

تأثیر ذوب و یخبندان سیکلی بر تحکیم پوزولانی خاک‌های آلوده به آلاینده فلز سنگین

فاطمه خسروی^۱، صلاح الدین حمیدی^۲، سید مهدی حسینی^{۳*}، سید مرتضی مرندي^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی دکترا مهندسی عمران-مکانیک خاک و پی، دانشگاه شهید باهنر

۳- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۴- استاد مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

s.m.hosseini@shahroodut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

چکیده

آلاینده‌های فلز سنگین علاوه بر ایجاد مشکلات ژئوتکنیکی، می‌تواند سبب به خطر انداختن سلامت محیط‌زیست و انسان شود. با افزایش جمعیت، پیشرفت تکنولوژی و به تبع آن افزایش آلاینده‌های فلز سنگین و نیز قرارگرفتن یک‌چهارم سطح زمین در مناطق سردسیر و لزوم طراحی و احداث بنا بر روی این خاک‌ها، مطالعه‌ی تأثیر ذوب و یخبندان روی خاک‌های رسی تثبیت شده در معرض ذوب و یخبندان ضروری به نظر می‌رسد. برای تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده افزودنی‌های مختلفی به کار رفته است که در این میان سیمان بواسطه سازگار بودن با مواد آلاینده و کارایی زیاد، دسترسی آسان و ارزان بودن مصالح، کاربردی‌تر است. در این پژوهش از سیمان برای تثبیت خاک آلوده به آلاینده فلز سنگین سرب در سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان استفاده شد. با توجه به اهمیت نشست در خاک‌های رسی روی نمونه‌های آزمایش شده، آزمایش تحکیم انجام شد. همچنین با توجه به کاربرد فراوان بنتونیت در سایت‌های آلوده از نمونه‌ی رسی بنتونیت برای انجام مطالعات آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در اغلب مواقع سیکل بحرانی سیکل ۷ است. همچنین تثبیت با سیمان در شرایط مختلف پارامترهای مقاومتی از جمله تنش پیش‌تحکیمی خاک را ۲ تا ۸ برابر بهبود می‌بخشد. علاوه بر آن مقدار بهینه سیمان در نمونه‌های آلوده و غیرآلوده در سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان متغیر بوده، اما در اغلب نمونه‌ها حدود ۵٪ تا ۱۰٪ بوده است. در ادامه، بررسی بازدهی تثبیت و مطالعه تشکیل ترکیبات هیدراته سیمان و خاک رس با استفاده از آزمایش شیمیایی pH انجام شد.

واژگان کلیدی: خاک آلوده، سیمان، سیکل‌های ذوب و یخبندان، بنتونیت، تحکیم

۱- مقدمه

[5]. آلاینده‌های فلزات سنگین بیشترین اهمیت را در آلودگی حاصل از زباله‌های شهری و صنعتی دارد [6]. با توجه به آنکه یکی از کانی‌های اصلی نمونه‌ی رسی بنتونیت که جزو خاک‌های تورمی و حساس بوده و در مراکز دفن زباله استفاده می‌شود کانی مونت‌موریلونیت است؛ در نتیجه ترکیب رس

خاک‌های رسی نرم و نشست‌پذیر بخش قابل توجهی از سطح زمین را پوشانده است [1, 2]. همچنین خاک‌های رسی متورم شونده یا آماسی در بسیاری از نقاط دنیا به ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک (از جمله کشور ایران) پراکنده شده‌اند [3-

ترین مشکلات در خاک‌های ریزدانه متراکم‌شده در سیستم‌های پوششی است [23]. حجم آب به علت یخ‌زدن حدوداً ۹ برابر افزایش می‌یابد که منجر به افزایش حجم کل خاک و مصالح روسازی می‌شود [24-27]. همچنان که مشاهده شد با وجود آلودگی سایت‌های مختلف از جمله مراکز دفن زباله به آلاینده‌های فلز سنگین، مطالعات جامعی در خصوص تأثیر ذوب و یخبندان روی خاک‌های آلوده انجام نشده است. با توجه به نکات مذکور در پژوهش حاضر به مطالعه تأثیر ذوب و یخبندان بر رفتار نمونه‌ی رسی بتونیت آلوده‌ی تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد مصرفی و روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر نمونه‌ی رسی بتونیت مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه رسی مطالعه شده از جنوب شرق ایران-کرمان تهیه شده است. بخشی از مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه‌ی رسی بتونیت در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به تولید و کاربرد فراوان سیمان تیپ ۲ نسبت به سایر سیمان‌ها، در پژوهش حاضر از سیمان تیپ ۲ استفاده شده که مشخصات آن در جدول (۲) ارائه شده است، لازم به ذکر سیمان استفاده شده از کارخانه سیمان شاهرود تهیه شده است. مجموعه آزمایش‌های انجام شده براساس دستورالعمل‌های استاندارد ASTM انجام شده است (ASTM, 1994). در ادامه با توجه به افزایش قابل توجه آلاینده‌های فلز سنگین از جمله آلاینده فلز سنگین سرب در مراکز دفن زباله و سایر سایت‌های آلوده، سه غلظت کم، متوسط و بالای آلاینده نیترات سرب $Pb(NO_3)_2$ (بر اساس ظرفیت تبادلی کاتیونی (CEC) بتونیت) به نمونه‌ی رسی بتونیت اضافه شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک یکی از مشخصه‌های مهم خاک‌های رسی است که به صورت کلی بیانگر میزان کل کاتیون‌هایی است که پولک‌های رسی قادر به جذب و نگهداری آن است. دلیل استفاده از بتونیت جذب و سطح مخصوص بالای این نمونه‌ی رسی و به تبع آن قابلیت نگهداری بالای آلاینده است. همچنین تغییر ویژگی‌های سیال منفذی در آن، تغییرات مشهود

حساس بتونیت با خاک موجود در محل دفن زباله باعث آب‌بندی شدن محل می‌شود. زیرا مونت‌موریلونیت دارای لایه دوگانه کاملاً توسعه یافته بوده و توانایی هیدراته‌شدن آن را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود بیشترین پتانسیل تغییر حجم را داشته باشد [7-10]. جامدسازی و تثبیت از جمله تکنیک‌های تصفیه در مدیریت پسماند می‌باشد که طی آن پسماند خطرناک با مواد چسباننده مخلوط می‌شود تا از روش‌های فیزیکی و شیمیایی از میزان آب‌شویی آلاینده‌های پسماند به محیط زیست کاسته شود و پسماند خطرناک به پسماند و ماده جدیدی تبدیل شده که به لحاظ زیست‌محیطی برای دفن در زمین دفن یا حتی استفاده در ساخت‌وساز، مناسب باشد [11, 12]. استفاده از محصولات جانبی پسماندها به جای دفن آنها از لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی مقرون به صرفه است [13]. در این روش با جامد کردن و از جنبش انداختن آلاینده از حرکت نفوذی و انتشار آن به چرخه آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌شود و از طرف دیگر تثبیت باعث افزایش مقاومت فشاری مصالح می‌شود [14, 15]. سیمان بیشترین استفاده و ساده‌ترین نحوه اجرا را در جامدسازی دارد [16]. سیمان با تشکیل هیدروکسیدهای نامحلول مربوط به فلزات سنگین، رسوب‌دهی این ترکیبات، جذب شیمیایی محصولات هیدراتاسیون، و جذب فیزیکی یون‌ها در داخل و روی سطح محصولات هیدراتاسیون، مانع از تحرک مواد آلاینده می‌شود [17]. مسئله مهم در تثبیت و جامدسازی زباله‌ها به وسیله سیمان، تداخل کامل آن با اجزاء زباله و انجام صحیح واکنش هیدراتاسیون است [18]. در صورت عدم سازگاری سیمان و آلاینده بازدهی روش به شدت کاهش می‌یابد [19]. به فراخور پیشرفت تکنولوژی و افزایش جمعیت، لزوم توسعه مناطق سردسیر و در نتیجه بررسی‌های ژئوتکنیکی این نواحی اجتناب ناپذیر می‌شود [20]. انجماد و ذوب خاک‌ها می‌تواند تغییرات مهمی در مشخصات ژئوتکنیکی خاک به وجود آورد. خاک‌های ریزدانه‌ای که تحت یخبندان و ذوب قرار گرفته‌اند، تغییراتی در حجم، مقاومت، تراکم‌پذیری، درصد رطوبت یخ‌نزده، ظرفیت باربری و تغییرات ریزساختاری نشان داده‌اند [20, 21]. آسیب‌های ناشی از چرخه‌های یخبندان و ذوب یکی از مهم-

در پارامترهای این خاک را به دنبال دارد.

۲۰ نسبت به وزن خشک خاک و سیمان بوده است. به منظور انجام واکنش‌های پوزولانی نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری در دستگاه تحکیم یک بعدی قرار داده‌شد.

۲-۲-۲ ساخت نمونه‌های حاوی آلاینده

برای ساخت نمونه‌های آلوده به آلاینده فلز سنگین سرب، ابتدا محلول‌هایی با سه غلظت ۱۰، ۴۰ و ۸۰ Cmol/kg-soil آلاینده نیترات سرب تهیه شد، سپس محلول ساخته شده به نسبت ۱ به ۵۰ به بتونیت اضافه شد. پس از آن نمونه‌ها به وسیله لرزاننده الکتریکی هر روز به مدت ۴ ساعت لرزانده شده و این روند تا ۹۶ ساعت ادامه پیدا کرد، تا فرآیند جذب به صورت کامل انجام شده و خاک کاملاً همگن شود. سپس نمونه‌ها در سینی‌های مخصوص در گرمخانه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، خشک شدند. پس از آن نمونه‌ها با چکش پلاستیکی پودر شده و با استفاده از روش دانسیته کنترل ساخته شد.

۲-۳-۲ روش اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان

در پژوهش حاضر، نمونه‌های مطالعه شده براساس استاندارد ASTM, D6035 تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار گرفت. با توجه به اهمیت سیکل‌های ۳، ۷ و ۱۲ ذوب و یخبندان، تنها نتایج اعمال سیکل‌های مذکور ارائه شده است. به صورت کلی در اغلب مطالعات انجام شده سیکل ۷ ذوب و یخبندان سیکل بحرانی شناخته شده است، همچنین مراجع محدودی نیز سیکل سوم را به عنوان سیکل بحرانی معرفی کرده‌اند. بر همین اساس در این پژوهش یک سیکل قبل از سیکل بحرانی احتمالی ۷ و یک سیکل پس از آن مورد مطالعه قرار گرفت تا دامنه بررسی معقول باشد.

به منظور اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان، ابتدا براساس نکات مذکور در بخش‌های ۲-۲-۱ و ۲-۲-۲ نمونه‌ها با استفاده از روش دانسیته و درصد رطوبت ثابت ساخته شد.

جدول ۱. بخشی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی نمونه رسی بتونیت

Geotechnical properties	Bentonite
XRD Analysis	Montmorillonite, Carbonate, Quartz, Kaolinite
Carbonate content (%)	7±0.5
CEC (cmol/kg-soil) (Na ⁺ +Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +K ⁺)	36.86
pH (1:10 ; soil : water)	8.44
Clay (%)	67
Silt (%)	31
Sand (%)	2
Liquid limit (%)	99
Plastic Limit (%)	27
Plasticity Index (%)	72
G _s	2.79
Classification	CH

Table 1. Some geo-environmental and geotechnical properties of the bentonite clay sample

با توجه به آنکه در نمونه‌ی رسی بتونیت مطالعه شده که جزو خاک‌های نرم نیز محسوب می‌شود، عموماً میزان نشست ملاک تعیین ظرفیت باربری خاک خواهد بود، بر همین اساس آزمایش تحکیم مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۲-۲ روش آماده‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش

۲-۲-۱ ساخت نمونه‌های فاقد آلاینده

برای ساخت نمونه‌ها از روش دانسیته کنترل استفاده شد. به صورتی که دانسیته خشک و درصد رطوبت کلیه نمونه‌ها یکسان بوده‌است. درصد رطوبت تمامی نمونه‌های مورد آزمایش ۳۰٪ بوده که در حدود حد خمیری نمونه رسی بتونیت بوده و دانسیته خشک تمامی نمونه‌های مورد آزمایش ۰/۹ g/cm³ بوده که در حدود دانسیته خشک خاک‌های رسی نرم بوده‌است. برای همگن و ثابت ماندن رطوبت، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل زیپ کیپ قرار گرفت. لازم به ذکر است نمونه‌ها به روش اختلاط خاک و سیمان به صورت خشک در ۴ درصد ساخته‌شد. درصدهای سیمان ۰، ۵، ۱۰ و

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمان استفاده شده

Product type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Total alkaline	Free Lime	SO ₃	LOI	Insoluble residue
Type II	21.54	4.95	3.82	63.24	1.55	0.75	0.48	0.97	0.85	2.41	1.15	0.43

Table 2. Chemical composition of cement

بواسطه‌ی تثبیت پوزولانی، خاک در مدت زمان بسیار کمی (در مقایسه با زمان‌های زیاد لازم برای وقوع پیش تحکیمی در حالت طبیعی) پیش تحکیم‌یافته شده است که موارد فوق به معنای اصلاح ویژگی‌های مقاومتی و نشست‌پذیری نمونه‌ی آزمایش شده است. در همین راستا با توجه به کاهش حدوداً ۷۰٪ در مقادیر C_c و C_s به ازای افزودن ۱۰٪ سیمان و نیز افزایش ۶ برابری P_c به ازای افزودن ۱۰٪ سیمان و نیز تقریباً ثابت ماندن مقادیر فوق با افزایش درصد سیمان، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که درصد بهینه سیمان در نمونه‌های بدون آلاینده ۱۰٪ است.

۲-۳ تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش تحکیم در نمونه‌های آلوده به فلز سنگین

در شکل‌های (۲، ۳ و ۴) نمودار e -log p و نمودار تغییرات C_c ، C_s و P_c به ازای درصد‌های مختلف سیمان به ترتیب برای نمونه‌های رسی حاوی ۱۰، ۴۰ و ۸۰ cmol/kg-soil نیترا سرب ارائه شده است. به دلیل تمایل ذرات رسی به جذب کاتیون (H^+) و تضعیف ذره به دلیل جذب فلز سرب در اختلاط با آلاینده، رفتار ذره رسی تغییر کرده و دچار افت مقاومت شده است [29-32]. با افزودن سیمان میزان تنش پیش تحکیمی افزایش و ضرایب فشردگی‌پذیری و تورم خاک کاهش پیدا کرده است. بنابراین در نمونه‌ی آلوده نیز افزودن سیمان موجب ایجاد پیش تحکیم‌یافتگی در مدت زمان بسیار کم خواهد شد. لازم به ذکر است رفتار نمونه‌ها در غلظت‌های مختلف آلاینده با یکدیگر متفاوت است. بهترین عملکرد یا بازدهی در نمونه‌های آلوده مربوط به نمونه‌ی آلوده شده با 10 cmol/kg-soil سرب است؛ به طوری که با افزایش ۵٪ سیمان میزان تنش پیش تحکیمی حدود ۳/۳ برابر افزایش یافته و به حدود ۰/۹ kg/cm² رسیده و نیز ضریب فشردگی ۶۴٪ و ضریب تورم ۷۱٪ نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان کاهش یافته است. پس از افزایش ۵٪ سیمان نرخ افزایش تنش پیش تحکیمی و نیز نرخ کاهش ضرایب تورم و فشردگی تقریباً ثابت شده است، بنابراین درصد بهینه سیمان ۵٪ خواهد بود. در ادامه با توجه به مقادیر P_c ، C_c و C_s می‌توان بیان نمود که ضعیف‌ترین

لازم به ذکر است به ازای تعداد سیکل‌های مطالعه شده، برای هر سیکل یک نمونه اختصاص داده شد. هر سیکل ذوب و یخبندان شامل قرار دادن نمونه درون فریزر در دمای ۱۵ °C- به مدت ۲۴ ساعت، سپس قرار دادن نمونه در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت بوده است.

شکل ۱. نمودار e -log p و تغییرات C_c ، C_s ، P_c ، حاصل از آزمایش‌های

تحکیم در نمونه‌های فاقد آلاینده فلز سنگین سرب

شکل ۱. الف. نمودار e -log p

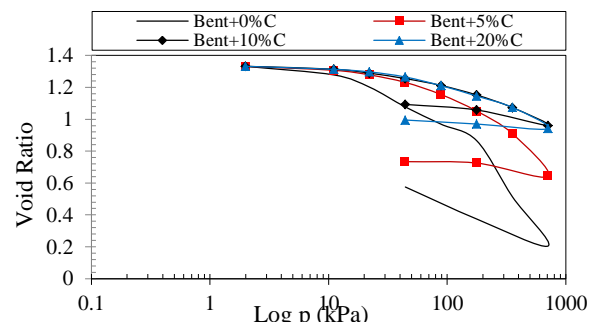


Fig. 1a. E-log p variation curves

شکل ۱-ب. تغییرات C_c ، C_s ، P_c به ازای تغییرات درصد سیمان

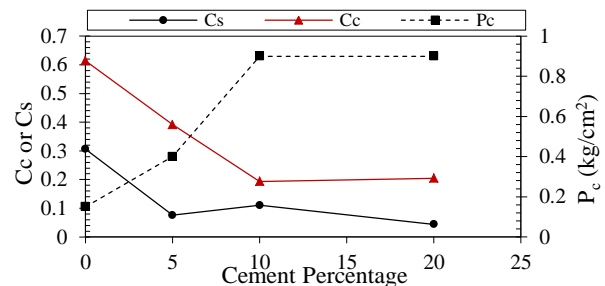


Fig. 1b. Variation of C_c , C_s and P_c vs cement percentage
Fig. 1. Result of consolidation tests on the uncontaminated samples; a: e -log p curves and b: Variation of C_c ، C_s and P_c vs cement percentage (cycle0).

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

۳-۱- نتایج تجزیه و تحلیل نمونه‌های فاقد آلاینده

در شکل‌های (۱-الف و ۱-ب) به ترتیب نمودار e -log p و تغییرات C_c ، C_s و P_c نمونه‌های فاقد آلاینده ارائه شده است. بواسطه تحکیم پوزولانی [26]، با افزودن سیمان تنش پیش تحکیمی افزایش و ضریب فشردگی‌پذیری که بیانگر میزان نشست‌پذیری تحکیمی و ضریب تورم که بیانگر میزان پتانسیل تورم خاک است کاهش پیدا کرده است. بنابراین با افزودن سیمان، خاک از حالت عادی تحکیم‌یافته به خاک پیش تحکیم‌یافته تبدیل یافته است. موارد فوق بیانگر آن است که

شکل ۳. نمودار e-log p و تغییرات C_c , C_s , P_c در نمونه‌های حاوی 40 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$

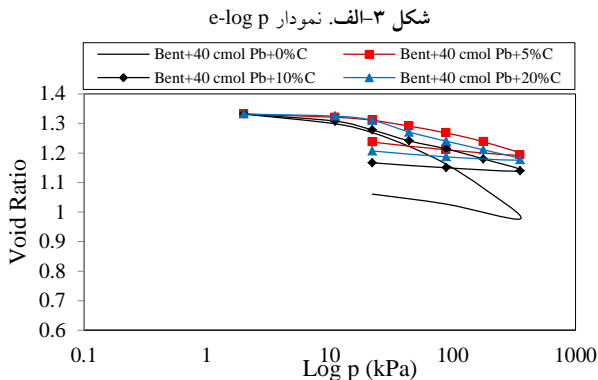


Fig. 3a. e-log p variation curves

شکل ۳ب. تغییرات C_c , C_s , P_c به ازای درصد‌های مختلف سیمان

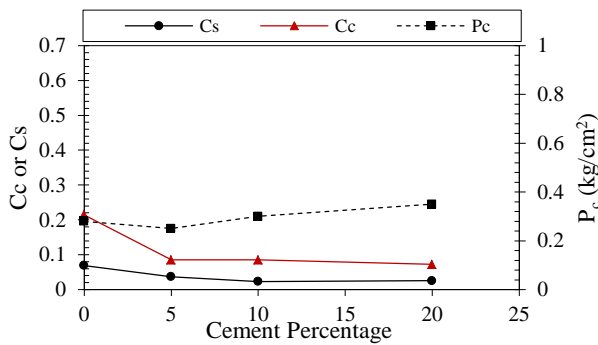


Fig. 3b. Variation of C_c , C_s and P_c

Fig. 3. Result of consolidation tests on the contaminated samples containing 40 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$; a: e-log p curves and b: Variation of C_c , C_s and P_c vs cement percentage (cycle0).

شکل ۴. نمودار e-log p و تغییرات C_c , C_s , P_c در نمونه‌های حاوی 80 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$

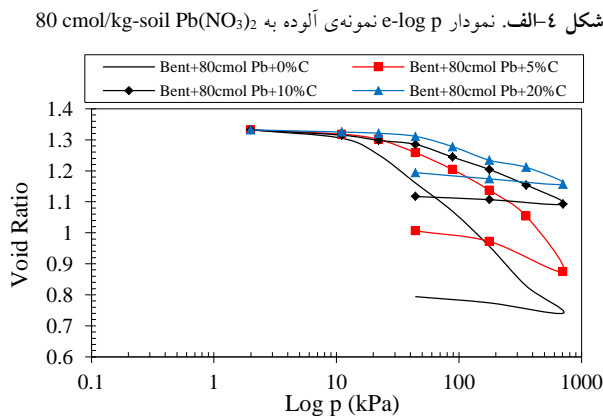


Fig. 4a. e-log p variation curves

شکل ۴-الف. نمودار e-log p نمونه‌ی آلوده به 80 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$

عملکرد مربوط به نمونه حاوی 40 cmol/kg-soil سرب است؛ به طوری که میزان P_c با افزایش ۱۰٪ و ۲۰٪ سیمان به ترتیب به ۰/۳۰ و ۰/۳۵ کیلوگرم رسیده که تنش‌های مذکور با توجه به بارهای سازه‌های معمول، تنش پیش‌تحکیمی کم محسوب می‌شود. در نمونه‌های حاوی غلظت ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک، افزایش مقادیر C_c و C_s در نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ سیمان، بیانگر آن است که ۵٪ سیمان کارایی مناسبی در تثبیت نمونه‌ی رسی بتونیت ندارد. در ادامه با توجه به نتایج حاصل دو نکته در خصوص عملکرد سیمان اهمیت دارد: از یک سو در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان، تغییر غلظت آلاینده تعیین‌کننده رفتار مقاومتی خاک نیست و از سوی دیگر افزایش مقدار سیمان از ۱۰ تا ۲۰ درصد بهبود قابل توجهی در افزایش مقاومت و کاهش (Δe) نداشته‌است، بنابراین در غلظت ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک، میزان ۱۰٪ سیمان در جامدسازی بهینه است.

شکل ۲. نمودار e-log p و تغییرات C_c , C_s , P_c در نمونه‌های حاوی 10 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$

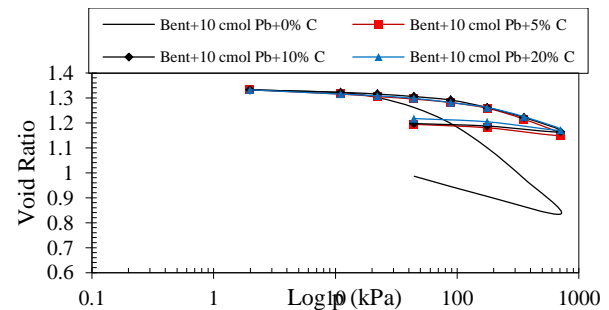


Fig. 2a. e-log p variation curves

شکل ۲ب. تغییرات C_c , C_s , P_c به ازای درصد‌های مختلف سیمان

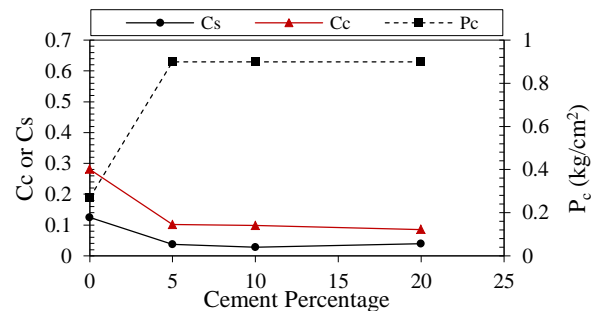


Fig. 2b. Variation of C_c , C_s and P_c

Fig. 2. Result of consolidation tests on the contaminated samples containing 10 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$; a: e-log p curves and b: Variation of C_c , C_s and P_c vs cement percentage (cycle0).

غلظت‌های آلاینده ۱۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک، به ترتیب حدود ۷۱، ۶۴ و ۶۱ درصد کاهش یافته است. بنابراین درصد بهینه سیمان در نمونه‌های آلوده، ۱۰٪ بوده که افزایش غلظت آلاینده موجب کاهش بازدهی تثبیت با سیمان شده است. در شکل (۵-د) نمودار تغییرات C_c ، C_s و P_c در سیکل سوم ذوب و یخبندان نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان بیان نمود که تثبیت با سیمان تأثیر قابل توجهی در کاهش مقدار ضرایب تورم و فشردگی پذیری و افزایش تنش پیش‌تحکیمی داشته است. لازم به ذکر است در درصدهای بیشتر از ۱۰٪ سیمان مقادیر C_c ، C_s و P_c تقریباً ثابت است. بنابراین در سیکل سوم ذوب و یخبندان نیز درصد بهینه سیمان حدود ۱۰٪ است به طوری که مقادیر C_c ، C_s و P_c در نمونه‌های مختلف تثبیت شده با ۱۰٪ سیمان نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان به ترتیب حدود ۶۱ تا ۶۹ درصد کاهش، ۵۱ تا ۶۴ درصد کاهش و حدود ۴/۶۴ تا ۵/۴۲ برابر افزایش یافته است.

شکل ۵. نمودار e -log p و تغییرات C_c ، C_s ، P_c در نمونه‌های حاوی

غلظت‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ نترات سرب در سیکل ۳

شکل ۵-الف. نمودار e -log p نمونه‌ی آلوده به ۱۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

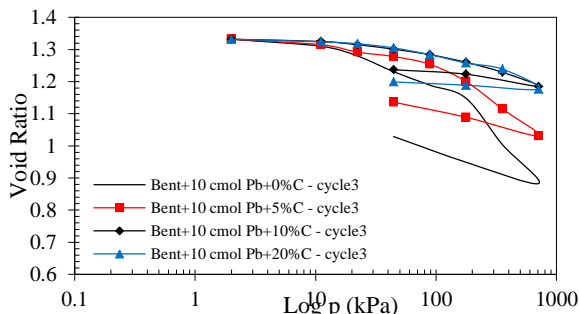


Fig. 5a. e -log p curves of contaminated samples containing 10 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ (cycle 3)

شکل ۵-ب. نمودار e -log p نمونه‌ی آلوده به ۴۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

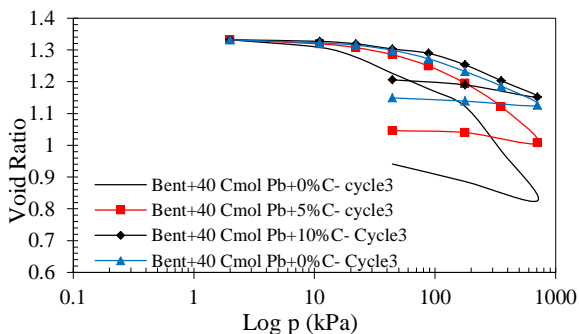


Fig. 5b. e -log p curves of contaminated samples containing 40 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ (cycle 3)

شکل ۴-ب. تغییرات C_c ، C_s ، P_c ، نمونه‌ی آلوده به 80 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

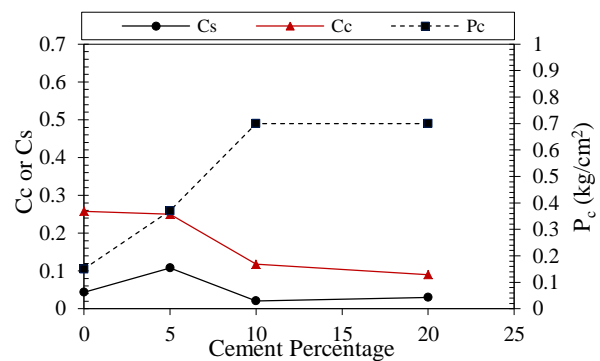


Fig. 4b. Variation of C_c ، C_s and P_c

Fig. 4. Result of consolidation tests on the contaminated samples containing 80 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂; a: e -log p curves and b: Variation of C_c ، C_s and P_c vs cement percentage (cycle 0).

$$\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H}{H} \quad (1)$$

در معادله (۱): Δe تغییرات نسبت تخلخل، e_0 نسبت تخلخل اولیه، ΔH میزان نشست یا کاهش ضخامت نمونه و H ارتفاع یا ضخامت اولیه نمونه است.

۳-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش تحکیم در نمونه‌های حاوی

آلاینده فلز سنگین سرب تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان

سیکل‌های یخبندان و ذوب سبب افزایش رطوبت و در نتیجه افزایش حجم حفرات شده و پارامترهای مقاومتی را تضعیف خواهد کرد [33-35]. در شکل‌های (۵-الف، ۵-ب و ۵-ج) نمودار تغییرات e -log p به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۱۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین سرب در سیکل سوم ذوب و یخبندان ارائه شده است. کمترین مقدار (Δe) یا کمترین میزان نشست (ΔH) در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان، مربوط به نمونه حاوی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلاینده فلز سنگین سرب است. همگرا شدن سه گراف در سه غلظت آلاینده در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان می‌تواند بر کاهش غلظت آلاینده با آبشویی بر اثر تکرار سیکل‌ها دلالت داشته باشد.

تثبیت با ۱۰٪ سیمان تا سیکل سوم ذوب و یخبندان، سبب حصول بازدهی بسیار مناسب شده به صورتی که (Δe) در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ سیمان نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان در

ملاحظه‌ای داشته است. درصد بهینه سیمان در سیکل ۷، همچون سیکل سوم حدود ۱۰ درصد می‌باشد به صورتیکه در مقادیر بیشتر از ۱۰٪ تغییرات قابل توجهی در پارامترهای C_c ، C_s و P_c ایجاد نشده است. در سیکل ۷ نیز افزایش فلظت آلاینده موجب کاهش P_c ، افزایش C_c و کاهش C_s خاک شده است. مقادیر C_c ، C_s و P_c در نمونه‌های مختلف تثبیت شده با ۱۰٪ سیمان نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان به ترتیب حدود ۶۱ تا ۶۳ درصد کاهش، ۵۱ تا ۸۱ درصد کاهش و حدود ۴ تا ۶ برابر افزایش یافته است. با وجود آنکه افزودن ۵٪ سیمان موجب افزایش P_c در غلظت ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم-خاک (موجب افزایش C_s و $P_c=0.54 \text{ kg/cm}^2$) در غلظت ۱۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم-خاک سرب ($C_s=0.0322$) شده است، اما عدم بهبود پارامترهای دیگر در نمونه‌های حاوی ۵٪ سیمان بیانگر عدم کفایت ۵٪ سیمان در بازدهی مناسب تثبیت است.

شکل ۶. نمودار $e-\log p$ و تغییرات C_c ، C_s ، P_c در نمونه‌های حاوی

غلظت‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ cmol/kg-soil Pb

شکل ۶-الف. نمودار $e-\log p$ نمونه‌ی آلوده به ۱۰ cmol/kg-soil Pb

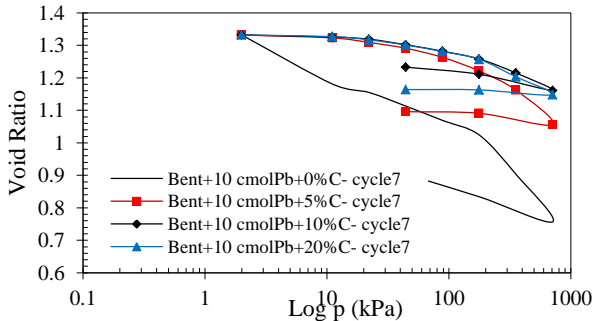


Fig. 6a. $e-\log p$ curves of contaminated samples containing 10 cmol/kg-soil Pb(NO_3)₂ (cycle 7)

شکل ۶-ب. نمودار $e-\log p$ نمونه‌ی آلوده به ۴۰ cmol/kg-soil Pb

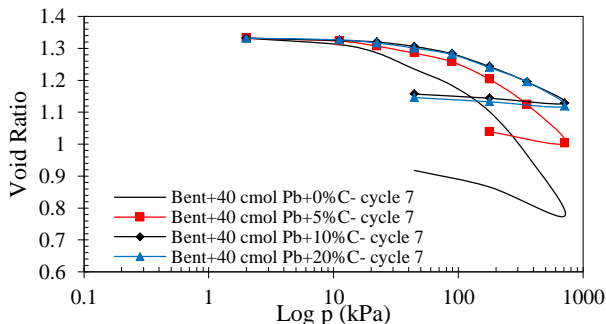


Fig. 6b. $e-\log p$ curves of contaminated samples containing 40 cmol/kg-soil Pb(NO_3)₂ (cycle 7)

شکل ۵-ج. نمودار $e-\log p$ نمونه‌ی آلوده به ۸۰ cmol/kg-soil Pb

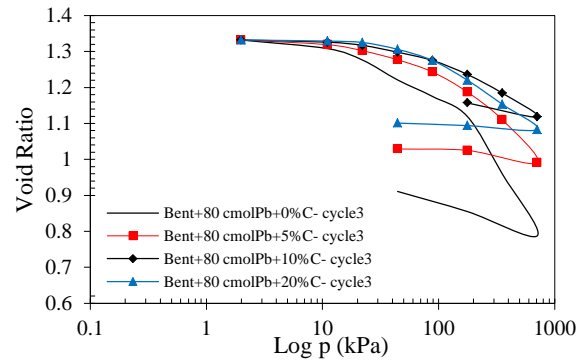


Fig. 5c. $e-\log p$ curves of contaminated samples containing 80 cmol/kg-soil Pb(NO_3)₂ (cycle 3)

شکل ۵-د. تغییرات C_c ، C_s ، P_c در غلظت‌های مختلف آلاینده

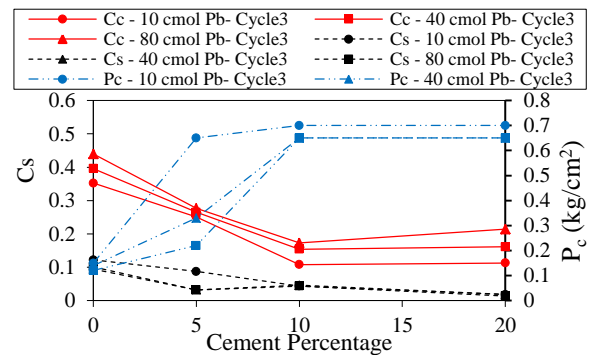


Fig. 5d. Variation of C_c ، C_s and P_c in the contaminated samples with different Pb concentration (cycle 3)

Fig. 5. Result of consolidation tests on the contaminated samples with different Pb heavy metal concentration (cycle 3).

در شکل (۶) نمودار تغییرات $e-\log p$ و نمودار تغییرات C_c ، C_s و P_c در نمونه‌های حاوی غلظت‌های مختلف آلاینده در سیکل ۷ ارائه شده است. با توجه نمودارهای $e-\log p$ ، درصد بهینه سیمان در تمامی غلظت‌های آلاینده، ۱۰ درصد است به طوریکه مقدار (Δe) در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ سیمان نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان در غلظت‌های آلاینده ۱۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم-خاک، به ترتیب برابر ۰/۱۷۱، ۰/۲۰۴ و ۰/۲۲۵ بوده که حدود ۷۰، ۶۳ و ۶۲ درصد کاهش یافته است و در نمونه‌های تثبیت شده با درصد بیشتر سیمان مقدار (Δe) افزایش اندکی نیز داشته است. میزان کاهش (Δe) در سیکل هفتم تقریباً با میزان کاهش (Δe) در سیکل سوم تقریباً برابر است. لازم به ذکر است در سیکل هفتم نیز همچون سیکل سوم، اعمال سیکل‌ها بر نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ سیمان تقریباً بی‌تأثیر بوده ولی بر نمونه‌های ۰ و ۵٪ تأثیر قابل

تأثیری بر بازده تثبیت نداشته و بنابراین فرآیند تثبیت و جامدسازی موفقیت آمیز است؛ بنابراین تحکیم پوزولانی خاک به صورت کامل رخ داده است. در شکل (۷-د) نمودار تغییرات C_c ، C_s و P_c به ازای درصدهای مختلف سیمان در سیکل ۱۲ ارائه شده است. نکته قابل تأمل آن است که درصد بهینه سیمان براساس پارامترهای C_s و P_c ۰.۵٪ است اما همچنان که در نمودارهای e -log p مشاهده شد درصد بهینه سیمان همچنان که نتایج C_c نیز نشان می‌دهد ۱۰٪ می‌باشد. دلیل این مسئله آن است که با توجه به عوض شدن ساختار خاک و تمایل رفتار خاک رس به رفتار خاک‌های دانه‌ای، ۰.۵٪ سیمان نیز عملکرد مناسبی داشته است. نکته قابل تأمل دیگر آن است که در میزان سیمان کمتر از ۱۰٪ افزایش غلظت آلاینده موجب افزایش تنش پیش تحکیمی شده و این مسئله بیانگر عملکرد مطلوب سیمان و آلاینده در سیکل ۱۲ ذوب و یخبندان است که احتمالاً عامل اصلی این رفتار اعمال سیکل‌های مکرر ذوب و یخبندان در حضور آلاینده فلز سنگین و در نتیجه‌ی آن تغییر ساختار خاک از ساختار پولکی به دانه‌ای و کاهش سطح مخصوص آن و عدم توانایی آن در جذب آلاینده و واکنش با سیمان است که در این میان سیمان با توجه به سطح مخصوص قابل توجه، توانایی قابل توجه در جذب و واکنش با آلاینده و تشکیل ترکیبات پوزولانی را نشان داده است. جمع‌بندی مجموعه نتایج حاصل از شکل‌های (۲ تا ۷) بیانگر آن است که در سیکل ۷ بیشترین میزان کاهش در پارامترهای مقاومتی و نشست‌پذیری مشاهده شده و پس از آن میزان تغییرات تقریباً ثابت بوده است. بنابراین سیکل ۷ ذوب و یخبندان سیکل بحرانی است. همچنین به صورت کلی در سیکل‌های مختلف درصد بهینه سیمان حدود ۱۰٪ است. همچنین افزایش غلظت آلاینده در سیکل‌های مختلف تأثیرات متفاوتی داشته است؛ در سیکل ۳ و ۷ موجب افزایش ضرایب فشردگی پذیری، کاهش ضریب تورم و کاهش تنش پیش تحکیمی شده است. این در حالی است که سیکل ۱۲ موجب افزایش ضرایب فشردگی پذیری، کاهش ضریب تورم و افزایش تنش پیش تحکیمی شده است. کاهش C_s می‌تواند ناشی از آن باشد که کاتیون‌های فلز سنگین سرب با چسبیدن به سطح پولک رسی، موجب کاهش قابل توجه حد خمیری و PI

شکل ۶-ج. ؟؟؟؟؟

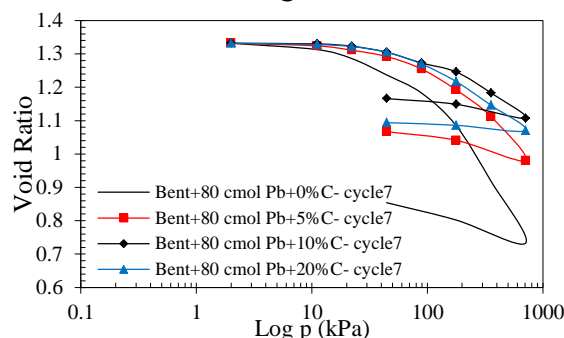


Fig. 6c. e-log p curves of contaminated samples containing 80 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$ (cycle 7)

شکل ۶-د. تغییرات C_c ، C_s ، P_c در غلظت‌های مختلف آلاینده

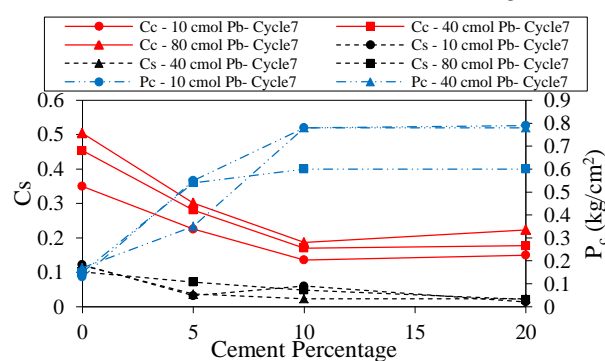


Fig. 6d. Variation of C_c , C_s and P_c in the contaminated samples with different Pb concentration (cycle 7)

Fig. 6. Result of consolidation tests on the contaminated samples with different Pb heavy metal concentration (cycle 7).

در شکل (۷) نمودار تغییرات e -log p و نمودار تغییرات C_c ، C_s و P_c در سیکل ۱۲ ارائه شده است. مقدار Δe نهایی در غلظت‌های مختلف آلاینده نشان می‌دهد که درصد بهینه سیمان در تمامی غلظت‌ها، ۱۰٪ است. در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ سیمان مقدار Δe نهایی نسبت به نمونه‌ی فاقد سیمان در غلظت‌های آلاینده ۱۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌مول به ترتیب حدود ۰.۵۱، ۰.۷۰ و ۰.۷۲ درصد کاهش یافته است. اعمال ۱۲ سیکل ذوب و یخبندان ساختار خاک را کاملاً تغییر داده و رفتار خاک را از حالت خمیری به سمت رفتار خاک‌های غیرخمیری سوق داده است، به طوری که میزان Δe نهایی در سیکل ۱۲ در نمونه‌های فاقد سیمان در غلظت‌های آلاینده ۱۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم-خاک آلاینده سرب، به ترتیب ۰/۳۵۱، ۰/۵۶۱ و ۰/۵۹۶ است؛ اما در ادامه با افزودن ۱۰ درصد سیمان Δe نهایی به ترتیب برابر ۰/۱۷۱، ۰/۱۶۹ و ۰/۱۶۹ است، بنابراین میزان نشست تقریباً ثابت شده و افزایش یا کاهش غلظت آلاینده

شکل ۷-د. تغییرات C_c ، C_s ، P_c در غلظت‌های مختلف آلاینده

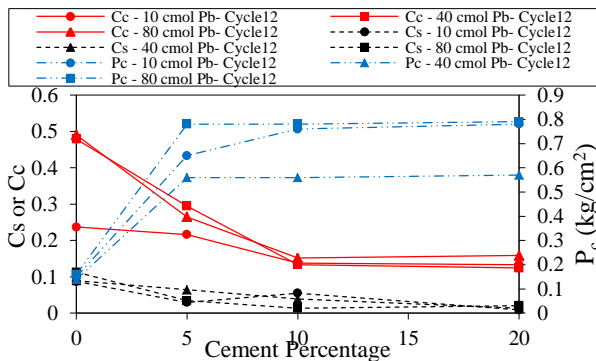


Fig. 7d. Variation of C_c , C_s and P_c in the contaminated samples with different Pb concentration (cycle 12)

Fig. 7. Result of consolidation tests on the contaminated samples with different Pb heavy metal concentration (cycle 12).

۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های pH

نمودار تغییرات pH به ازای درصدهای مختلف سیمان و غلظت‌های مختلف آلاینده در شکل‌های (۸) ارائه شده است. حضور آلاینده فلز سنگین و اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان موجب کاهش pH خاک شده و بنابراین دو عامل مذکور موانع ایجاد شرایط مناسب محیطی برای تکمیل واکنش‌های پوزولانی است [27- 29]. با افزایش درصد سیمان مقدار pH افزایش یافته است. در نمونه‌ی فاقد آلاینده، pH نمونه با افزودن ۵٪ سیمان ۳/۵۴ واحد افزایش یافته و به ۱۱/۹۸ رسیده که این مقدار pH می‌تواند بیانگر ایجاد شرایط انجام واکنش‌های پوزولانی و تثبیت خاک باشد. در ادامه با افزایش درصد سیمان به ۱۰٪، pH نمونه به ۱۲/۶ رسیده است که می‌تواند دال بر تشکیل ترکیبات هیدراته سیمان از جمله نانوساختار C-S-H و در نتیجه بیانگر حصول بازدهی مناسب فرآیند تثبیت پوزولانی است. نکته قابل تأمل آن است که در سیکل ۳ مقدار pH تقریباً در تمام نمونه‌ها بزرگ‌تر و مساوی با pH سیکل صفر است که بیانگر عملکرد مطلوب سیمان در ۳ سیکل اول ذوب و یخبندان بوده و نیز بیانگر آن است که در ۳ سیکل اول واکنش‌های پوزولانی و تحکیم پوزولانی خاک به نحو مطلوبی انجام خواهد شد. اما در سیکل‌های ۷ و ۱۲ مقدار pH تمام نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌ها نسبت به سیکل ۰ و ۳ کاهش یافته است که این مسئله هم می‌تواند دال بر بحرانی بودن سیکل ۷ داشته باشد و هم دال بر بازدهی ضعیف‌تر تثبیت با سیمان در سیکل‌های ۷ و ۱۲

شده و بر همین اساس رفتار خاک را از حالت خمیری به رفتار دانه‌ای متمایل می‌سازد، بنابراین پتانسیل تورم که تابعی از خصوصیات خمیری است، کاهش یافته است. غالباً میزان تنش پیش‌تحکیمی که پارامتر مهمی در طراحی پی است با افزایش غلظت آلاینده کاهش و ضریب فشردگی افزایش یافته است. بنابراین به جز موارد معدود، افزایش غلظت آلاینده سبب تضعیف پارامترهای مقاومتی شده است.

شکل ۷. نمودار e-log p و تغییرات C_c ، C_s ، P_c در نمونه‌های حاوی

غلظت‌های ۱۰، ۴۰ و ۸۰ نیترا ت سرب در سیکل ۱۲

شکل ۷-الف. نمودار e-log p نمونه‌ی آلوده به ۱۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

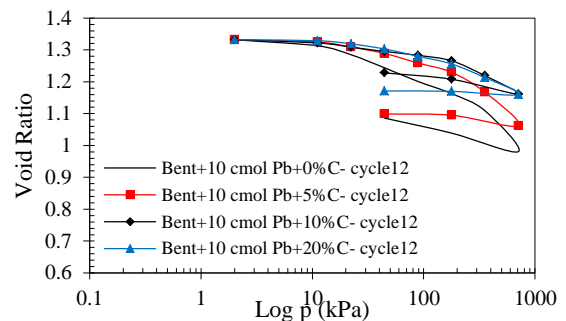


Fig. 7a. e-log p curves of contaminated samples containing 10 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ (cycle 12)

شکل ۷-ب. نمودار e-log p نمونه‌ی آلوده به ۴۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

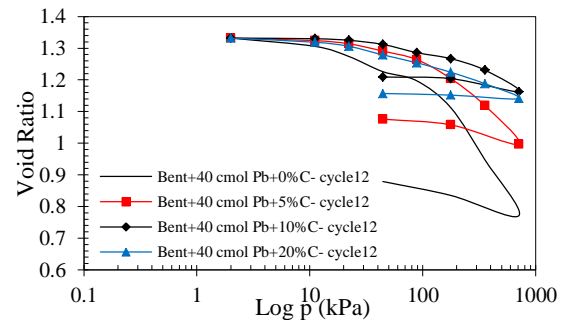


Fig. 7b. e-log p curves of contaminated samples containing 40 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ (cycle 12)

شکل ۷-ج. نمودار e-log p نمونه‌ی آلوده به ۸۰ cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂

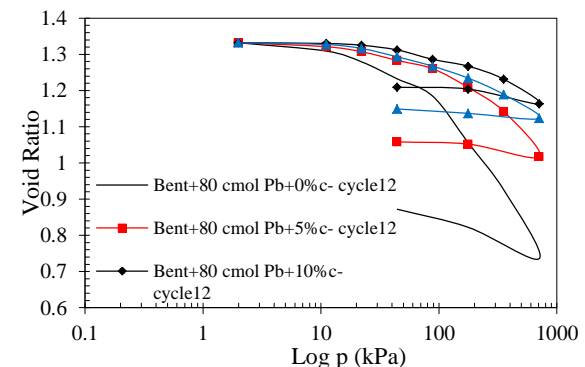


Fig. 7c. e-log p curves of contaminated samples containing 80 cmol/kg-soil Pb(NO₃)₂ (cycle 12)

شکل ۸-ب. تغییرات pH بر حسب درصد سیمان (سیکل ۳)

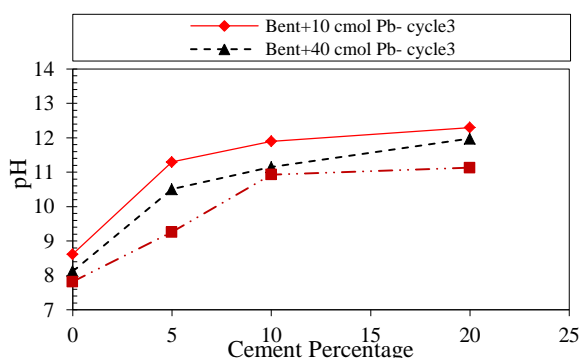


Fig. 8b. Variation of pH value (cycle 3)

شکل ۸-ج. تغییرات pH بر حسب درصد سیمان (سیکل ۷)

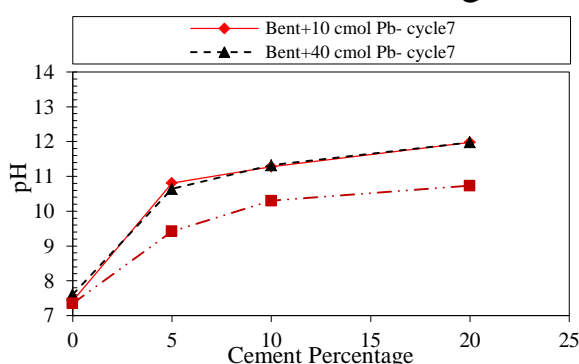


Fig. 8c. Variation of pH value (cycle 7)

شکل ۸-د. تغییرات pH بر حسب درصد سیمان (سیکل ۱۲)

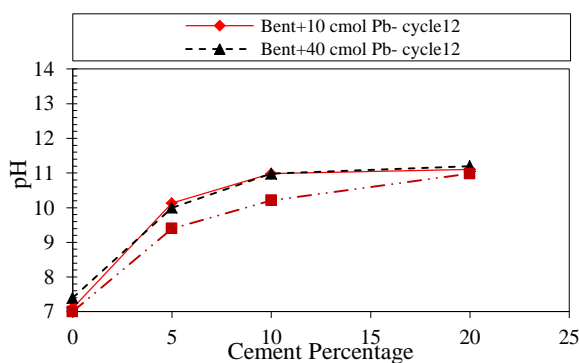


Fig. 8d. Variation of pH value (cycle 12)

Fig. 8. Variation of pH value vs cement percentage in the samples containing different Pb heavy metal concentration (0, 10, 40 and 80 cmol/kg-soil $Pb(NO_3)_2$) for different freezing and thawing cycles (0, 3, 7 and 12).

۴- نتیجه گیری

مهمترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح ذیل است:

۱. افزایش حدودی ۲ تا ۸ برابری در مقدار تنش پیش تحکیمی و نیز کاهش حدودی ۵۰ تا ۸۰ درصدی ضرایب تورم و

نسبت به بازدهی تثبیت در سیکل های ۰ و ۳ است. در نمونه- های حاوی آلاینده در سیکل های مختلف، معمولاً ۱۰ درصد سیمان بهترین عملکرد را دارد. نکته قابل تأمل در شکل های (۸-ج و ۸-د) آن است که در غلظت های ۱۰ و ۴۰ سانتی مول سرب، مقدار pH تقریباً ثابت بوده است. دلیل کاهش قابل توجه در غلظت های ۸۰ سانتی مول سرب می تواند رسوب سرب به داخل محلول باشد که این مسئله موجب کاهش pH خاک محلول خواهد شد. لازم به ذکر است با توجه به آنکه غلظت های ۱۰ cmol/kg-soil که کمتر از خاک CEC بوده و غلظت ۴۰ cmol/kg-soil در حدود CEC خاک است، بنابراین در این دو غلظت مقدار رسوب آلاینده فلز سنگین در نمونه قابل توجه نیست، اما در غلظت ۸۰ cmol/kg-soil که بیشتر از CEC نمونه- ی رسی بنتونیت است و نیز با توجه به تأثیر سیکل بحرانی ۷ بر تغییر رفتار نمونه ی رسی بنتونیت از رفتاری خمیری به رفتار غیر خمیری و بنابراین کاهش پتانسیل خاک برای جذب آلاینده، میزان رسوب آلاینده در سیکل ۷ در محلول آب و خاک افزایش یافته و بنابراین حضور آلاینده فلز سنگین سرب موجب کاهش pH می شود. علاوه بر موارد فوق تغییر رفتار خاک از سیکل ۳ به سیکل ۷ دلیلی دیگر بر بحرانی بودن سیکل ۷ فرآیند ذوب و یخبندان است.

شکل ۸ نمودار تغییرات pH به ازای درصد سیمان در نمونه های حاوی غلظت- های مختلف آلاینده نترات سرب در سیکل های ۰، ۳، ۷ و ۱۲ ذوب و یخبندان

شکل ۸-الف. تغییرات pH بر حسب درصد سیمان (سیکل صفر)

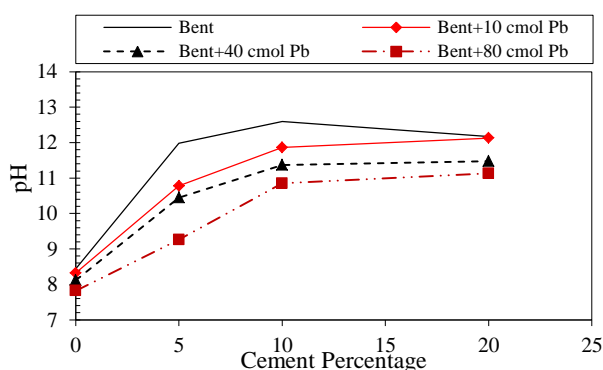


Fig. 8a. Variation of pH value (cycle 0)

۷. نتایج آزمایش تحکیم و نتایج آزمایش‌های شیمیایی هم-خوانی قابل قبولی با یکدیگر دارند.

References

۵- مراجع

- [1]. Williams, AAB, Pidgeon, JT and Day, P. 1985. Problem Soils in South Africa- State-of-the-Art: Expansive Soils. *The Civil Engineer in South Africa*, pp 367-377.
- [2]. Sasanian, s., 2011. The Behaviour of Cement Stabilized Clay At High Water Contents. *PhD Thesis, University of Western Ontario*, 287p.
- [3]. Schwartz, K. 1985. Problem Soils in South Africa – State-of-the-Art: Collapsible Soils. *The Civil Engineer in South Africa*. July, pp. 379-393.
- [4]. Ahmed, A., 2015. Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite. *Appl. Clay Sci*, **104**, 27–35.
- [5]. Rao, M. R., Rao, A. S., and Babu, R. D., 2008. Efficacy of cement-stabilized fly Ash cushion in arresting heave of expansive soils. *Geotech Geol Eng.*, **26**, 189-197.
- [6]. USEPA, 2004. Treatment Technologies for Site Cleanup: *Annual Status Report (11th E.)*. EPA542-R-03-009. www.epa.gov.
- [7]. Gismera, M.J., and Sevilla, M.T., 2012. Clayey materials as geologic barrier in urban landfills. *Applied Clay Science*, pp 23–29.
- [8]. Howel, J. L., Shackelford, C. D., 1997. Hydraulic conductivity of sand admixture processed clay mixture. *In: Proceedings of 14th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Hamburg*, 1, 307-310.
- [9]. Dixon, D. A., Gray, M. N., and Thomas, A. W., 1985. A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixture for use in nuclear fuel waste disposal. *Eng Geol.*, **21**, 247-255.
- [10]. Chapuis, R. P., 1990. Soil – bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **27**, 47-57.
- [11]. Sofilić, T. et.al. 2012. The Significance of Iron and Steel Slang as by-product for Utilization in Road Construction. *12th International Foundrymen Conference, Opatija, Croatia*.
- [12]. Yarlagađa, P.S., Matsumoto, M.R., Van Benschoten, J.E., and Kathuria, A., 1995. Characteristics of heavy metal in contaminated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **121**, 276-286.
- [13]. Shi, C., and Jimenez, A.F., 2006. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of Hazardous Materials*, **137**, pp. 1656-1663.
- [14]. Batchelor, B., 2006. Overview of waste stabilization with cement. *Journal of Waste Management*. 26, 689-698.
- [15]. Pereira, C.F., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., and Vale, J., 2009. Waste

فشرده‌گی پذیری در نمونه‌های آلوده و غیر آلوده به فلز سنگین سرب، دال بر حصول بازدهی مناسب در جامدسازی آلاینده و نیز دلالت بر سازگاری سیمان با خاک و آلاینده دارد.

۲. به صورت کلی تأثیر افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین سرب در سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان متفاوت است، اما در یک نگاه کلی موجب کاهش پتانسیل تورم، افزایش نشست-پذیری و کاهش تنش پیش‌تحکیمی (به استثنای نمونه‌های تثبیت شده با ۰ و ۵ درصد سیمان در غلظت ۸۰ cmol/kg- soil) شده است، بنابراین به صورت کلی موجب تضعیف خصوصیات مقاومتی خاک شده است.

۳. عملکرد سیمان و آلاینده در سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان بواسطه سطح مخصوص و پتانسیل بالای سیمان در جذب و واکنش با آلاینده و تشکیل ترکیبات پوزولانی، مطلوب ارزیابی می‌شود.

۴. افزایش مقدار pH در سیکل سوم ذوب و یخبندان در اغلب موارد و کاهش pH در سیکل‌های ۷ و ۱۲ نسبت سیکل صفر بیانگر عملکرد مطلوب سیمان در ۳ سیکل اول ذوب و یخبندان و نیز بحرانی بودن سیکل ۷ است.

۵. در سیکل ۷ و ۱۲، در غلظت‌های کم و متوسط آلاینده (غلظت‌های ۱۰ و ۴۰ cmol/kg-soil) کاتیون فلز سنگین توسط پولک رسی جذب شده و بنابراین مقدار رسوب آلاینده در نمونه قابل توجه نبوده و بنابراین pH خاک تقریباً ثابت است، اما در غلظت بالا (۸۰ cmol/kg-soil) با کاهش پتانسیل خاک در جذب آلاینده و افزایش میزان رسوب آلاینده در محلول آب و خاک، pH خاک و به تبع آن بازدهی تثبیت با سیمان کاهش یافته است.

۶. با توجه به آنکه ۱۰٪ سیمان موجب افزایش مقاومت، اصلاح ویژگی‌های نشست‌پذیری و تورمی خاک، از جنبش انداختن و غیر فعال کردن (جامدسازی) آلاینده با وجود افزایش غلظت آلاینده فلز سنگین و غلبه بر تأثیر مخرب اعمال سیکل‌ها شده و نیز از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است، بنابراین مقدار بهینه سیمان را می‌توان ۱۰٪ در نظر گرفت.

- [26]. Yong, R.N., 2000. Geo-environmental engineering, contaminated soils, pollutant fate and mitigation. *CRC Press*, p.307.
- [27]. Yong, R. N. and Phadangchewit, Y., 1993. pH Influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. *Can. Geotech. J.*, **30**, 821-833.
- [28]. Yong, R. N. and Warkentin, B. P. and Phadangchewit, Y. and Galvez, R., 1990. Buffer capacity and lead retention in some clay minerals. *Water, Air, Soil, Pollution, J.*, **53**, 53-67.
- [29]. Ouhadi, V.R., and Amiri, M., 2011. Geo-environmental Behaviour of Nanoclays in Interaction with Heavy Metals Contaminant. *Amirkabir J, Civil*, **42**(3), 29-36.
- [30]. Yong, R. N. and Warkentin, B. P. and Phadangchewit, Y. and Galvez, R., 1990. Buffer capacity and lead retention in some clay minerals. *Water, Air, Soil, Pollution, J.*, **53**, pp. 53-67.
- [31]. Lumsdon, D.G., Evans, L.J., Bolton, K.A., 1995. The influence of pH and chloride on the retention of cadmium, lead, mercury and zinc by soils. *Journal of Soil Contamination*, **4**, pp. 137-150.
- [32]. Yong, R. N. and Phadangchewit, Y., 1993. pH Influence on selectivity and retention of heavy metals in some clay soils. *Can. Geotech. J.*, **30**, pp. 821-833.
- [33]. Taylor GS and Luthin JN, 1978. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canadian Geotechnical Journal*, **15**, 548-555.
- [34]. Andersland OB and Anderson DM, 1978. Geotechnical Engineering for Cold Region. *Mc Graw-Hill, New York*.
- [35]. Williams PJ and Perfect E, 1980. Investigation of thermally actuated water migration in frozen soils. *Geotechnical Science Laboratories, Department of Geography, Carleton University, Ottawa, Canada*.
- stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based. *geopolymers Fuel*, **88**, 1185-1193.
- [16]. Glasser, F.P., 1993. Chemistry of cement-solidified waste forms, Chemistry and microstructure of solidified waste forms. Spence, R.D. (Ed.), *Lewis Publishers*, p. 315.
- [17]. Klich, I., Wilding, L.P., Drees, L.R., and Landa, E.R., 1999. Importance of microscopy in durability studies of solidified and stabilized contaminated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**, 1274-1283.
- [18]. Andersland O.B., Ladanyi B., 1994. An Introduction to Frozen Ground Engineering. *Chapman & Hall, N.Y.*, pp. 352.
- [19]. Viklander P., 1998. Laboratory study of stone heave in till exposed to freezing and thawing. *Cold Regions, Science and Technology*, **27**, 141-152.
- [20]. Eigenbrod K.D., Knutsson S., Sheng D., 1996. Pore water pressures in freezing and thawing fine-grained soils. *Journal of Cold Regions Engineering*, **10**, 76-92.
- [21]. Cruzda K.A., Hohmann M., 1997. Freezing effect on strength of clayey soils. *Applied Clay Science*, **12**, 165-187.
- [22]. Marion, G.M., 1995. Freeze-thaw processes and soil chemistry. *Cold regions research & engineering laboratory, America*.
- [23]. Arabi, M., 1987. Frost resistance of lime stabilized clay soil. Ph.D, Thesis, *University of South Glamorgan, Wales, UK*.
- [24]. Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., 2007. Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. *Cold Regions Science and Technology*, **48**, 34-43.
- [25]. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M., Ouhadi, M.H., 2014. Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Applied Clay Science*, **95**, 111-118.

Impact of cyclic freezing and thawing on the pozzolanic consolidation of heavy metal contaminated soils

Fatemeh Khosravi (F. Khosravi¹), Salaheddin Hamidi (S. Hamidi²), Seyed Mehdi Hosseini (S. M. Hosseini^{3*}), Seyed Morteza Marandi (S. M. Marandi⁴)

1- M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahrood University of Technology

2- PhD Candidate of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

3- Assistant Prof. in civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahrood University of Technology

4- Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

* s.m.hosseini@shahrood.ut.ac.ir

Abstract:

Heavy metals are elements that exhibit metallic properties such as ductility, malleability, conductivity, cation stability, and ligand specificity. They are characterized by relatively high density and high relative atomic weight with an atomic number greater than 20. Clay and other soils may become contaminated by the accumulation of heavy metals and metalloids through emissions from the rapidly expanding industrial areas, mine tailings, disposal of high metal wastes, leaded gasoline and paints, land application of fertilizers, animal manures, sewage sludge, pesticides, wastewater irrigation, coal combustion residues, spillage of petrochemicals, and atmospheric deposition. Heavy metal contaminants in addition to geotechnical problems creation and change in the soil strength parameters especially in clay soils, can cause environmental and human health risks due to penetrate through the groundwater. Most commonly heavy metal found at contaminated sites are lead (Pb), chromium (Cr), arsenic (As), zinc (Zn), cadmium (Cd), copper (Cu), mercury (Hg), and nickel (Ni). Also, freezing and thawing cycles have a significant effects on the behavior of stabilized clay soils specially on the heavy metal contaminated clay soils stabilized by cement od other additives. So, by population increasing, advancement of technology and consequently increase in heavy metals emissions, as well as being a quarter of the earth surface in the cold regions and the necessity of building design and construction on these soils, it seems necessary to study the impact of the freezing and thawing cycles on the stabilized clay soils. Different additives such as cement, lime, gypsum, fly ash and other additives were used for stabilization and solidification of heavy metal and oily contaminated soils, the cement is more practical among the stabilizer additives, because of its compatibility with pollutants and high efficiency, low cost and easy access. In this research used cement for stabilization of the lead heavy metal contaminated soil exposed to freezing and thawing cycles. According to the importance of the soil settlement in the clay soils, one dimensional consolidation test was conducted on the experimental samples. Also, due to extensive use of bentonite clay soil in contaminated sites, bentonite clay sample was used for experimental studies. The results of this research indicate that in most cases the critical cycle is a cycle 7. Also, The soil strength parameters such as over-consolidation stress increased about 2 to 8 times in different conditions by cement stabilization. Also, stabilization of heavy metal contaminated by cement clay soils that exposed to freezing and thawing cycles reduce the C_c and C_s coefficients of bentonite clay samples about 50 to 80 percent depending on number of freezing and thawing cycles and heavy metal concentration in bentonite clay sample and also causing preconsolidation in soft clay soils or normally consolidated soils through the pozzolanic reactions of soil and cement at a low time. Furthermore, the optimum content of cement in contaminated and uncontaminated samples in different freezing and thawing cycles is variable, but in most cases is about 5% to 10% depending on number of freezing and thawing cycles and heavy metal concentration in bentonite clay sample. In continance, stabilization efficacy and the formation of hydrated compounds of cement and clay soil was investigated by using pH chemical test.

Keywords: Contaminated soil, cement, freezing and thawing cycles, bentonite, consolidation.