودگی به دو نوع آلی و غیر آلی تقسیم می‌شود. منشأ آلودگی‌های آلی مواد هیدروکربنی نفتی است. آلودگی خاک با مواد آلی ممکن است در اثر نشت مواد هیدروکربنی از مخازن سطحی یا زیرزمینی، تخریب تأسیسات نفتی و غیره باشد.

وجود آلاینده‌های آلی در خاک‌ها خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Cook *et al* (1992) با آزمایش‌های گوناگون بر نمونه‌های خاک ماسه‌ای آلوده به مواد نفتی به این نتیجه رسیدند که در این نوع خاک‌ها زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد؛ لیکن تغییراتی در تراکم آن‌ها مشاهده نمی‌شود. Puri *et al* (1994) و Meegoda and Ratraweera (1994) با آزمایش بر خاک‌های رسی ماسه‌ای به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند. محققان بسیاری (Chen *et al*, 2000; Kaya and Fang, 2000; Graham *et al*, 2001; Singh *et al*, 2008; Di Matteo *et al*, 2010) به این نتیجه رسیدند که خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی تغییر می‌کند.

واکنش بین ذرات خاک و آلاینده به نوع خاک بستگی دارد؛ به طوری که این عمل در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های دانه‌ای بسیار بیشتر است. Fang and Daniels (1997)، برای بیان شدت واکنش ذرات خاک با مواد آلاینده، اندکسی به نام اندکس حساسیت ارائه کردند که تغییرات آن بین ۰ تا ۱ است. مقدار این اندکس برای خاک‌های دانه‌ای بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ و برای خاک‌های رسی بین ۰/۶ تا ۰/۹ تعیین شد. بنابراین خاک‌های رسی بیشترین واکنش را با مواد آلاینده از خود نشان می‌دهند که می‌توان گفت سطح ویژهٔ ذرات و باردار بودن آن‌ها نقشی مؤثر در این زمینه دارند. واکنش بین مواد آلاینده و خاک را می‌توان واکنش‌های فیزیکوشیمیایی نامید؛ که به تغییراتی در ساختمان خاک و خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌انجامد (Meegoda and Rajapakse, 1993). واکنش‌های فیزیکوشیمیایی حادث‌شده در خاک را می‌توان به تغییرات لایهٔ مضاعف ارتباط داد؛ به طوری که کاهش ضخامت این لایه موجب پیدایش ساختمان فولکوله (لخته) می‌شود و

* نویسندهٔ مسئول: Mehdi.khatibi@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

افزایش آن در خاک رسی ساختمان پراکنده ایجاد می‌کند. محققان (Mitchell, 1960; Olsen and Mesri, 1970; Sridharan and Venkatappa Rao, 1973) با آزمایش‌های مختلف بر نمونه‌های خاک رسی بنتونیت و ایلیت و کائولینیت، که مایع حفره‌ای آن‌ها شامل مواد آلایندهٔ گوناگون بود، نتیجه گرفتند خواص فیزیکی و مکانیکی ایجادشده را می‌توان با تغییرات لایهٔ مضاعف توضیح داد.

پاک‌سازی خاک‌های آلوده به مواد آلاینده با روش‌های گوناگون امکان‌پذیر است (روش‌های بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی). لیکن، گاهی استفاده از روش‌های ارائه‌شدهٔ پاک‌سازی خاک اقتصادی نیست و ممکن است خاک‌های آلوده در شرایطی خاص قرار گرفته باشند و برای سفره‌های آب زیرزمینی بی‌خطر باشند. بنابراین، می‌توان به کمک عملیات به‌سازی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده را بهبود داد و در پروژه‌های مختلف، مانند راه‌سازی و خاکریزها و سایر عملیات ساختمانی، از آن استفاده کرد.

به‌سازی خاک‌های رسی معمولاً با روش‌های شیمیایی صورت می‌پذیرد. در این روش‌ها درصد وزنی مشخصی از مواد افزودنی، مانند آهک یا سیمان، به خاک اضافه می‌شود. این کار برخی واکنش‌های شیمیایی را در مخلوط ایجاد می‌کند و خواص خاک را بهبود می‌بخشد. محصولی که از افزودن سیمان به خاک ایجاد می‌شود خاک سیمان نام دارد. مطالعات گسترده‌ای در زمینهٔ چگونگی بهبود خواص خاک‌های رسی به این روش صورت پذیرفته است؛ از جمله تحقیقات Al-Rawas *et al* (2005)، Basha *et al* (2005) و Estabragh *et al* (2012).

گرچه تحقیقات زیادی در زمینهٔ استفاده از سیمان در خاک‌های رسی نرم آلوده به مواد آلاینده، جهت تثبیت آلاینده‌ها، صورت پذیرفته است، تحقیقات در خصوص اثر افزودن سیمان بر خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بسیار محدود است. بنابراین، هدف این تحقیق بررسی اثر سیمان بر خواص یک خاک رسی آلوده به مادهٔ هیدروکربنی است. آزمایش‌هایی بر نمونه‌های طبیعی خاک، خاک آلوده به مواد آلاینده (گلیسرول) و خاک سیمان آلوده به مواد هیدروکربنی انجام شد. سپس نتایج با یک‌دیگر مقایسه شد و در خصوص آن‌ها بحث و بررسی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

مواد استفاده‌شده

الف) خاک

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی و جدول ۲ مشخصات شیمیایی خاک استفاده‌شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها مطابق استاندارد ASTM صورت پذیرفت. همان‌طور که اطلاعات جدول ۱ نشان می‌دهد، خاک استفاده‌شده، بر اساس طبقه‌بندی متحد، خاک رسی با پلاستیسیتهٔ کم (CL) است که زین پس خاک نامیده می‌شود با وزن واحد حجم خشک ماکزیمم ۱۷٫۷ kN/m^3 و رطوبت بهینهٔ ۱۶٫۷ درصد؛ که از آزمایش تراکم استاندارد نتیجه‌گیری شد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده‌شده

مشخصه	استاندارد	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	ASTM-D-854	۲٫۶۹
شن (٪)	ASTM-D-422	۰
ماسه (٪)		۳
سیلت (٪)		۴۵
رس (٪)		۵۲
حد روانی (LL) (٪)	ASTM-D-4318	۴۶
حد خمیری (PL) (٪)		۲۴
طبقه‌بندی متحد (USCS)	ASTM-D-2487	CL
درصد رطوبت بهینه ($\omega_{opt.}$) (٪)	ASTM-D-698	۱۶٫۷
وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)		۱۷٫۷

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک استفاده‌شده

مشخصه	مقدار	مشخصه	مقدار
pH	۸٫۲	(meq/L) Mg^{2+}	۲٫۲
(ds/m) EC	۵٫۰۳	(meq/L) Cl^-	۲۶٫۲
(meq/L) Na^+	۴۲	(meq/L) CO_3^{2-}	۰٫۲
(meq/L) K^+	۰٫۴	(meq/L) HCO_3^-	۳٫۷
(meq/L) Ca^{2+}	۴٫۶	(meq/L) SO_4^{2-}	۱۹٫۲

ب) آب

آب استفاده‌شده از نوع شرب بود و مقادیر اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون کلر (Cl^-) و غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم (Ca2+-Mg2+) آن به ترتیب برابر ۷٫۷۲ ds/m، ۱٫۲ meq/L، ۱٫۷ meq/L و ۹٫۴ meq/L اندازه‌گیری شد.

ج) سیمان

سیمان استفاده‌شده پرتلند نوع ۲ بود. این سیمان خواصی مشابه سیمان پرتلند معمولی (تیپ ۱) دارد؛ با این تفاوت که مقاومت آن در برابر خوردگی و حملهٔ سولفات‌ها بالاتر است. این سیمان وزن مخصوص ۳٫۱۵ دارد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن مطابق استاندارد ASTM استخراج شد که در جدول ۳ می‌آید.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سیمان استفاده‌شده

مشخصه	استاندارد	مقدار
غلظت نرمال (٪)	ASTM-C-187	۲۵٫۵
زمان گیرش اولیه (min)	ASTM-C-191	۱۶۵
زمان گیرش نهایی (min)		۲۲۰
مقاومت فشاری (MPa)		
۷ روزه	ASTM-C-109	۱۹٫۲
۲۸ روزه		۲۵٫۸
مقاومت کششی (MPa)		
۷ روزه	ASTM-C-190	۱٫۶
۲۸ روزه		۲٫۲
مقاومت خمشی (MPa)		
۷ روزه	ASTM-C-190	۳٫۷
۲۸ روزه		۴٫۳

د) گلیسرول

در این پژوهش از گلیسرول با غلظت ۴۵ درصد استفاده شد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن، بر اساس اطلاعاتی که تولیدکننده ارائه کرده، در جدول ۴ می‌آید. با توجه به اطلاعات آب مقطر و گلیسرول ضریب دی‌الکتریک محلول گلیسرول ۴۵ درصد بر اساس میانگین‌گیری وزنی محاسبه شد.

تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی

برای دست‌یابی به اهداف این تحقیق به تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی مناسب نیاز است. نمونه‌های مورد نظر شامل نمونه‌هایی از خاک طبیعی و خاک طبیعی آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول است. تهیهٔ نمونه‌های دیگری نیز از خاک سیمان حاوی ۳ و ۶ درصد سیمان و نیز مخلوط خاک سیمان تهیه‌شده از خاک آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول و ۳ و ۶ درصد سیمان با زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد نظر است. جهت ساخت نمونه‌های مذکور مادهٔ آلاینده با درصدهای مختلف (۳، ۶ و ۹ درصد) با خاک مخلوط شد و این مخلوط به مدت یک هفته در کیسهٔ پلاستیکی جهت انجام‌دادن واکنش‌های شیمیایی نگهداری شد (Meegoda and Ratraweera, 1994). آزمایش تراکم استاندارد روی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک حاوی درصدهای مختلف مادهٔ آلاینده انجام شد و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینهٔ هر یک از نمونه‌ها به دست آمد. با افزودن ۳ و ۶ درصد سیمان به خاک طبیعی و خاک آغشته به درصدهای مختلف گلیسرول مخلوط خاک سیمان تهیه و با آزمایش تراکم استاندارد وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه برای هر یک از آن‌ها تعیین شد. نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نظر طوری تهیه شدند که دارای وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه بودند (DeBlasis, 2008). بنابراین، رطوبت‌های اولیهٔ مخلوط‌های مذکور ابتدا با افزودن آب به رطوبت بهینه رسانده شد؛ سپس با روش تراکم استاتیکی اقدام به تهیهٔ نمونه شد. در این روش مخلوط مذکور در یک قالب ویژه، که اجزای آن در شکل ۱ می‌آید، در سه لایه ریخته شد و سپس هر لایه به وسیلهٔ یک دستگاه بارگذاری، با سرعت ۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه، متراکم شد؛ به طوری که وزن واحد حجم خشک آن با وزن واحد حجم خشک ماکزیمم نمودار تراکمی معادل شد. نمونه‌های استفاده‌شده دارای طول و قطر به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر بودند. نمونه‌های خاک سیمان و خاک سیمان گلیسرول تهیه‌شده مطابق استاندارد ASTM نگهداری شدند و پس از مدت زمان عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آزمایش مقاومت تک‌محوری روی آن‌ها انجام شد.

شکل ۱. اجزای مختلف قالب استفاده‌شده جهت تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گلیسرول

نوع ماده	گالی جرمی (kg/m^3)	ویسکوزیتهٔ مطلق (cp)	ثابت دی‌الکتریک	دایت الکتریکی (mmhos/cm)
آب مقطر	۹۹۷٫۰۵	۰٫۸۹۴	۷۸٫۵	$۸٫۴\times۱۰^{-۳}$
گلیسرول	۱۲۵۸٫۰۲	۱۵۰۰	۴۰٫۱۰	$۶٫۴۲\times۱۰^{-۵}$
٪۴۵ گلیسرول+آب	۱۰۹۷٫۱۰	۴٫۳۱	۶۷٫۱۰	$۸٫۴\times۱۰^{-۳}$

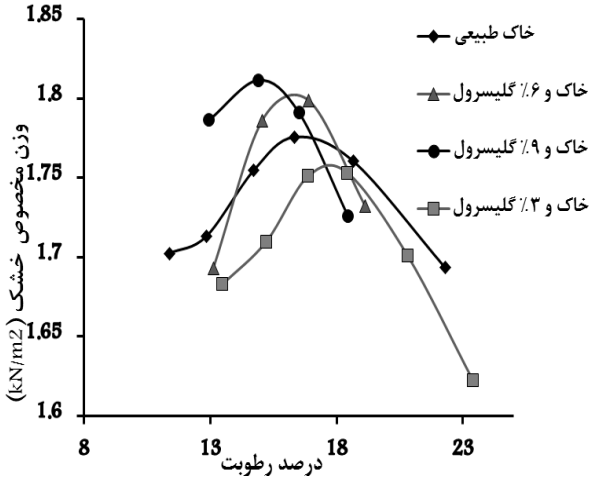
Archive of SID
www.SID.ir

روش آزمایش

آزمایش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM-D-2166 -00 انجام گرفت و سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌های گوناگون اعمال شد. عمل بارگذاری تا وقوع گسیختگی در نمونهٔ مورد آزمایش ادامه یافت. در طول آزمایش، داده‌ها به صورت پیوسته ثبت و تنش و کرنش واردشده به نمونه‌ها محاسبه شد و سپس در بحث و تحلیل نتایج به کار رفت.

نتایج و بحث

شکل ۲ نمونه‌ای از نتایج آزمایش تراکم استاندارد را برای خاک طبیعی و مخلوط خاک طبیعی با وزن ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول نشان می‌دهد. مقادیر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه برای خاک طبیعی به ترتیب برابر ۱۷٫۷۱ (kN/m^3) و ۱۶٫۷ درصد است. این مقادیر برای خاک حاوی ۳ درصد گلیسرول به ۱۷٫۵۳ (kN/m^3) و ۱۷٫۹ درصد تغییر می‌یابد. نتایج خاک شامل ۹ درصد گلیسرول نشان‌دهندهٔ وزن واحد حجم خشک ماکزیمم ۱۸٫۱۱ (kN/m^3) و رطوبت بهینهٔ ۱۴٫۹ درصد است که پارامترهای مذکور نسبت به خاک طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش مقدار را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار تراکم برای خاک طبیعی و خاک آلوده‌شده با ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول

جدول ۵ مقادیر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه را برای مخلوط خاک سیمان با ۳ و ۶ درصد سیمان حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد سیمان یا گلیسرول وزن واحد حجم خشک ماکزیمم افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.

جدول ۵. مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم با درصدهای مختلف سیمان و گلیسرول

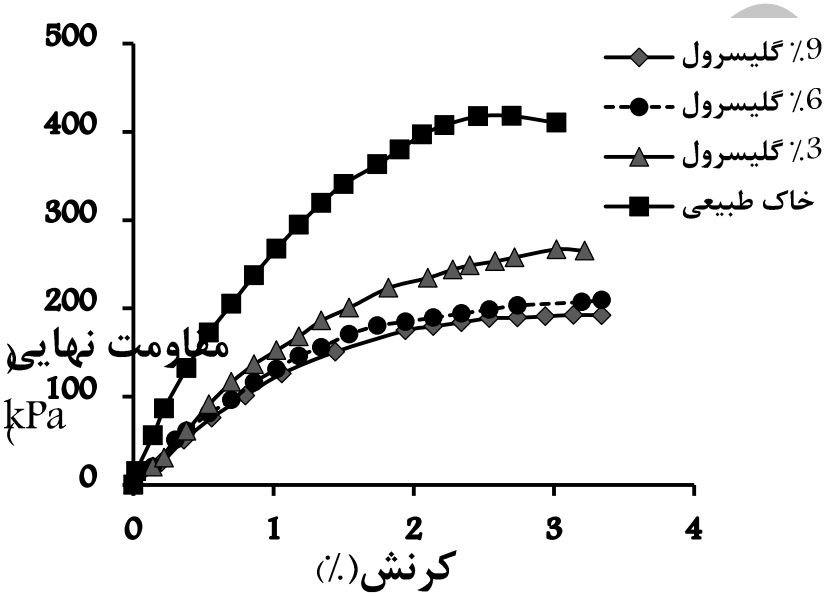
رطوبت بهینه (٪)	وزن واحد حجم خشک ماکزیمم (kN/m^3)	درصد گلیسرول	درصد سیمان
۱۸٫۱	۱۷٫۵۳	۰	۳
۱۸٫۷	۱۷٫۱۳	۰	۶
۱۸٫۰۰	۱۷٫۷۰	۳	۳
۱۷٫۲۰	۱۷٫۸۱	۶	۳
۱۶٫۰۰	۱۷٫۹۱	۹	۳
۱۸٫۰۰	۱۷٫۷۱	۳	۶
۱۶٫۰۰	۱۸٫۱۰	۶	۶
۱۴٫۶۰	۱۸٫۲۰	۹	۶

افزودن مادهٔ آلی هیدروکربنی (گلیسرول) به خاک معمولی موجب تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌شود. نتایج آزمایش تراکمی (شکل ۲) خاک حاوی ۳ درصد گلیسرول نشان می‌دهد وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در صورتی که تغییرات پارامترهای تراکمی برای خاک حاوی ۶ و ۹ درصد گلیسرول همانند نتایج به‌دست‌آمده برای خاک حاوی ۳ درصد گلیسرول نیست و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش نشان می‌دهد. این نتایج بیان‌کنندهٔ آن است که مقادیر ۶ و ۹ درصد گلیسرول باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک، لغزش و کاهش فضای بین آن‌ها و در نتیجه افزایش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم می‌شود. اما مقدار ۳ درصد گلیسرول قدرت کافی جهت حذف نیروی جاذبه و اصطکاک بین ذرات و جابه‌جایی آن‌ها را، مانند مقادیر ۶ و ۹ درصد گلیسرول، ندارد. در نتیجه، مقدار وزن واحد حجم خشک ماکزیمم کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. نتایج تراکم خاک سیمان (جدول ۵) نشان می‌دهد افزودن سیمان به خاک طبیعی موجب کاهش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. می‌توان گفت افزودن سیمان به مقدار ۳ یا ۶ درصد موجب واکنش شیمیایی خاک و سیمان و تشکیل ساختمانی فولکوله در تودهٔ خاک سیمان متراکم‌شده می‌شود. این وضعیت به کاهش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و افزایش درصد رطوبت بهینه می‌انجامد. این نتایج با داده‌هایی که Estabragh *et al* (2010) ارائه کرده‌اند تطابق دارد. نتایج تراکمی خاک سیمان تشکیل‌یافته از خاک آغشته به گلیسرول (جدول ۵) نشان‌دهندهٔ آن است که در مجموع وزن واحد حجم خشک ماکزیمم افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که آن را می‌توان ناشی از کاهش

Archive of SID
www.SID.ir

اصطکاک بین ذرات در اثر وجود گلیسرول در مخلوط خاک سیمان دانست. مشابه این نتایج را Al-Sanad *et al* (1995)، با آزمایش خاک‌های دانه‌ای آلوده به مواد نفتی، گزارش کردند.

منحنی تغییرات تنش و کرنش حاصل از نتایج آزمایش تک‌محوری برای نمونه‌هایی از خاک طبیعی و خاک طبیعی اختلاط‌یافته با ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول در شکل ۳ می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت نهایی خاک طبیعی ۴۱۷ kPa در کرنش ۲٫۴۶ درصد است. لیکن افزایش گلیسرول موجب کاهش قابل ملاحظهٔ مقاومت نهایی می‌شود؛ به طوری که مقاومت نهایی برای نمونهٔ خاک حاوی ۳ درصد گلیسرول معادل ۲۶۷ kPa در کرنش ۳ درصد و مقدار کاهش مقاومت آن نسبت به خاک طبیعی برابر ۳۶ درصد است. افزایش درصدهای گلیسرول باعث کاهش مقاومت نسبت به خاک طبیعی و یک‌دیگر می‌شود؛ به طوری که مقاومت نمونه‌ای که حاوی ۹ درصد گلیسرول است نسبت به نمونهٔ خاک طبیعی ۶۴ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان گفت با افزایش درصد گلیسرول منحنی‌های تنش و کرنش موقعیت نزولی به خود می‌گیرند و از میزان شکنندگی و سختی آن‌ها کاسته می‌شود.



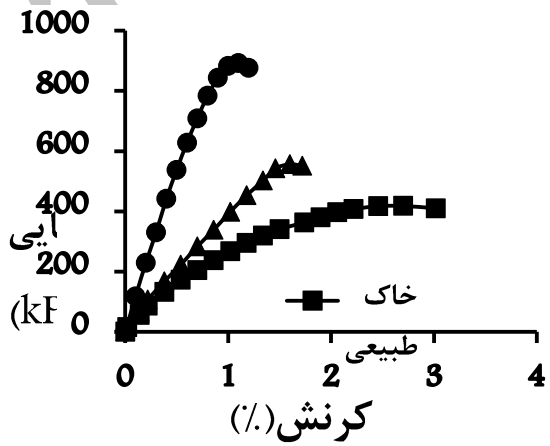
شکل ۳. نمودار تنش- کرنش برای خاک طبیعی و خاک آلوده‌شده با ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول

نتایج آزمایش‌های مقاومت (شکل ۳) نشان داد افزودن گلیسرول موجب کاهش مقاومت نمونه نسبت به خاک معمولی و افزایش درصد گلیسرول موجب کاهش بیشتر آن می‌شود. این نتایج مشابه نتایجی است که Ratnaweera and Meegoda (2006) گزارش کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزودن درصدهای مختلف گلیسرول یا پروپانل به خاک چسبنده موجب کاهش مقاومت با افزایش درصد وزنی آلاینده می‌شود. می‌توان گفت لزوجت بالای مادهٔ آلاینده نسبت به آبْ عامل کاهش مقاومت است؛ به طوری که لزوجت زیاد موجب تراکم‌پذیری و کاهش مقاومت می‌شود (Meegoda and Ratnaweera, 1994). افزودن مادهٔ آلی به خاک‌های چسبنده به واکنش ذرات خاک با مادهٔ آلی می‌انجامد که واکنش‌های فیزیکوشیمیایی نامیده می‌شود. این واکنش‌ها تغییراتی در ضخامت لایهٔ مضاعف و فولکوله‌شدن ساختمان خاک ایجاد می‌کند. کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی‌اند و خاصیت جذب آب به وسیلهٔ آن‌ها با میزان بار الکتریکی و سطح ویژهٔ آن‌ها مرتبط است. محققانی چون Sheng and Boyd (1996) و Jaynes and Vance (1999) گزارش کردند خاک‌های رسی از طریق کاتیون‌هایی مانند Na^{+}، K^{+}، Ca^{++} و Mg^{++} می‌توانند مواد آلی- مانند فنول، بنزن، تلوئن و غیره- را جذب کنند. بخشی از مواد آلی، به علت نبودِ کانی‌های لازم و نیز سطح ویژهٔ مناسب، جذب ذرات رس نمی‌شوند و در فضای بین ذرات باقی می‌مانند و در سهولت جابه‌جایی ذرات مؤثرند. عامل مؤثر در کاهش مقاومت خاک آلوده به گلیسرول (شکل ۳) نسبت به خاک طبیعی را می‌توان با این موضوع مرتبط دانست. از آنجا که قدرت جذب مواد آلی به وسیلهٔ ذرات رس محدود است، افزایش درصد مادهٔ آلاینده موجب افزایش بیشتر مقدار آن‌ها در فضای بین ذرات می‌شود که کاهش بیشتر مقاومت را در پی دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد تا کنون محققان به روندی مشخص در خصوص افزودن مادهٔ آلی به خاک دست نیافته‌اند و مشخص نیست که افزودن مادهٔ آلی

www.SID.ir

هیدروکربنی به خاک مقاومت آن را کاهش می‌دهد یا افزایش. این موضوع با نوع خاک و نوع مادهٔ هیدروکربنی به‌کاررفته مرتبط است؛ که در این خصوص به تحقیق و بررسی گسترده نیاز است. گفتنی است برخی محققان (Moore and Mitchell, 1974; Sridharan and Venkatappa Rao, 1973) با افزودن مادهٔ آلی هیدروکربنی با افزایش مقاومت و برخی دیگر (Ratnaweera and Meegoda, 2006) با کاهش مقاومت مواجه شدند.

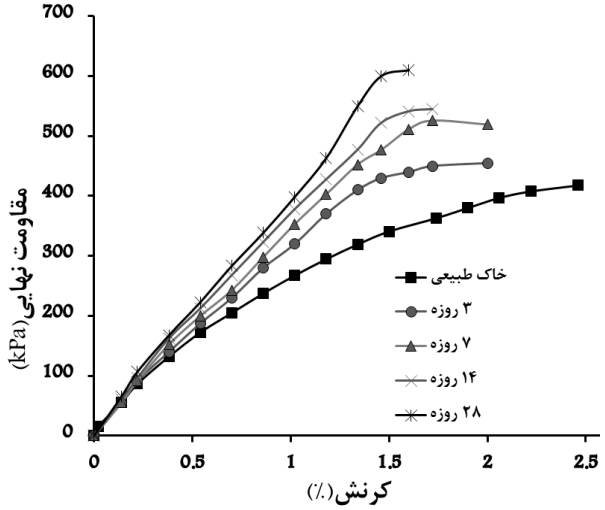
در شکل ۴ منحنی‌های تنش و کرنش خاک طبیعی و خاک سیمان حاوی ۳ و ۶ درصد سیمان، با زمانِ عمل‌آوری ۲۸ روز، می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش سیمان به خاک موجب افزایش مقاومت و نیز پیدایش خاصیت شکنندگی در نمونه‌ها می‌شود؛ به طوری که این خصوصیت با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی نمونهٔ خاک طبیعی ۴۱۷ kPa در کرنش ۲٫۴۶ درصد (شکل ۴) است. لیکن افزودن ۶ درصد سیمان مقاومت نهایی را به ۸۹۲ kPa در کرنش ۱٫۱ درصد می‌رساند.



شکل ۴. نمودار تنش‌ـ کرنش خاک طبیعی و خاک سیمان با ۳ و ۶ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

منحنی‌های تنش و کرنش خاک طبیعی و خاک سیمان با ۳ درصد وزنی سیمان با زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۵ می‌آید. این شکل نشان‌دهندهٔ اثر زمان عمل‌آوری بر افزایش مقاومت مخلوط خاک سیمان است؛ به طوری که مقاومت نمونهٔ ۳ روزه ۴۷۵ kPa در کرنش ۱٫۸ درصد و مقاومت نمونهٔ ۲۸ روزه ۶۰۱ kPa در کرنش ۱٫۵ درصد است که افزایش ۲۶ درصدی مقاومت را نسبت به نمونهٔ ۳ روزه نشان می‌دهد. نمودارهای تنش و کرنش شکل ۵ نشان می‌دهد افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت و خصوصیت شکنندگی نمونه می‌شود.

www.SID.ir

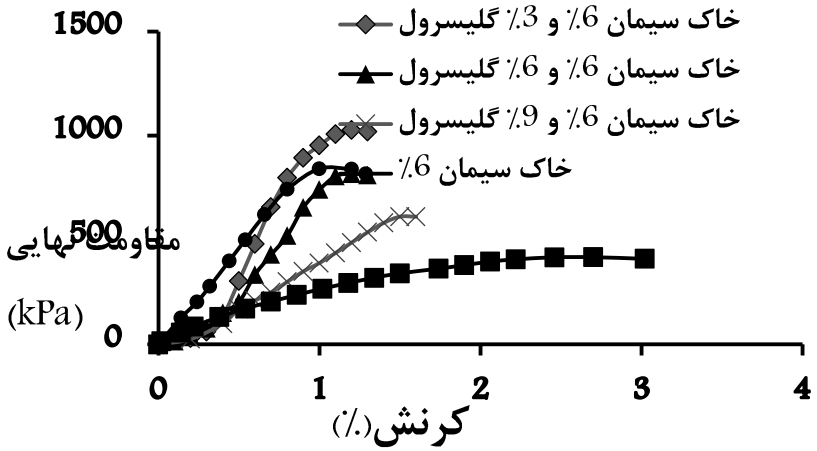


شکل ۵. نمودار تنش‌ـ کرنش خاک طبیعی و خاک سیمان با ۳ درصد سیمان در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

نتایج مقاومت خاک طبیعی و خاک سیمان (شکل ۴) نشان‌دهندهٔ افزایش مقاومت خاک سیمان نسبت به خاک طبیعی است. علت آن می‌تواند افزودن سیمان به خاک باشد که موجب یک‌سری واکنش‌های شیمیایی می‌شود. این دسته واکنش‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحلهٔ اول سیمان با جذب رطوبت عمل هیدراسیون را انجام می‌دهد که موجب آزادشدن یون‌های کلسیم در محیط می‌شود. یون‌های آزادشده، در اثر تبادل کاتیونی با ذرات رس، موجب کاهش پلاستیسیتهٔ خاک می‌شوند. در مرحلهٔ دوم یک سری اتصالات شیمیایی بین ذرات خاک و سیمانی که در مجاورت هم قرار دارند به وجود می‌آید. آهک تشکیل‌شده در طول فرایند هیدراسیون سیمان با رس واکنش نشان می‌دهد و مادهٔ ژلاتینی ثانویه‌ای را می‌سازد که این ماده موجب پیدایش اتصالات قوی بین کانی‌های رسی و ذرات سیمان می‌شود. این اتصالات یک شبکهٔ لانه‌زنبوری تشکیل می‌دهد که مانع لغزش ذرات روی یکدیگر می‌شود و در نتیجه جسمی صلب و مقاوم تشکیل می‌دهد. واکنش‌های صورت‌پذیرفته در این دو مرحله موجب افزایش مقاومت می‌شوند.

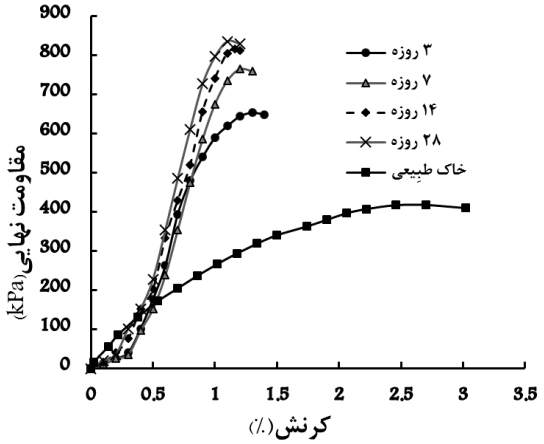
در شکل ۶ منحنی‌های تغییرات تنش و کرنش خاک طبیعی، خاک سیمان شامل ۶ درصد سیمان و خاک سیمان شامل ۶ درصد سیمان شامل درصدهای مختلف گلیسرول (۳، ۶، ۹) با زمان عمل‌آوری ۱۴ روز می‌آید. نتایج نشان می‌دهد افزودن سیمان موجب افزایش مقاومت خاک اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف گلیسرول می‌شود. لیکن نمونه‌های حاوی ۳ درصد گلیسرول بیشترین مقدار افزایش را دارند و با افزایش

درصد گلیسرول این مقدار کاهش و شکل‌پذیری نمونه افزایش می‌یابد. گفتنی است مشابه همین تغییرات برای نمونه‌های خاک سیمان، که شامل ۳ درصد سیمان و ۳ و ۶ و ۹ درصد گلیسرول بودند، به دست آمد.



شکل ۶. نمودار تغییرات تنش- کرنش خاک طبیعی و خاک سیمان با ۶ درصد سیمان و درصدهای مختلف گلیسرول به‌ازای زمان عمل‌آوری ۱۴ روز

شکل ۷ منحنی تغییرات تنش و کرنش خاک سیمان تهیه‌شده با ۶ درصد سیمان و ۶ درصد گلیسرول را در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد. مقاومت نهایی نمونهٔ ۳ روزه kPa ۶۵۳ در کرنش ۱٫۳ درصد و مقاومت نمونهٔ ۲۸ روزه kPa ۸۳۶ در کرنش ۱٫۱ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت و خاصیت شکنندگی نمونه‌ها می‌شود.

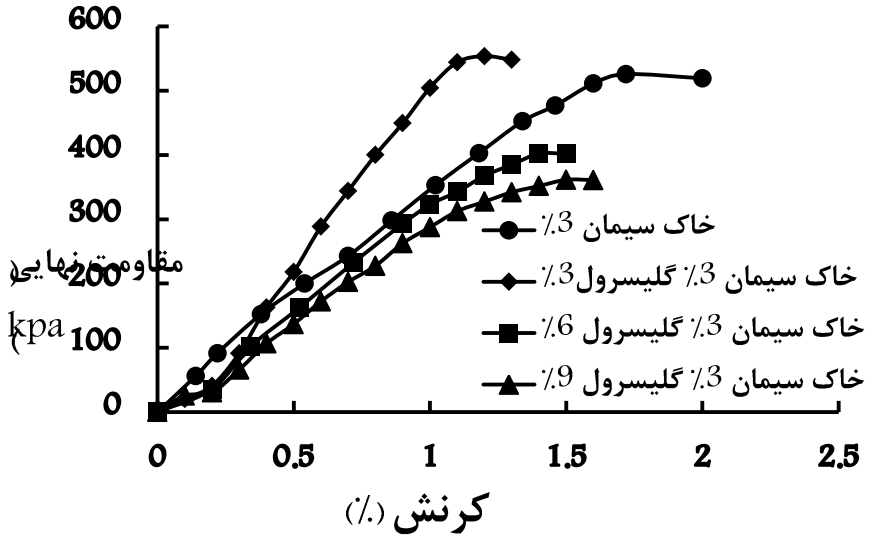


شکل ۷. نمودار تغییرات تنش- کرنش خاک سیمان با ۶ درصد سیمان و ۶ درصد گلیسرول در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

خاک سیمان تهیه‌شده از خاک آلوده به درصد کم گلیسرول (۳ درصد) مقاوم‌تر از خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی است؛ در صورتی که در درصدهای بیشتر گلیسرول (۶ و ۹ درصد) مقاومت خاک سیمان تهیه‌شده از خاک آلوده کمتر از خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی است. شکل ۸ نتایج مقاومت ۷ روزهٔ خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی با ۳ درصد سیمان و خاک سیمان حاوی ۳ ، ۶ و ۹ درصد گلیسرول با مخلوط ۳ درصد سیمان را نشان می‌دهد. مقاومت نهایی نمونهٔ خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی kPa ۵۲۵ در کرنش ۱٫۷ درصد و مقاومت نهایی خاک سیمان تهیه‌شده از خاک اختلاط‌یافته با ۳ و ۶ و ۹ درصد گلیسرول به ترتیب ۵۵۳ و ۴۰۱ و kPa ۳۶۱ در کرنش‌های به ترتیب ۱٫۲ و ۱٫۴ و ۱٫۵ درصد است.

بررسی منحنی‌های تنش و کرنش (شکل ۸) نشان می‌دهد افزودن سیمان به خاک حاوی ۳ درصد گلیسرول مقاومت آن را نسبت به خاک سیمان تهیه‌شده از خاک طبیعی بالا می‌برد. معمولاً در مخلوط خاک سیمان، به علت وجود سیمان، یک‌سری واکنش‌های شیمیایی صورت می‌پذیرد. این واکنش‌ها به تشکیل یک ژل منجر می‌شود که با ذرات خاک پیوند می‌خورد و ماده‌ای سخت تولید می‌کند. در خاک‌های حاوی مادهٔ آلی، همان‌طور که بیان شد، ممکن است مقداری محدود از مادهٔ آلی جذب ذرات شود و در تشکیل مادهٔ سخت، که از ژل ایجادشده به وسیلهٔ سیمان و ذرات خاک به وجود می‌آید، مشارکت داشته باشد و به افزایش مقاومت کمک کند. باقی‌ماندهٔ مادهٔ آلی در فضاها باقی می‌ماند و دور ذرات سیمان را احاطه و از واکنش شیمیایی سیمان با خاک جلوگیری می‌کند و هیچ‌گونه واکنشی با سیمان انجام نمی‌دهد (Botta *et al*, 2004) همچنین سهولت لغزش و تغییر شکل نمونه را فراهم می‌آورد. بنابراین، افزایش درصد مادهٔ آلی در درصدهای بالا (۶ و ۹ درصد) کاهش مقاومت خاک سیمان را در پی خواهد داشت.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸. نمودار تغییرات تنش- کرنش خاک سیمان با ۳ درصد سیمان و خاک سیمان حاوی ۳ و ۶ و ۹ درصد گلیسرول با ۳ درصد سیمان با زمان عمل‌آوری ۷ روز

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی خواص مکانیکی خاک آلوده با درصدهای مختلف گلیسرول و نیز خاک سیمان تهیه‌شده از خاک رسی معمولی و خاک رسی حاوی مواد آلاینده بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

۱. افزودن گلیسرول به خاک رسی معمولی مقاومت آن را نسبت به خاک رسی معمولی کاهش می‌دهد. کاهش مقاومت تابعی از افزایش درصد وزنی گلیسرول است.

۲. افزایش سیمان به خاک رسی معمولی و خاک رسی حاوی درصدهای مختلف گلیسرول موجب افزایش مقاومت و خواص شکنندگی نمونه‌ها می‌شود. این افزایش تابعی از کاهش درصد مادهٔ آلاینده و افزایش درصد سیمان مورد استفاده و زمان عمل‌آوری است.

۳. افزودن سیمان به خاک رسی آلوده با درصد کم گلیسرول (۳٪) باعث افزایش مقاومت آن و در درصدهای بالاتر (۶ و ۹ درصد گلیسرول) باعث کاهش مقاومت آن نسبت به خاک سیمان متناظر تهیه‌شده از خاک رسی طبیعی می‌شود.

REFERENCES

Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., and Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, *40*(5), 681-687.

Al-Sanad, H. A., Eid, W. K., and Ismael, N. F. (1995). Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand. Journal of geotechnical engineering, 121(5), 407-412.

Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., and Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, *19*(6), 448-453.

Botta, D., Dotelli, G., Biancardi, R., Pelosato, R., and Natali Sora, I. (2004). Cement–clay pastes for stabilization/solidification of 2-chloroaniline. *Waste Management*, *24*(2), 207-216.

Chen, J., Anandarajah, A., and Inyang, H. (2000). Pore fluid properties and compressibility of kaolinite. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *126*(9), 798-807.

Cook, E. E., Puri, V. K., and Shin, E. C. (1992). Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands. In: Proceedings of *2th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 14-19 June., International Society of Offshore and Polar Engineers, San Francisco, California, USA.

DeBlasis, N. J. (2008). *The influence of curing temperature on cement stabilization of North Carolina soils*. Ph. D. dissertation, University of North Carolina, Charlotte.

Di Matteo, L., Bigotti, F., and Ricco, R. (2010). Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *137*(9), 846-849.

Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., and Javadi, A. A. (2010). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(7), 969-976.

Estabragh, A. R., Namdar, P., and Javadi, A. A. (2012). Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber. *Geosynthetics International*, *19*(1), 85-92.

Fang, H. Y. and Daniels, J. (1997). *Introduction to environmental geotechnology*. CRC Press.

Graham, J., Yuen, K., Goh, T. B., Janzen, P., and Sivakumar, V. (2001). Hydraulic conductivity

Archive of SID
www.SID.ir

and pore fluid chemistry in artificially weathered plastic clay. *Engineering geology*, *60*(1), 69-81.

Jaynes, W. F. and Vance, G. F. (1999). Sorption of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) compounds by hectorite clays exchanged with aromatic organic cations. *Clays and Clay Minerals*, *47*(3), 358-365.

Kaya, A. and Fang, H. Y. (2000). The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, *37*(5), 943-950.

Meegoda, N. J. and Rajapakse, R. A. (1993). Short-term and long-term permeabilities of contaminated clays. *Journal of Environmental Engineering*, *119*(4),. 725-743.

Meegoda, N. J. and Ratraweera, P. (1994). Compressibility of contaminated fine-grained soils. *ASTM geotechnical testing journal*, *17*(1), 101-112.

Mitchell, J. K. (1960). The application of colloidal theory to the compressibility of clays. *Commonwealth Science and Industry Research Organization*, *2*, 92-97.

Moore, C. A. and Mitchell, J. K. (1974). Electromagnetic forces and soil strength. *Geotechnique*, *24*(4), 627-640.

Olsen, R. E. and Mesri, G. (1970). Mechanisms controlling compressibility of clay. J. Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 96, 1863-1978.

Puri, V. K., Das, B. M., Cook, E. E., and Shin, E. C. (1994). Geotechnical properties of crude oil contaminated sand. ASTM Special Technical Publication, 1221, 75-75.

Ratnaweera, P. and Meegoda, J. N. (2006). Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils. *ASTM geotechnical testing journal*, *29*(2), 133-140.

Sheng, G., Xu, S., and Boyd, S. A. (1996). Mechanism (s) controlling sorption of neutral organic contaminants by surfactant-derived and natural organic matter. *Environmental science & technology*, *30*(5), 1553-1557.

Singh, S. K., Srivastava, R. K., and John, S. (2008). Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & sediment contamination*, *17*(3), 290-300.

Sridharan, A. and Venkatappa Rao, G. (1973). Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept. *Geotechnique*, *23*(3), 359-382.

Archive of SID

www.SID.ir