

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین‌المللی خوارزمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

تأثیر ذوب و یخبندان بر خاک‌های آلوده‌ی تثبیت‌شده با سیمان

نگارنده : فاطمه خسروی

استاد راهنما

آقای دکتر سید مهدی حسینی

استاد مشاور

آقای دکتر صلاح الدین حمیدی

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم به وجود با ارزشستان

مقدس‌ترین واژه‌ها در لغت نامه‌ی دلم

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان پر مهر مادرم

که هر چه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هر چه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران
مهربانیتان را سپاس نتوانم گفت. امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت‌م رضای شما.
بوسه بر دستان پر مهرتان.

برادر عزیزم

نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم که هر چه گویم و بسرایم کم گفته‌ام.
رنگ شادی‌هایم شدی، غصه‌ها را با تمام وجود از من زدودی، عمری خستگی‌ها را به جان خریدی تا
اکنون توانستی طعم خوش پیروزی را به من بچشانی، بوسه بر دستان پر مهرت.

تشکر و قدردانی :

سپاس خدای را

هر چه هست از برکت وجود اوست.....

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است چون بر می‌آید مفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

به مصداق " من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق " بسی شایسته از استادان فرهیخته و فرزانه استاد راهنما جناب آقای سید مهدی حسینی و استاد مشاور جناب آقای صلاح الدین

حمیدی :

که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند، به پاس قلب بزرگشان و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان، تقدیر و تشکر نمایم.

" و یزکیهم و یعلمهم الكتاب و الحکمه "

تشکر از خانواده عزیزم

مهربان فرشتگانی که لحظات ناب باهم بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست .

تعهد نامه

اینجانب **فاطمه خسروی** دانشجوی دوره **کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران** دانشکده پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه **تأثیر ذوب و یخبندان بر خاک‌های آلوده‌ی تثبیت‌شده با سیمان**

تحت راهنمایی **دکتر سید مهدی حسینی** متعهد می‌شوم :

تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی

شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

پیشرفت روزافزون صنعت و گسترش معادن از عوامل موثر بر تولید و انتشار مواد آلاینده حاوی فلزات سنگین می‌باشد. وجود مواد آلاینده علاوه بر مشکلات ژئوتکنیکی و تغییر پارامترهای مقاومتی خاک، می‌تواند از طریق نفوذ به چرخه‌های آب زیرزمینی سبب انتقال آلودگی به محیط‌زیست و در نتیجه به خطر انداختن سلامت انسان شود. از این رو تثبیت و جامدسازی بوسیله سیمان به عنوان بهترین روش اصلاح آلودگی انتخاب شد. کارایی زیاد، دسترسی آسان و ارزان بودن مصالح از جمله مزایای روش تثبیت با سیمان می‌باشد. در این تحقیق به بررسی جامدسازی و تثبیت خاک آلوده به فلزات سنگین با سیمان پرتلند به عنوان یکی از تکنیک‌های تصفیه در مدیریت پسماندهای خطرناک پرداخته شد. این پژوهش مطالعه‌ای بر تاثیر سیکل‌های ذوب-یخبندان بر روی پارامترهای تحکیم خاک رس است. با توجه به اهمیت نشست در خاک‌های رسی آزمایش تحکیم ادئومتر استفاده شده است. خاک رس آلوده به نیترات سرب پس از تثبیت تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بیشترین تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک تا سیکل ۳ بوده و در سیکل‌های ۷ و ۱۲ خاک از نظر مقاومتی به ثبات رسیده است. با توجه به نتایج CC, Cs و PC ، ۱۰٪ سیمان برای جامدسازی خاک آلوده در معرض سیکل ذوب و یخبندان بهینه در نظر گرفته شد.

کلمات کلیدی: تثبیت، خاک آلوده به فلزات سنگین، سیمان پرتلند، سیکل‌های ذوب و یخبندان، XRD (پراش پرتو ایکس).

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول	۱
مقدمه و کلیات پژوهش	۱
۲-۱ اهداف پژوهش	۷
۳-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه	۸
فصل دوم	۹
مروری بر متون فنی	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ خاک	۱۰
۳-۲ رس	۱۰
۱-۳-۲ ساختمان رس‌ها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها	۱۱
۲-۳-۲ جانشینی یونی در درون ذره رسی	۱۳
۳-۳-۲ تبادل کاتیونی	۱۳
۴-۳-۲ ظرفیت تبادل کاتیونی	۱۳
۵-۳-۲ تبادل آنیونی	۱۳
۶-۳-۲ منشا ظرفیت تبادل آنیونی	۱۳
۷-۳-۲ ظرفیت تبادل آنیونی	۱۴
۴-۲ مروری بر مطالعات انجام شده	۱۴
۶-۲ مطالعات، داده‌ها و بررسی‌های ژئوتکنیکی	۱۵
۷-۲ خاک‌های مساله‌دار	۱۶
۱-۷-۲ خاک‌های واگرا	۱۶
۱-۱-۷-۲ مشکلات خاک‌های واگرا	۱۸
۲-۱-۷-۲ راهکارهای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های واگرا	۱۸
۲-۷-۲ خاک‌های رمبنده	۱۹
۱-۲-۷-۲ مشکلات خاک‌های رمبنده	۲۰
۲-۲-۷-۲ راهکارهایی برای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های رمبنده	۲۱
۳-۷-۲ خاک‌های متورم شونده	۲۲

۲۴	مشکلات خاک‌های متورمشونده..... ۱-۳-۷-۲
۲۴	راهکارهایی برای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های متورمشونده..... ۲-۳-۷-۲
۲۵	حرکت آب بین ذرات جامد خاک..... ۸-۲
۳۰	منابع آلودگی..... ۹-۲
۳۱	آلاینده‌های فلزات سنگین..... ۱۰-۲
۳۱	اثر سرب در آلودگی محیطزیست..... ۱-۱۰-۲
۳۲	تأثیر سرب در آلودگی آب‌ها..... ۲-۱۰-۲
۳۲	تأثیر سرب در آلودگی خاک‌ها..... ۳-۱۰-۲
۳۳	تأثیر سرب در آلودگی هوا..... ۴-۱۰-۲
۳۴	تأثیر سرب و روی در آلودگی حیوانات و گیاهان..... ۵-۱۰-۲
۳۴	تأثیر سرب بر سلامتی انسان..... ۶-۱۰-۲
۳۵	راه‌های ورود سرب به بدن..... ۱۱-۲
۳۵	بیماری‌های ناشی از قرارگیری در معرض سرب :..... ۱۲-۲
۳۵	تکنیک اصلاح خاک‌های آلوده..... ۱۳-۲
۳۸	روش بیولوژیک..... ۲-۱۳-۲
۳۹	گیاه‌انباشتی و استخراج گیاهی..... ۱-۲-۱۳-۲
۳۹	ریشه‌پالایی..... ۲-۲-۱۳-۲
۴۰	پایدارسازی گیاهی..... ۳-۲-۱۳-۲
۴۰	تثبیت و جامدسازی (s/s)..... ۳-۱۳-۲
۴۱	جامدسازی پایه‌ی سیمانی..... ۱-۳-۱۳-۲
۴۵	فصل سوم
۴۵	معرفی مواد، نمونه‌سازی و روش آزمایش
۴۶	مقدمه..... ۱-۳
۴۶	مبانی مختصر در رابطه با خاک رس..... ۲-۳
۴۶	آزمایش ادنومتر دوگانه..... ۳-۳
۴۷	آزمایش ادنومتر تک..... ۴-۳
۴۸	تجهیزات آزمایش..... ۵-۳
۴۸	مواد تحت آزمایش..... ۶-۳
۴۸	سیمان ۱-۶-۳.....

۴۹	۲-۶-۳ خاک بنتونیت
۴۹	۷-۳ آلاینده نیترات سرب
۴۹	۸-۳ آزمایش‌های انجام شده
۴۹	۱-۸-۳ آزمایش هیدرومتری
۴۹	۲-۸-۳ آزمایش دانه‌بندی با الک
۵۱	۳-۸-۳ آزمایش حدود اتربرگ
۵۲	۹-۳ نمونه‌سازی
۵۲	۱-۹-۳ ساخت نمونه بدون آلاینده
۵۴	۲-۹-۳ ساخت نمونه با آلاینده
۵۷	۱۰-۳ روش اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان
۵۸	۱۱-۳ آزمایش PH
۵۸	۱۲-۳ آزمایش ریزساختاری
۵۹	فصل چهارم
۵۹	بحث و بررسی نتایج آزمایش
۶۰	۱-۴ مقدمه
۶۰	۲-۴ کلیات روند آزمایش
۶۱	۳-۴ تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها
۶۱	۴-۴ تاثیر تثبیت با سیمان بر خصوصیات مقاومتی خاک بنتونیت در سیکل ۰ و آلاینده
۶۴	۵-۴ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس بنتونیت در سیکل ۰
۷۲	۱-۵-۴ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل
۷۵	۶-۴ تاثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر رفتار بنتونیت آلوده به فلز سنگین
۷۵	۷-۴ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس بنتونیت در سیکل ۳
۸۳	۱-۷-۴ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل
۸۶	۸-۴ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس بنتونیت در سیکل ۷
	۹-۴ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس بنتونیت در سیکل ۱۲
۹۸	۱۲
۱۰۸	۱-۹-۴ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل ۱۲
۱۱۳	فصل پنجم
۱۱۳	نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۱۴	۱-۵ مقدمه
۱۱۴	۲-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۶	۳-۵ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی
۱۱۷	منابع

فهرست جداول

- جدول (۲-۲) مشخصات ۳ نوع کانی رسی ۲۹
- جدول (۲-۳) : مشخصات رس بنتونیت تحت آزمایش ۵۱
- جدول (۱-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۰ و آلاینده ۶۱
- جدول (۲-۴) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۶۲
- جدول (۳-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۰ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۶۴
- جدول (۵-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۰ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۶۷
- جدول (۶-۴) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۶۸
- جدول (۷-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۰ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۰
- جدول (۸-۴) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۰
- جدول (۹-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۳ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۵
- جدول (۱۰-۴) : مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۶
- جدول (۱۱-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۳ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۸
- جدول (۱۲-۴) : مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۷۸
- جدول (۱۳-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۳ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۸۰
- جدول (۱۴-۴) : مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۸۱
- جدول (۱۵-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۷ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۸۶
- جدول (۱۶-۴) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۸۷
- جدول (۱۷-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۷ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۸۹
- جدول (۱۸-۴) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۹۰
- جدول (۱۹-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۷ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۹۲
- جدول (۲۰-۴) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۹۳
- جدول (۲۱-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۱۲ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۹۹
- جدول (۲۲-۴) : مقادیر pH در سیکل ۱۲ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۹۹
- جدول (۲۳-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۱۲ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۱۰۲
- جدول (۲۴-۴) : مقادیر pH در سیکل ۱۲ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۱۰۳
- جدول (۲۵-۴) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۱۲ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۱۰۵
- جدول (۲۶-۴) : مقادیر pH در سیکل ۱۲ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک ۱۰۶
- جدول (۲۷-۴) : ترکیب نمونه‌های تحت آزمایش XRD ۱۱۲
- جدول (۲۸-۴) : نتایج گراف XRD ۱۱۲

فهرست شکل ها

- شکل (۱-۲) : ورقه های اکتاهدرال (هشت وجهی) [۳۱] ۱۱
- شکل (۲-۲) : ورقه های تتراهدرال (چهار وجهی) [۳۱] ۱۲
- شکل (۳-۲) : فرسایش بر اثر پدیده واگرایی [۳۸] ۱۸
- شکل (۴-۲) : ساختار خاک رمینده [۹۵،۳۸] ۲۱
- وقوع پدیده رمیندگی [۳۸] : شکل (۵-۲) : ۲۱
- شکل (۶-۲) : آثار مخرب خاک های متورم شونده. سمت راست بالازدگی ناشی از تورم خاک. سمت چپ تورم و ۲۴
- شکست دیوار [۳۸] ۲۴
- شکل (۷-۲) : حرکت آب در بین دانه های جامد خاک و کاهش مقاومت [۴۶] ۲۵
- شکل (۸-۲) : شبیه سازی آزمایش تحکیم [۴۶] ۲۸
- شکل (۹-۲) : دستگاه آزمایش تحکیم یک بعدی ۲۸
- شکل (۱۰-۲) : آلاینده های صنایع سرب و روی [۶۱] ۳۱
- شکل (۱۱-۲) : واکنش های کنترل کننده غلظت فلزات سنگین در محلول خاک [۶۶] ۳۶
- شکل (۱۲-۲) : ساختار کلی روش الکتروکینتیک در بهسازی خاک [۷۳] ۳۸
- شکل (۱۳-۲) : بازه مقاومت فشاری محصولات S/S شده و مقایسه آن ها با سایر مواد و مصالح [۹۰] ۴۲
- شکل (۱۴-۲) : تغییرات نفوذپذیری مصالح S/S شده با مواد مضاعف متفاوت [۹۱] ۴۳
- شکل (۱-۳) : نتایج آزمایش ادنومتر دوگانه ۴۷
- شکل (۲-۳) : نتایج آزمایش ادنومتر تک [۹۵] ۴۸
- شکل (۳-۳) : تجهیزات همسنگ سازی گیج اندازه گیری تغییر مکان و دستگاه تحکیم [۹۹] ۴۸
- شکل (۴-۳) : خاک پس از شسته شدن ۵۰
- شکل (۵-۳) : نتیجه آزمایش دانه بندی ۵۰
- شکل (۶-۳) : گراف آزمایش دانه بندی ۵۱
- شکل (۷-۳) : تعیین حدود اتربرگ ۵۱
- شکل (۸-۳) : آماده سازی خاک (خاک عبوری از الک نمره ۱۰) ۵۳
- شکل (۹-۳) : خاک مرطوب (رطوبت حد خمیری) ۵۳
- شکل (۱۰-۳) : قالب فلزی ساخته شده ۵۳
- شکل (۱۱-۳) : نمونه های حاوی سیمان بعد از نمونه سازی ۵۴
- شکل (۱۲-۳) : قرار دادن نمونه ها در زیپ کیپ به منظور ثابت ماندن رطوبت ۵۴
- شکل (۱۳-۳) : قرار گرفتن نمونه ها در دستگاه تحکیم ۵۴
- شکل (۱۴-۳) : آلاینده نیترات سرب ۵۵
- شکل (۱۵-۳) : اضافه کردن خاک به مخلوط آب و آلاینده ۵۵
- شکل (۱۶-۳) : آماده شدن سوسپانسیون حاوی بنتونیت و الکترولیت با نسبت مشخص ۵۵
- شکل (۱۷-۳) : استفاده از شیکر نا مناسب در مرحله اول ۵۶
- شکل (۱۸-۳) : همزن جهت مخلوط کردن سوسپانسیون خاک و آب و آلاینده ۵۶
- شکل (۲۱-۳) : نمونه خاک آلوده پس از خشک شدن ۵۸
- شکل (۲۲-۳) : دستگاه PH متر و نمونه های حاوی سیمان و بنتونیت ۵۸

- شکل (۱-۴) نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۰، سیکل ۰ ۶۳
- شکل (۲-۴) گراف تحکیم، آلاینده ۰ در سیکل ۰ ۶۳
- شکل (۳-۴) گراف نفوذپذیری، آلاینده ۰ در سیکل ۶۴
- شکل (۴-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ ۶۶
- شکل (۵-۴) : گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ ۶۶
- شکل (۶-۴) : گراف نفوذپذیری، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ ۶۷
- شکل (۷-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، ۴۰ سانتی مول آلاینده در سیکل ۰ ۶۹
- شکل (۸-۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ ۶۹
- شکل (۹-۴) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۶۹
- شکل (۱۰-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷۱
- شکل (۱۱-۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ ۷۲
- شکل (۱۲-۴) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷۲
- شکل (۱۳-۴) : گراف تحکیم ۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷۳
- شکل (۱۴-۴) : گراف تحکیم ۵% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷۴
- شکل (۱۵-۴) : گراف تحکیم ۱۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۰ ۷۴
- شکل (۱۶-۴) : گراف تحکیم ۲۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۰ ۷۴
- شکل (۱۷-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۷۷
- شکل (۱۸-۴) : گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۷۷
- شکل (۱۹-۴) : گراف نفوذپذیری، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۷۸
- شکل (۲۰-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۷۹
- شکل (۲۱-۴) : گراف تحکیم، ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۸۰
- شکل (۲۲-۴) : گراف نفوذپذیری، ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۸۰
- شکل (۲۳-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۸۲
- شکل (۲۴-۴) : گراف تحکیم، ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۸۲
- شکل (۲۵-۴) : گراف نفوذپذیری، ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ۸۳
- شکل (۲۶-۴) : گراف ۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳ ۸۴
- شکل (۲۷-۴) : گراف ۵% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳ ۸۵
- شکل (۲۸-۴) : گراف ۱۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳ ۸۵
- شکل (۲۹-۴) : گراف ۲۰% سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳ ۸۶
- شکل (۳۰-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۸۸
- شکل (۳۱-۴) : گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۸۸
- شکل (۳۲-۴) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۸۹
- شکل (۳۳-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۱
- شکل (۳۴-۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۱
- شکل (۳۵-۴) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۲
- شکل (۳۶-۴) : نمودار Pc, Cc, Cs ، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۴
- شکل (۳۷-۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۴

- شکل(۴-۳۸) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ۹۵
- شکل(۴-۳۹) : گراف %۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷ ۹۷
- شکل(۴-۴۰) : گراف %۵ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷ ۹۷
- شکل(۴-۴۱) : گراف %۱۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷ ۹۸
- شکل(۴-۴۲) : گراف %۲۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷ ۹۸
- شکل(۴-۴۳) : نمودار Pc،Cc،Cs، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۰۱
- شکل(۴-۴۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۱
- شکل(۴-۴۵) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۲
- شکل(۴-۴۶) : نمودار Pc،Cc،Cs، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۴
- شکل(۴-۴۷) : گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۴
- شکل(۴-۴۸) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۵
- شکل(۴-۴۹) : نمودار Pc،Cc،Cs، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۷
- شکل(۴-۵۰) : گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۷
- شکل(۴-۵۱) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ۱۰۷
- شکل(۴-۵۲) : گراف %۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲ ۱۰۹
- شکل(۴-۵۳) : گراف %۵ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲ ۱۱۰
- شکل(۴-۵۴) : گراف %۱۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲ ۱۱۰
- شکل(۴-۵۵) : گراف %۲۰ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲ ۱۱۱

فصل اول

مقدمه و کلیات پژوهش

۱-۱ مقدمه

گسترش روزافزون فعالیت‌های عمرانی و ساخت و ساز و در مواردی عدم دسترسی به زمین‌های مناسب، بشر را به سمت استفاده از زمین‌های موجود هر چند با مشخصه‌های مهندسی نامناسب سوق می‌دهد.

معمولا خاک موجود در محل عملیات ساختمانی به طور کامل برای تحمل سازه مورد نظر مناسب نیست. عواملی مانند: ساختار خاک، رطوبت، چگالی حجمی، توزیع دانه‌بندی، شکل و کانی‌شناسی، درجه قفل‌وبست خاک، چسبندگی دانه‌ها و هوازدگی شیمیایی، ساز و کارهای پیوستگی ذرات، وجود پوشش گیاهی در خاک‌های رسی خواص مکانیکی خاک را معین می‌نماید. خاک‌های ریزدانه به تنهایی در محیط‌های مرطوب قابل استفاده نیستند. ضمن اینکه در این محیط‌ها نیز قابل تراکم نیستند، در نتیجه امکان بارگذاری آن‌ها در این شرایط وجود ندارد [۱].

بنابراین، چنانچه از این نوع خاک‌ها استفاده شود، در محیط‌های مرطوب نیاز به بهسازی آن‌ها است. این موضوع به خصوص در مناطق سردسیر اهمیت خاص می‌یابد. بر اساس مطالعه منابع کنونی مشخص شده‌است که در مناطق سردسیر، برخی از مشخصات مکانیکی خاک تحت اثر یخبندان و ذوب‌های^۱ متعدد تغییر می‌نماید [۱].

به همان اندازه که تکنولوژی پیشرفت می‌کند و میزان جمعیت افزایش می‌یابد، لزوم توسعه مناطق سردسیر و در نتیجه بررسی‌های ژئوتکنیکی این نواحی اجتناب ناپذیر می‌شود. خاک مناطقی را که حداقل برای دو سال در دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد باقی بماند خاک همیشه یخ‌زده می‌نامند. مناطقی را که در آنها عمق نفوذ یخبندان حداقل یک بار در هر ۱۰ سال بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر است را به عنوان مناطق سردسیر تلقی کرده‌اند. براین اساس حدود یک‌چهارم خشکی‌های دنیا جز مناطق سردسیر تلقی می‌گردند. در نواحی سردسیر خاک‌ها حداقل یک بار در سال در معرض سیکل یخبندان و ذوب قرار می‌گیرند [۲].

^۱ Freezing-thawing

ونگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که در مناطق سردسیر، عوامل ویژه‌ای بر مشخصات مکانیکی خاک اثرگذار هستند. در این مورد خواص مکانیکی خاک چندین بار تحت اثر تشکیل یخ بین ذرات در طول انجماد و رطوبت اضافی در طول آب شدن قرار می‌گیرد. این اثرات ممکن است منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت باربری خاک شود [۱].

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 یخ نرزه، ظرفیت باربری و تغییرات ریزساختاری نشان داده‌اند [۳،۴]. آسیب‌های ناشی از چرخه‌های یخبندان و ذوب یکی از مهمترین مشکلات در خاک‌های ریزدانه متراکم‌شده در سیستم‌های پوششی است. مقاومت و دوام آن‌ها به علت این سیکل‌ها کاهش می‌یابد. ترک‌خوردگی و ورقه‌ورقه شدن خاک معمول‌ترین آسیب‌های ناشی از سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌باشد [۵].

گستره دانش تغییر رفتار خاک به علت انجماد به درک بهتر مهندسی در اجرای روش انجماد موقت زمین نیز کمک می‌کند. انجماد موقت زمین روشی است که در آن به کمک عبور نیتروژن مایع از داخل لوله‌های قرار داده شده در زمین و یا با عبور آب شور معمولاً با عبور کلرید کلسیم از داخل سیستم بسته دوار و دستگاه خنک‌کننده، گرمای خاک گرفته می‌شود. بنابراین آب موجود در خاک، یخ‌زده و توده نفوذناپذیر و مقاوم ایجاد می‌شود. از جمله کاربردهای این روش تونل‌سازی در خاک‌های لایه‌لایه و یا خاک‌های کاملاً دانه‌ای، ایجاد مانع برای کنترل پخش آلودگی، دیوار آب‌بند برای جریان آب زیر زمینی و تثبیت زمین برای گودبرداری‌ها و... می‌باشد [۶].

دوام خصوصیات مهندسی خاک‌های رس‌دار در فرایند یخبندان و ذوب یکی از نگرانی‌های مهندسی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بوده است.

یکی از مهمترین مسائلی که همیشه در مورد خاک‌ها مطرح گردیده، مسئله رفتار آنها در مقابل تغییرات رطوبت بوده، که باعث تورم، واگرایی و رمبندگی آن‌ها می‌شود [۷].

به بالا آمدن سطح روسازی در اثر یخ‌زدن آب موجود در حفرات و تشکیل عدسی‌های یخ در خاک بستر با لایه‌های اساس و زیراساس، تورم گفته می‌شود. بدین منظور سه عامل هوای سرد (دمای زیر صفر)، خاک ریزدانه و منبع آب زیرزمینی در عمق کمتر از سه متر موردنیاز می‌باشد [۸].

تورم ناشی از یخبندان باعث افزایش حجم کل خاک و ذوب یخ باعث افزایش تخلخل، درصد رطوبت و نهایتاً کاهش مقاومت خاک می‌شود [۹،۱۰].

بدین ترتیب که آب موجود در منبع آب زیرزمینی به علت خاصیت موئینگی بالا آمده و پس از رسیدن به قسمت‌های سرد سیستم روسازی یخ زده و عدسی‌های یخ تشکیل می‌شوند. حجم آب به علت یخ‌زدن حدوداً ۹ برابر افزایش می‌یابد که منجر به افزایش حجم کل خاک و مصالح روسازی می‌شود [۱۱،۱۲،۱۳].

یخ در اندازه و شکل‌های مختلف تمایل به جداسازی خاک دارد و سبب شکل‌گیری مشخصه‌های ساختاری در مقیاس میکرو و ماکرو می‌گردد [۱۴].

کاهش دما و تشکیل بلورهای یخ در نزدیکی سطح زمین به علت تشکیل پتانسیل حرارتی باعث مکیده شدن مقدار بیشتری آب از اعماق پایین‌تر می‌شود. در اثر این پدیده میزان رطوبت در نزدیکی سطح یخ‌زده افزایش یافته و نتیجتاً ضخامت لایه یخ مرتباً افزایش می‌یابد که منجر به تورم می‌گردد. در فصل گرما و در نتیجه افزایش دما، عدسی‌های یخ ذوب می‌شود که نه تنها تخلخل خاک را افزایش و سطوح تماس بین ذرات را کاهش می‌دهد، بلکه باعث کاهش مقاومت برشی در نتیجه افزایش رطوبت نیز می‌شود. تخلخل خاک به دلیل فاصله گرفتن ذرات از یکدیگر در حین انجماد و افزایش حجم یخ صورت می‌گیرد. این امر باعث کاهش سطوح تماس بین دانه‌ای و نهایتاً مقاومت برشی خاک می‌گردد. همچنین افزایش میزان رطوبت به دلیل مکیده شدن آب از اعماق پایین‌تر پس از ذوب شدن یخ بوجود می‌آید. خاک رس و لای و ماسه ریز از خاک‌های حساس در برابر یخبندان می‌باشند. این خاک‌ها به دلیل کوچک بودن اندازه، و قطر متوسط حفرات، از خاصیت موئینگی بالایی برخوردارند که این خود باعث جذب آب و تورم می‌شود. با افزایش اندازه ذرات و نتیجتاً اندازه متوسط حفرات بین

دانه‌ای خاک، از حساسیت آن در برابر یخبندان کاسته می‌شود [۸،۱۵].

رس‌های متورم شونده جزو خاک‌های مساله‌داری^۲ هستند که در بسیاری از نقاط دنیا به ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک (از جمله کشور ایران) پراکنده شده‌اند [۱۶،۱۷].

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد سازوکار تورم خاک تابعی از عوامل مختلف مانند: ترکیب کانی ساخت، مشخصات شیمیایی مایع منفذی اطراف ذرات رسی است [۱۸،۱۹].

در شرایط کلی تغییرات حجم بر اثر حضور این گونه از خاک‌ها در بستر و یا مصالح ساخت سازه‌های مهندسی می‌تواند باعث آسیب و حتی تخریب کامل طرح شود. به گونه ای که در کشورهایی مانند آمریکا و چین سالانه میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارات ناشی از تورم خاک می‌شود [۲۰].

بر این اساس تاکنون روش‌های متنوعی مانند تعویض مصالح، اصلاح شیمیایی، بهبود فیزیکی، اجرای پی‌های خاص و بهسازی حرارتی برای مواجهه با مشکلات تورم و انقباض خاک‌ها ارائه شده‌است [۲۱،۲۲].

ایجاد تغییراتی در خاک در راستای افزایش ظرفیت باربری و مقاومت در برابر تنش‌های فیزیکی و شیمیایی ناشی از محیط زیست را تثبیت^۳ خاک می‌نامند [۲۳].

استفاده از روش تثبیت برای بهسازی زمین در پروژه‌های عمرانی سابقه‌ای نزدیک به ۱۰۰ سال دارد. این روش در بیشتر موارد در پروژه‌های راهسازی به منظور اصلاح خاک‌های نرم و کم مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی، ایجاد لایه‌های اساس و زیر اساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود و کاهش گردوخاک و یا کاهش رطوبت مورد استفاده قرار گرفته‌است [۲۴،۲۵،۲۶].

به‌وسیله روش‌های گوناگون تثبیت می‌توان مشخصات خاک نظیر، مقاومت، سختی، تراکم پذیری، حساسیت تورم در مقابل آب و گرایش به تغییر حجم را تغییر داد. این دامنه روش‌ها می‌تواند تغییرات

^۲ Problematic soils

^۳ Solidification/stabilization

در دانه‌بندی خاک و تراکم با استفاده از ترکیبات گوناگون یا روش‌های حرارتی و الکتروکینتیک را شامل شود، که با استفاده از مواد افزودنی یا بدون استفاده از آن انجام می‌گیرد [۲۷].

به طور کلی در فرایند تثبیت خاک، پیوند بین ذرات تغییر می‌یابد. این تغییر منجر به ایجاد ساختاری جدید می‌گردد که نسبت به ساختار پیشین خاک چسبندگی بیشتری دارد. در برخی از این روش‌ها ساختار پیشین خاک شکسته می‌شود ولی در برخی دیگر با تزریق مواد این ساختار مستحکم می‌شود و مقاومت خاک افزایش می‌یابد [۲۸].

بر این اساس انتخاب نوع ماده تثبیت کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان آمدوشد، هدف از انجام تثبیت خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. با توجه به این موارد، انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه ضروری می‌باشد. در بسیاری از موارد انتخاب نادرست روش تثبیت نتایج نامناسب و افزایش هزینه‌های بلندمدت روسازی را دربر داشته‌است [۲۶]. تاریخچه بهسازی خاک به وسیله ترکیبات گوناگون مانند آهک و سیمان به دهه‌ها قبل باز می‌گردد. استفاده از سیمان و آهک یکی از روش‌های مرسوم در بهسازی و اصلاح ظرفیت باربری و نشست‌پذیری خاک‌های مسئله‌دار است. امروزه بهسازی بر پایه ترکیبات سیمانی در سراسر جهان کاربرد گسترده‌ای دارد.

به این ترتیب که با اعمال سیمان به خاک واکنش هیدراتاسیون آغاز می‌گردد. در طی این واکنش ترکیباتی از سیمان با آب اختلاط وارد واکنش شده و ترکیبات سیمانی را تولید می‌نمایند که باعث ایجاد چسبندگی بین دانه‌های خاک تثبیت شده گردیده و مقاومت خاک را افزایش می‌دهند. همچنین در اثر هیدراتاسیون، هیدروکسید کلسیم تولید می‌گردد که بر خواص خمیری خاک تثبیت‌شده تاثیر زیادی داشته و همانند آهک در صورت وجود مواد پوزولانی در خاک با آن‌ها وارد واکنش شده و ترکیبات سیمانی ثانویه را تولید کرده که پیشرفت این واکنش به موازات واکنش هیدراتاسیون باعث افزایش مقاومت در خاک می‌گردد [۲۹].

برای هدف جامدسازی آلاینده‌ها از بایندهای آلی و غیر آلی (متنوعی) استفاده شده‌است که اغلب

آن‌ها دارای خواص تثبیت‌کنندگی نیز هستند. در این میان سیمان پرتلند معمولی^۴ به علت در دسترس بودن، ارزان بودن، وسازگاری با بسیاری از آلاینده‌ها پرمصرف‌ترین و رایج‌ترین ماده بایندر مورد استفاده در این روش تصفیه می‌باشد.

در تحقیقات صورت‌گرفته درباره جامدسازی و تثبیت پسماندها، اغلب هدف دستیابی به ماده (پسماند) ثانویه‌ای بوده‌است که برای دفن در زمین دفن‌ها^۵ به لحاظ مسائل زیست‌محیطی مشکلی نداشته‌باشد و در مواردی توده سخت‌شده نهایی دارای مقاومت‌های مکانیکی مناسبی نیز شده‌است [۳۰].

۱-۲ اهداف پژوهش

دوام و ضعف برخی ویژگی‌های مهندسی خاک‌های رسی یکی از نگرانی‌های مداوم مهندسين ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی است.

در پروژه‌های مهندسی که در نواحی سردسیر انجام می‌شوند، یخبندان و ذوب یکی از عوامل جوی موثر بر پایداری رفتار مهندسی خاک، شامل آسیب و ترک‌خوردگی در بستر رسی، مراکز دفن زباله، دوام و عملکرد روسازی‌ها و شیروانی‌های خاکی می‌باشد.

از طرفی پدیده ذوب و یخبندان باعث تغییر در خصوصیات لایه دوگانه در خاک‌های رسی شده و لذا موجب تغییر در پارامترهای مقاومتی و به طور کلی تغییر در رفتار خاک‌های رسی می‌شود. علیرغم کاربرد قابل توجه سیمان در بهسازی خاک‌های رسی و نیز با توجه به وقوع پدیده ذوب و یخبندان خصوصا در نواحی کوهستانی و تأثیر آن بر رفتار ریزساختاری و درشت‌ساختاری خاک‌های رسی، تاکنون تحقیقات جامعی در خصوص مطالعه ذوب و یخبندان بر رفتار خاک‌های رسی انجام نشده‌است.

از طرف دیگر هدف از تثبیت خاک آلوده^۶ به پسماند حاصل از فلزات سنگین^۷ دستیابی به توده‌ای که از همان سنین اولیه دارای مقاومت فشاری بالا در مقایسه با سایر تحقیقات بوده و روند افزایش

^۴ Ordinary Portland cement (opc)

^۵ Land fill

^۶ Sordid soil

مقاومت آن بالا باشد به گونه‌ای که بتوان از آن در موارد خاص به عنوان ماده با مقاومت بالا استفاده کرد [۳۳].

با توجه به نکات مذکور در پژوهش حاضر به مطالعه تأثیر ذوب و یخبندان بر رفتار خاک‌های آلوده‌ی تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است.

۳-۱ فصل بندی پایان نامه

در فصل دوم نخست مطالبی چکیده راجع به خاک‌های رسی و روش‌های تثبیت آن‌ها و همچنین آسیب‌های ناشی از این خاک‌ها در مقابل سیکل ذوب و یخبندان و اثرات زیست محیطی خاک‌های آلوده بیان می‌شود.

در فصل سوم به معرفی مواد و دستگاه‌های مورد استفاده و توضیح نمونه‌سازی و روش آزمایش پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم به انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی همراه تجزیه و تحلیل، سپس تاثیر عوامل گوناگون نظیر نوع کانی و غلظت ماده شیمیایی بررسی می‌گردد.

در فصل پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای پژوهش‌های بعدی بیان می‌شود.

فصل دوم

مروری بر متون فنی

۱-۲ مقدمه

درفصل پیش رو نخست مطالبی چکیده راجع به خاک‌های رسی و روش‌های تثبیت آن‌ها و همچنین آسیب‌های ناشی از این خاک‌ها در مقابل سیکل ذوب و یخبندان، منابع آلودگی، روش‌های اصلاح خاک‌های آلوده، اثرات زیست محیطی خاک‌های آلوده و ... بیان می‌شود.

۲-۲ خاک

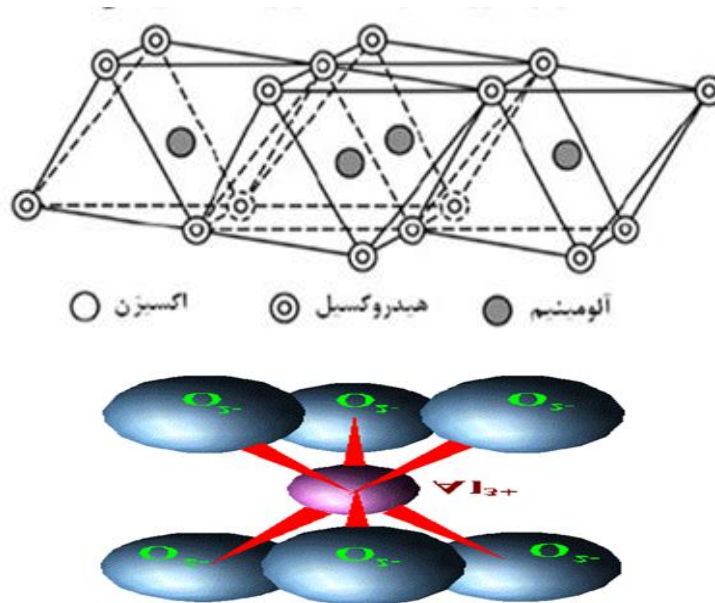
خاک مطمئن‌ترین قسمت پوسته جامد زمین را تشکیل می‌دهد که به‌صورت پوششی سست و کم ضخامت سنگ‌هایی را که هنوز تخریب نشده‌اند می‌پوشاند. ضخامت این پوشش (خاک) در شرایط عادی ۰.۵ تا ۲ متر است. این قشر نازک در واقع بین جو (اتمسفر) و قسمت سخت زمین که هنوز تحت تاثیر عوامل جوی واقع نشده و تخریب نگردیده (لیتوسفر) قرار گرفته‌است. به‌طور کلی از دیدگاه خاک‌شناسی به ذرات کوچکتر از دو میلی‌متر خاک اطلاق می‌شود.

۳-۲ رس

رس‌ها شامل مواد و کانی‌های ریزاندازه، طبیعی و با منشأ زمین و در واقع شامل فرآورده‌های حاصل از هوادهی، تغییرات حرارتی و رسوبی می‌باشند. از نظر کانی‌شناسی رس‌ها درمیان ترکیبات معدنی، دارای کوچکترین اندازه هستند. دانشمندان علوم مهندسی و خاک، اندازه ذرات رس را کمتر از ۴ میکرومتر تعریف کرده‌اند در حالی که دانشمندان رس‌شناس اندازه ۲ میکرومتر را به عنوان حد بالایی اندازه رس‌ها قائل هستند. به‌طور کلی رس‌ها را می‌توان به عنوان (سیلیکات‌های آلومینیوم آبدار) شناخت که در برخی از آنها آهن و منیزیم جایگزین آلومینیوم شده و در برخی عناصر قلیایی و قلیایی خاکی جایگزین شده‌است. ترکیب معدنی رس‌ها تابع فراوانی نسبی و نوع کانی‌های رسی موجود در آن می‌باشد. گاه مقادیر بسیار کمی از یک نوع کانی رسی خاص، اثر بسیار مهمی بر روی ویژگی‌های آن دارد.

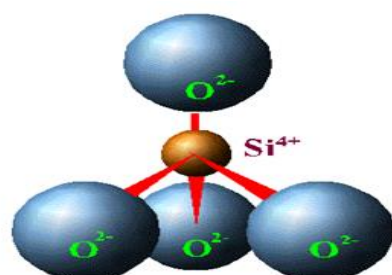
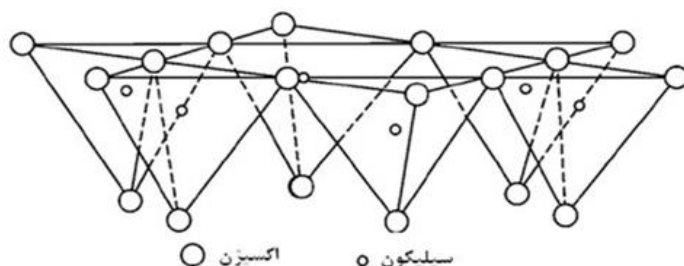
۲-۳-۱ ساختمان رس ها و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن ها

ساختار اتمی کانی های رسی شامل دو نوع واحدهای ساختمانی است که ورقه های هشت وجهی و چهار وجهی نامیده می شوند. ورقه های هشت وجهی شکل (۱-۲) متشکل از گروه های اکسیژن و هیدروکسیل است که در میان آن ها اتم های آلومینیوم، آهن و منیزیم وجود داشته و نوعی آرایش هشت وجهی به آن می دهد. وقتی آلومینیوم با سه ظرفیت مثبت در میان این هشت وجهی ها قرار می گیرد، در این صورت ماده معدنی را دی اکتاهدرال (dioctahedrol) می نامند.



شکل (۱-۲): ورقه های اکتاهدرال (هشت وجهی) [۳۱].

وقتی عنصر منیزیم که دارای دو بار مثبت است در مرکز هشت وجهی قرار می گیرد، هر سه جایگاه پر شده و ساختمان آن به تعادل می رسد. ماده معدنی را در این حالت تری اکتاهدرال (terioctahedral) می نامند.



شکل (۲-۲) : ورقه‌های تتراهدرال (چهاروجهی) [۳۱].

خاک‌های رسی در اغلب نقاط خصوصا مناطق خشک و نیمه خشک یافت می‌شوند. خاک‌های رسی صنعتی به چند دسته تقسیم می‌شوند که یکی از آن‌ها بنتونیت می‌باشد [۳۱]. یکی از راه‌های عمل‌آوری و افزایش شاخص خمیری خاک افزودن بنتونیت با درصد مناسب به این مصالح ریزدانه است. بنتونیت یک کانی رسی با خصوصیات انبساطی است که در اثر دگرسانی خاکسترهای آتش‌فشانی به وجود آمده است. این رس از نظر ساختمانی شبیه مونت‌موریلونیت می‌باشد یعنی دارای یک ساختمان سه لایه‌ای است که در آن یک لایه آلومینای ۸ وجهی بین دو لایه سیلیکای ۴ وجهی قرار می‌گیرد [۳۲].

علت استفاده از بنتونیت این است که اولاً بنتونیت به دلیل توانایی‌اش در انبساط و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک‌ها دربرآورده کردن این اهداف موثر است زیرا در تماس با آب سریعاً تورم یافته و با تشکیل یک ماتریکس محکم سبب کاهش نفوذپذیری می‌گردد [۳۳].

ثانیاً از آنجا که مخلوط‌های خاک-بنتونیت در حالت خشک انقباض کمتری را تحمل می‌نمایند [۳۴]. مخلوطی از خاک به همراه بنتونیت به عنوان پوشش‌های آب بند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۵].

۲-۳-۲ جانشینی یونی در درون ذره رسی

طریق دیگری که به وسیله آن ذره رسی دارای بار الکتریکی منفی می‌گردد جانشین شدن یونی با ظرفیت کمتر به جای یونی با ظرفیت بیشتر است.

۲-۳-۳ تبادل کاتیونی

تبادل بین یک کاتیون در سطح مواد مبادله‌کننده فعال را تبادل کاتیونی می‌گویند. اگر چه مواد خاک به درجات مختلف در ایجاد نقاط تبادل کاتیونی نقش دارند اما این خصوصیت در غالب خاک‌ها در بخش رس و مواد آلی آن‌ها متمرکز است.

۲-۳-۴ ظرفیت تبادل کاتیونی^۸

فعل و انفعالات کاتیونی در خاک‌ها عمدتاً در مجاورت سطوح کلوییدهای رسی و ذرات هوموس یا میسل‌ها صورت می‌گیرد. هر میسل ممکن است از هزاران نقطه یا بار الکتریکی منفی تشکیل شده‌باشد که با جذب کاتیون‌ها خنثی می‌گردد. بارهای منفی در سطح میسل‌ها در خطوط مرزی متمرکز گشته و دارای حداکثر قدرت جذب کاتیونی می‌باشند. جذب کاتیون‌ها موجب خنثی شدن این بارهای منفی می‌گردد. کاتیون‌های تبدالی به علت هیدراته بودن و کشیده شدن از طریق ملکول‌های آب دائماً در اطراف نقاط تبدالی در حال دوران یا حرکت رفت‌وبرگشت می‌باشند.

۲-۳-۵ تبادل آنیونی

قابلیت استفاده آنیون عمده نیترات، سولفات و فسفات توسط گیاه تا حد زیادی بستگی به معدنی شدن مواد آلی خاک دارد. بر روی هم دو آنیون فسفات و سولفات از آنیون‌های معدنی هستند که غالباً در تبادل خاک‌ها شرکت دارند.

۲-۳-۶ منشا ظرفیت تبادل آنیونی

نقاطی که تبادل آنیونی انجام می‌دهند در اثر جذب هیدروژن یا پروتون به وسیله هیدروکسیل‌های سطح رس به وجود می‌آیند. گیبسایت یک رس اکسیدی می‌باشد که از یک آلومینیوم که به وسیله

^۸ Cation exchange capacity

شش یون هیدروکسیل احاطه شده تشکیل گردیده است. در شرایط معمولی و اسیدی خاک‌های تروپیک که کاملاً هوازدگی پیدا کرده‌اند یون‌های هیدروکسیل اتم‌های هیدروژن (پروتون) را جذب می‌نمایند.

۲-۳-۷ ظرفیت تبادل آنیونی^۹:

هر چه واکنش خاک قلیایی‌تر شود یا به عبارتی واکنش خاک بالاتر رود ظرفیت تبادل کاتیونی خاک افزایش می‌یابد و برعکس هر چه واکنش خاک پایین‌تر رود ظرفیت تبادل آنیونی افزوده می‌گردد [۳۱].

۲-۴ مروری بر مطالعات انجام شده

یکی از مشکلاتی که عموماً در پروژه‌های عمرانی با آن رو به رو هستیم کیفیت و خواص نامطلوب مهندسی خاک و بستر موجود است. برای پروژه‌هایی که در مکان‌هایی با مشکلات ناشی از خاک موجود قرار دارند، می‌توان از راه‌حل‌های زیر استفاده کرد:

۱- جا به جایی محل پروژه: اغلب در مورد پروژه‌های بزرگ نظیر راه‌ها و یا مکان‌های توسعه‌ای مقدور نمی‌باشد.

۲- طراحی سازه‌ای متناسب با شرایط در محل که ممکن است هزینه‌های پروژه را افزایش دهد.

۳- تعویض خاک بستر: این عمل با توجه به هزینه بالای عملیات خاک‌برداری و مسائل ترافیکی نیز هزینه بالایی دارد.

۴- تلاش برای بهسازی خاک موجود: این روش سبب می‌شود که هزینه‌های ناشی از سایر روش‌های بالا کاهش یافته و عملیات عمرانی پروژه را در زمان کمتری انجام دهیم.

۲-۵ طبقه‌بندی روش‌های بهبود کیفیت و مقاومت خاک

انتخاب یکی از روش‌های بهبود خواص مهندسی خاک به عوامل بسیاری وابسته است که می‌توان به چند نمونه زیر اشاره کرد:

۱- حجم و وسعت بهسازی مورد نیاز

^۹ Anion exchange capacity

۲- نوع خاک و خواص مهندسی و شرایط زهکشی

۳- هزینه و منابع مالی

۴- دسترس بودن تجهیزات مناسب و نیروی متخصص

۵- تاثیر زیست محیطی بر مکان های مجاور

۶- سازه ها و پروژه های عمرانی مجاور

۷- عمر طرح [۳۶].

۲-۶ مطالعات، داده ها و بررسی های ژئوتکنیکی

در کلیه تحقیقات مهندسی نیاز به جمع آوری داده ها، اطلاعات اولیه و پایه در خصوص منطقه مورد بررسی و مطالعه منطقه، مهندسین را به سمت بررسی و شناسایی در این خصوص سوق می دهد [۳۷]. در خصوص مطالعات و جمع آوری اطلاعات در زمینه مهندسی ژئوتکنیک و جهت بررسی خاک های مساله دار، گردآوری داده ها به روش های متعددی از جمله موارد زیر صورت می گیرد :

- اطلاعات زمین شناسی عمومی

- زمین شناسی مهندسی

- زمین ریخت شناسی^{۱۰}

- لرزه خیزی

- لرزه زمین ساخت

- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی

- داده های ژئوتکنیکی موجود

- تاریخچه ساختگاه

در خصوص بررسی های ژئوتکنیکی، بررسی های مورد نیاز شامل یک تا سه مرحله زیر است که ممکن است شامل همپوشانی هم باشند :

^{۱۰} Geomor phology

۱- بررسی‌های مقدماتی

۲- بررسی‌های طراحی

۳- بررسی‌های کنترلی [۳۸].

۲-۷ خاک‌های مساله‌دار

از نقطه‌نظر مهندسی خاک‌هایی که احداث سازه‌ها بر روی آن‌ها مطمئن نبوده و تحت تاثیر شرایط آب‌وهوایی قرار دارند خاک‌های مساله‌دار گفته می‌شوند. به طور کلی در برخی از توده‌های خاک‌های زیرسطحی، افزایش رطوبت و یا اشباع شدن موجب بروز پدیده‌های ویژه‌ای می‌شود که بعضاً می‌تواند موجب بروز خسارت عمده در پروژه‌های عمرانی گردد. این خاک‌ها در غالب خاک‌های مساله‌دار طبقه‌بندی می‌شوند. که مثال‌های بارز آن خاک‌های آماسی و متورمشونده، خاک‌های واگرا و خاک‌های رمبنده هستند [۳۹،۴۰].

در یک طبقه‌بندی کلی از خاک‌های مساله‌دار، خاک‌هایی که ساخت‌وساز و احداث سازه‌های گوناگون مهندسی بر روی آن‌ها با اطمینان نبوده و تحت شرایط مختلف و رفتار مختلف و گاه غیرقابل پیش‌بینی از خود نشان می‌دهند را می‌توان به گروه‌ها یا دسته‌های زیر تقسیم کرد :

خاک‌های واگرا، خاک‌های رمبنده، خاک‌های روانگرا، خاک‌های حل‌شونده، خاک‌های متورمشونده [۳۸].

۲-۷-۱ خاک‌های واگرا

خاک‌های واگرا خاک‌هایی هستند که در آب‌هایی با غلظت پایین نمک به راحتی شسته می‌شوند [۳۹].

این رس‌ها معمولاً دارای مقادیر بالای یون سدیم در کاتیون‌های جذبی خود می‌باشند. واگرایی، یک پدیده پیش‌رونده می‌باشد که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع شده و به تدریج گسترش می‌یابد.

نقطه شروع پدیده واگرایی می‌تواند ترک‌های حاصل از انقباض، نشست نامساوی و یا ترک‌های

هیدرولیکی باشد. پدیده واگرایی و اهمیت شناخت آن در طرح‌هایی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های

آبرسانی که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد.

خاک‌های واگرا در انواع مختلف اقلیم‌ها و در مناطق مختلف جهان نظیر استرالیا، برزیل، ایران و ایالات متحده آمریکا به وفور وجود دارد. پدیده واگرایی دارای ماهیت فیزیکی- شیمیایی است که عمدتاً از نوع کانی‌های خاک و خصوصیات شیمیایی آب منفذی خاک متأثر می‌گردد. تجربیات گذشته نشان می‌دهند که عمده کانی تشکیل‌دهنده خاک‌های واگرا مونت‌موریلونیت‌ها می‌باشند. بر اساس تاثیر آب منفذی بر روی رفتار واگرایی خاک، می‌توان گفت که هر گاه یک خاک واگرا در معرض آب قرار گیرد، ذرات رس ممکن است از هم جدا گردیده و به صورت معلق درآیند. به همین دلیل شکل‌گیری پدیده واگرایی می‌تواند باعث شکل‌گیری پدیده پایپینگ^{۱۱} در سدهای خاکی، فرسودگی و تخریب جاده‌ها و کانال‌های آبرسانی و تخریب پی سازه‌ها گردد [۴۱].

شناسایی خاک‌های واگرا شامل دو دسته می‌گردد که یکی شناسایی صحرائی و دیگری شناسایی به کمک آزمایش می‌باشد [۴۲].

شناسایی اولیه (صحرائی) خاک‌های واگرا در بازدیدهای مقدماتی از محل و در ضمن بررسی‌های اولیه زمین‌شناسی در سطح منطقه صورت می‌پذیرد و شامل موارد زیر می‌باشد:

- جزء خاک‌های رسی با حداقل ۱۰٪ رس
- جزء گروه‌های CH، CL
- دارای رنگ قهوه‌ای، قرمز، زرد و خاکستری
- قابل تشخیص در زمین‌های دارای شیب به دلیل فرسایش سریع، بریدگی‌های بسیار عمیق در سطح زمین بر اثر بارندگی.

همچنین شناسایی خاک‌های واگرا در آزمایشگاه به کمک آزمایش‌هایی نظیر موارد زیر صورت می‌گیرد:

- آزمایش هیدرومتری
- آزمایش تعیین نمک‌های محلول

^{۱۱} piping

- آزمایش جریان سطحی در کانال‌ها

- آزمایش شاخص واگرایی

- آزمایش پین هول^{۱۲}

- آزمایش استوانه چرخان

- آزمایش کرامب^{۱۳}

- آزمایش تورم آزاد

۲-۷-۱-۱ مشکلات خاک‌های واگرا

عمده‌ترین مساله در این نوع از خاک‌ها پدیده آب شکستگی است. و مهم‌ترین عوامل غلظت یون سدیم در آب منفذی می‌باشد. خاک‌های واگرا در اثر بارندگی به شدت دچار فرسایش می‌شوند و بریدگی‌های بسیار عمیق و مشخصی در سطح زمین ظاهر می‌کنند.



شکل (۲-۳) : فرسایش بر اثر پدیده واگرایی [۳۸].

۲-۷-۱-۲ راهکارهای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های واگرا

برای مقابله و بهسازی این خاک‌ها به دو روش می‌توان عمل کرد :

^{۱۲} pinhole
^{۱۳} crump

۱- اقداماتی پیش از ساخت و ساز شامل :

- تثبیت با آهک، گچ یا سیمان

- برداشتن خاک واگرا و احداث زی زمین

- تثبیت بوسیله رزین‌های طبیعی و مصنوعی

- ایزوله کردن مجاری آب و فاضلاب

- تعویض خاک

۲- روش‌هایی بعد از احداث سازه شامل :

- پر کردن شکاف‌ها و حفره‌ها با مخلوط سیمان و خاک

- تزریق آهک جهت بهبود پارامترهای خاک

- استفاده از روش زیر شمع‌زنی

۲-۷-۲ خاک‌های رمبنده

رمبندگی به ریزش ناگهانی خاک در اثر از دست رفتن مقاومتی که عامل پیوند دهنده ذرات خاک محسوب می‌شود گفته می‌شود. میزان رمبندگی وابسته به تخلخل اولیه خاک است. ذرات بعضی از خاک‌ها نظیر خاک‌های لس^{۱۴}، رس‌های متخلخل و رسوبات آبرفتی در مناطق کم آب، در حالت غیر اشباع دارای ساختاری تقریباً پایدار هستند، اما وقتی که خاک اشباع می‌شود، این ساختار از میان رفته و توده خاک ناپایدار^{۱۵} می‌شود. در مواردی نیز این پدیده صرفاً با افزایش رطوبت خاک و قبل از آنکه اشباع گردد به وقوع می‌پیوندد. این‌گونه خاک‌ها در عین حال که در آزمایش نفوذ استاندارد مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند، به ظاهر خاک‌هایی مقاوم می‌باشند و در حالت عادی، حتی در صورت ایجاد ترانشه‌هایی نسبتاً قائم و عمیق در آن‌ها ممکن است پایداری خود را از دست ندهند [۳۸،۳۹،۴۰،۴۲].

^{۱۴} loess

عوامل موثر و ویژگی‌های اصلی که باعث می‌شود خاک خصوصیات رمبندگی از خود نشان دهد شامل موارد زیر می‌باشد :

۱- میزان نشست تدریجی یا ناگهانی تحت اثر باری بحرانی در رطوبت طبیعی خاک

۲- میزان نشست تدریجی یا ناگهانی تحت اثر باری بحرانی در حالت اشباع

آزمایش بارگذاری صفحه نیز روش مفیدی جهت ارزیابی تراکم‌پذیری و بار بحرانی است. که تحت آن نشست ناگهانی به وقوع می‌پیوندد. این ارزیابی در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه آزمایش تحکیم انجام می‌گیرد. بنابراین شناسایی خاک‌های رمبنده را می‌توان بر مبنای زیر دسته بندی نمود :

- آزمایش‌هایی بر مبنای آزمایش تحکیم

- بررسی دانسیته خاک به کمک آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی

- بررسی دانه‌بندی خاک

- بررسی حدود اتربرگ

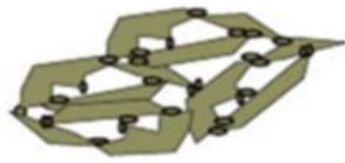
- بررسی تراکم خاک

- بررسی وزن مخصوص خاک

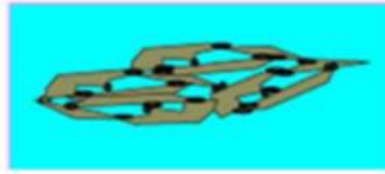
- بررسی تخلخل خاک

۲-۷-۱-۲ مشکلات خاک‌های رمبنده

ایجاد خسارات ناشی از رمبندگی در سازه‌ها که معمولا در اثر جریان یافتن آب و اشباع شدن خاک بستر به وقوع می‌پیوندد. معمولا به صورت نشست‌های بستر، ترک خوردگی نامنظم کف‌ها، دیوارها و غیره نمایان می‌گردد.



(الف) خاک رمنده پیش از تماس با رطوبت



(ب) خاک رمنده پس از غرقاب شدن

شکل (۲-۴) : ساختار خاک رمنده [۳۸،۹۵].



شکل (۲-۵) : وقوع پدیده رمندگی [۳۸].

۲-۲-۷-۲ راهکارهایی برای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های رمنده
از جمله بهترین تکنیک‌ها و روش‌های مختلف برای مقابله با خاک‌های رمنده می‌توان به موارد زیر
اشاره کرد :

- ۱- جمع‌آوری، تراکم و تعویض خاک
- ۲- پایدارسازی شیمیایی و تزریق
- ۳- جمع‌آوری خاک‌های حساس به رطوبت
- ۴- استفاده از شمع‌ها
- ۵- جلوگیری از تر شدن
- ۶- پیش‌تر شدگی
- ۷- تر شدگی کنترل شده
- ۸- تراکم دینامیکی
- ۹- تراکم با انفجار

۲-۷-۳ خاک‌های متورم شونده

خاک‌های متورم‌شونده بخش وسیعی از خشکی‌های جهان را پوشش داده و همواره باعث بروز خسارات گسترده‌ای شده‌اند. این خاک‌ها در ایران نیز وجود داشته و سبب بروز دشواری‌ها و ایجاد خسارات عمده به سازه‌ها شده‌اند. خاک‌های آماسی خاک‌هایی هستند که در اثر افزایش رطوبت، تغییر حجم افزایشی در خور توجه از خود بروز می‌دهند. بهترین تعریف از پدیده تورم عبارت از واکنش فیزیکی-شیمیایی خاک و محیط است که مقدار تورم در آن بستگی به شدت نیروهای جاذبه و دافعه میان ذرات خاک دارد. خاک‌های متورم‌شونده نسبت به رطوبت بسیار حساس می‌باشند. لذا با جذب رطوبت از آب تحت‌الارضی و یا آب نشتی و حتی رطوبت ناشی از گیاهان و فضاهای سبز مجاور سازه سریعاً متورم می‌شوند [۳۸،۴۰،۴۲،۴۴].

خاک‌های مستعد تورم شامل کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت‌ها می‌باشند. از عوامل موثر در بروز پدیده تورم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- نوع کانی‌های رسی

- پیوند ملکولی بین ذرات

- تراکم ذرات خاک

- میزان حساسیت خاک به رطوبت

پدیده تورم پدیده برگشت‌پذیر است، یعنی خاک پس از کم شدن رطوبت منقبض می‌شود. لذا طبیعی است که ضمن بررسی تورم به انقباض نیز توجه شود. مقدار تورم تابع نوع کانی رسی و پیوند ملکولی موجود در آن نیز می‌باشد. به افزایش حجم خاک بر اثر گودبرداری آماس گویند. دانه‌های خاک در حین گودبرداری از یکدیگر جدا شده و فضاهای روزه‌ای ایجاد شده را هوا پر می‌کند. آماس از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\text{فرمول ۱-۱} [۳۸،۴۰،۴۲،۴۴] \quad \text{آماس (\%)} = \left[\frac{\text{حجم توده / وزن}}{\text{حجم جدا شده / وزن}} - 1 \right] \times 100$$

به کاهش حجم خاک بر اثر فشرده شدن، انقباض می گویند. که از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$\text{فرمول ۲-۱} [۳۸،۴۰،۴۲،۴۴] \quad \text{انقباض (\%)} = \left[1 - \frac{\text{حجم توده / وزن}}{\text{حجم فشرده شده / وزن}} \right] \times 100$$

روش دقیق و موثر شناسایی خاک های متورم شونده اساسا بر اساس آزمایش های آزمایشگاهی می باشد. اما برخی از مشاهدات صحرایی می تواند در تشخیص این گونه خاک ها موثر باشند. عمدتا هر خاکی که علائمی از انقباض و ترک خوردگی در شرایط خشک از خود نشان می دهد، قابلیت تورم در اثر جذب رطوبت را دارد. شناسایی خاک های متورم شونده عمدتا به دو روش مستقیم و غیر مستقیم انجام می شود. در روش مستقیم اندازه گیری تورم در آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه تحکیم و به روش تورم آزاد، تورم با سربار و تورم با حجم ثابت انجام می شود. در روش غیر مستقیم تورم زایی خاک با استفاده از رابطه تجربی و سایر خصوصیات خاک بررسی می شود [۳۸،۴۰،۴۲،۴۴].

از جمله روش های صحرایی تشخیص خاک های متورم شونده می توان به موارد زیر اشاره کرد :

- توپوگرافی
- وزن مخصوص و سختی خاک
- عمق آب های زیرزمینی
- تبخیر دمای محیط
- بارندگی
- رنگ خاک
- نبود الگوی زهکشی طبیعی

۲-۷-۳-۱ مشکلات خاک‌های متورم‌شونده

خاک‌های متورم‌شونده در بستر سازه‌های مهندسی سبک قرار می‌گیرند و باعث بالا آمدن کف‌ها و بعضاً جداره کانال‌ها، پوشش آسفالت جاده‌ها و بروز ترک در دال‌ها و دیوارهای ساختمان‌ها و نواحی درگیر با این خاک‌ها می‌شوند. در مواردی که نیروی تورم خاک خیلی زیاد نیست باعث بروز ترک و شکستگی در سازه‌های مهندسی می‌گردند که با گذشت زمان و عدم توجه، نگهداری و ترمیم صحیح باعث صدمات جبران ناپذیری می‌گردند.



شکل (۲-۶) : آثار مخرب خاک‌های متورم‌شونده. سمت راست بالا زدگی ناشی از تورم خاک. سمت چپ تورم و

شکست دیوار [۳۸].

۲-۷-۳-۲ راهکارهایی برای بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب خاک‌های متورم‌شونده

برای مقابله و بهسازی این خاک‌ها به دو روش می‌توان عمل کرد :

۱- اقدامات قبل از احداث سازه :

غرقاب کردن، کوبیدن خاک با رطوبت بیش از رطوبت بهینه، استفاده از بالشتک‌های ماسه‌ای زیر

فونداسیون، تثبیت خاک با سیمان و آهک، بارگذاری یکنواخت سازه، برداشتن خاک و احداث

زیرزمین، عایق‌بندی کف و اطراف سازه، عایق‌بندی خطوط آب و فاضلاب.

۲- روش‌های ترمیم بعد از احداث سازه :

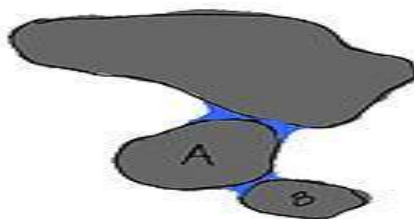
کنترل رطوبت و آب‌بند کردن اطراف سازه با استفاده از ژئوممبرین‌ها^{۱۶} و دیوارهای آب‌بند، تعبیه

سیستم زهکشی اطراف ساختمان جهت تخلیه آب، استفاده از شمع [۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲].

^{۱۶} jeomemberin

۲-۸ حرکت آب بین ذرات جامد خاک

ضریب نفوذپذیری از پارامترهای مهم در حیطة آب‌شناسی می‌باشد، این پارامتر در مدیریت منابع آب زیرزمینی کاربرد دارد از این رو رفتار خاک‌های تثبیت شده نیز به لحاظ نفوذپذیری آب در خاک، بسیار مهم می‌باشد. اگر مخلوط خاک تثبیت شده در مقابل آب دارای نفوذپذیری بالایی باشد، در جاهایی که برای گودبرداری استفاده شده یا در پروژه‌های راه‌سازی، حرکت آب در خاک بیشتر می‌شود. حرکت چرخ‌ها و بارگذاری و باربرداری مستمر ناشی از ترافیک در خاک عملکردی چون پمپ خواهد داشت، حرکت آب در خاک قفل و بست‌های بین دانه‌ای خاک تثبیت شده را می‌شکند و مقاومت به سرعت کاهش می‌یابد در صورت وجود آب، سیلیکات‌ها و آلومینات‌های کلسیم سیمان ترکیبات هیدراته‌ای را تشکیل می‌دهند که به نوبه خود خمیر سیمان سخت شده با استحکام زیاد را به وجود می‌آورد و مصالح مخلوط شده با سیمان را به خود می‌گیرد. واکنش هیدراته شدن با توجه به اینکه از سطح ذره سیمان به پیش می‌رود کند بوده و حتی ممکن است مرکز ذره اصلا هیدراته نشود از این رو روند هیدراته شدن به طور مداوم در حال کاهش است که خود بیانگر علت کاهش سریع در روند کسب مقاومت با گذشت زمان در مصالح تثبیت شده با سیمان می‌باشد تشکیل یا عدم تشکیل پیوند بین ساختار سیمان سخت شده و ذرات مصالح مورد تثبیت به ترکیب شیمیایی مصالح بستگی دارد [۴۵].



شکل (۲-۷): حرکت آب در بین دانه‌های جامد خاک و کاهش مقاومت [۴۶].

در تحقیقی که تاثیر مقدار رس در خاک‌های ماسه‌ای و رسی بر روی ضریب نفوذپذیری را مورد آزمایش قرار داد چنین نتیجه‌ای حاصل شد که رابطه مستقیمی بین مقدار رس موجود در ترکیب

خاک و ضریب نفوذپذیری دیده شده به گونه‌ای که با افزایش رس ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد [۴۷].

در تحقیق دیگری که بر روی اثر شیرابه بر ضریب نفوذپذیری و ساختمان خاک‌های رسی بنتونیتی انجام شده نشان داد که با افزایش ۴ تا ۶ درصد بنتونیت به خاک ماسه بد دانه‌بندی شده (sp) مقدار ضریب نفوذپذیری را می‌توان در حد استانداردهای آمریکا جهت ایجاد دیوار آب‌بند برای دور تا دور محل دفن زباله‌ها تعیین کرد [۴۸].

در تحقیق دیگری که تاثیر ترکیب دوغاب بنتونیت با ماسه بر روی ضریب نفوذپذیری انجام شده است در حالی که مشخصات نمونه‌ها به این گونه بوده است که محدوده تغییرات به نسبت تخلخل بین ۰.۶۷ تا ۳.۹۴ و مقدار بنتونیت اضافه شده به صورت وزنی در محدوده ۰.۶۱ تا ۷.۶۵ بوده است تاثیر به‌سزایی ترکیب دوغاب بنتونیت در کاهش ضریب نفوذپذیری دیده می‌شود [۴۹].

در تحقیقی دیگر که تاثیر اضافه کردن آب نمک به بنتونیت کوبیده شده بر روی ضریب نفوذپذیری انجام شده این نتیجه حاصل شد که اگر جرم حجمی خشک بنتونیت کم باشد با افزایش نمک محلول در آب مقدار ضریب نفوذپذیری هم افزایش می‌یابد [۵۰].

تعیین میزان نشست، اضافه فشار آب و نحوه اتلاف این فشار در فرآیند تحکیم خاک‌های ریزدانه از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین معقولهایی است که مهندسی ژئوتکنیک به محاسبه آن پرداخته‌اند و تا کنون نیز ذهن آنان را مشغول ساخته است. اولین بار در سال ۱۲۲۳ ترزاقی ساده‌ترین و کارآمدترین معادله تحکیم یک بعدی خاک‌های ریزدانه را با در نظر گرفتن مفروضاتی همچون یک بعدی بودن تحکیم، تراکم ناپذیر بودن آب، همگن و اشباع بودن خاک، تغییر شکل شبکه جامد خاک به صورت خطی، برقرار بودن قانون دارسی و همچنین در نظر گرفتن انتقال کل سربار اعمالی به آب در لحظه اول بارگذاری به صورت معادله ذیل بیان نمود [۵۱].

فرمول ۲-۳ [۵۲]

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$$

در این رابطه u اضافه فشار آب حفره‌ای، C_v ضریب تحکیم، z عمق و t زمان، Mv ضریب فشردگی پذیری حجمی و γ وزن مخصوص آب می‌باشد.

رندالیک (۱۲۳۱)، تئوری تحکیم یک بعدی ترزاقی را به حالت سه بعدی تعمیم داد، مشروط بر آنکه تغییر شکل‌های خاک، یک بعدی و جریان‌های آن سه بعدی باشد [۵۲].

بایوت (۱۲۹۱)، اولین محقق بود که توانست تئوری تحکیم را تبیین کند تا ماهیت سه بعدی جریان‌ها و تغییر شکل‌های خاک را مطرح سازد [۵۳].

از آنجایی که این تئوری افت اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییر شکل‌های خاک را به طور همبسته^{۱۷}

تحلیل می‌نماید، در مهندسی ژئوتکنیک به تئوری تحکیم همبسته موسوم است. در سال ۱۲۹۹

اسکمپتون با معرفی در پارامتر فشار آب حفره‌ای A و B توانست تئوری یک‌بعدی تحکیم را در جهتی

تغییر دهد که با نتایج تجربی تحکیم سه بعدی تطبیق پیدا کند. در این روش مقدار فشار آب و

نشست محاسبه شده در روش معمولی در ضریبی مانند μ ضرب می‌شود تا فشار و نشست برای حالت

سه بعدی به دست آید. مقدار این ضریب وابسته به پارامترهای فشار آب حفره‌ای و نسبت ضخامت

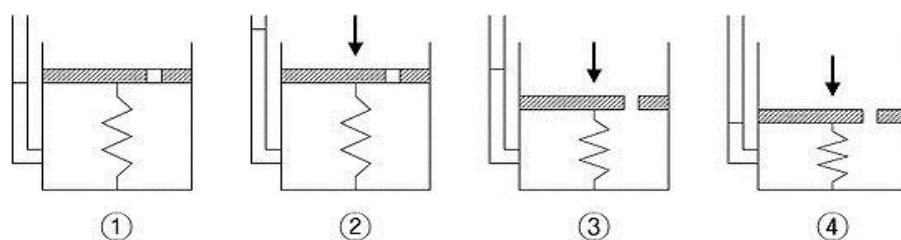
لایه خاک به عرض پی است. اسکمپتون برای یک خاک کاملاً اشباع پارامتر B را که معرف نسبت

اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده به سربار اعمالی می‌باشد را برابر یک بیان کرد و برای یک خاک

کاملاً الاستیک مقدار پارامتر A را $1/3$ به دست آورد. مقدار این پارامترها را می‌توان از تست سه

محوری به دست آورد [۵۴].

^{۱۷} coupled



شکل (۸-۲) : شبیه‌سازی آزمایش تحکیم [۴۶].



شکل (۹-۲) : دستگاه آزمایش تحکیم یک بعدی

در پژوهش‌هایی که تاکنون بر روی عوامل تاثیرگذار بر روی ضریب تحکیم انجام شده است صرفاً بر نوع کانی، گروه‌بندی خاک، عمق نمونه‌ها، فاصله نمونه موردنظر از رودخانه و... تاکید شده است. ولی نحوه تاثیر مواد افزودنی مثل سیمان روی خاک‌های ریزدانه مورد بررسی قرار نگرفته است [۵۵]. این پژوهش‌ها که بر روی انواع خاک‌ها با کانی‌های متفاوت صورت پذیرفته است نتایجی طبق جدول شماره ۱-۲ حاصل شده است.

جدول (۱-۲) نتایج پژوهش‌های گذشته [۵۶].

پژوهشگران	نوع خاک	حد روانی	حد خمیری	تغییرات C_v با فشار
لئوناردز و رامیا (۱۹۵۹) [۱]	Residual Clay	59	31	کاهش
	Glacial Silty Clay	28	8	افزایش
ساماراسینگ و همکاران (۱۹۸۲) [۲]	Sandy clay	27	14	افزایش
	Don Valley Clay	41	22	افزایش
	New Liskeard Clay	67	40	افزایش
	Bentonite	118	72	کاهش
	Kaolinite	-	-	افزایش
ناگاسه و همکاران (۱۹۸۴) [۳]	Kawasaki Clay	53/6	26/9	افزایش
سریدهاران و همکاران (۱۹۹۴) [۴]	Kaolinite	49	11/8	افزایش

در جدول شماره ۲-۱ شاهد تاثیر نوع کانی بر روی ضریب تحکیم می‌باشیم. البته در پژوهش‌های فوق درصد کانی‌های کائولینایت، ایلایت و مونت موریلونایت در خاک‌ها ذکر نشده‌است و صرفاً به نوع کانی تاکید شده‌است که به صورت کلی شاهد کاهش ضریب تحکیم با افزایش فشار در بنتونایت هستیم. در پژوهش دیگری که بر روی ضریب تحکیم در دانشگاه بنگلور هند انجام شده‌است، پژوهشگران تمرکز مطالعه خود را بر روی سه نوع کانی کائولینایت، ایلایت، و مونت موریلونایت قرار داده‌بودند که مشخصات خاک‌های آن‌ها طبق جدول شماره ۲-۲ می‌باشد [۵۶].

جدول (۲-۲) مشخصات ۳ نوع کانی رسی

مشخصات	کائولینایت	ایلایت	مونت موریلونایت
حد روانی	53	131	321
حد خمیری	32	78	58
درصد ماسه	0	0	0
درصد سیلت	71	36	2
درصد رس	29	64	98

نتیجه حاصل شده از پژوهش فوق بیانگر تاثیر مستقیم نوع کانی بر روی ضریب تحکیم بوده‌است به گونه‌ای که ضریب تحکیم به نسبت افزایش فشار در کائولینایت و ایلایت افزایش و در مونت موریلونایت کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که از این پژوهش به دست آمد این است که عوامل تاثیرگذار بر روی تغییرات ضریب تحکیم در دو نوع کانی کائولینایت و ایلایت بیشتر مکانیکی بوده‌است. این درحالی است که در مورد مونت موریلونایت بیشتر عوامل فیزیکی و شیمیایی تاثیرگذار بوده‌اند [۵۵].

در پژوهش دیگری که توسط احدیان و همکاران بر روی رس‌های با خاصیت خمیری کم و متوسط انجام شده‌است تاثیر فاصله نمونه‌ها از رودخانه بر روی ضریب تحکیم مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این پژوهش نمونه‌ها با فواصل مختلف و مکان‌های مختلف از رودخانه تهیه شده‌اند. سپس به کمک آزمایش تحکیم اقدام به محاسبه پارامترهای خاک کرده و ضریب تحکیم محاسبه شده‌است. مهمترین نتیجه‌ای که در این پژوهش به دست آمده این است که ضریب تحکیم با افزایش فاصله از رودخانه کاهش می‌یابد [۵۶].

جامدسازی و تثبیت از جمله تکنیک‌های تصفیه در مدیریت پسماند می‌باشد که طی آن پسماند خطرناک با مواد چسباننده (بایندر) مخلوط می‌گردد تا از روش‌های فیزیکی و شیمیایی از میزان آب‌شویی^{۱۸} آلاینده‌های پسماند به محیط‌زیست 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 مصارف ساخت‌وساز، مناسب باشد [۵۷،۵۸].

از خاک‌های رسی برای پوشش زمین‌هاتی دفن زباله و جلوگیری از انتقال شیرابه‌های حاصل از زباله به آب‌های زیرزمینی، استفاده می‌شود. فلزات سنگین بیشترین اهمیت را در آلودگی حاصل از زباله‌های شهری و صنعتی دارند. رفتار آن‌ها در خاک‌های رسی تحت تاثیر فرایندهای جذب، واجذبی و رسوب‌گذاری است [۵۹].

نتیجتاً می‌توان گفت ترکیب رس حساس با خاک موجود در محل دفن زباله باعث آب‌بندی شدن محل می‌شود زیرا مونت‌موریلونیت دارای لایه دوگانه کاملاً توسعه یافته‌است که توانایی هیدراته‌شدن آن را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود بیشترین پتانسیل تغییر حجم را داشته‌باشد. وقتی مونت‌موریلونیت با شیرابه که حاوی فلزات سنگین است در تماس باشد، ضخامت لایه دوگانه تغییر کرده و توانایی هیدراته‌شدن آن نیز کاهش می‌یابد. در واقع ذرات رس دارای ساختار درهم شده و پولک‌های رسی نسبت به هم نزدیک‌تر می‌شوند، کاهش پتانسیل سطحی رس سبب ایجاد ساختار گوشه به سطح و گوشه به گوشه شده و در نتیجه تورم‌پذیری خاک کاهش می‌یابد [۶۰].

۹-۲ منابع آلودگی

- ۱- فاضلاب‌های صنعتی ۱۰۰-۱۵۰ مترمکعب در روز
- ۲- فاضلاب‌های انسانی ۵۰-۷۵ مترمکعب در روز تخلیه شده به آب‌های سطحی
- ۳- باطله‌های معادن قدیمی سرب
- ۴- دود آگزوز ماشین‌های سنگین و دود حاصل از سوزاندن صنعتی زغال

^{۱۸} Leaching

۵- معدن کاری و فرآوری سرب و ذخایر مرتبط با آن

۶- آب و غذا و استنشاق دود آلوده به سرب

۲-۱۰ آلاینده‌های فلزات سنگین

۱- اثر سرب در آلودگی محیط‌زیست

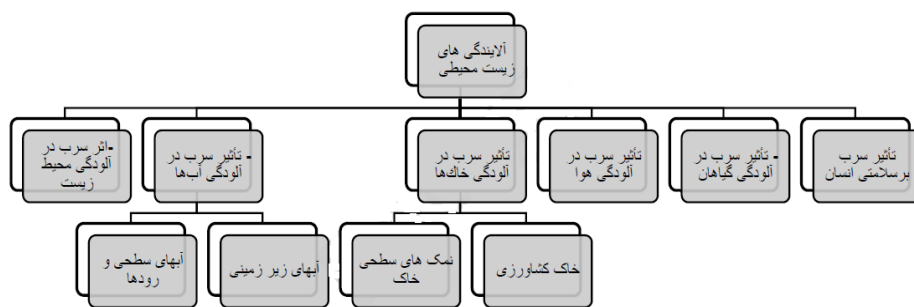
۲- تاثیر سرب در آلودگی آب‌ها

۳- تاثیر سرب در آلودگی خاک‌ها

۴- تاثیر سرب در آلودگی هوا

۵- تاثیر سرب در آلودگی گیاهان

۶- تاثیر سرب بر سلامتی انسان



شکل (۲-۱۰): آلاینده‌های صنایع سرب و روی [۶۱]

۲-۱۰-۱ اثر سرب در آلودگی محیط‌زیست

در سال‌های اخیر به آلودگی سرب با منشا صنعتی و غیرصنعتی توجه خاص شده‌است. بعضی از مطالعات نشان می‌دهند که سطح اقیانوس‌ها نسبت به اوایل پیدایش آن‌ها (حدود ۲ میلیون سال پیش) بیش از ۱۰ برابر به سرب آلوده شده‌است. همچنین ۵۰۰۰ سال است که بشر آب و خاک و هوا را با سرب آلوده می‌کند و خود انسان نیز از سه هزار سال پیش با کاربرد ظروف و وسایل سربی در معرض آلودگی به سرب بوده‌است [۶۱].

۲-۱۰-۲ تاثیر سرب در آلودگی آب‌ها

پراکندگی و آلودگی سرب در محیط‌زیست نه تنها هوا و خاک بلکه آب‌ها را نیز در بر می‌گیرد. امروزه بسیاری از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های سطحی در معرض آلودگی به سرب حاصل از صنایع، امور کشاورزی و استخراج معادن و دود حاصل از وسایل نقلیه موتوری هستند. در آب‌های آشامیدنی، سرب به ندرت بیش از حد مجاز افزایش می‌یابد و این هنگامی است که PH در آب هنگام عبور از لوله‌ها اسیدی بوده و در نتیجه مقداری از سرب موجود در لوله‌های آب را در خود حل کرده و غلظت سرب در آب را افزایش می‌دهد. در مناطقی که آب‌ها اسیدی است با افزودن مواد قلیایی PH آب را بالا برده و خطر رفع می‌شود. منابع آلوده‌کننده آب‌های زیرزمینی و سطحی شامل زه آب‌ها، جریان‌های ناشی از لیچینگ و جریان‌های نفوذی از سدهای باطله، پیت‌های معادن و عملیات معدن‌کاری می‌باشد. در معادن سرب شامل کانی‌های سولفوری در نتیجه اکسیداسیون سولفیدها، اسید تولید می‌شود که در این صورت آب اسیدی دارای قدرت بیشتری برای لیچینگ فلزات سنگین از این منابع و مناطقی که عبور می‌کند بوده میزان آلودگی افزایش می‌یابد [۶۲].

در شرایط طبیعی، معمولا سرب آب کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر می‌باشد و این حالتی است که حداکثر مقدار مجاز سرب در آب آشامیدنی در اغلب کشورهای جهان ۵۰ میکروگرم در لیتر پذیرفته شده است. فعالیت سرب نیز در آب‌های سبک حدود ۰.۵ میلی گرم در لیتر و در آب‌های سخت فقط ۰.۳ میلی گرم در لیتر می‌باشد و این تفاوت به واسطه وجود یون‌های بی‌کربنات در آب‌های سخت است [۶۳].

۲-۱۰-۳ تاثیر سرب در آلودگی خاک‌ها

کلارک سرب ppm ۱۵ است. سرب موجود در اتمسفر نیز به خاک افزوده می‌گردد. از منابع عمده تولید سرب در اتمسفر می‌توان به دود حاصل از صنایع، گاز خروجی از آگروز اتومبیل‌ها و بعضی از مواد شیمیایی مثل حشره‌کش‌ها اشاره کرد. ضمناً سرب توسط کودهای شیمیایی و سوپر فسفات‌ها نیز به خاک افزوده می‌شود. همچنین سربی که از طریق اتمسفر بر روی درختان وجود دارد توسط آب

باران یا مستقیماً در اثر تماس برگ‌های خشکیده با سطح زمین به خاک افزوده می‌گردد. معمولاً غلظت سربی که در سطح خاک در مناطق غیر آلوده وجود دارد حدود ۱۰-۲۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک خاک بوده و در خاک‌های کشاورزی به ۲-۲۰۰ میکروگرم بر گرم می‌رسد. تاثیر زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی بر روی خاک‌ها، معمولاً با فرسایش و آلودگی است. فرسایش ممکن است در اثر کندن و حذف نباتات در ارتباط با فعالیت‌های معدنی صورت گیرد. تحت چنین شرایطی رخدادهایی مانند ذوب برف ممکن است سبب فرسایش بیشتر خاک شود. آلودگی خاک‌ها ممکن است در اثر تخلیه مواد معدنی و باطله، زه آب‌ها، جریان‌های ناشی از لیچینگ و نفوذ از سدهای باطله صورت گیرد. از دیگر منابع آلودگی خاک‌ها میتوان به سوخت‌ها، مواد شیمیایی به کاررفته در فرآیند فلوتاسیون، محلول‌های بهداشتی و تمیزکننده بکار رفته و یا ذخیره شده در محل اشاره کرد. خاک‌های آلوده می‌توانند به عنوان منبع آلودگی برای آب‌های سطحی و زیرزمینی عمل کرده و در نتیجه منبع آلوده‌کننده دیگر مناطق باشند [۶۳].

۲-۱۰-۴ تاثیر سرب در آلودگی هوا

به طور کلی دو دوره کلی برای افزایش غلظت سرب هوا در نیمکره شمالی شناخته شده است. دوره اول حاصل از رشد سریع صنعت در قرون هجدهم و نوزدهم میلادی بوده است. دوره دوم حاصل از گسترش ترافیک و وسایل نقلیه موتوری پس از جنگ جهانی دوم است. موتورهای وسایل نقلیه جهت تبدیل سوخت معدنی به کار مفید، از اکسیژن هوا استفاده کرده و در مقابل نتایج احتراق را که همان باقیمانده ترکیبات شیمیایی اکسیژن و سوخت است وارد هوای اتمسفر می‌نمایند. تعداد گازهای خروجی بالغ بر ۵۰ نوع می‌باشد که اغلب آن‌ها مضر و آلوده‌کننده هستند [۶۴].

زمان ماندن سرب در هوا بستگی به اندازه ذرات آن و همچنین چگونگی سرب اضافه شده به بنزین دارد. زمان ماندن سرب در هوا را یک تا چهار هفته حدس می‌زنند. سربی که از اتومبیل‌ها حاصل می‌شود، در اتمسفر کنار جاده به صورت‌های مختلف ته‌نشین شده و به خاک افزوده می‌شود و مقداری از آن از راه تنفس وارد بدن جانوران و گیاهان می‌شود. غلظت سرب در کنار جاده‌ها و راه‌های ارتباطی

علاوه بر فاصله از جاده به عواملی نظیر حجم ترافیک، نزدیکی به جاده‌های دیگر، بادهای دائمی، فصل سال، زمان، روز و اوضاع جوی بستگی دارد [۶۳].

۲-۱۰-۵ تاثیر سرب و روی در آلودگی حیوانات و گیاهان

سرب که عنصری ضروری برای رشد و نمو گیاه نیست، توسط گیاهان جذب می‌شود و بدین طریق گیاه در معرض آلودگی به این عنصر سمی قرار می‌گیرد. در این حالت علاوه بر آسیب‌هایی که به خود گیاه می‌رسد، انسان‌ها و حیواناتی که از این گیاه تغذیه می‌کنند نیز در خطر آلودگی به سرب قرار می‌گیرند. گیاهانی که در معرض آلودگی به سرب هستند، در سه گروه درختان، علف‌های هرز و بوته‌ها و گیاهان زراعی قرار دارند. جذب سرب در گیاهان به دو طریق انجام می‌پذیرد:

۲-۱۰-۵-۱ جذب از راه شاخه و برگ

۲-۱۰-۵-۲ جذب از طریق ریشه

عوامل موثر در جذب سرب از خاک شامل ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، مقدار فسفات موجود در خاک، کود، سایر فلزات سنگین، حرارت، مواد آلی موجود در خاک، سن گیاه، نوع آن و بالاخره تغییرات محیط هستند. سرب بعد از جذب به راحتی درون گیاه حرکت می‌کند. این انتقال بستگی زیادی به حالت فیزیولوژیکی گیاه دارد. ابتدا سرب در دیواره سلولی ریشه مشاهده می‌شود. در همین زمان در برگ‌ها نیز با مقادیر کمتر وجود سرب ثابت شده‌است. به طور کلی عقیده بر این است که مقدار سرب خاک باید بالاتر از ۱۰۰۰ ppm باشد تا بتواند اثرات نامطلوب در گیاه باقی گذارد. با وجود دانستن موارد ذکر شده، متأسفانه سرب آن‌چنان گسترده به وسیله بشر استفاده شده‌است که مقدار سرب منتشرشده در اتمسفر، سالانه بالغ بر ۳۰۰۰۰۰ تن می‌باشد که به مراتب بیشتر از ۲۰۰۰۰ تن سرب آزادشده توسط فرآیندهای طبیعی است [۶۳].

۲-۱۰-۶ تاثیر سرب بر سلامتی انسان

سرب عنصری سمی است و فاقد هرگونه نقش بیولوژیکی می‌باشد. اثرات فیزیولوژیکی شناخته‌شده‌تر سرب، سرگیجه، کم‌خونی، از دست رفتن حس جهت‌یابی، اغماء و مرگ هستند. در واقع گفته

شده است که سرب باعث سقوط امپراطوری روم بوده زیرا عوارض مسمومیت در برخی از رهبران اواخر امپراطوری ظاهر شده است. این فرضیه با توجه به بالا بودن غلظت سرب در استخوان برخی از اشراف روم تقویت می شود. اثرات عصبی سرب طیف گسترده ای از کاهش عملکرد سلول های عصبی تا عفونت مغزی را در بر می گیرد.

۲-۱۱ راه های ورود سرب به بدن

۱- دستگاه گوارش

۲- دستگاه تنفس

۳- پوست و مخاط

۲-۱۲ بیماری های ناشی از قرارگیری در معرض سرب :

۱- نابینایی

۲- سرب از طریق جایگزین شدن به جای آهن در بدن باعث ایجاد کم خونی می شود.

۳- سرب از طریق جمع شدن در استخوان ها باعث کمبود کلسیم می شود.

۴- فشار خون

۵- یبوست

۶- اسکیزوفرنی (schizophrenia) [۷۹].

۲-۱۳ تکنیک اصلاح خاک های آلوده

به علت محدودیت های اجرایی و گاهی نبود شناخت کافی از تکنیک های اصلاح خاک های آلوده، بخشی

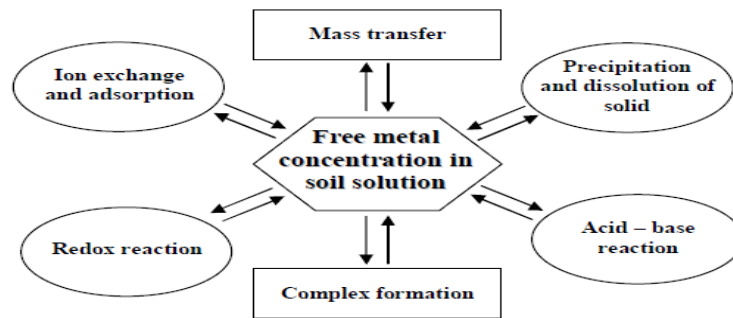
از این مشکلات هنوز پا بر جاست. شکل (۲-۱۱) واکنش های کنترل کننده غلظت فلزات سنگین در

خاک را نشان می دهد. با توجه به مکانیزم شکل (۲-۱۱) در برخورد با مواد آلاینده حاوی فلزات

سنگین چهار روش وجود دارد : رها کردن آلودگی در طبیعت و محدود نمودن شرایط استفاده از

محل های آلوده شده، اجرای عملیات غیر متحرک نمودن آلودگی در محل موردنظر و بازبینی مداوم به

منظور محدود نمودن انتقال آلودگی به محل‌های دیگر، انتقال خاک آلوده و نگهداری آن در محل‌های مخصوص دفن مهندسی زباله، و رفع آلودگی از خاک به وسیله روش‌های در محل یا خارج از محل، وجود دارد [۷۷،۷۸].



شکل (۱۱-۲) : واکنش‌های کنترل‌کننده غلظت فلزات سنگین در محلول خاک [۶۶].

۲-۱۳-۱ روش الکتروکینتیک ۱۹

پدیده الکتروکینتیک نخستین بار در سال ۱۸۰۸ میلادی بوسیله رئوس ابداع شد. این فرآیند در سال ۱۹۷۰ میلادی در کشور شوروی سابق برای تغلیظ فلزات معدنی در خاک‌های معادن به کار گرفته می‌شد، اما به عنوان یک روش تصفیه شناخته شده نبود. واژه الکتروکینتیک به معنی حرکت ذرات بر اثر میدان الکتریکی است [۶۷،۶۸].

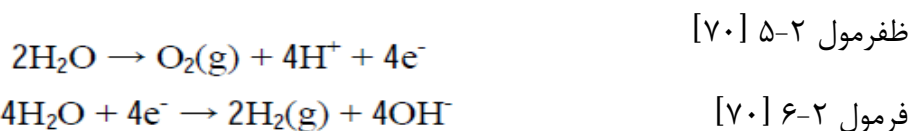
به نحوی که با اعمال جریان الکتریکی مستقیم (DC) با شدت کم (با اختلاف پتانسیل کم) به جفت الکتروود مثبت و منفی قرار گرفته در خاک می‌توان انتقال آب حفره‌ای به همراه فلزات سنگین از سمت قطب آند به سمت قطب کاتد را ملاحظه کرد. در ژئوتکنیک کلاسیک از این روش برای تحکیم خاک‌های رسی و همچنین مقاوم‌سازی الکتروشیمیایی خاک‌های دریایی نرم استفاده می‌شود [۶۹،۷۰].

بسته به مشخصات موادی که در میدان الکتریکی حاصل از جریان بین الکتروودها حرکت خواهد کرد، چهار مفهوم اصلی از الکتروکینتیک مشتق می‌شود که شامل الکترواسمزی (حرکت ملکول‌های آب بر اثر میدان الکتریکی)، انتقال الکترویونی (حرکت یون‌ها بر اثر جریان الکتریکی)، الکتروفورز (حرکت

^{۱۹} Electrokinetic method

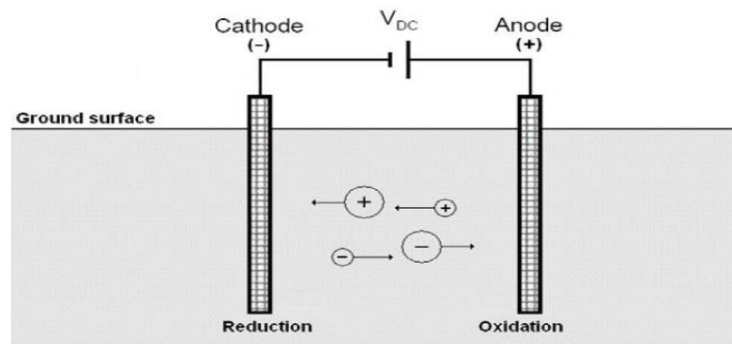
ذرات جامد بر اثر میدان الکتریکی) و الکترولیز (واکنش‌های شیمیایی مایع منفذی در اطراف الکترودها) می‌باشند. لازم به ذکر است بسیاری از کاربردهای ژئوتکنیکی روش الکتروکینتیک، بر مفهوم الکترواسمزی تکیه دارد، اگرچه در رفع آلودگی از خاک‌ها، فرآیندهای انتقال الکترویونی و الکتروفوروز نیز استفاده می‌شوند [۷۱، ۷۲].

در روش الکتروکینتیک، پس از نصب سلول‌های فلزی درون خاک و با وصل شدن جریان، الکترولیز آب در سلول‌های آند و کاتد آغاز شده که منجر به واکنش‌های اکسیداسیون و احیا به صورت معادلات ذیل، می‌شود.



واکنش‌های (۵-۲) و (۶-۲) اساس واکنش‌های الکتروکینتیک را تشکیل می‌دهند. این واکنش‌ها در محیط آند شرایط اسیدی و در محیط کاتد باعث ایجاد شرایط قلیایی می‌شوند. یون‌های H^+ تولید شده در آند و OH^- ایجاد شده در کاتد به سمت قطب مخالف خود حرکت می‌کنند. با توجه به اینکه در محیط مرطوب کاتیون‌ها هیدراته هستند، لذا آب نیز همراه فلزات سنگین به سمت کاتد کشیده خواهد شد (جریان آب از سمت آند به طرف کاتد). در این شرایط اگر کاتد به صورت لوله سوراخ‌دار درون خاک تعبیه شود، فلزات سنگین پس از رسیدن به کاتد ملکول‌های آب متصل به خود را آزاد می‌کنند. با فشار ایجاد شده، زهکشی آب از درون خاک به همراه کاهش غلظت مواد آلاینده صورت می‌پذیرد [۷۰].

مهمترین مکانیزم‌هایی که در فرآیند الکتروکینتیک سبب حذف آلودگی از خاک می‌شود، حرکت فلز سنگین به سمت آند و همچنین ایجاد جبهه اسیدی در خاک (ناشی از وقوع واکنش‌های اکسیداسیون و احیا) بوده که سبب انحلال اولیه تمام مواد آلاینده ساختگاه و خارج شدن آن‌ها از محیط می‌شود [۷۲].



شکل (۲-۱۲) : ساختار کلی روش الکتروکینتیک در بهسازی خاک [۷۳]

روش پالایش آلودگی در خاک به کمک جریان الکتروسیته، بعضا مشکلات عمده‌ای دارد. بر اساس مطالعات انجام شده، یکی از الزامات مهم در فرآیند پاکسازی به روش الکتروکینتیک ایجاد شرایط اسیدی در محیط خاک می‌باشد که برای انحلال و قابلیت حرکت فلزات سنگین در فاز محلول خاک ضروری می‌باشد. از طرفی زیاد بودن PH محیط (به صورت طبیعی و یا ناشی از واکنش‌های اطراف کاتد) سبب خواهد شد فلزات سنگین به صورت رسوب در خاک باقی مانده و عملا امکان جداسازی آن‌ها در خاک به روش الکتروکینتیک نباشد. محدودیت‌های دیگری نیز از جمله کم بودن یون هدف هدف در مقایسه با غلظت زیاد یون‌های غیر هدف، نیاز به هادی کردن سیال منفذی درون خاک به منظور حرکت آلاینده‌ها و همچنین ناهمگنی‌های موجود در خاک (مانند وجود قطعات سنگ درون خاک)، می‌تواند سبب کاهش بازده این روش شود [۷۰].

علاوه بر این، به خاطر وجود شرایط اسیدی در محیط اطراف آند و در نتیجه خوردگی سلول‌های فلزی، نیاز به تعویض مکرر این فلز است که موجب بالارفتن هزینه‌های اقتصادی این روش خواهد شد.

۲-۱۳-۲ روش بیولوژیک

روش بیولوژیک (گیاه بهسازی)، از جمله روش‌های ساده، موثر و بدون اثرات جانبی، برای اصلاح خاک‌های آلوده محسوب می‌شود که در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این روش از گیاهان مقاوم برای بهسازی و کاهش آلودگی در خاک‌های حاوی ترکیبات آلی و معدنی استفاده

می‌گردد. مهمترین موضوع در این روش، انتخاب مناسب گیاه با توجه به شرایط اقلیمی و همچنین نوع آلودگی خاک است [۷۴].

مکانیسم‌های متفاوتی در فن‌آوری گیاه بهسازی، برای کاهش غلظت مواد آلاینده در خاک استفاده می‌شوند که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱۳-۲-۱ گیاه‌انباشتی^{۲۰} و استخراج گیاهی^{۲۱}

فرآیند گیاه‌انباشتی و استخراج گیاهی متعارف‌ترین تکنیک مورد استفاده در روش گیاه بهسازی است. در این روش، ریشه گیاهان ابتدا عناصر آلاینده را از درون خاک جذب و آن‌ها را به انشعابات هوایی خود (شاخ و برگ گیاه) انتقال و در آنجا انباشته می‌کنند. بعد از رشد کافی گیاه و انباشتگی فلزات سنگین در آن‌ها، بخش‌های هوایی گیاه برداشت می‌شوند. سپس بخش‌های هوایی برای کاهش حجم سوزانده و تبدیل به خاکستر می‌شوند. در برخی موارد فلزات با ارزشی را می‌توان از خاکسترهای حاصل از این روش استخراج کرد که درآمد حاصل از آن بخشی از هزینه‌ها را جبران می‌کند. در روش استخراج گیاهی نیز برای حذف آلودگی از منطقه، یک گیاه مشخص چندین بار کاشت و برداشت شده تا در هر مرحله غلظت مواد آلاینده درون خاک کاهش یابد. روش کاشت گیاهی پدیده‌ای طولانی‌مدت بوده که برای کاهش آلاینده‌ها تا رسیدن به مقدار قابل قبول، نیاز به چرخه‌های کشت و برداشت زیادی دارد [۷۵].

۲-۱۳-۲-۲ ریشه‌پالایی^{۲۲}

در روش ریشه‌پالایی، گیاهان هیدروپونیک را در زمین‌های آلوده به فلزات سنگین، کشت می‌کنند. این گیاهان فلزات را جذب کرده و در ریشه و انشعابات خود تغلیظ می‌کنند. وقتی که گیاهان با آلاینده‌های حاوی فلز سنگین اشباع شدند ریشه یا تمام گیاه برداشت می‌شود [۷۶].

^{۲۰} phytoaccumulation

^{۲۱} phytoextraction

^{۲۲} rhizofiltration

۲-۱۳-۳ پایدارسازی گیاهی^{۲۳}

پایدارسازی گیاهی شامل جذب، فرونشست (ایجاد رسوب)، و کاهش توان جابجایی مواد آلاینده و جلوگیری از آبشویی آن‌ها به درون چرخه آب‌های زیرزمینی، بوسیله ایجاد پوشش گیاهی است. به بیانی دیگر پایدارسازی گیاهی، به معنای نگهداری، تثبیت و متوقف کردن حرکت مواد آلاینده درون خاک، توسط کشت و زرع است. به نحوی که با استفاده از یک گونه خاص گیاهی، آلاینده‌های موجود در خاک بوسیله اجزاء مختلف گیاه جذب سطحی یا ته‌نشین خواهند شد. بدین ترتیب ریشه‌ها سبب تثبیت آلاینده‌ها درون خاک شده و مانع از ورود و پراکندگی آن‌ها به محیط‌زیست خواهند شد [۷۴].

علی‌رغم مزیت‌هایی که انواع روش‌های گیاه بهسازی دارند این روش کاستی‌هایی هم دارد از قبیل طولانی بودن فرآیند بهسازی، ناکارآمدی در خاک‌ها و آب‌های با غلظت زیاد آلودگی و همچنین عدم امکان استفاده از آن‌ها برای حذف آلودگی در عمق‌های زیاد خاک می‌توان اشاره کرد. که بر حسب شرایط مختلف متفاوت بوده و صرفاً از طریق یک سری آزمایشات گسترده امکان‌پذیر می‌باشد [۷۷].

۲-۱۳-۳ تثبیت و جامدسازی (s/s)

تثبیت و جامدسازی (s/s) فرآیند مهندسی متداولی است که اغلب برای تسویه نهایی مواد زائد خطرناک موجود در زباله‌های خانگی و صنعتی، قبل از مرحله دفن آن‌ها انجام می‌شود. هدف از اجرای این روش تبدیل زباله‌های خطرناک به صورت بی‌خطر یا کم‌خطر بوده به صورتی که برای مناطق دفن زباله مشکل زیست‌محیطی ایجاد نکنند [۷۸].

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 شده و تا حدی باعث افزایش مقاومت زمین‌های دفن زباله از لحاظ سازه‌ای می‌شود [۸۱، ۸۲].

برای کاهش این تحرک و سمیت لازم است آلاینده از فاز محلول به فاز جامد تبدیل شود، زیرا در فاز محلول آلاینده به راحتی می‌تواند از طریق منافذ خاک حرکت کرده و منتشر شود و سبب آلودگی

^{۲۳} phytostabilization

بیشتر محیط‌زیست گردد. بر اساس مطالعات انجام‌شده، تثبیت آلاینده‌ها در خاک به وسیله مکانیسم‌های اصلاحی مختلفی شامل جذب (فیزیکی یا شیمیایی)، ایجاد ترکیبات کمپلکس و تشکیل رسوب عناصر در خاک صورت می‌پذیرد. به نحوی که نتیجه جامدسازی تغییر در خصوصیات فیزیکی-شیمیایی زباله‌ها، با هدف کاهش قابلیت تحرک آن‌ها و افزایش استحکام خاک باشد [۸۳].

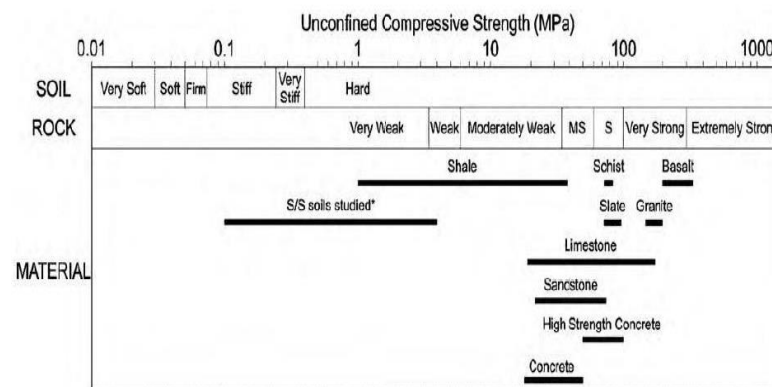
۲-۱۳-۳-۱ تثبیت و جامدسازی پایه‌ی سیمانی

در فرآیند تثبیت و جامدسازی نگهدارنده‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود که طبق آمارهای موجود سیمان بیشترین استفاده و ساده‌ترین نحوه اجرا را داشته و محصول آن معمولاً پایدارتر است [۸۴]. تثبیت و جامدسازی آلاینده‌ها به وسیله سیمان از طریق فرآیندهای مختلفی شامل تثبیت شیمیایی آلاینده‌ها (واکنش‌های شیمیایی و ایجاد ترکیبات کمپلکس بین محصولات هیدراتاسیون سیمان و مواد آلاینده)، جذب فیزیکی از طریق اتصال چسبیدن آلاینده‌ها روی محصولات هیدراتاسیون سیمان، و محصور کردن فیزیکی زباله از طریق جامدسازی و کم کردن نفوذپذیری خمیر سخت‌شده، صورت می‌گیرد. فرآیندهای اول و دوم تابعی از شرایط واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان بوده ولی فرآیند سوم، علاوه بر هیدراتاسیون سیمان و نحوه اندرکنش آن با مواد آلاینده، به وزن مخصوص، میزان تراکم، و ساختار فیزیکی خمیر حاصل نیز وابسته است [۸۵، ۸۶، ۸۱].

طی این فرآیندها، 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 و نفوذ آن‌ها به چرخه آب‌های زیرزمینی می‌شود [۸۷]. مسئله مهم در تثبیت و جامدسازی زباله‌ها به وسیله سیمان، تداخل کامل آن با اجزاء زباله و انجام صحیح واکنش هیدراتاسیون است. به طوری که طبق تحقیقات انجام شده برخی از انواع زباله‌ها هیدراتاسیون را افزایش و برخی کاهش می‌دهند [۸۸]. بنابراین سازگاری بین سیمان و زباله‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و در صورت عدم سازگاری سیمان و آلاینده بازدهی روش به شدت کاهش می‌یابد. این ناسازگاری‌ها از طریق رسوب محصولات هیدراتاسیون (کاهش گیرش) انحلال

نامطلوب کانی‌های کلینکر (کاهش توانایی سخت شدن)، افزایش امکان ایجاد ساختار کانی اترینگایت (ایجاد تورم و گسیختگی ساختار توده اصلاح شده)، و تشکیل ترکیبات نامطلوب جدید (مانند هیدروکسیدها، نمک‌های کلسیم و...)، قابلیت تاثیر سیمان برای بهسازی خاک آلوده را کاهش خواهند داد [۸۹]. در نتیجه در روش بهسازی با سیمان، دوام و پایداری زباله‌های اصلاح شده در دراز مدت باید بررسی شود. به این دلیل انجام یک سری آزمایشات اولیه شامل آزمایش مقاومت فشاری (برای تعیین پایداری دراز مدت شکل زباله)، آزمایش دوام (باهدف بررسی تعیین مقاومت نمونه در مقابل چرخه‌های خیس و خشک شدن و سیکل ذوب و یخبندان) و همچنین بررسی نفوذپذیری نمونه در مقابل آبشویی آلودگی محصول نهایی، برای تعیین کارایی این روش ضروری به نظر می‌رسد [۸۳].

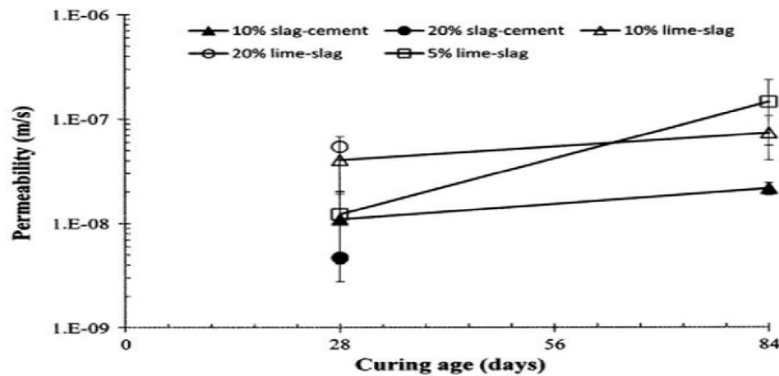
برای بررسی مقاومت خاک‌های آلوده جامد شده با سیمان، در گاهی مصالح تثبیت شده را با بتن مقایسه کرده‌اند. ولی نتایج حاصل شده به دلیل تفاوت ماهیت محصولات S/S با بتن، نمی‌تواند مناسب باشد. بازه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های جامد سازی شده با سیمان در محدوده ۰٫۱ Mpa و ۰٫۴ Mpa بوده که این رقم قابل مقایسه با خاک‌های سفت و یا سنگ‌های ضعیف مانند شیل می‌باشد. که همین مقدار مقاومت نیز بسیاری از مشکلات ژئوتکنیکی در سازه‌ها را برطرف خواهد کرد. [۹۰].



شکل (۲-۱۳) : بازه مقاومت فشاری محصولات S/S شده و مقایسه آن‌ها با سایر مواد و مصالح [۹۰].

با توجه به شکل (۲-۱۴) مشاهده می‌شود نفوذپذیری در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نسبت به مواد آلاینده تثبیت شده با آهک شرایط بهتری دارد. به طوری که از لحاظ نفوذپذیری و دوام و مقاومت

سیمان نسبت به آهک تثبیت کننده بهتری برای بهسازی خاک‌های آلوده می‌باشد [۹۰]. لازم به ذکر است که با توجه به شکل (۲-۱۴) باگذشت زمان نفوذپذیری اندکی افزایش یافته است [۹۱].



شکل (۲-۱۴) : تغییرات نفوذپذیری مصالح S/S شده با مواد مضاعف متفاوت [۹۱]

براساس تحقیقات پژوهشگران مختلف، به طور معمول حدود ۵ تا ۲۰ درصد سیمان برای جامد کردن زباله استفاده می‌شود. که مقادیر کمتر از ۵ درصد قادر به پوشش اجزاء زباله و ایجاد واکنش‌های لازم جهت تثبیت نخواهد بود [۷۸، ۸۱، ۸۳، ۹۱].

همچنین اضافه کردن مقدار زیاد سیمان (بیشتر از ۲۵ درصد) الزاماً نمی‌تواند مقاومت زیادی را ایجاد کرده و گاهی ممکن است با گذشت زمان شرایط لازم برای واکنش‌های مخرب مانند تشکیل کانی متورم‌شونده اترینگایت را فراهم کند که در نهایت موجب کاهش کارایی روش اصلاح خواهد شد [۹۰]. اثرات دمای زیر صفر بر روی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها تاثیر گذار است.

اعمال سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث تغییر ساختار خاک شده که این تغییر ساختار ناشی از چیدمان مجدد ذرات و افزایش تنش‌های بین پولک‌ها است. که در واقع سبب ایجاد تحکیم در خاک می‌شود. نوع کانی‌ها و اجزای موجود در خاک، نرخ یخ‌زدگی، و درصد رطوبت خاک عوامل مهمی بر رفتار خاک در طی سیکل‌های یخبندان و ذوب هستند. سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث تسریع در انتقال آب در خاک شده و بر باز توزیع و پخش مواد حل شده در خاک افزایش می‌دهد که این امر باعث تسهیل انتقال شیرابه‌های سمی و خطرناک به لایه‌های زیرین زمین شده و نهایتاً آب‌های زیرزمینی را آلوده می‌سازد [۹۲].

در حال حاضر، پاک‌سازی اولیه لجن‌های آلوده و پساب‌های حاوی فلزات سنگین قبل از دفن آنها، در بسیاری از کشورهای دنیا اجباری شده‌است [۹۳،۹۴].

با توجه به اهمیت زیست‌محیطی این موضوع و نیز وقوع آب و هوای سرد در اکثر شهرهای ایران و نیز مناطقی از آمریکا مانند آلاسکا، کانادا، روسیه و مناطق شمالی چین و ... پرداختن به تاثیرات ذوب و یخبندان بر رفتار ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست‌محیطی بنتونیت تثبیت شده و آلوده به فلز سنگین حائز اهمیت است.

فصل سوم

معرفی مواد، نمونه‌سازی و روش آزمایش

۳-۱ مقدمه

در گذشته روابط زیادی در مورد نشست تحکیمی خاک‌ها ارائه شد ولی اکثر این روابط برای خاک‌های طبیعی کاربرد دارد. و در خصوص خاک‌های اصلاح شده و تثبیت شده تحقیقات کمتری صورت پذیرفته است.

در این فصل ابتدا توضیحاتی راجع به حساسیت خاک‌های ریزدانه در مقابل رطوبت و سپس به معرفی مواد و دستگاه‌ها و توضیح روش آزمایش و نمونه‌سازی پرداخته می‌شود.

۳-۲ مبانی مختصر در رابطه با خاک رس

خاک رس یکی از انواع خاک‌های مساله‌دار محسوب می‌شود.

به طور کلی خاک‌های حساس به رطوبت به دو دسته تقسیم می‌شوند. خاک‌های رمبنده و تورم‌زا. زمانی که نمونه دست نخورده این نوع خاک‌ها اشباع و تحت آزمایش تحکیم قرار می‌گیرند، دو مدل رفتار از خود نشان می‌دهند. در خاک‌های رمبنده نسبت تخلخل کاهش می‌یابد، ولی در خاک‌های تورم‌زا، این نسبت افزایش پیدا می‌کند [۹۶].

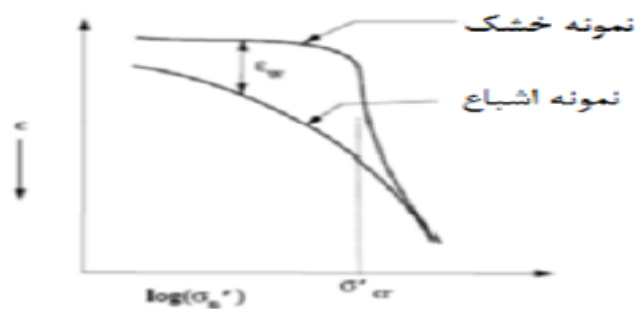
برای مشخص شدن ماهیت خاک از لحاظ رمبندگی و تورم‌زا بودن دو مدل آزمایش انجام می‌شود: آزمایش ادئومتر تک^{۲۴} و آزمایش ادئومتر دوگانه^{۲۵}.

۳-۳ آزمایش ادئومتر دوگانه

در این آزمایش دو نمونه یکسان در دستگاه تحکیم قرار داده می‌شود و بر روی آن بارگذاری می‌گردد. یک نمونه با درصد رطوبت طبیعی که معمولاً کم است و نمونه دیگر قبل از شروع آزمایش کاملاً اشباع شده و سپس با همان شرایط آزمایش می‌شوند.

منحنی تنش - تنجش برای هر دو نمونه ترسیم می‌شود. اگر خاک رمبنده باشد منحنی بدست آمده برای نمونه اشباع بسیار متفاوت از نمونه در حالت خشک می‌باشد.

^{۲۵} double oedometer



شکل (۱-۳) نتایج آزمایش ادنومتر دوگانه

اختلاف تنش بین دو منحنی، تنش رمبندگی ناشی از آب^{۲۶} - ϵ_w در آن تنش نام دارد. به طور کلی برای نمونه خشک تنش بحرانی^{۲۷} σ'_{cr} وجود دارد که در آن ساختار سست از هم می‌پاشد و در فراتر از آن، تنش دومنحنی همگرا می‌گردد.

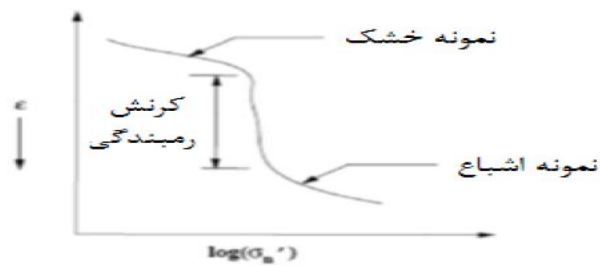
۳-۴ آزمایش ادنومتر تک

آزمایش ادنومتر تک مانند آزمایش ادنومتر دوگانه می‌باشد، تنها تفاوتش این است که این آزمایش بر خلاف ادنومتر دوگانه بر روی یک نمونه انجام می‌گیرد. که روند آن به شرح ذیل می‌باشد:

- نمونه دست نخورده با درصد رطوبت طبیعی در دستگاه تحکیم قرار می‌گیرد.
- سربار اندکی به نمونه اعمال می‌گردد. علت اعمال این سربار، جلوگیری از تورم احتمالی نمونه‌های دارای استعداد تورمزایی می‌باشد که احتمال تورم آن‌ها در اثر دست‌خوردگی وجود دارد.
- نمونه به تدریج بارگذاری می‌شود تا به تنش مورد انتظار در محل برسد.
- در تنش موردنظر نمونه اشباع می‌شود تا جایی که رمبندگی ناشی از آب مشاهده گردد.
- سپس بارگذاری نمونه تا مقدار تحکیم مجاز ادامه می‌یابد [۹۵].

^{۲۶} Hydro-collapse-strain

^{۲۷} $P_{i-collapsibility}$



شکل (۲-۳) نتایج آزمایش ادنومتر تک [۹۵].

۳-۵ تجهیزات آزمایش

تجهیزات آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM به شماره D۲۴۳۵ شامل تجهیزات بارگذاری، قالب تحکیم، سنگ‌های متخلخل، تجهیزات پرداخت نمونه، گیج اندازه‌گیری تغییر مکان با دقت ۰,۰۰۰۲ میلی‌متر و سایر تجهیزات فرعی مانند زمان‌سنج، کاردک، ترازو و ... می‌باشد [۹۸]. لازم به بیان است، در همه آزمایشات انجام شده در این پژوهش از کاغذ صافی استفاده شده است، بنابراین هم‌سنگ‌سازی^{۲۸} دستگاه و گیج اندازه‌گیری تغییر مکان بر اساس استاندارد ASTM به شماره D۲۴۳۵ الزامی است [۹۸].



شکل (۳-۳) تجهیزات هم‌سنگ‌سازی گیج اندازه‌گیری تغییر مکان و دستگاه تحکیم [۹۹].

۳-۶ مواد تحت آزمایش

۳-۶-۱ سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد.

جدول (۱-۳) مشخصات سیمان تیپ ۲

^{۲۸} calibration

مشخصه های فیزیکی						مشخصه های شیمیایی					نام مشخصه	
مقاومت فشاری kg/cm^2		زمان گیرش		انبساط اتوکلاو %	سطح مخصوص ص (بلین) cm^2/gr	C_3A %	IR %	L.O. I %	SO_3 %	Mgo %		
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه	نهایی ساعت	اولیه دقیقه	<0.8	>2800	<8	<0.75	<3	<3	<5	سیمان تیپ ۲
>315	>175	>100	<6	>45								طبق استاندارد ۳۸۹

۳-۶-۲ خاک بنتونیت

این خاک از زون بنتونیتی سمنان-ترود تهیه شده است. در بخش خاوری و شمال خاوری سمنان تا خاور ترود یک افق بنتونیتی در سنگ‌های ولکانیک هم‌ارز سازند کرج وجود دارد. این افق، کانسارهای رشم، سوسن‌وار و ترود به سن ائوسن را دربر می‌گیرد. که از لحاظ کیفیت بسیار مرغوب هستند.

۳-۷ آلاینده نیترات سرب

۳-۸ آزمایش‌های انجام شده

۳-۸-۱ آزمایش هیدرومتری

پس از تهیه خاک از محل مورد نظر، آزمایشات دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود اتربرگ و تعیین وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک طبق استاندارد انجام شد. به دنبال آزمایش هیدرومتری به منظور کامل شدن گراف، آزمایش دانه‌بندی با الک به صورت ذیل انجام گرفت.

۳-۸-۲ آزمایش دانه‌بندی با الک

برای انجام آزمایش دانه‌بندی خاک بنتونیت در سطح مناسبی پخش شد و بیشتر از ۲۰۰ گرم خاک برداشته و به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد خشک شد. بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت میزان ۲۰۰ گرم خاک بوسیله ترازو وزن شد و داخل الک نمره ۲۰۰ ریخته و با دقت شسته شد. دلیل شستن خاک این است که به علت چسبندگی بودن خاک رس ممکن است ذرات خاک به دانه‌های ماسه و دیگر ذرات بچسبند و دانه‌بندی درست انجام نشود. از این رو خاک تا زمانی که آب

زالال از زیر الک شود شسته شده و سپس ذرات به داخل ظرف مشخص ریخته و مجدداً به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار گرفت.

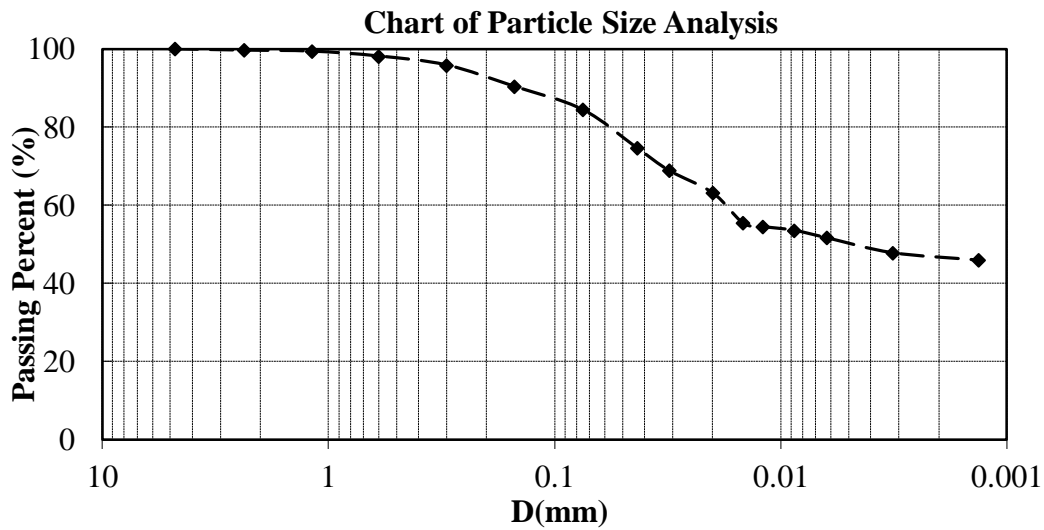


شکل (۳-۴) : خاک پس از شسته شدن

پس از خشک شدن، خاک تحت آزمایش دانه‌بندی با الک قرار گرفت که نتایج آن بصورت ذیل می‌باشد:



شکل (۳-۵) : نتیجه آزمایش دانه‌بندی



شکل (۶-۳) گراف آزمایش دانه‌بندی

۳-۸-۳ آزمایش حدود اتربرگ

به منظور تعیین حد روانی و خمیری آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد D۴۳۱۸ ، ASTM طی پنج مرحله تکرار انجام گرفت [۱۰۰]. سپس میانگین آن‌ها مطابق جدول ذیل به عنوان حد روانی، حد خمیری و دامنه خمیری انتخاب شد.

جدول (۲-۳) : مشخصات رس بنتونیت تحت آزمایش

وزن مخصوص (Gs)	حد روانی (%) (LL)	حد خمیری (%) (PL)	شاخص خمیری (%) (PI)	عبوری از الک ۲۰۰ (%)	طبقه بندی پونفاپد
۲,۷۸	۱۰۵	۳۶	۶۹	۱۶۹	CH



شکل (۷-۳) : تعیین حدود اتربرگ

قبل از شروع نمونه‌سازی میزان مصالح مورد نیاز جهت ساخت نمونه از این طریق محاسبه شد :

$$W_s = \frac{w}{1+w} \quad (1)$$

$$W_s = \gamma_d * v \quad (2)$$

$$v_s = \frac{w_s}{G_s * \gamma_w} \quad (3)$$

$$W_t = w_s + w_w \quad (4)$$

متغیرهای فوق به صورت ذیل تعریف می‌شوند :

v_s : حجم خاک خشک

v : حجم کل خاک

w_w : وزن خاک مرطوب

W_s : وزن خاک خشک

γ_d : وزن مخصوص خشک خاک

G_s : توده ویژه جامد خاک

W_T : وزن کل خاک

۳-۹ نمونه‌سازی

۳-۹-۱ ساخت نمونه بدون آلاینده

بیش از ۹۹٪ خاکی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت از الک نمره ۱۰ عبور داده‌شد، به دلیل چسبیده بودن ذرات خاک رس که باعث می‌شود ذرات خاک به هم چسبیده و به صورت کلوخه در بیایند، به منظور آماده‌سازی، ابتدا خاک از الک نمره ۱۰ عبور داده‌شد (به منظور همگن و یکدست شدن خاک) و پس از رطوبت زدن به میزان ۳۰٪ (رطوبت حد خمیری) برای همگن و ثابت ماندن رطوبت به مدت ۲۴ ساعت در داخل زیپ کیپ قرار گرفت.



شکل (۸-۳): آماده‌سازی خاک (خاک عبوری از الک نمره ۱۰ خمیری)
 شکل (۹-۳): خاک مرطوب (رطوبت حد

برای افزایش سرعت نمونه‌سازی یک قالب فلزی (مشابه حلقه فلزی داخل حباب تحکیم) از جنس برنج با همان ابعاد حلقه اصلی ساخته شد.



شکل (۱۰-۳): قالب فلزی ساخته شده

نمونه‌های بنتونیت در ۴ درصد مختلف سیمان ۱۰، ۵۰، ۲۰ و به روش خشک (اختلاط سیمان به صورت خشک با خاک رس بنتونیت در رطوبت حد خمیری) طبق استاندارد ساخته و در دولایه درون قالب تحکیم کوبیده شدند. سپس به دلیل محافظت در مقابل تغییرات رطوبت در داخل زیپ کیپ قرار گرفته و به مدت ۸ روز عمل‌آوری شدند. نمونه‌ها برای محاسبه میزان نشست و دیگر پارامترهای غیر مستقیم وابسته به آن در دستگاه تحکیم یک بعدی ASTM، D2435 قرار گرفتند.



شکل (۱۱-۳): نمونه‌های حاوی سیمان بعد از نمونه‌سازی
 شکل (۱۲-۳): قرار دادن نمونه‌ها در زیپ کیپ به منظور ثابت ماندن رطوبت.



شکل (۱۳-۳): قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه تحکیم

همچنین لازم به ذکر است که برای اشباع شدن نمونه‌ها به منظور جلوگیری از تورم خاک رس، پس از قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه و تراز کامل آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حالت اشباع و بدون اعمال بار قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان ذکر شده با اعمال تنش به نمونه‌ها آزمایش به صورت بارگذاری و باربرداری (اعمال یک چهارم بار در هر نوبت) به مدت ۱۰ روز انجام شد.

۳-۹-۲ ساخت نمونه با آلاینده

برای ساخت نمونه‌های حاوی آلاینده فلز سنگین سوسپانسیون‌هایی از بنتونیت و الکترولیت با نسبت ۱ به ۵ ساخته شد. محلول الکترولیت حاوی نترات سرب $Pb(NO_3)_2$ با غلظت‌های ۱۰، ۴۰، ۸۰ سانتی‌مول بوده که این نمونه‌ها به مدت سه مرحله ۶۰ دقیقه‌ای با فواصل زمانی ۹۰ دقیقه توسط همزن مخلوط شد تا کاملاً بلورهای سفید آلاینده و ذرات خاک در میزان آب مشخص مخلوط شوند.

در هر مرحله نسبت آب مقطر و خاک ثابت (۲۰۰ گرم خاک در ۱ لیتر آب مقطر) و میزان درصد آلاینده بر حسب سه غلظت متغیر بود.

جرم آلاینده بر حسب گرم :

میزان ۶,۶۲۴۲ گرم نیترات سرب برای نمونه حاوی ۱۰ سانتی مول آلاینده

میزان ۲۶,۴۹۶ گرم نیترات سرب برای نمونه حاوی ۴۰ سانتی مول آلاینده

میزان ۵۲,۹۹۳۶ گرم نیترات سرب برای نمونه حاوی ۸۰ سانتی مول آلاینده



شکل (۱۵-۳) : اضافه کردن خاک به مخلوط آب و آلاینده

شکل (۱۴-۳) : آلاینده نیترات سرب



شکل (۱۶-۳) : آماده شدن سوسپانسیون حاوی بنتونیت و الکترولیت با نسبت مشخص

لازم به ذکر است در ابتدا برای آماده کردن سوسپانسیون و شیک دادن مخلوط به منظور اختلاط بهتر از شیکر استفاده شد ولی به دلیل مناسب نبودن شیکر و همچنین مقاومت کم بطری‌های حاوی سوسپانسیون، با ترکیدن و ریختن مواد داخل بطری مواجه شده به همین علت در ادامه روند نمونه‌سازی از همزن برقی جهت اختلاط استفاده شد.



شکل (۱۷-۳) : استفاده از شیکر نامناسب در مرحله اول



شکل (۱۸-۳) : همزن جهت مخلوط کردن سوسپانسیون خاک و آب و آلاینده

بعد از ته‌نشینی نمونه‌ها با جدا کردن الکترولیت حاصل از ته‌نشینی، دوغاب حاصل از مخلوط جدا شد و خاک آلوده به منظور تسریع در خشک شدن در سینی‌هایی ریخته شد. و به طور میانگین به مدت ۴ الی ۵ روز در دمای محیط قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. سپس نمونه‌سازی طبق روند نمونه‌سازی بدون آلاینده انجام گرفت. به طور خلاصه پس از رطوبت زدن به میزان معین ۳۰٪ (رطوبت حد خمیری) و همگن شدن به مدت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها در چهار درصد مختلف سیمان ساخته و به مدت ۸ روز عمل‌آوری شدند.

۳-۱۰ روش اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان

جهت اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان نمونه‌ها به داخل فریزر منتقل شدند. بدین صورت که پس از اتمام زمان عمل‌آوری، جهت اعمال سرما نمونه‌ها داخل فریزر با دمای ۱۶- درجه قرار گرفته و جهت ذوب نیز در دمای محیط (۱۶+ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شدند. مدت زمان ذوب و یخبندان هر کدام ۱۲ ساعت در نظر گرفته شد. بدین ترتیب که یک سیکل کامل ذوب و یخبندان ۲۴ ساعت به طول انجامید. اعمال سیکل‌های یخبندان و ذوب بر اساس استاندارد ASTM D6035 انجام شده است. پس از پایان زمان عمل‌آوری دوغاب حاصل از سوسپانسیون درون قالب‌های پیش‌تحکیمی که از جنس پلاستیک فشرده‌اند ریخته شد و به آرامی تحت تنش‌های ۰٫۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ کیلوگرم و هر بار به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. روند بارگذاری به مدت ۹ الی ۱۰ روز بوده است. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و برای بدست آوردن درصد رطوبت در آون قرار گرفتند.



ب

الف

شکل (۳-۱۹) ریختن نمونه آلوده در سینی جهت ته‌نشینی خاک و جدا کردن دوغاب

شکل (۳-۲۰) جدا کردن دوغاب حاصل از ته‌نشینی و ریختن مخلوط در سینی جهت خشک شدن



شکل (۲۱-۳) نمونه خاک آلوده پس از خشک شدن

۱۱-۳ آزمایش PH

در پایان آزمایش‌ها، بر روی چهار درصد مختلف سیمان آزمایش PH انجام گرفت.



شکل (۲۲-۳) : دستگاه PH متر و نمونه‌های حاوی سیمان و بنتونیت

۱۲-۳ آزمایش ریزساختاری

با ارزیابی نتایج، نمونه‌های حاوی ۱۰٪ سیمان جهت انجام آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)^{۲۹}، با تاکید بر میزان واکنش سیمان و ایجاد ترکیبات پوزولانی در نظر گرفته شد.

^{۲۹}X Ray Diffraction

فصل چهارم

بحث و بررسی نتایج آزمایش

در این فصل به بررسی نتایج آزمایش و تجزیه و تحلیل با استفاده از نمودار و گراف پرداخته می‌شود. سپس تاثیر عوامل گوناگون نظیر نوع کانی، غلظت ماده شیمیایی و تاثیر تثبیت با سیمان جهت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک رس بنتونیت آلوده طی چرخه‌های ذوب و یخبندان بررسی می‌گردد.

۴-۲ کلیات روند آزمایش

تعداد ۵۲ آزمایش تحکیم یک بعدی بر روی خاک رس بنتونیت گرفته شده از زون بنتونیت سمنان انجام پذیرفت. این آزمایش‌ها جهت تعیین میزان نشست، تورم و میزان نفوذپذیری خاک صورت پذیرفت. در پایان آزمایشات، تعدادی آزمایش شیمیایی و ریز ساختاری نیز بر روی خاک رس بنتونیت انجام شد. لازم به بیان است که تعداد آزمایشات صورت گرفته بیش از ۵۲ آزمایش می‌باشد به این صورت که در ابتدای کار هر آزمایش با دو بار تکرار انجام شد که پس از بررسی نتایج بدست آمده به دلیل نزدیک بودن نتایج آزمایشات اصلی و آزمایش‌های تکراری، تکرار بیشتر از یک بار برای برخی از نمونه‌ها صورت نپذیرفت.

در آزمایشات انجام شده با استفاده از نتایج حاصل از نشست، به صورت غیر مستقیم و با استفاده از فرمول تجربی میزان نفوذپذیری نمونه‌ها محاسبه و نمودار آن ترسیم شد. علاوه بر این نفوذپذیری با توجه به تنش نرمال سازه‌های معمولی با تاکید بر بارگذاری ۴ کیلوگرم بر روی نمونه‌ها انجام گردید. به طور کلی متغیرهایی که تاثیر آن بر روی مقاومت خاک رس بنتونیت در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت به شرح ذیل می‌باشد:

۱- چهار درصد مختلف سیمان شامل ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ درصد.

۲- آلایندہ نیترا ت سرب شامل سه غلظت مختلف ۱۰، ۴۰، ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک.

۳- مدت ۷ روز عمل آوری سیمان بر روی خاک بنتونیت پس از نمونه‌سازی در چهار درصد مختلف سیمان.

۴- روند افزودن آلایندہ و آماده‌سازی خاک جهت ساخت نمونه‌های حاوی آلایندہ نیترا ت سرب.

۵- سیکل‌های ذوب و یخبندان در سه غلظت شامل سیکل‌های ۱،۳، ۵، ۷، ۹، ۱۲ که به دلیل کمبود وقت فقط سیکل‌های ۳ و ۷ و ۱۲ انجام پذیرفت.

۳-۴ تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۴ تاثیر تثبیت با سیمان بر خصوصیات مقاومتی خاک بنتونیت در سیکل ۰ و آلاینده ۰

به منظور مشاهده نتایج بدست آمده نمودارهای ۴-۱ تا ۴-۴ برای نمونه های فاقد آلاینده و سیکل ۰ به شرح ذیل ارائه گردیده است.

تغییرات Cs (ضریب تورم) و Cc (ضریب تحکیم) به شکل ذیل می باشد :

جدول (۴-۱) : مقادیر Cc و Cs در سیکل ۰ و آلاینده ۰

Cc	Cs	سیمان
0.8773	0.3062	0%
0.5595	0.0759	5%
0.2763	0.1105	10%
0.2924	0.0437	20%

با توجه به نتایج فوق و شکل ۴-۱ کاهش ضریب تحکیم و ضریب تورم با افزایش درصد سیمان قابل مشاهده است. کاهش تورم به دلیل تبادل کاتیونی و کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختار مجتمع بر اثر اندرکنش با سربار می باشد. سیمان با ایجاد واکنش‌های پوزولانی و یا به عبارتی تشکیل مواد سیمانته ذرات رس را به هم چسبانده و قابلیت تغییر حجم خاک را هنگام جذب آب کاهش می دهد. از طرفی دلیل کاهش ضریب تحکیم، افزایش درصد سیمان می باشد که باعث زهکشی کمتر و در نتیجه جلوگیری از کاهش ارتفاع نمونه‌ها با افزایش بارگذاری شده است. بیشترین میزان تغییرات Cc و Cs تا ۱۰٪ سیمان بوده و روند تغییرات بعد از ۱۰٪ سیمان کاهش یافته و از ۱۰ تا ۲۰ به مقدار ثابتی رسیده است. با توجه به عملکرد چشمگیر ۱۰٪ سیمان در تثبیت می توان مقدار ۱۰٪ را بهینه در نظر گرفت. علاوه بر Cc و Cs با توجه به نتایج Pc نیز این مطلب قابل اثبات می باشد. تنش پیش تحکیمی با افزایش درصد سیمان افزایش یافته و تغییرات در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان به مقدار ثابتی

رسیده است. با توجه به نتایج Cc, Cs و Pc می توان دریافت مقدار ۱۰٪ سیمان برای تثبیت نمونه ها بهینه بوده است.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۲) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۰

سیمان	ph
0%	8.44
5%	11.98
10%	12.6
20%	12.17

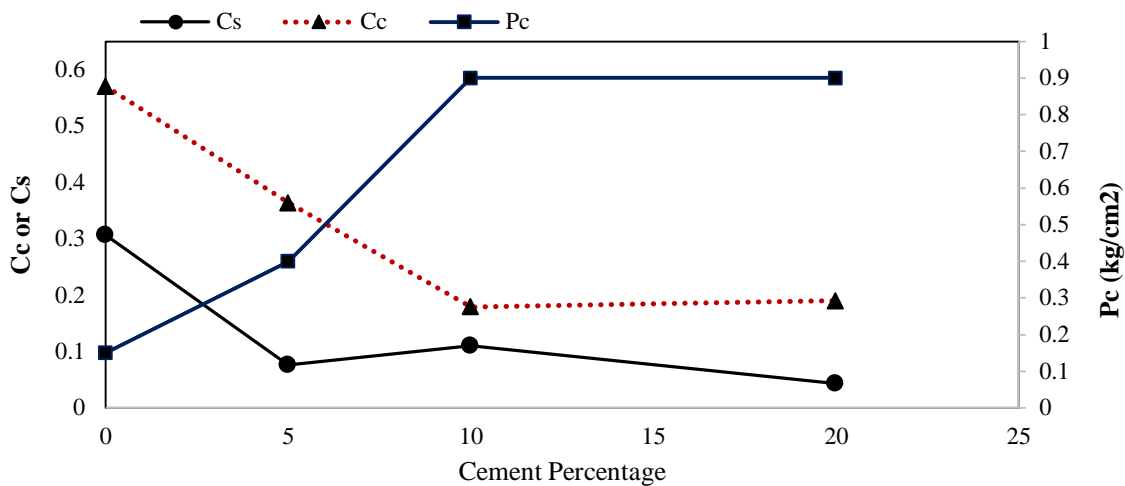
pH بیشتر از ۱۲ نشانگر ادامه ی واکنش های پوزولانی می باشد، با توجه به نتایج می توان دریافت که دلیل اصلی کاهش تورم و همچنین بهبود ضریب تحکیم و بطور کلی کاهش نشست در نمونه ها، عملکرد مثبت سیمان بوده که با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب سیمانته شدن و انجام جامدسازی شده است. مطالعات نشان می دهند با افزودن سیمان به خاک، pH افزایش یافته و سیلیکای خاک از ساختمان ورقه ای چهاروجهی و آلومینای خاک از ساختمان ورقه ای هشت وجهی آزاد شده و واکنش های پوزولانی شتاب می گیرند. و تا زمانی که pH، ۱۲.۴ باقی بماند واکنش های پوزولانی در حال انجام می باشند.

با توجه به شکل ۴-۲ تغییرات نسبت تخلخل در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۰.۹۴۱ میلی متر) نسبت به گراف ۰٪ سیمان (۰.۲۰۵ میلی متر) حدود ۵۶٪ و نسبت به ۵٪ سیمان (۰.۶۴۲ میلی متر) حدود ۲۳٪ کاهش یافته است.

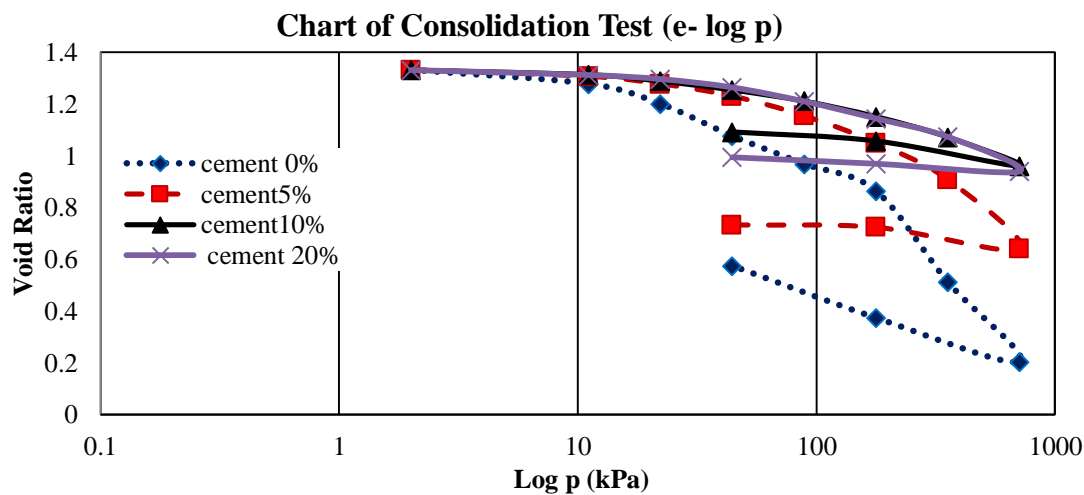
با توجه به شکل ۴-۳ که نشان دهنده روند نفوذپذیری با افزایش درصد سیمان است استنباط می شود در نمونه ۰٪ سیمان در مقایسه با سه درصد دیگر با افزایش میزان بار زهکشی بیشتر شده و نشست بیشتری رخ داده است. نمونه ۵٪ سیمان نسبت به نمونه ۰٪ سیمان، مقدار ۳۲.۸۶٪ و نمونه

۱۰ و ۲۰٪ سیمان نسبت به نمونه ۵٪ سیمان ، ۲۲.۴۷٪ کاهش نفوذپذیری داشته‌اند. با توجه به نتایج،

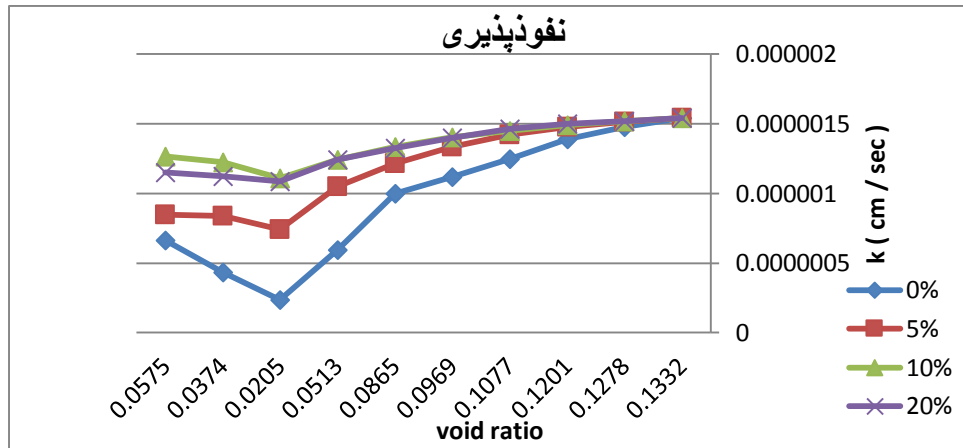
سیمان عملکرد قابل توجهی جهت کاهش ارتفاع نمونه و کاهش نفوذپذیری داشته‌است .



شکل (۱-۴) نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۰، سیکل ۰



شکل (۲-۴) گراف تحکیم، آلاینده ۰ در سیکل ۰



شکل (۴-۳) گراف نفوذپذیری، آلاینده ۰ در سیکل ۰

۴-۵ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس

بنتونیت در سیکل ۰

شکل های ۴-۴ تا ۴-۶ حاوی ۴ درصد مختلف سیمان و ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک، آلاینده در

سیکل ۰ می باشند. با توجه به نمودار ۴-۴، تغییرات C_c و C_s به شرح ذیل می باشد :

جدول (۴-۳) : مقادیر C_c و C_s در سیکل ۰ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

C_c	C_s	سیمان
0.4006	0.1243	0%
0.1451	0.0368	5%
0.1404	0.0276	10%
0.122	0.0391	20%

با توجه به نتایج گرفته شده از شکل ۴-۴ می توان دریافت، افزایش درصد سیمان سبب تاثیر مثبت در

کاهش تورم و کاهش ضریب تحکیم بوده و بیشترین میزان تغییر تا ۵٪ سیمان می باشد. روند تاثیر

سیمان در ۱۰ و ۲۰٪ تقریبا ثابت بوده است. همچنین با توجه به نتایج P_c نیز این موضوع قابل اثبات

می باشد. به طور کلی نتایج C_c, C_s و P_c نشان دهنده عملکرد چشمگیر سیمان در تثبیت و افزایش

مقاومت نمونه های آلوده بوده و از آنجایی که تاثیر ۱۰٪ سیمان در جامدسازی مشابه نمونه های حاوی

۲۰٪ سیمان است، استفاده از ۱۰٪ سیمان سبب کاهش هزینه های طرح در عملکرد جامدسازی

می‌باشد. و با توجه به نتایج می‌توان مقدار ۱۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. و از طرفی افزودن آلاینده فلز سنگین سبب کاهش تاثیر سیمان در نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون آلاینده شده‌است. این موضوع را می‌توان با توجه به نتایج آزمایش pH نیز توجیه کرد. که به صورت ذیل می‌باشد :

جدول (۴-۴) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

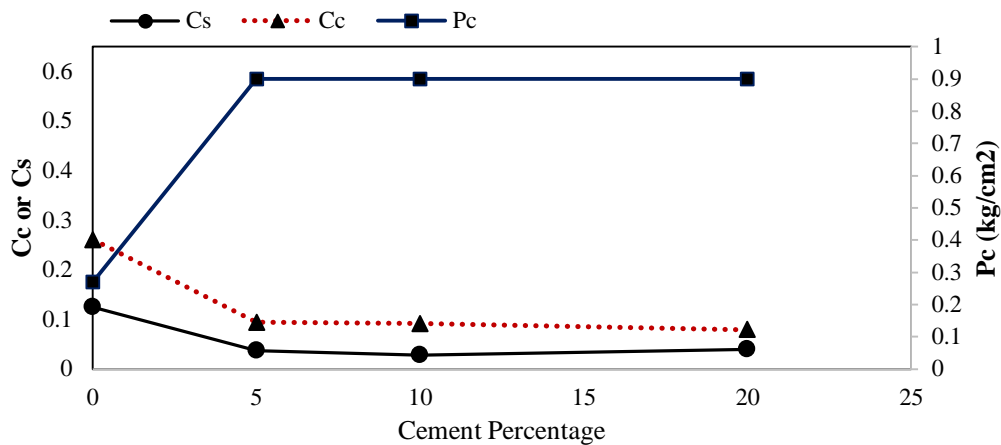
سیمان	ph
0%	8.32
5%	10.78
10%	11.86
20%	12.13

با توجه به نتایج در نمونه‌های ۱۰ و ۲۰٪ سیمان ، و خصوصا نمونه ۲۰٪، سیمان با انجام واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده و با توجه به کاهش pH در نمونه ۰٪ سیمان استنباط می‌شود که افزودن آلاینده باعث اثر منفی در پارامترهای مقاومتی و افزایش نشست خاک شده‌است. از آنجایی که ذرات خاک آلوده دارای دانه بندی ریز و سطح مخصوص زیاد هستند، سطح مخصوص زیاد موجب شده تا ذرات خاک نسبت به حالت عاری از آلاینده، سیمان بیشتری برای دربرگرفتن نیاز داشته‌باشند، این کاهش حضور سیمان موجب افت مقاومت به دلیل کندگیر شدن و عدم انجام کامل واکنش‌های پوزولانی می‌باشد.

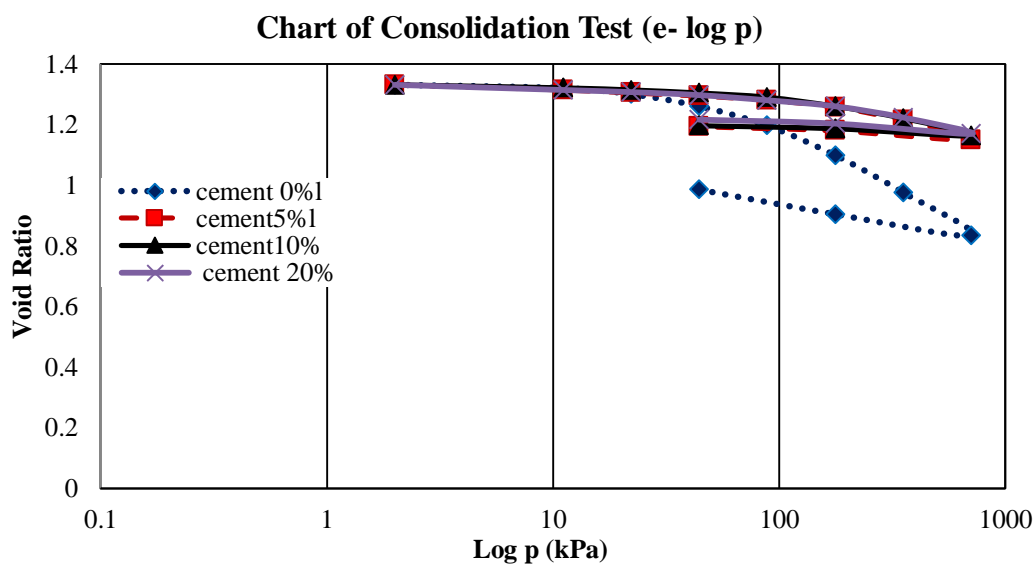
با توجه به شکل ۴-۵ بیشترین میزان تغییرات نسبت تخلخل در نمونه ۰٪ سیمان (۰.۸۳۵ میلی‌متر) بوده و تقریبا معادل ۳۷.۳۲٪ می‌باشد. و در نمونه‌های حاوی سه درصد سیمان ۲۰، ۱۰، ۵ (۱.۱۷ میلی‌متر)، به دلیل سیمانته شدن و افزایش مقاومت، نسبت به نمونه ۰٪ سیمان، Δe ۲۵.۱۵٪ کاهش یافته‌است.

با توجه به نتایج نفوذپذیری، نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۰٪ سیمان حدود ۲۳.۶۴٪، نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۱۰٪ سیمان حدود ۸.۵٪ و نمونه ۱۰٪ سیمان نسبت به ۲۰٪ سیمان حدود ۱٪ کاهش

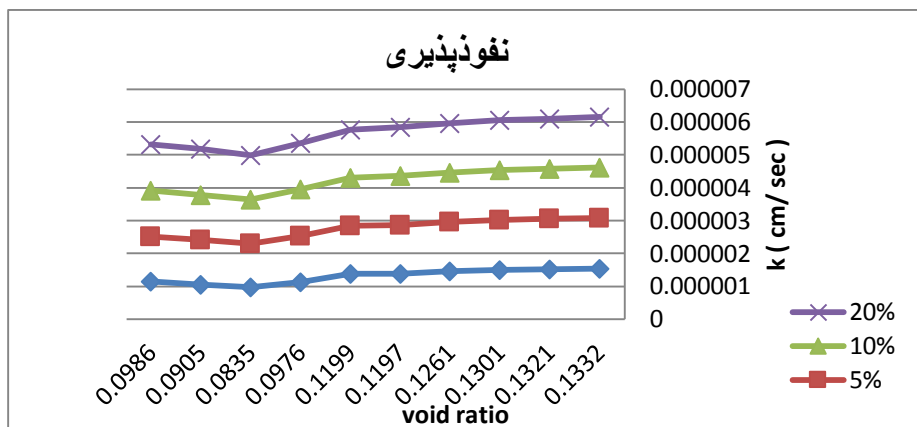
نفوذپذیری داشته‌اند. دلیل بهبود مقاومت افزایش درصد سیمان بوده که سبب کاهش ارتفاع نمونه‌ها و زهکشی کمتر شده‌است.



شکل (۴-۴) : نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل



شکل (۴-۵) : گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل



شکل (۴-۶): گراف نفوذپذیری، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰

تاثیر آلاینده بر خصوصیات تحکیمی بنتونیت تثبیت شده :

نمودارهای ۷-۴ تا ۹-۴ حاوی آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰ به شرح ذیل

می‌باشند. نتایج C_c و C_s به شرح ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۵): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۰ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.3062	0.0691	0%
0.1220	0.0368	5%
0.1220	0.0230	10%
0.1036	0.0253	20%

با مشاهده نتایج شکل ۷-۴ نتیجه می‌شود، افزایش درصد سیمان موجب تاثیر مثبت در کاهش تورم،

کاهش ضریب تحکیم و افزایش تنش پیش تحکیمی شده‌است. بیشترین مقدار تغییر C_c و C_s تا ۵٪

سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان عملکرد سیمان تقریباً ثابت می‌باشد. از طرفی افزایش غلظت

آلاینده موجب کندگیر شدن سیمان و عدم انجام واکنش‌های هیدراتاسیون و در نهایت افت مقاومت

نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای غلظت کمتر شده‌است.

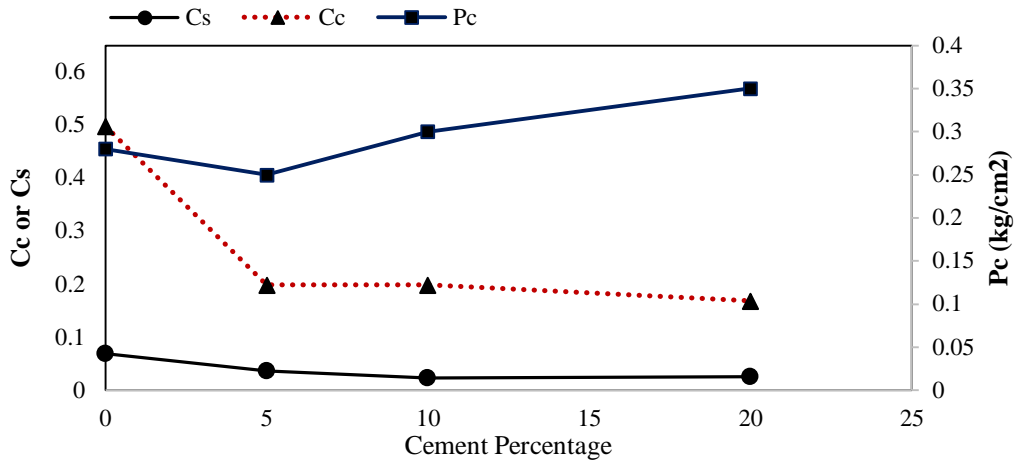
نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۶) : مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

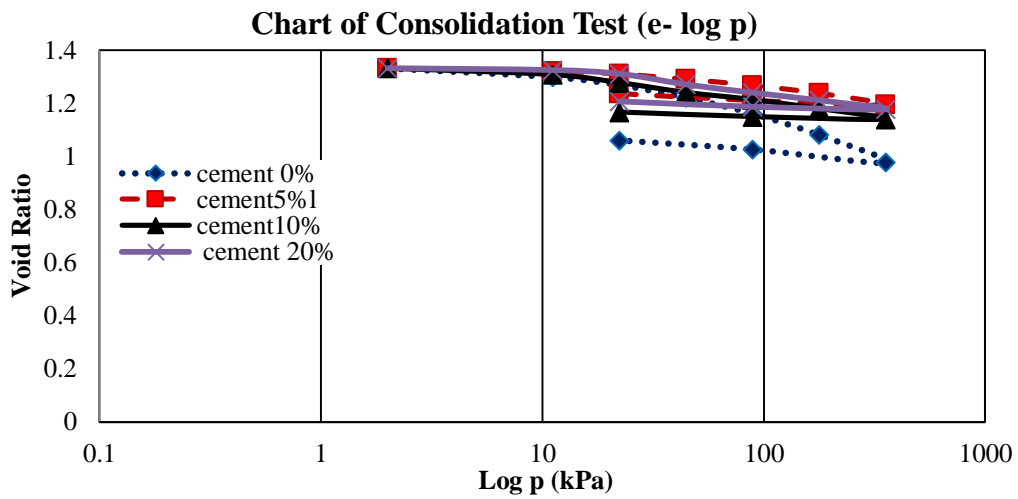
سیمان	ph
0%	8.12
5%	10.45
10%	11.37
20%	11.48

با توجه به شکل ۴-۸ بیشترین میزان Δe در نمونه ۰٪ سیمان (۰.۹۷۷ میلی متر) و حدوداً معادل، ۲۷٪ می باشد. و Δe در نمونه های حاوی ۵ تا ۱۰٪ و ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان (۱.۱۹۴، ۱.۱۷۷، ۱.۱۴ میلی متر) به ترتیب حدود ۳ و ۱٪ می باشد. با توجه به نتایج افزایش سیمان در سه نمونه ۵، ۱۰ و ۲۰٪ می توان نتیجه گرفت، افزایش درصد سیمان سبب افزایش مقاومت و سیمانته شدن و در نهایت سبب کاهش نشست در نمونه ها شده است.

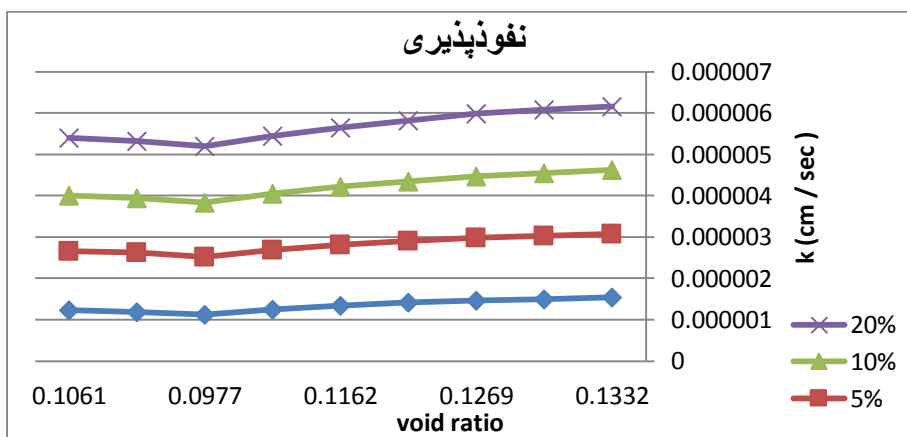
با توجه به مقادیر جدول ۴-۶، مقدار pH در دو نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان به هم نزدیک بوده و نشان دهنده عملکرد مثبت سیمان در افزایش مقاومت خاک و تاثیر یکسان سیمان در این دو نمونه می باشد. این مطلب با توجه به گراف Pc نیز قابل اثبات می باشد. با توجه به ثابت شدن تغییرات در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان و افزایش مقاومت و جامدسازی تقریباً یکسان در آن ها می توان نتیجه گرفت افزودن ۱۰٪ سیمان به نمونه ها سبب ایجاد استحکام کافی شده و ۱۰٪ سیمان مقدار بهینه می باشد. با مشاهده ی نتایج گراف نفوذپذیری، نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۰٪ سیمان حدود ۲٪، نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۱۰٪ سیمان حدود ۵٪ و نمونه ۱۰٪ سیمان نسبت به ۲۰٪ حدود ۳٪ کاهش نفوذپذیری داشته اند. بیشترین مقدار ضریب نفوذپذیری در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۱۹٪ می باشد. افزایش درصد سیمان سبب کاهش ارتفاع نمونه ها و زهکشی کمتر شده است.



شکل (۷-۴): نمودار Cc، Cs، Pc، ۴۰ سانتی مول آلاینده در سیکل .



شکل (۸-۴): گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل .



شکل (۹-۴): گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل .

شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) حاوی ۴ درصد مختلف سیمان و ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک آلاینده در سیکل ۰ می‌باشند. با توجه به نمودار ۴-۱۰ تغییرات C_c و C_s به صورت ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۷): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۰ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	C_s	C_c
0%	0.0437	0.3684
5%	0.1082	0.3569
10%	0.0207	0.1681
20%	0.0299	0.1289

با مشاهده شکل ۴-۱۰ نتیجه می‌شود، افزایش درصد سیمان موجب تاثیر مثبت در کاهش ضریب تورم، ضریب تحکیم و افزایش تنش پیش تحکیمی شده‌است. تغییرات مقادیر C_c, C_s و P_c در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان ثابت شده‌است. می‌توان گفت ۱۰٪ سیمان برای جامدسازی نمونه‌ها کافی بوده و عملکرد چشمگیری داشته‌است. از این رو نتیجه می‌شود که در جامد سازی خاک‌های آلوده و یا زباله‌های آلوده به فلزات سنگین میزان ۱۰٪ سیمان مطلوب و بهینه می‌باشد. و از طرفی افزودن آلاینده فلز سنگین سبب کاهش تاثیر سیمان در نمونه‌ها شده و نسبت به نمونه‌های بدون آلاینده سبب کاهش مقاومت خاک شده‌است. آلاینده با کندگیر کردن سیمان و جلوگیری از انجام واکنش‌های هیدراتاسیون در نمونه‌ها سبب افت پارامترهای مقاومتی خاک شده‌است. این موضوع را می‌توان با توجه به نتایج آزمایش pH نیز توجیه کرد که به صورت ذیل می‌باشد:

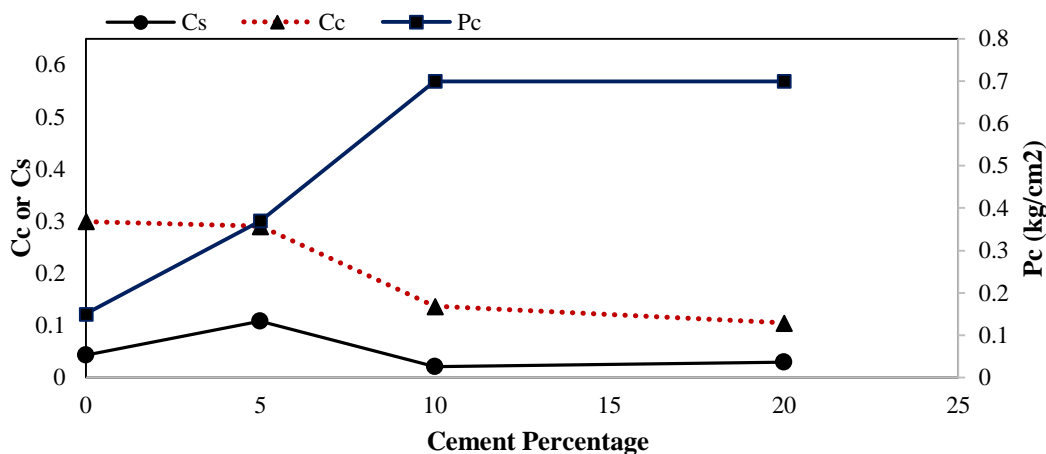
جدول (۴-۸): مقادیر pH در سیکل ۰ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	ph
0%	7.82
5%	9.26
10%	10.85
20%	11.13

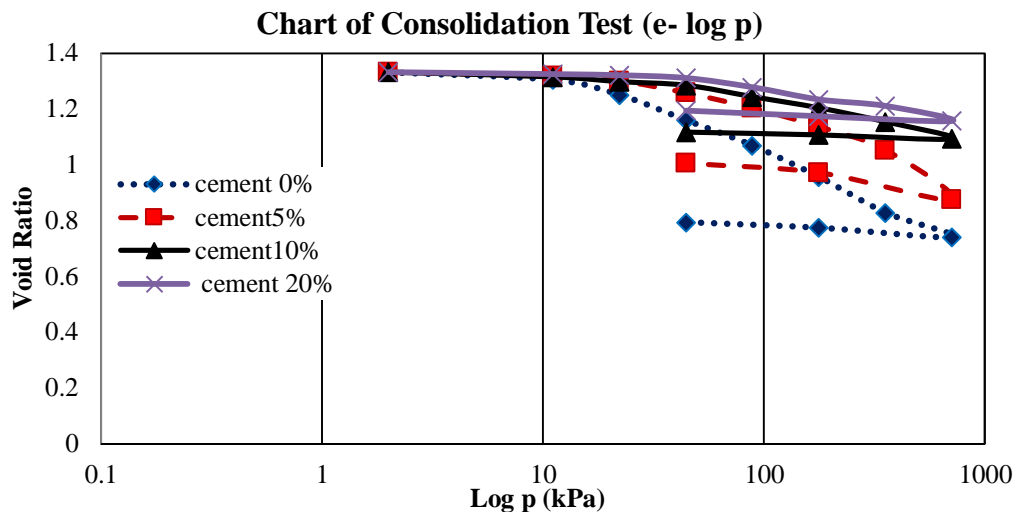
با توجه به جدول ۴-۸، مقدار pH در دو نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان نزدیکتر بوده و نشان دهنده عملکرد مثبت سیمان در افزایش مقاومت خاک می‌باشد. از طرفی مقدار pH در نمونه‌ی ۰٪ نشان دهنده‌ی کاهش مقاومت خاک با افزایش آلاینده‌ی فلز سنگین می‌باشد. همچنین نتایج نزدیک به هم pH در نمونه‌های ۱۰ و ۲۰٪ سیمان نیز بهینه بودن ۱۰٪ سیمان را اثبات می‌کند.

با توجه به شکل ۴-۱۱ بیشترین میزان Δe در نمونه ۰٪ سیمان (۰.۷۴۱ میلی‌متر) حدود ۴۴٪ می‌باشد. و در نمونه‌های حاوی سه درصد ۵ تا ۱۰٪ و ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان (۰.۸۷۵، ۱.۰۹۳، ۱.۱۵۷ میلی‌متر) به دلیل سیمانته شدن و افزایش مقاومت، نسبت به نمونه ۰٪ سیمان، Δe به ترتیب ۱۶ و ۶٪ کاهش یافته‌است.

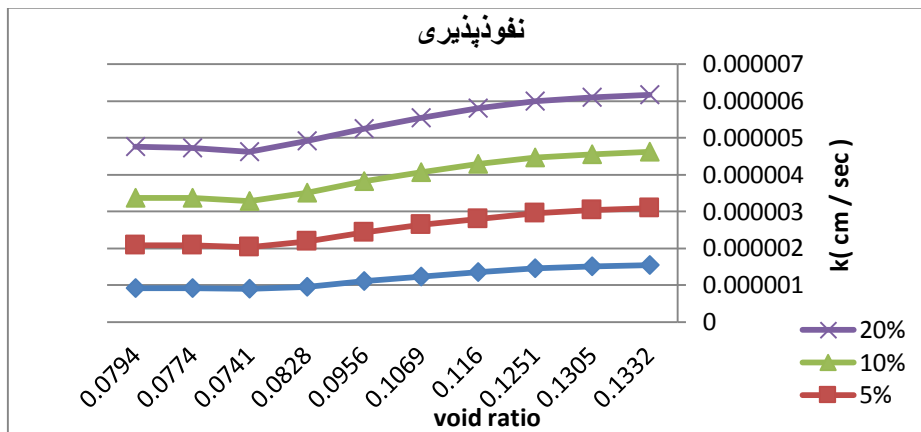
با توجه به نتایج گراف ۴-۱۲ ضریب نفوذپذیری در نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۰٪ سیمان حدود ۱۷٪، نمونه ۵٪ سیمان نسبت به ۱۰٪ سیمان حدود ۷.۵٪ و نمونه ۱۰٪ سیمان نسبت به ۲۰٪ حدود ۴٪ کاهش یافته‌است. افزایش درصد سیمان سبب کاهش ارتفاع نمونه‌ها و زهکشی کمتر شده‌است.



شکل (۴-۱۰): نمودار Cs، Cc، Pc، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰.



شکل (۴-۱۱) : گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰



شکل (۴-۱۲) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۰

۴-۵-۱ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل ۰

با توجه به گراف ۴-۱۳ با افزایش غلظت آلاینده، مقدار Δe افزایش یافته و ماکزیمم تغییرات نسبت

تخلخل (۰.۷۴۱ میلی متر) بوده که در هر مرحله به میزان ۱۰٪ کاهش یافته است.

با توجه به گراف ۴-۱۴ بیشترین تغییرات در هر مرحله مربوط به نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی

مول بر کیلوگرم خاک بوده و معادل (۰.۸۷۵ میلی متر) ۳۴٪ می‌باشد. که نسبت به دو غلظت ۱۰ و ۴۰

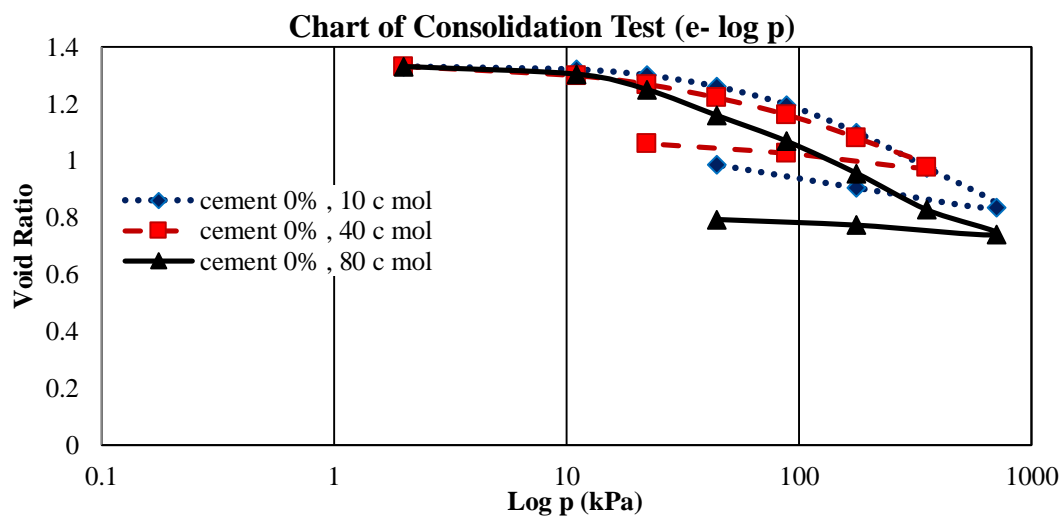
سانتی مول بر کیلوگرم خاک چشمگیرتر است. ولی به طور کلی در گراف ۴-۱۳ (۰٪ سیمان) نسبت

به گراف ۴-۱۴ (۵٪ سیمان)، Δe بیش از ۱۰٪ افزایش یافته است. این نتیجه بیانگر تاثیر مثبت

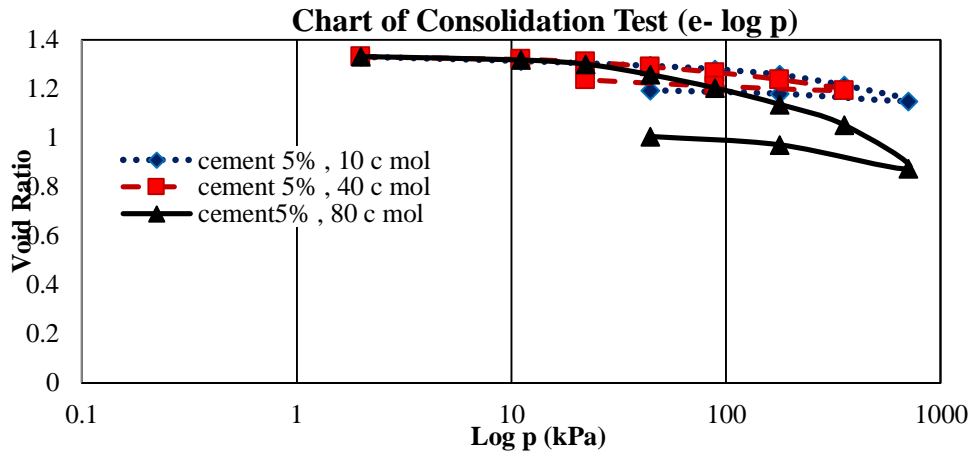
سیمان و عملکرد آن در نمونه‌ها می‌باشد. با مشاهده گراف ۴-۱۵ این نتیجه استنباط می‌شود که

استفاده از ۱۰٪ سیمان در نمونه‌ها تاثیر بیشتری در تحکیم و کاهش نشست داشته به طوری که عملکرد سیمان تا حدی بوده که بر عملکرد آلاینده غالب شده و سه نمودار به سمت یک نقطه در حال همگرا شدن می‌باشند. همچنین با توجه به گراف ۴-۱۶ بیشترین Δe مربوط به نمونه‌های حاوی آلاینده ۴۰ و ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۵۴ میلی‌متر) و تقریباً معادل ۱۴٪ می‌باشد. که نسبت به غلظت ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۲۲۱ میلی‌متر) حدود ۵٪ افزایش در Δe داشته‌است. همچنین با توجه به گراف ۴-۱۶ مشاهده می‌شود ۲۰٪ سیمان تاثیر بهتر و چشمگیری در بهبود نشست و کاهش میزان افت مقاومت نمونه‌ها داشته‌است.

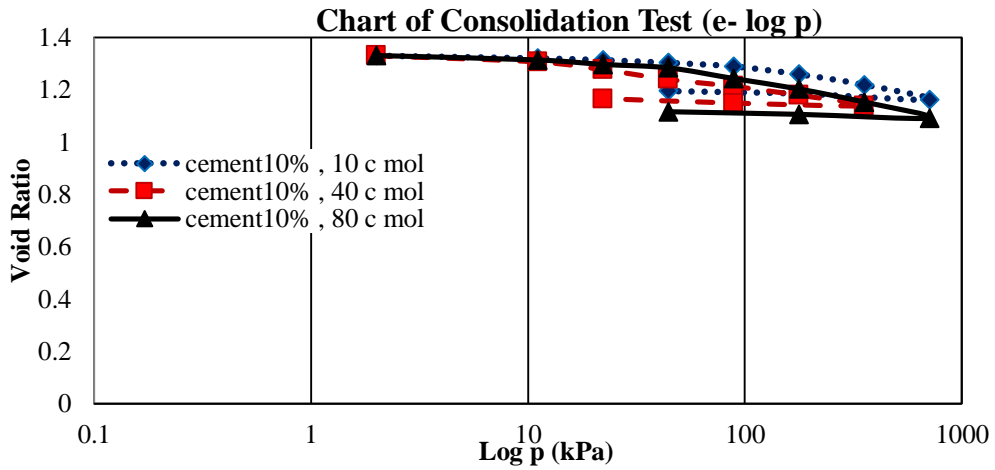
مقدار Δe کل در نمونه‌های ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک به ۱.۲۱۱ میلی‌متر رسیده که معادل ۹٪ می‌باشد. و نسبت به نمونه‌های حاوی آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۲۲۴ میلی‌متر) و ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۷۷ میلی‌متر)، Δe به ترتیب حدود ۱ و ۴٪ افزایش یافته‌است.



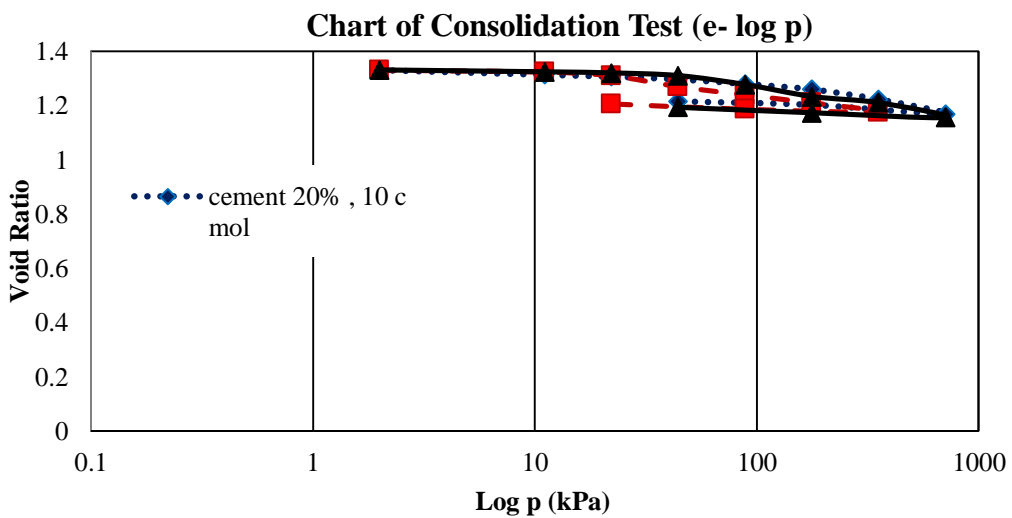
شکل(۴-۱۳): گراف تحکیم ۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل .



شکل (۱۴-۴) : گراف تحکیم ۵٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل .



شکل (۱۵-۴) : گراف تحکیم ۱۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل .



شکل (۱۶-۴) : گراف تحکیم ۲۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل .

۶-۴ تاثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر رفتار بنتونیت آلوده به فلز سنگین

به منظور بررسی سیکل‌های یخبندان و ذوب بر رفتار بنتونیت تثبیت‌شده و آلوده به فلز سنگین نیترات سرب پس از اعمال سیکل‌ها نمونه‌ها تحت آزمایش تحکیم قرار گرفتند از طرفی از آنجایی که اعمال سیکل‌ها باعث تغییر در تخلخل اولیه خاک می‌شوند در نمودارهای آزمایش تحکیم از نسبت $\frac{e}{e_0}$ (تخلخل به تخلخل اولیه) استفاده شد [۱۰۱].

۷-۴ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس

بنتونیت در سیکل ۳

شکل‌های ۴-۱۷ تا ۴-۱۹ حاوی آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳ ذوب و یخبندان به شرح ذیل می‌باشند. تغییرات Cc و Cs با توجه به ۴-۱۷ به صورت ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۹) مقادیر Cc و Cs در سیکل ۳ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.3523	0.122	0%
0.5595	0.0759	5%
0.1082	0.0437	10%
0.1128	0.0184	20%

با توجه به نتایج فوق و گراف ۴-۱۷ اعمال سیکل‌های یخبندان و ذوب سبب افزایش ضرایب تحکیم و تورم نسبت به نمونه‌های سیکل ۰ در برخی از نمونه‌ها شده‌است. بیشترین میزان افزایش تورم تا نمونه حاوی ۵٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان تغییرات ثابت شده‌است. با توجه به تاثیر یکسان سیمان در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰٪ سیمان می‌توان مقدار ۱۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. این مطلب با نتایج Pc نیز قابل اثبات می‌باشد. تغییرات گراف Pc از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان ثابت شده‌است. افزایش تعداد سیکل‌ها سبب افزایش تخلخل نمونه‌ها و افزایش هدایت هیدرولیکی آب شده و از طرفی روند افزایش بار سبب زهکشی و کاهش ارتفاع خاک بنتونیت شده‌است. که از دلایل اصلی افزایش Cc

می‌باشند. با افزایش هدایت هیدرولیکی سرعت زهکشی افزایش و خاک بیشتر تحکیم یافته‌است که سبب افزایش C_s شده‌است. از طرفی افزایش غلظت آلاینده سبب کاهش تاثیر سیمان نسبت به نمونه‌های حاوی غلظت کمتر شده‌است. این موضوع با توجه به مقادیر pH ، P_c ، C_c و C_s قابل مشاهده است.

نتایج آزمایش pH :

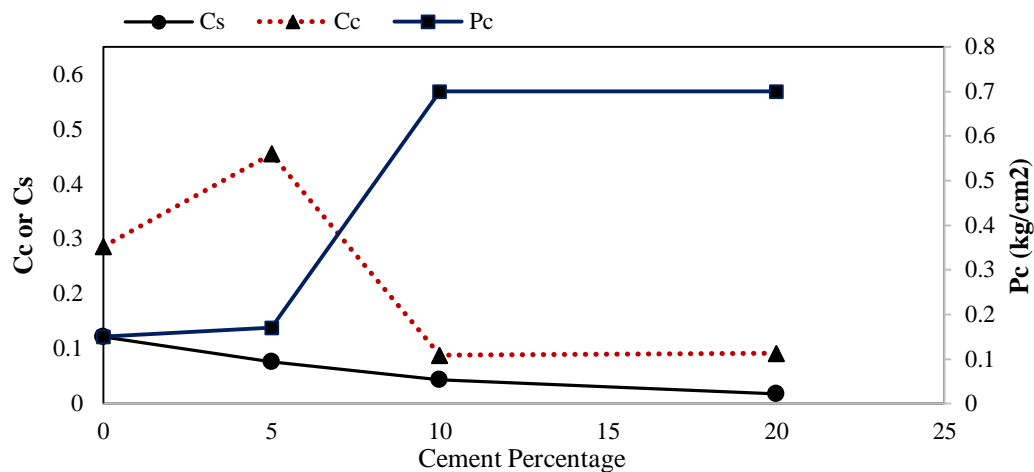
جدول (۴-۱۰) : مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	pH
0%	8.62
5%	11.3
10%	11.9
20%	12.3

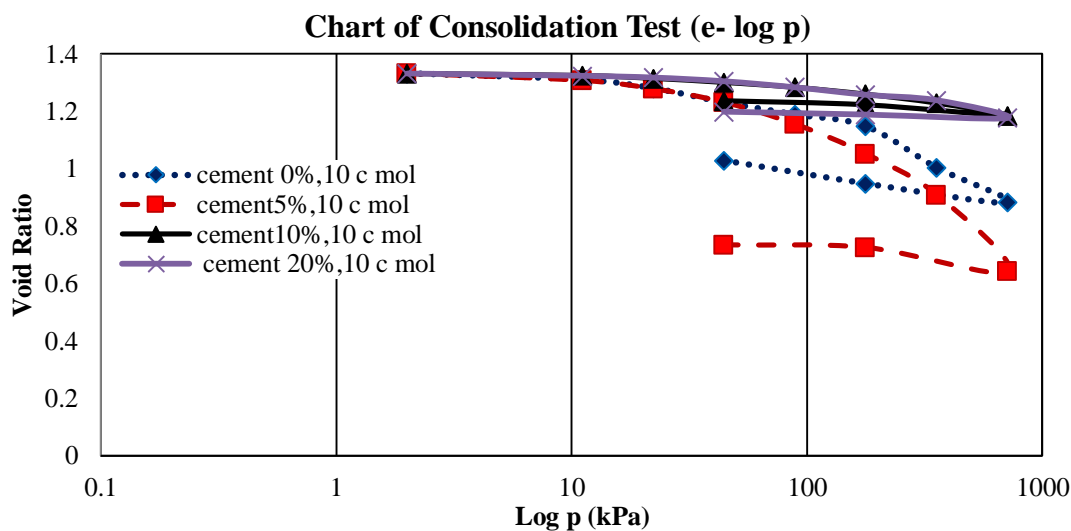
با توجه به مقادیر pH در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل‌ها سبب افت مقاومت در نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب بهبود پارامترهای مقاومتی خاک شده‌است. از طرفی با توجه به این موضوع که تاثیر سیمان در دو نمونه حاوی ۱۰ و ۲۰٪ سیمان تقریباً یکسان بوده می‌توان نتیجه گرفت مقدار ۱۰٪ سیمان برای افزایش مقاومت بنتونیت آلوده به فلز سنگین که در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار گرفته بهینه می‌باشد.

با توجه به گراف ۴-۱۸، Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۰.۸۸۳ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰.۶۴۲ میلی‌متر) حدود ۱۸٪، در نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۱.۱۷۷ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۲۲٪ کاهش یافته‌است. ماکزیمم مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان بوده و حدود ۵۲٪ می‌باشد. مقدار Δe نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۰ حدود ۱۴.۵٪ افزایش یافته‌است. این نتیجه بیانگر آن است که سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش و تغییر نسبت تخلخل اولیه (e_0) می‌شوند. تغییرات ضریب نفوذپذیری به شرح ذیل می‌باشد :

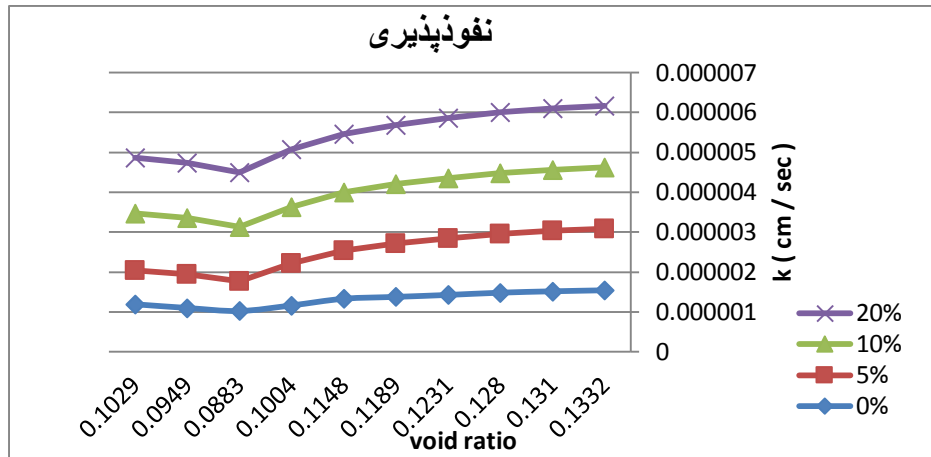
میزان نفوذپذیری از ۰ تا ۵٪ سیمان حدود ۰.۷٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۰.۲۴٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان حدود ۰.۷٪ کاهش پیدا کرده است. ضریب نفوذپذیری در سیکل ۳ نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۰، در برخی از نمونه‌ها افزایش یافته است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد.



شکل (۴-۱۷): نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۱۸): گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۱۹): گراف نفوذپذیری، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳

گراف‌های ۴-۲۰ تا ۴-۲۲ مربوط به سیکل ۳ ذوب و یخبندان و حاوی آلاینده‌ی ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک به شرح می‌باشند. نتایج C_c و C_s با توجه به نمودار ۴-۲۰ به شرح ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۱۱): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۳ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

C_c	C_s	سیمان
0.396	0.0944	0%
0.2648	0.0322	5%
0.1543	0.046	10%
0.1612	0.0184	20%

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۱۲): مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

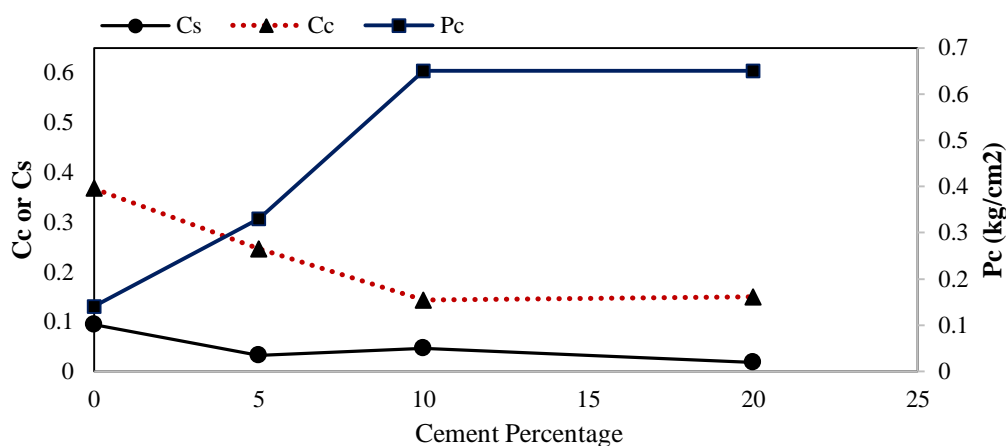
ph	سیمان
8.12	0%
10.51	5%
11.15	10%
11.98	20%

اعمال سیکل در برخی از نمونه‌ها باعث افزایش C_c و C_s شده که این کاهش مقاومت به دلیل افزایش حجم حفرات پس از اعمال سیکل‌ها و در نتیجه افزایش نشست می‌باشد. ولی عملکرد سیمان

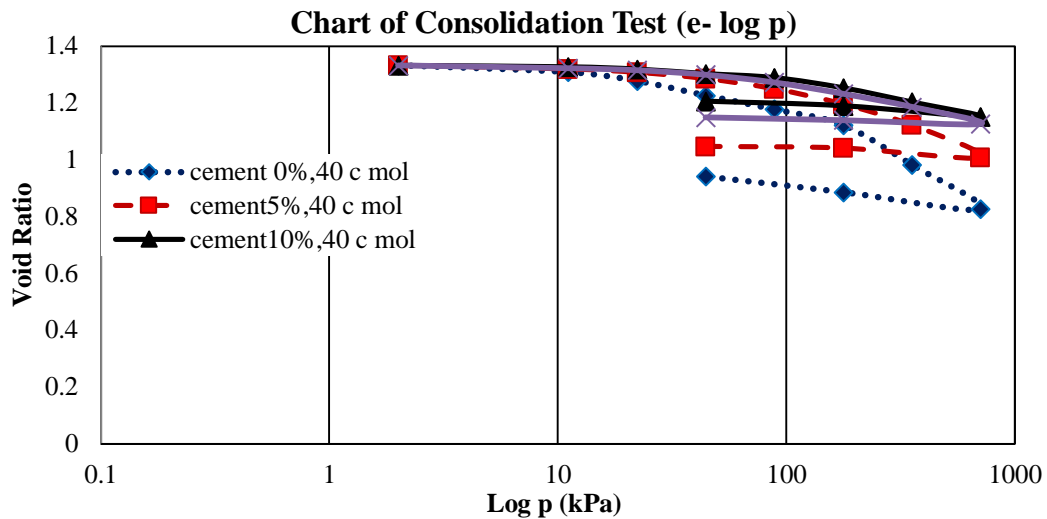
در کاهش ضریب تحکیم و تورم قابل ملاحظه است. تغییرات ضریب تورم و تحکیم در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان یکسان بوده و می‌توان مقدار ۱۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. این مطلب با توجه به نتایج P_c نیز قابل اثبات می‌باشد. تغییرات تنش پیش تحکیمی تا ۵٪ سیمان روند افزایشی داشته و در ۱۰ و ۲۰٪ تغییرات کاهش یافته و تقریباً ثابت شده‌است.

Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۱۰۰۰۷ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰۰۸۲۶ میلی‌متر) حدود ۱۴٪، در نمونه ۱۰٪ سیمان (۱۰۱۲۶ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۹٪ و در نمونه ۲۰٪ سیمان (۱۰۱۵۱ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۱۰٪ سیمان، حدود ۲٪ کاهش یافته است. ماکزیمم مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۳۸٪ بوده‌است. Δe نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۰ حدود ۱۲٪ افزایش یافته‌است. با توجه به مقادیر pH در دو نمونه‌ی حاوی ۱۰ و ۲۰٪ سیمان می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل‌ها سبب افت مقاومت نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب کاهش افت مقاومت شده‌است.

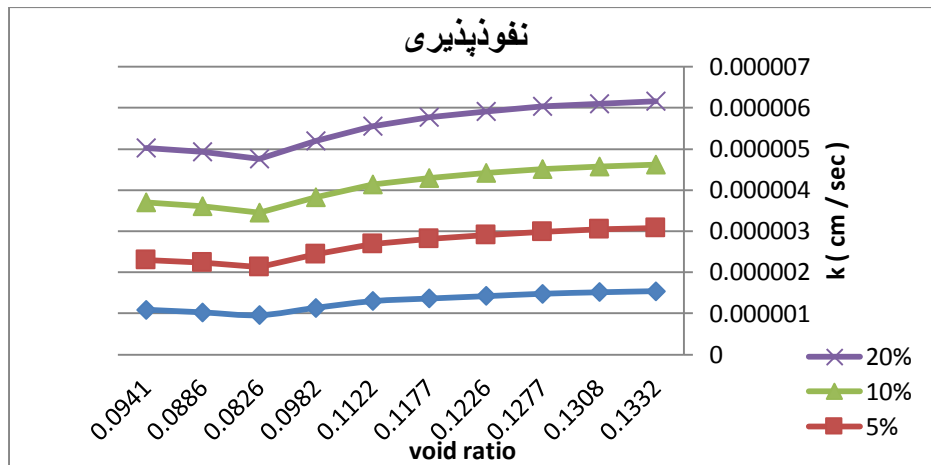
میزان نفوذپذیری از ۰٪ سیمان تا ۵٪ سیمان حدود ۱۴٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۱۱٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان، حدود ۲٪ کاهش یافته‌است. بطور کلی میزان نفوذپذیری در سیکل ۳ نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۰، حدود ۱۹٪ افزایش یافته‌است.



شکل (۴-۲۰): نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۲۱): گراف تحکیم، ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۲۲): گراف نفوذپذیری، ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳

شکل های ۴-۲۳ تا ۴-۲۵ مربوط به سیکل ۳ و حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک به

شرح ذیل می باشند. با توجه به نمودار ۴-۲۳ تغییرات C_c و C_s به صورت ذیل می باشد:

جدول (۴-۱۳): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۳ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

C_c	C_s	سیمان
0.4398	0.1013	0%
0.2763	0.0322	5%
0.1727	0.0437	10%
0.2141	0.0138	20%

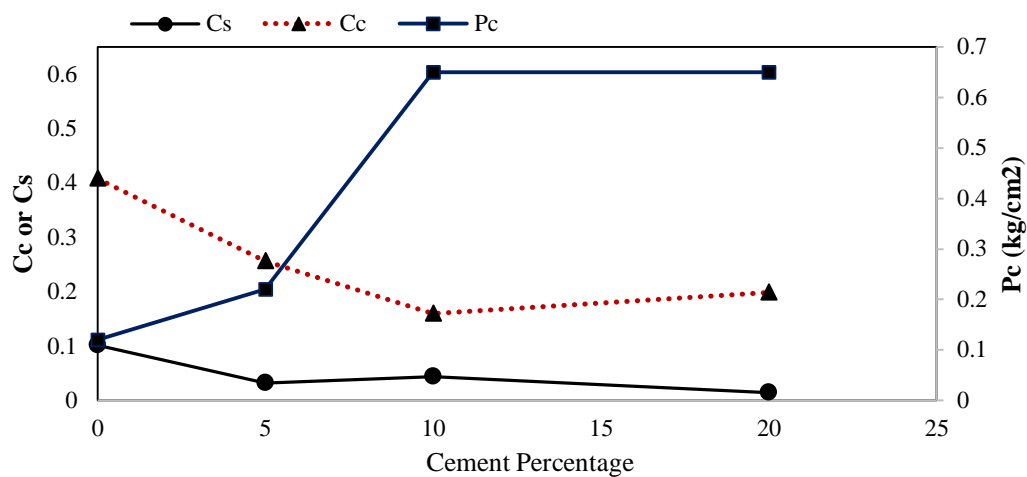
نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۱۴) : مقادیر pH در سیکل ۳ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

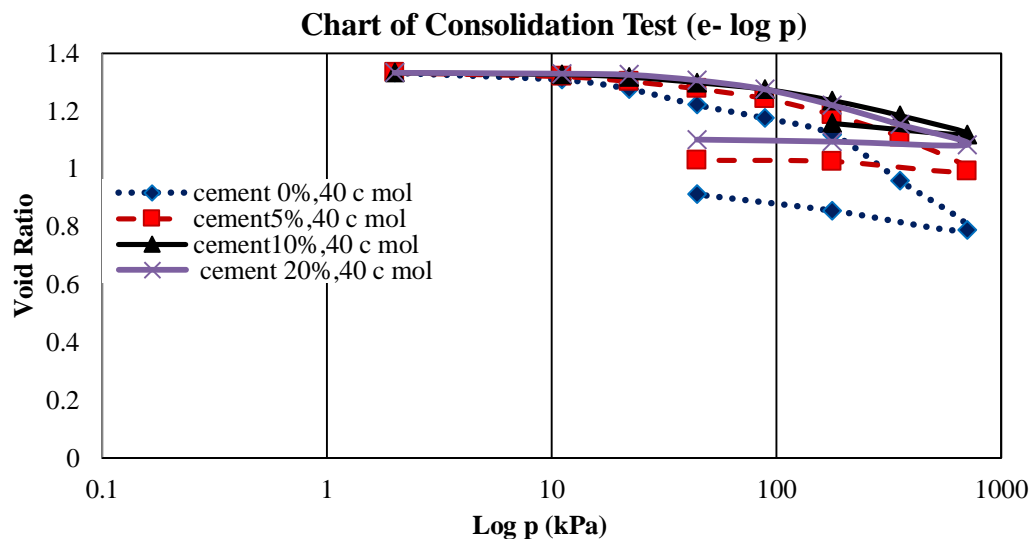
سیمان	ph
0%	7.82
5%	9.26
10%	10.93
20%	11.13

اعمال سیکل در برخی از نمونه‌ها باعث افزایش Cc و Cs شده که این کاهش مقاومت به دلیل افزایش حجم حفرات پس از اعمال سیکل‌ها و در نتیجه افزایش نشست می‌باشد. بیشترین مقدار تغییرات Cc و Cs از ۰ تا ۱۰٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ تغییرات ثابت شده‌است. همچنین با افزایش سیمان تنش پیش تحکیمی افزایش یافته و بیشترین میزان تغییرات آن تا ۵٪ سیمان بوده‌است. تغییرات در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان ثابت شده و می‌توان مقدار ۱۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. با توجه به نتایج آزمایش pH نیز این مطلب قابل اثبات می‌باشد. مقادیر pH در دو درصد سیمان ۱۰ و ۲۰٪ نزدیک به هم بوده و بیانگر انجام واکنش‌های پوزولانی به یک اندازه در نمونه‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج استفاده از ۱۰٪ سیمان در جامدسازی رس آلوده که در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دارد مقدار بهینه بوده و از لحاظ اقتصادی نسبت به نمونه‌های حاوی ۲۰٪ سیمان بصره‌تر می‌باشد. Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۰.۹۹۱ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰.۷۸۸ میلی‌متر) حدود ۱۵.۵٪، در نمونه ۱۰٪ سیمان (۱.۰۸۳ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۷٪ و در نمونه ۲۰٪ سیمان (۱.۱۱۸ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۱۰٪ سیمان، حدود ۳٪ کاهش یافته‌است. ماکزیمم Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۱٪ می‌باشد. افزایش Δe نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۰ کاهش یافته که بیانگر کاهش انجام واکنش‌های پوزولانی و سیمانته‌شدن می‌باشد. که هم آلاینده و هم اعمال سیکل‌ها دلیل کندگیرشدن و افزایش نشست بوده‌اند.

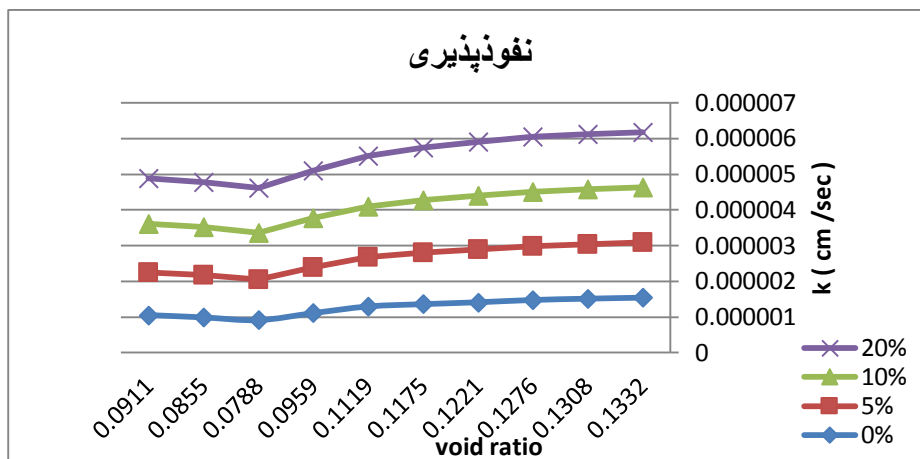
میزان نفوذپذیری از ۰٪ سیمان تا ۵٪ سیمان حدود ۱۵٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۱۰٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان حدود ۳٪ کاهش پیدا کرده است. به طور کلی ضریب نفوذپذیری در سیکل ۳ نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۰، حدود ۳٪ افزایش پیدا کرده است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد. که سبب زهکشی بیشتر خاک شده است.



شکل (۴-۲۳): نمودار Cc، Cs، Pc، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۲۴): گراف تحکیم، ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳



شکل (۴-۲۵): گراف نفوذپذیری، ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۳

۴-۷-۱ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل ۳

با توجه به گراف ۴-۲۶ میزان تغییرات نسبت تخلخل در آلاینده حاوی ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک نسبت به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک حدود ۳٪ و از ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک حدود ۴٪ کاهش پیدا کرده است. ماکزیمم Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۴۱٪ می باشد. افزایش درصد آلاینده فلز سنگین از ۱۰ تا ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک سبب افت پارامترهای مقاومتی خاک شده است.

با توجه به گراف ۴-۲۷، Δe در نمونه‌ی حاوی آلاینده‌ی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۰.۶۴۲ میلی‌متر) تا ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۰.۹۹۱ میلی‌متر) حدود ۲۶٪ و از ۸۰ تا ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۰۰۷ میلی‌متر) حدود ۱.۵٪ کاهش یافته است.

با توجه به گراف ۴-۲۸ مقدار Δe در نمونه حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۱۸ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ سانتی مول (۱.۱۵۱ میلی‌متر) حدود ۳٪ و از ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۸۵ میلی‌متر) حدود ۳٪ کاهش یافته است. ماکزیمم Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۱۶٪ می باشد.

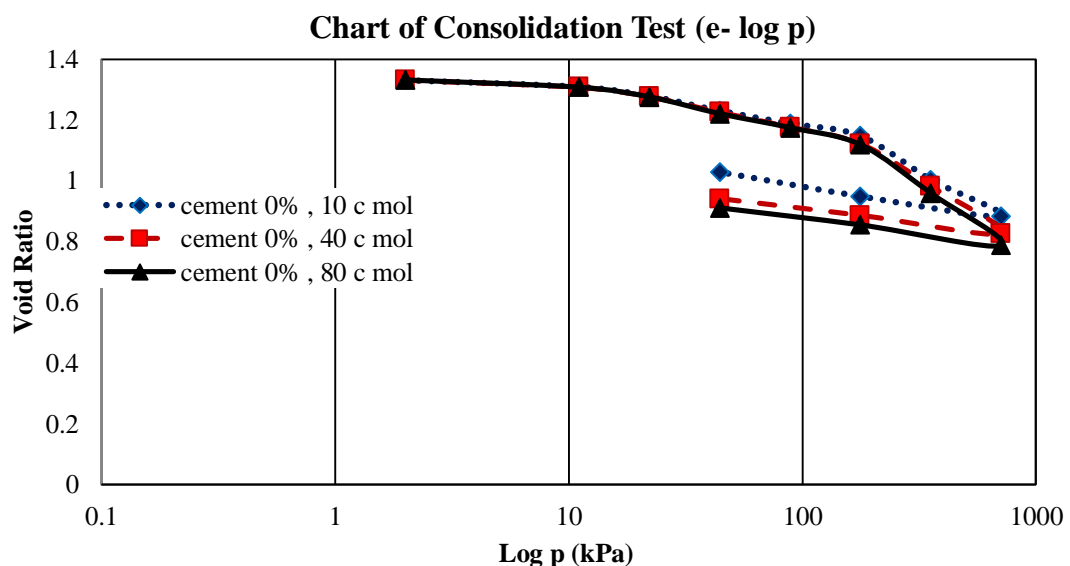
با توجه به گراف ۴-۲۹ مقدار Δe در نمونه حاوی آلاینده‌ی ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۰۸۳ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۲۶ میلی‌متر) حدود ۳.۲٪ و از ۴۰ تا ۱۰

سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۷۷ میلی متر) حدود ۰.۴٪ کاهش پیدا کرده است. ماکزیمم Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۰.۱۹٪ می باشد .
 با توجه به گرافهای ۴-۲۶ تا ۴-۲۹ استنباط می شود در شرایط یکسان به ازای تغییر در غلظت آلاینده، میزان افت مقاومت با افزایش مقدار آلاینده فلز سنگین افزایش می یابد.
 با توجه به نتایج بالا و مقایسه با نمونه های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۳ نتایج ذیل حاصل می شود :

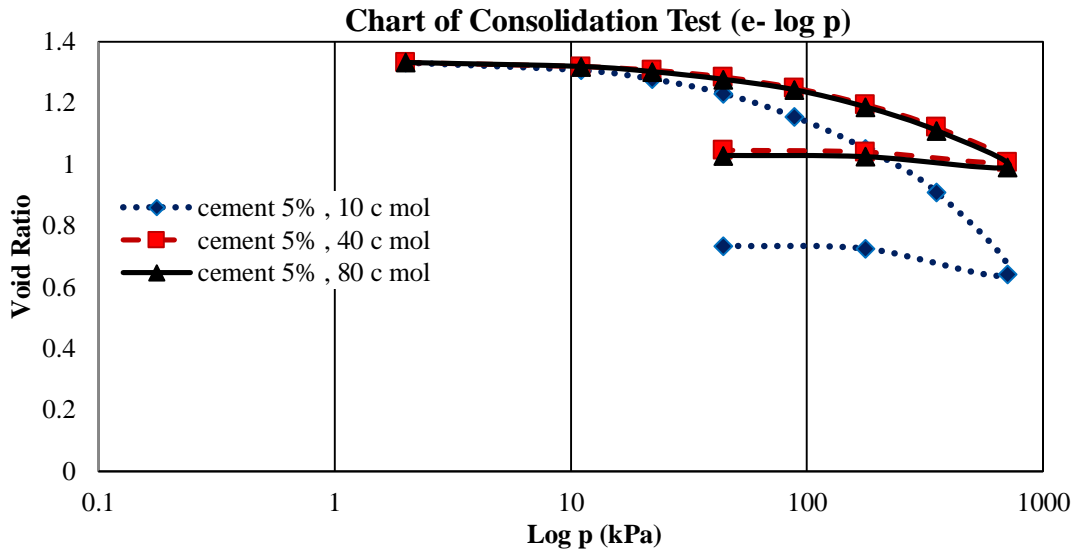
نمونه های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۳، نسبت به نمونه های مشابه در سیکل ۰، در ۰٪ سیمان Δe حدود ۰.۳٪ افزایش یافته است.

نمونه های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۳، نسبت به نمونه های مشابه در سیکل ۰، در ۰.۵٪ سیمان Δe حدود ۰.۳۱٪، در ۱.۰٪ سیمان حدود ۰.۳٪، در ۲.۰٪ سیمان حدود ۰.۱۰٪ افزایش یافته است.

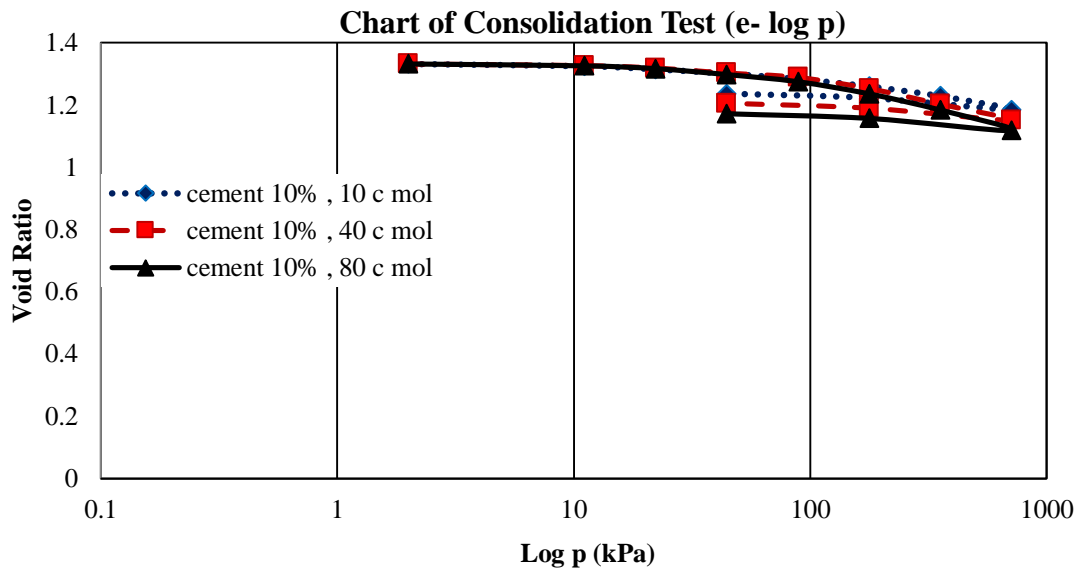
این مقایسه بیانگر تاثیر سیمان در افزایش مقاومت بتنویت آلوده می باشد. اگرچه آلاینده موجب کندگیر شدن سیمان شده و در نهایت سبب افت مقاومت خاک می شود ولی تثبیت با سیمان به دلیل انجام واکنش هیدراتاسیون سبب سیمانته شدن و افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش نشست شده است.



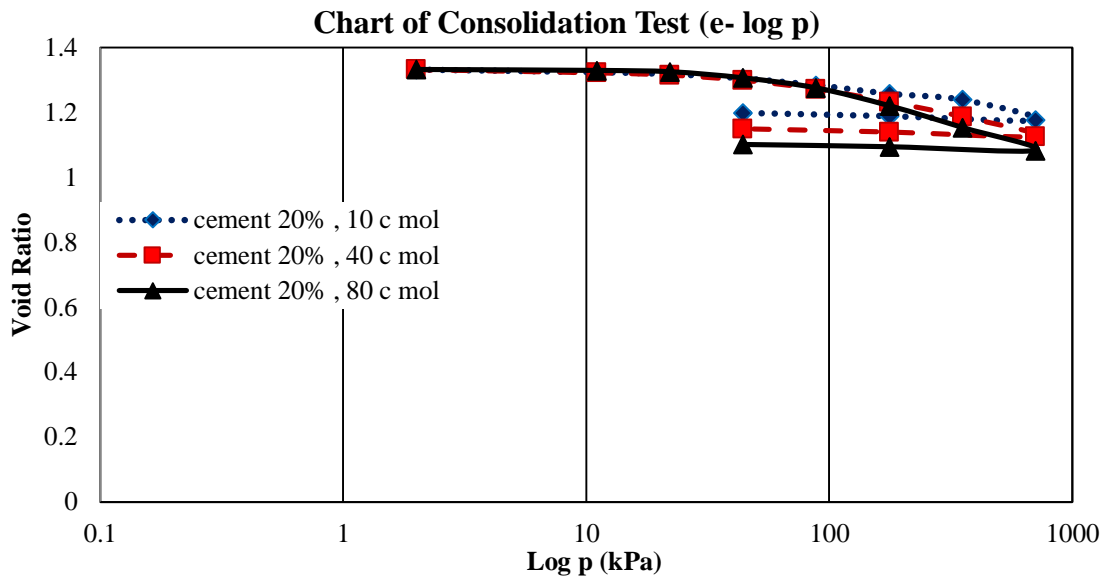
شکل (۴-۲۶) : گراف ۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳



شکل (۴-۲۷): گراف ۵٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳



شکل (۴-۲۸): گراف ۱۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳



شکل (۴-۲۹) : گراف ۲۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۳

۴-۸ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس بنتونیت در

سیکل ۷

گراف‌های ۴-۳۰ تا ۴-۳۲ حاوی آلاینده‌ی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷ ذوب و یخبندان به شرح ذیل می‌باشند. تغییرات C_c و C_s با توجه به شکل ۴-۳۰ به شرح ذیل می‌باشد :

جدول (۴-۱۵) : مقادیر C_c و C_s در سیکل ۷ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

C_c	C_s	سیمان
0.3499	0.122	0%
0.2256	0.0322	5%
0.1358	0.0599	10%
0.1497	0.0138	20%

با توجه به نتایج بدست آمده مقدار تنش پیش تحکیمی افزایش و ضرایب تحکیم و تورم ثابت، و در برخی موارد کاهش یافته‌است. می‌توان گفت، سیکل‌های یخبندان و ذوب از سیکل ۳ به بعد باعث کاهش تورم بنتونیت آلوده می‌شوند. هر چند در برخی موارد افزایش در تورم مشاهده می‌شود، اما این رفتار موقتی بوده و در سیکل‌های بعد شاهد کاهش مجدد تورم هستیم. با توجه به تغییرات C_c ، C_s و P_c در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان، می‌توان دریافت مقدار ۱۰٪ سیمان در جامدسازی خاک آلوده که در

معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دارد بهینه می‌باشد. و استفاده از ۲۰٪ سیمان سبب افزایش هزینه‌های طرح شده و در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک تاثیر چندانی ندارد.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۱۶) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

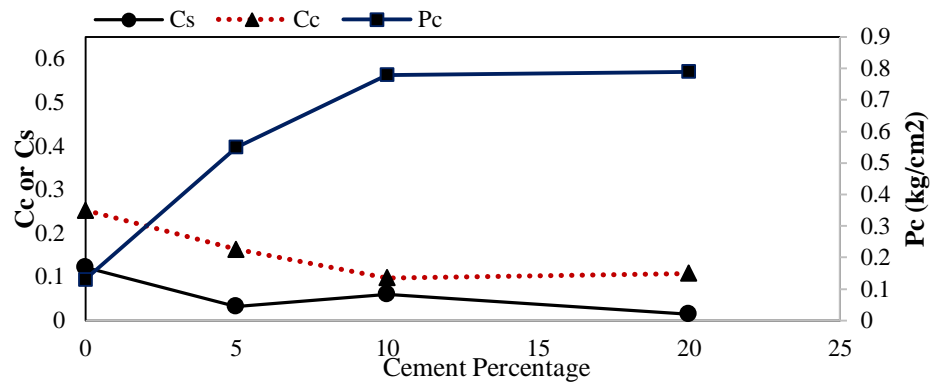
سیمان	ph
0%	7.42
5%	10.81
10%	11.28
20%	11.98

با توجه به روند افزایشی مقادیر pH با افزایش درصد سیمان می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار سیمان واکنش‌های پوزولانی انجام شده و سیمان سبب افزایش مقاومت خاک آلوده شده‌است. به خصوص در دو نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان این نتیجه واضح تر می‌باشد. به طور کلی می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل سبب افت مقاومت نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب کاهش افت مقاومت شده‌است.

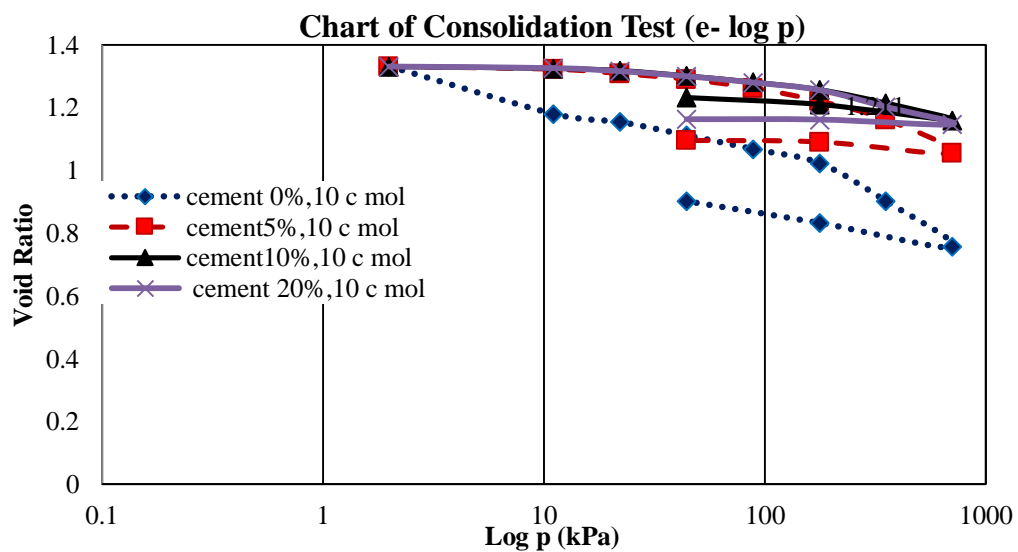
با توجه به گراف ۴-۳۱ Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۱.۱۴۸ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰.۷۵۷ میلی‌متر) حدود ۲۳٪، در نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۱.۱۴۸ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۷٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۳٪ می‌باشد. Δe نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳ حدود ۹٪ افزایش یافته‌است. این نتیجه بیانگر آن است که سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش و تغییر نسبت تخلخل اولیه (e_0) شده و سبب افزایش حجم حفرات طی سیکل‌های یخ و ذوب شدن می‌شوند. و پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش می‌دهند.

تغییرات ضریب نفوذپذیری به شرح ذیل می‌باشد :

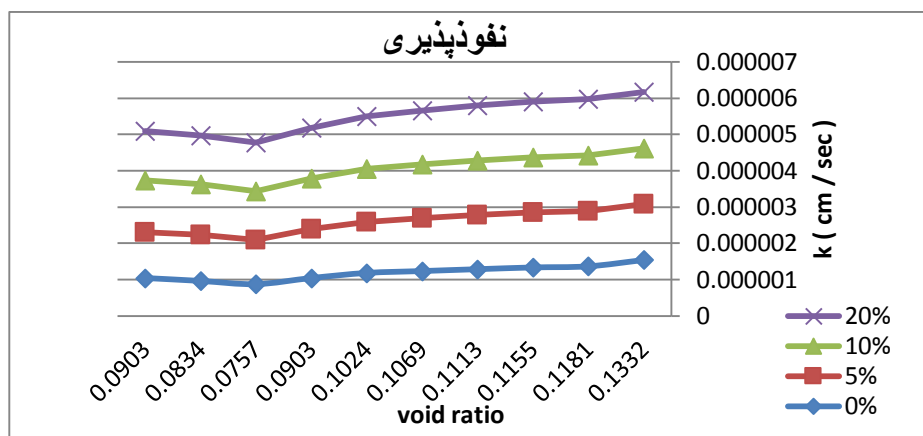
میزان نفوذپذیری از ۰٪ سیمان تا ۵٪ سیمان حدود ۲۳٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۸٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان حدود ۱٪ کاهش پیدا کرده است. ضریب نفوذپذیری در سیکل ۷ نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳، حدود ۱۸٪ افزایش داشته است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد. با توجه به نتایج پس از اعمال سیکل ۳ و در سیکل‌های بالاتر روند افزایشی نشست کاهش یافته و خاک از لحاظ مقاومتی تقریباً به ثبات رسیده است. و از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل‌های بیشتر آسیب کمتری به ساختار خاک وارد می‌کند. می‌توان گفت تثبیت با سیمان از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی افزایش مقاومت و پایداری نمونه‌ها بوده است.



شکل (۳۰-۴) : نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۳۱-۴) : گراف تحکیم، ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۴-۳۲): گراف نفوذپذیری، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷

شکل‌های ۴-۳۳ تا ۴-۳۵ مربوط به سیکل ۷ ذوب و یخبندان و حاوی آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک به شرح ذیل می‌باشند. تغییرات C_c و C_s در این نمونه‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۱۷): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۷ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.4536	0.1197	0%
0.2809	0.0368	5%
0.1704	0.023	10%
0.1773	0.023	20%

با توجه به نتایج فوق ضرایب تحکیم و تورم ثابت، و در برخی موارد کاهش یافته‌است. می‌توان گفت، افزایش تعداد سیکل‌های یخبندان و ذوب پس از سیکل ۳ باعث کاهش تورم بنتونیت آلوده می‌شوند. هر چند در برخی موارد افزایش در تورم مشاهده می‌شود، اما این رفتار موقتی بوده و در سیکل‌های بعد شاهد کاهش مجدد تورم هستیم. از طرفی با توجه به تاثیر یکسان سیمان در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان در کاهش ضریب تحکیم و تورم می‌توان گفت مقدار ۱۰٪ سیمان برای جامدسازی خاک بنتونیت آلوده که در معرض سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار گرفته بهینه می‌باشد. این مطلب با نتایج تنش پیش تحکیمی نیز قابل اثبات می‌باشد. تغییرات در گراف P_c نیز مانند گراف C_c و C_s در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان ثابت شده‌است. این نتیجه بیانگر بهینه بودن ۱۰٪ سیمان در تثبیت می‌باشد.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۱۸) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	ph
0%	7.61
5%	10.64
10%	11.32
20%	11.98

با توجه به نتایج آزمایش pH در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل‌ها و افزودن آلاینده سبب افت مقاومت نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب افزایش مقاومت و کاهش میزان نشست شده‌است.

با توجه به گراف ۴-۳۴ Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۱,۰۰۳ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰,۷۷۵ میلی‌متر) حدود ۱۷٪، در نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۱,۱۱۹ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۹٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۲٪ بوده‌است. Δe نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳ حدود ۴٪ افزایش یافته‌است.

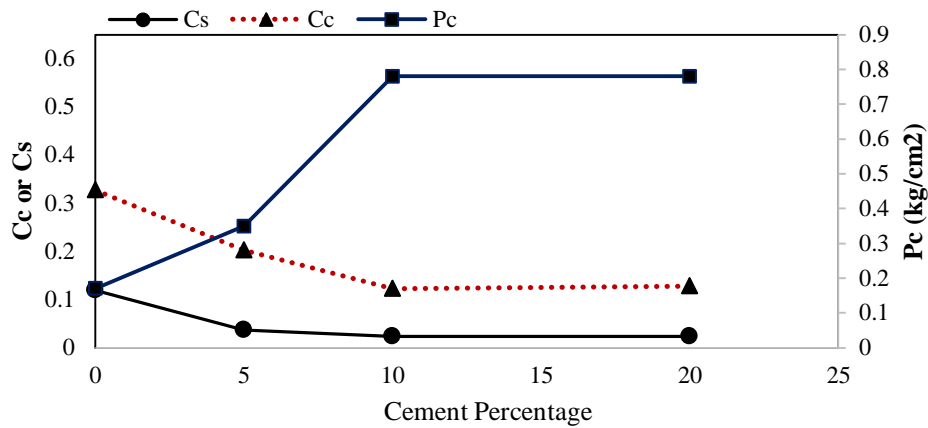
تغییرات ضریب نفوذپذیری به شرح ذیل می‌باشد :

میزان نفوذپذیری از ۰٪ سیمان تا ۵٪ سیمان حدود ۱۷٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۹٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان حدود ۱٪ کاهش پیدا کرده‌است. میزان نفوذپذیری در سیکل ۷ نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳، حدود ۴٪ افزایش یافته‌است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ‌زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد.

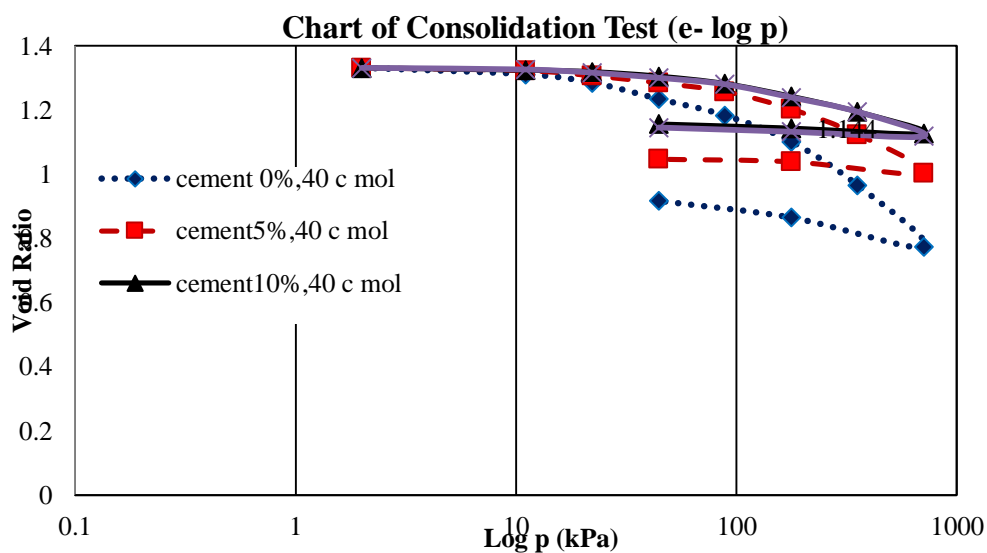
به طور کلی، پس از اعمال سیکل ۳ و در سیکل‌های بالاتر روند افزایشی نشست کاهش یافته و خاک از لحاظ مقاومتی تقریباً به ثبات رسیده‌است. از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل‌های بیشتر آسیب

کمتری به ساختار خاک وارد می‌کند. با توجه نزدیک بودن نتایج آزمایش نفوذپذیری در سیکل ۳ و ۷ می‌توان گفت نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری بعد از ۳ چرخه کاهش می‌یابد و پس از ۷ چرخه و

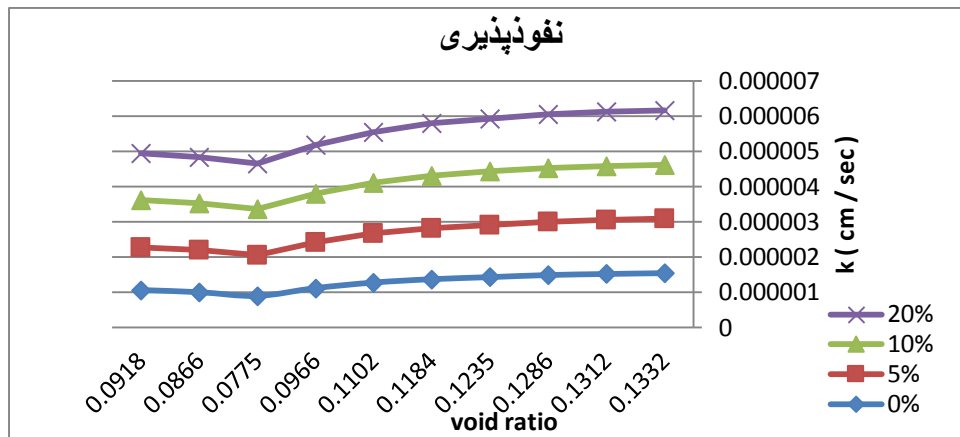
رسیدن به یک مقدار حداکثر تقریباً ثابت می‌ماند. از این رو می‌توان گفت ضریب نفوذپذیری که تحت ۷ چرخه‌ی ذوب و یخ قرار گرفته، قابل‌استفاده در طراحی‌های مهندسی در مناطق سردسیر می‌باشد.



شکل (۴-۳۳) : نمودار C_s ، C_c ، P_c ، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۴-۳۴) : گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۴-۳۵) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷

گراف‌های ۴-۳۶ تا ۴-۳۸ مربوط به سیکل ۷ ذوب و یخبندان و حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک به شرح ذیل می‌باشند. تغییرات C_c و C_s در این نمونه‌ها به شرح ذیل می‌باشد :

جدول (۴-۱۹) : مقادیر C_c و C_s در سیکل ۷ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.5043	0.1013	0%
0.3016	0.0714	5%
0.1865	0.0483	10%
0.2233	0.0207	20%

باتوجه به نتایج فوق و گراف ۴-۳۶ نتیجه می‌شود، ضرایب تحکیم و تورم کاهش و مقدار تنش پیش تحکیمی افزایش یافته‌است. بیشترین مقدار تغییرات تا ۵٪ سیمان بوده‌است. می‌توان گفت، سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش تورم بنتونیت آلوده پس از سیکل ۳ می‌شوند. هر چند در برخی موارد افزایش در تورم مشاهده می‌شود، اما این رفتار موقتی بوده و در سیکل‌های بعد شاهد کاهش مجدد تورم هستیم. فرآیند کاهش قابلیت تورم به دلیل تبادل کاتیونی و کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختار مجتمع بر اثر اندرکنش با سربار می‌باشد. سیمان با تشکیل مواد پوزولانی و سیمانته ذرات خاک رس را به هم چسبانده و در نتیجه امکان افزایش حجم خاک را به هنگام جذب آب کاهش می‌دهد. از طرفی بعد از سیکل سوم به دلیل اینکه هدایت هیدرولیکی و ارتفاع نمونه‌ها تغییرات

چندانی نداشته، تغییرات CC نیز کمتر و تقریباً ثابت شده است. با توجه به تاثیر چشمگیر و عملکرد خیلی خوب ۱۰٪ سیمان در افزایش پارامترهای مقاومتی خاک می توان گفت مقدار ۱۰٪ سیمان بهینه می باشد.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۲۰) : مقادیر pH در سیکل ۷ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	ph
0%	7.35
5%	9.42
10%	10.3
20%	10.73

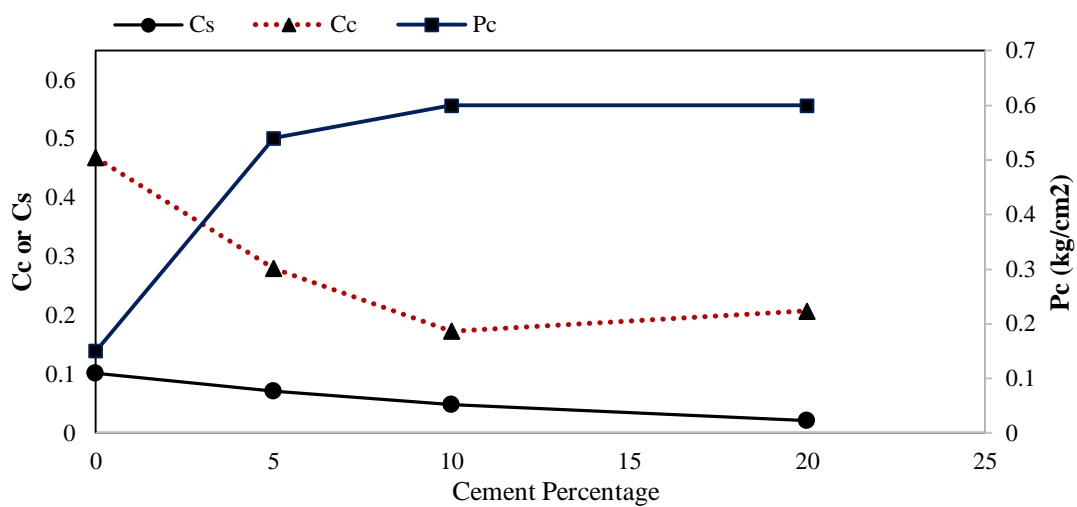
با توجه به جدول ۴-۲۰ با افزایش درصد سیمان pH خاک افزایش یافته است. به طور کلی با افزایش pH سیلیکای خاک از ساختار ورقه ای چهاروجهی و آلومینای خاک از ساختار ورقه ای هشت وجهی آزاد شده و واکنش های پوزولانی شتاب می گیرند. با توجه به مقدار pH در ۲۰ و ۱۰٪ سیمان می توان دریافت اگرچه اعمال سیکل ها سبب افت مقاومت نمونه ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب افزایش مقاومت و کاهش میزان نشست شده است.

با توجه به گراف ۴-۳۷ Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۰.۹۸ میلی متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰.۷۳۳ میلی متر) حدود ۱۹٪، نمونه ۱۰٪ سیمان (۱.۰۷ میلی متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۷٪ و نمونه ۲۰٪ سیمان (۱.۱۰۷ میلی متر) نسبت به نمونه ۱۰٪ سیمان حدود ۳٪ کاهش یافته است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۵٪ بوده است. تغییرات نسبت تخلخل نسبت به نمونه های مشابه در سیکل ۳، حدود ۴٪ افزایش یافته است.

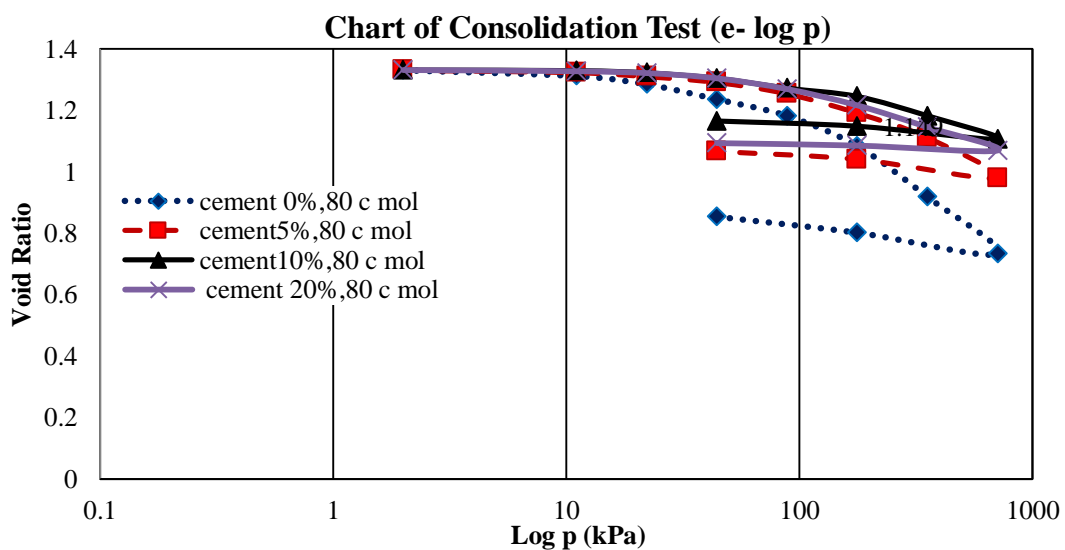
تغییرات ضریب نفوذپذیری به شرح ذیل می باشد :

میزان نفوذپذیری از ۰٪ سیمان تا ۵٪ سیمان حدود ۱۹٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۱۰٪ و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان حدود ۳٪ کاهش یافته است. میزان نفوذپذیری در سیکل ۷ نسبت به نمونه های مشابه در

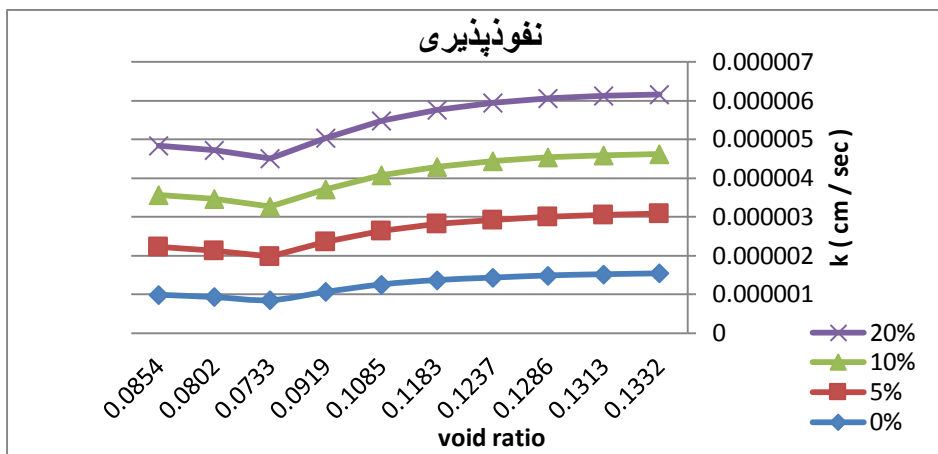
سیکل ۳، حدود ۴٪ افزایش یافته است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد. پس از اعمال سیکل ۳ و در سیکل‌های بالاتر روند افزایشی نشست کاهش یافته و خاک از لحاظ مقاومتی تقریباً به ثبات رسیده است. و از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل‌های بیشتر آسیب کمتری به ساختار خاک وارد می‌کند. با توجه نزدیک بودن نتایج آزمایش نفوذپذیری در سیکل ۳ و ۷ می‌توان گفت نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری بعد از ۳ چرخه کاهش می‌یابد و پس از ۷ چرخه و رسیدن به یک مقدار حداکثر تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل (۴-۳۶): نمودار Cc، Pc، Cs، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۴-۳۷): گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷



شکل (۴-۳۸): گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۷

۴-۸-۱ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل ۷

با توجه به گراف ۴-۳۹ میزان افزایش Δe در آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلو گرم خاک (۰.۷۳۳) میلی‌متر) نسبت به ۴۰ و ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۰.۷۷۵ میلی‌متر) حدود ۳٪ بوده‌است. مقدار Δe در ۴۰ و ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک حدود ۴۲٪ می‌باشد. ماکزیمم Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۴۵٪ است. افزایش درصد آلاینده فلز سنگین از ۱۰ تا ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک سبب افت مقاومت خاک شده‌است.

با توجه به گراف ۴-۴۰ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۰.۹۸ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۰۰۳ میلی‌متر) حدود ۲٪ و از ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۰۵۶ میلی‌متر) حدود ۴٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۲۷٪ است.

با توجه به گراف ۴-۴۱ مقدار Δe در آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۰۷ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۲۸ میلی‌متر) حدود ۲٪ و از ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱.۱۶۱ میلی‌متر) حدود ۳٪ کاهش یافته‌است. ماکزیمم مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۱۷٪ می‌باشد.

با توجه به گراف ۴-۴۲ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده‌ی ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۰۷ میلی متر) نسبت به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۱۱۹ میلی متر) حدود ۴٪ و از ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۱۴۸ میلی متر) حدود ۲٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و حدوداً معادل ۲۰٪ می‌باشد.

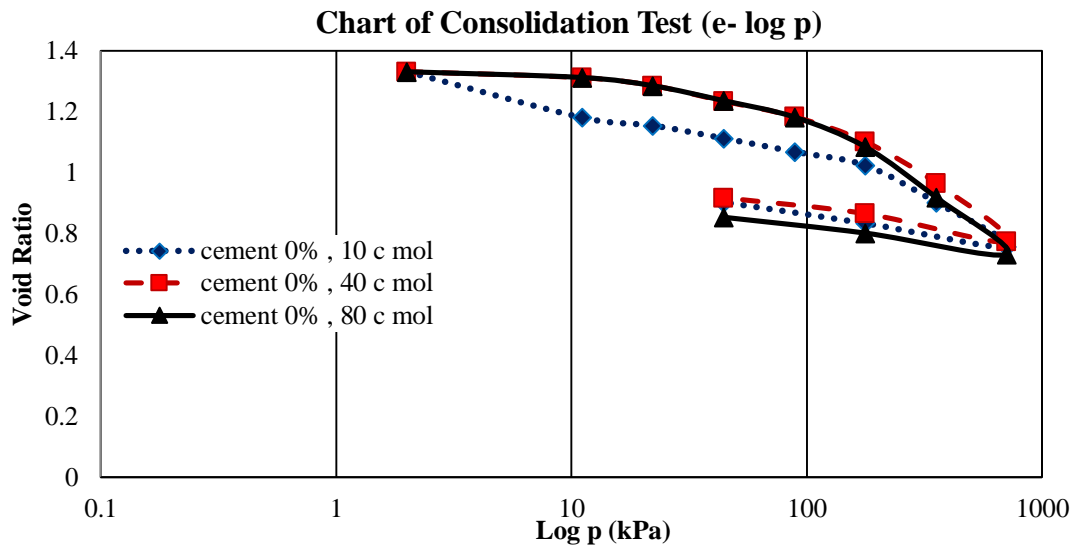
با توجه به گراف ۴-۳۹ تا ۴-۴۲ استنباط می‌شود در شرایط یکسان به ازای تغییر در غلظت آلاینده میزان افت مقاومت با افزایش مقدار آلاینده فلز سنگین افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج فوق و مقایسه با نمونه‌های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۳ نتیجه می‌شود:

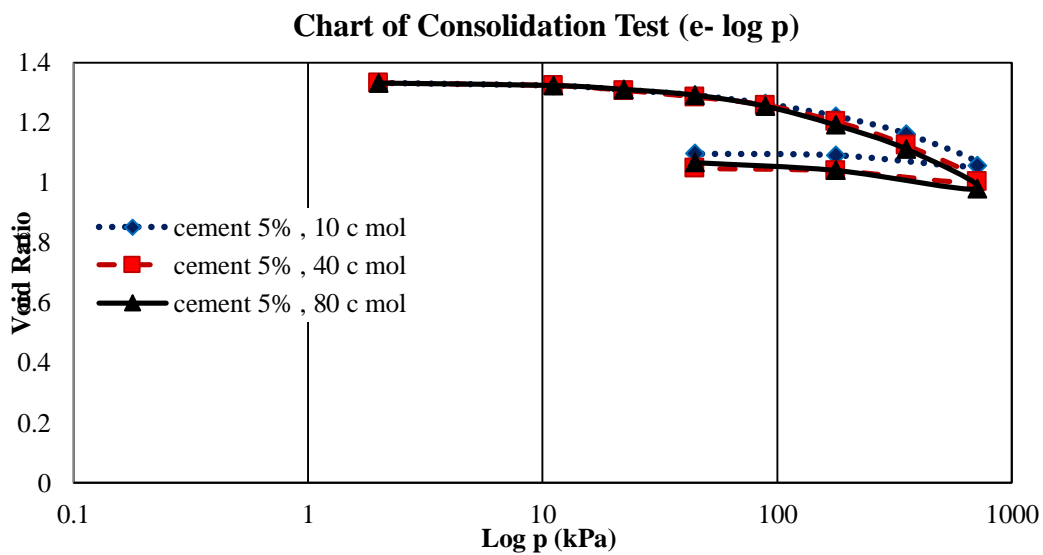
تغییرات نسبت تخلخل در نمونه‌های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۷، نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳، در ۰٪ سیمان حدود ۴٪ افزایش، در ۵٪ سیمان حدود ۲۵٪ کاهش، در ۱۰٪ سیمان حدود ۱٪ افزایش، در ۲۰٪ سیمان حدود ۱٪ افزایش یافته‌است.

این مقایسه بیانگر تاثیر سیمان در افزایش مقاومت بتن‌نویت آلوده می‌باشد. اگرچه آلاینده موجب کندگیر شدن سیمان شده و در نهایت سبب افت مقاومت خاک می‌شود ولی تثبیت با سیمان به دلیل انجام واکنش هیدراتاسیون سبب سیمانته شدن و افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش نشست می‌شود.

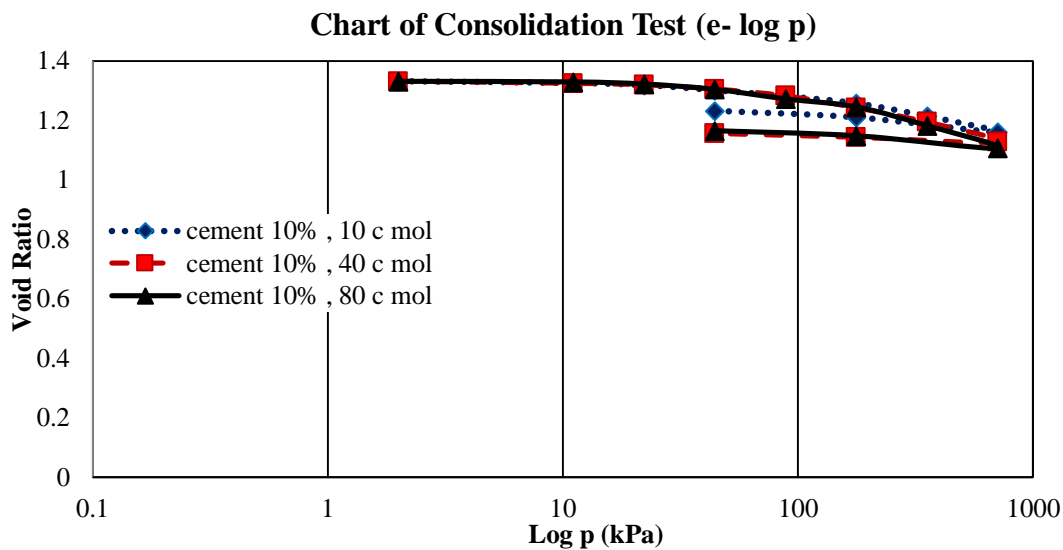
با توجه به نتایج می‌توان گفت سیکل‌های ذوب و یخبندان با افزایش هدایت هیدرولیکی و افزایش ارتفاع نمونه‌ها سبب افت پارامترهای مقاومتی خاک رس آلوده به فلز سنگین می‌شوند. ولی این تغییرات و اثر سیکل‌ها تا سیکل ۳ بیشترین تاثیر را داشته و از سیکل ۳ به بعد تقریباً ثابت شده‌است.



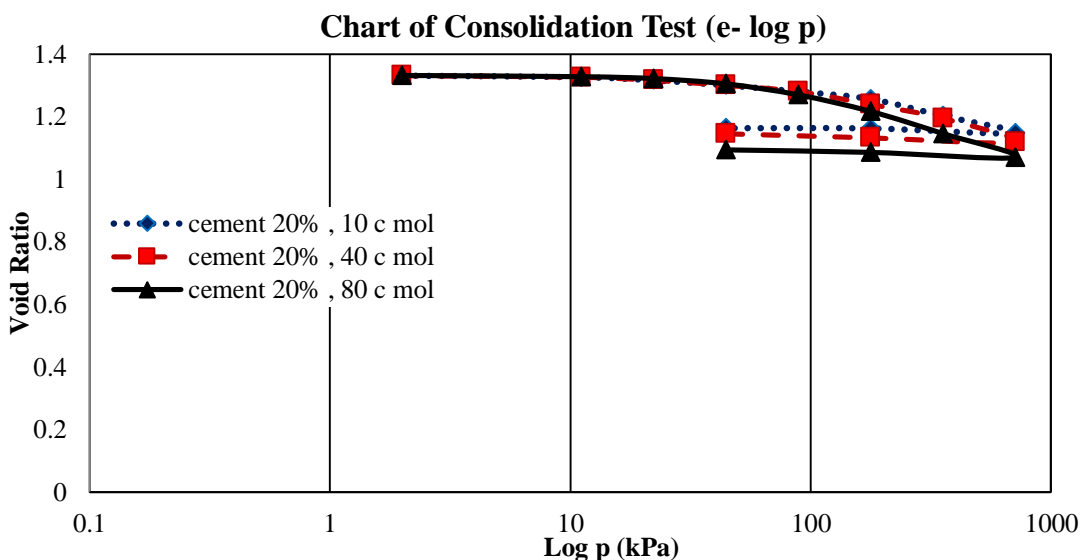
شکل (۴-۳۹): گراف ۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷



شکل (۴-۴۰): گراف ۵٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷



شکل (۴-۴۱): گراف ۱۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷



شکل (۴-۴۲): گراف ۲۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۷

۴-۹ تاثیر تثبیت با سیمان و سه غلظت آلاینده بر خصوصیات مقاومتی خاک رس

بنتونیت در سیکل ۱۲.

گراف‌های ۴-۴۳ تا ۴-۴۵ حاوی آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ذوب و

یخبندان به شرح ذیل می‌باشند. تغییرات C_c و C_s با توجه به گراف ۴-۴۳ به شرح ذیل می‌باشد:

جدول (۴-۲۱): مقادیر **Cc** و **Cs** در سیکل ۱۲ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.2371	0.0874	0%
0.2164	0.0299	5%
0.1381	0.0552	10%
0.1335	0.0092	20%

با توجه به نتایج فوق ضرایب تحکیم نسبت به سیکل ۷ تقریباً ثابت بوده و ضرایب تورم کاهش یافته است. با توجه به گراف **Pc** مشاهده می شود بیشترین تغییرات تنش پیش تحکیمی تا ۵٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ تغییرات ثابت شده است. از آنجایی که تاثیر ۱۰ و ۲۰٪ سیمان در کاهش ضریب تحکیم و تورم و افزایش تنش پیش تحکیمی یکسان می باشد می توان مقدار ۱۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. در واقع علت اصلی کاهش تورم تبادل کاتیونی و کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختار مجتمع به دلیل اندر کنش با سربار اعمالی می باشد. از طرفی سیمان با تشکیل مواد پوزولانی و سیمانته ذرات خاک رس را به هم چسبانده و در نتیجه امکان تغییر حجم بنتونیت هنگام جذب آب کاهش پیدا می کند. این کاهش تورم نشان می دهد که از سیکل ۳ به بعد و مخصوصاً سیکل ۱۲ تغییرات تورم کم شده و خاک به پایداری نسبی رسیده است.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۲۲): مقادیر **pH** در سیکل ۱۲ و آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

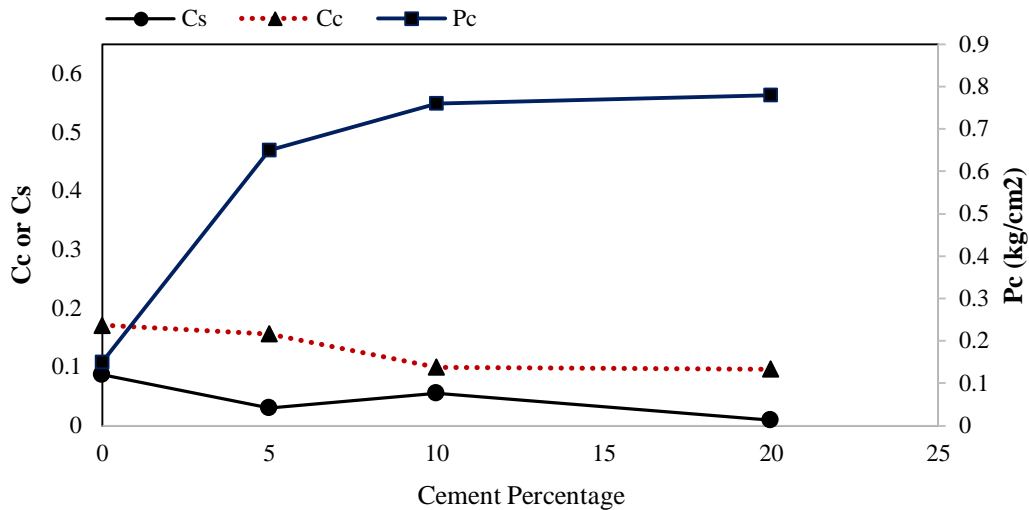
سیمان	ph
0%	7.11
5%	10.13
10%	10.98
20%	11.10

با توجه به مقادیر pH در ۲۰ و ۱۰٪ سیمان می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل سبب افت مقاومت نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب افزایش پارامترهای مقاومتی شده‌است. از طرفی با توجه به مقدار pH در دو درصد ۱۰ و ۲۰ در اکثر آزمایشات نتیجه می‌شود تاثیر ۱۰٪ سیمان بر روی مقاومت خاک بسیار نزدیک به ۲۰٪ سیمان بوده و می‌توان گفت ۱۰٪ سیمان مقدار بهینه در افزایش مقاومت خاک در نمونه‌ها می‌باشد. و از طرفی مقدار ۱۰٪ سیمان در تثبیت و جامدسازی از لحاظ اقتصادی بصره‌تر می‌باشد.

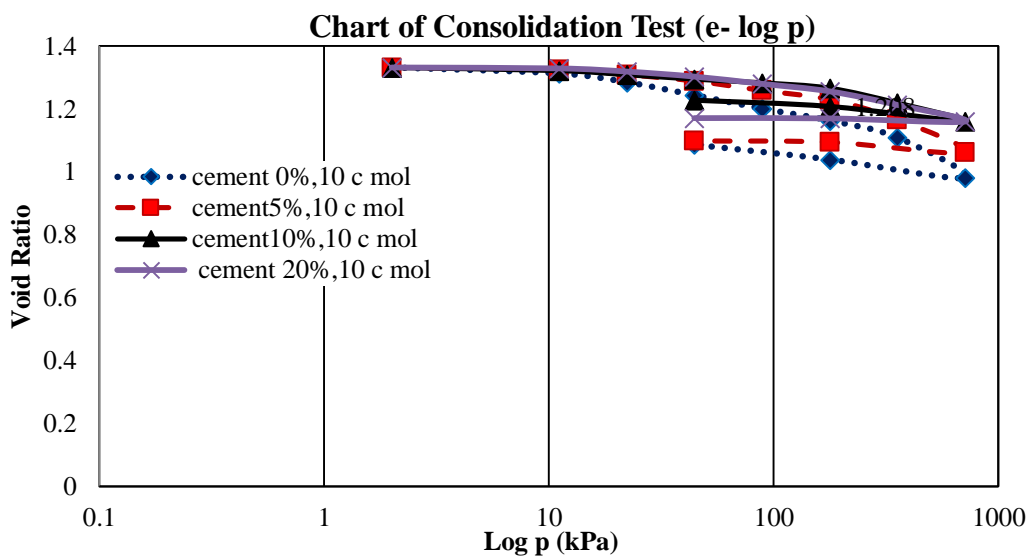
با توجه به گراف ۴-۴۴، Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۱۰۶۲ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰۹۸۱ میلی‌متر) حدود ۶٪، در نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۱۰۱۶ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۷٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۲۶٪ بوده‌است. Δe نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳ حدود ۲۶٪ و در سیکل ۷ حدود ۱۷٪ کاهش یافته‌است. این نتیجه بیانگر آن است که سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش و تغییر نسبت تخلخل اولیه (e_0) می‌شوند. و پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش می‌دهند. از طرفی با توجه به کاهش میزان نشست با افزایش سیکل‌ها نتیجه می‌شود که اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان تا سیکل ۳ بیشترین میزان آسیب را به خاک وارد می‌کنند و از سیکل ۳ به بعد خصوصاً در سیکل ۱۲ روند افزایشی نشست کاهش یافته‌است. تغییرات ضریب نفوذپذیری با توجه به گراف ۴-۴۵ به شرح ذیل می‌باشد :

میزان نفوذپذیری از ۰ تا ۵٪ سیمان ثابت و حدود ۷۴٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۱۴٪ و در ۱۰ و ۲۰٪ نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۱۳.۵٪ کاهش یافته‌است. میزان نفوذپذیری در سیکل ۱۲ نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳، حدود ۲٪ و نسبت به سیکل ۷ حدود ۱۷٪ افزایش یافته‌است. روند کاهش نفوذپذیری نشان می‌دهد اگرچه در تعداد کمی از نمونه‌ها در سیکل ۷ تغییراتی مشاهده شده، ولی این افزایش تغییرات موقتی بوده و در سیکل‌های بالاتر کاهش یافته و به مقدار تقریباً ثابتی رسیده‌است. دلیل افزایش ضریب نفوذپذیری در سیکل‌ها افزایش حجم آب در اثر یخ‌زدن و در نتیجه افزایش حجم حفرات خاک می‌باشد.

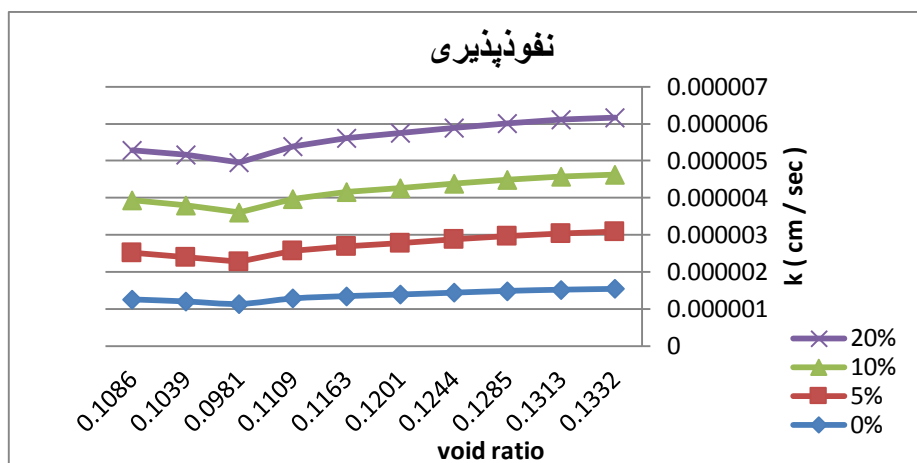
با توجه به نتایج پس از اعمال سیکل ۳ و در سیکل‌های بالاتر روند افزایشی نشست کاهش یافته و خاک از لحاظ مقاومتی تقریباً به ثبات رسیده‌است. از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل‌های بیشتر آسیب کمتری به ساختار خاک وارد می‌کند. می‌توان گفت تثبیت با سیمان از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی افزایش مقاومت و پایداری نمونه‌ها بوده‌است.



شکل (۴-۳): نمودار C_c ، C_s ، P_c ، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۴): گراف تحکیم، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۴۵) : گراف نفوذپذیری، آلاینده ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲

شکل های ۴-۴۶ تا ۴-۴۸ حاوی آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ذوب و یخبندان به شرح ذیل می باشند. تغییرات C_c و C_s در این نمونه ها به شرح ذیل می باشد :

جدول (۴-۲۳) : مقادیر C_c و C_s در سیکل ۱۲ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

C_c	C_s	سیمان
0.4789	0.0898	0%
0.2947	0.0644	5%
0.1335	0.0391	10%
0.1243	0.0138	20%

با توجه به نتایج فوق ضرایب تحکیم نسبت به سیکل ۷ تقریباً ثابت بوده و ضریب تورم کاهش پیدا کرده است. و همچنین با توجه شکل ۴-۴۶ مشاهده می شود افزایش درصد سیمان سبب افزایش تنش پیش تحکیمی شده است. بیشترین تغییرات ضریب تحکیم و تورم و تنش پیش تحکیمی از ۰ تا ۵٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ تغییرات ثابت بوده است. در واقع علت اصلی کاهش تورم تبادل کاتیونی و کاهش ضخامت لایه دوگانه و ایجاد ساختار مجتمع به دلیل اندرکنش با سربار اعمالی می باشد. از طرفی سیمان با تشکیل مواد پوزولانی و سیمانته کننده ذرات خاک رس را به هم چسبانده و در نتیجه امکان تغییر حجم بنتونیت هنگام جذب آب کاهش پیدا می کند. از سیکل ۳ به بعد و خصوصاً سیکل ۱۲ تغییرات تورم کم شده و خاک به پایداری نسبی رسیده است.

نتایج آزمایش pH :

جدول (۴-۲۴) : مقادیر pH در سیکل ۱۲ و آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	ph
0%	7.4
5%	10
10%	10.98
20%	11.2

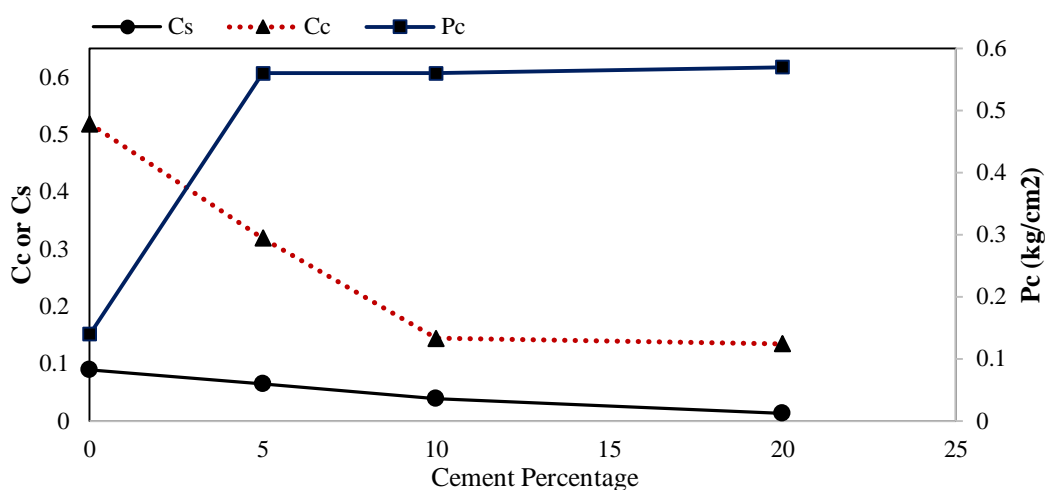
. با توجه به مقادیر pH در نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۱۰٪ سیمان می‌توان دریافت اگرچه اعمال سیکل

سبب افت مقاومت نمونه‌ها شده ولی سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی سبب افزایش مقاومت شده‌است. از طرفی مقادیر نزدیک به هم pH در دو درصد سیمان ۱۰ و ۲۰ و همینطور با توجه به گراف‌ها که نشان‌دهنده اختلاف نزدیک این دو درصد سیمان در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک است، نتیجه می‌شود مقدار ۱۰٪ سیمان برای تثبیت خاک آلوده بهینه می‌باشد. این نتیجه با نتایج Pc, Cc و Cs نیز قابل اثبات می‌باشد.

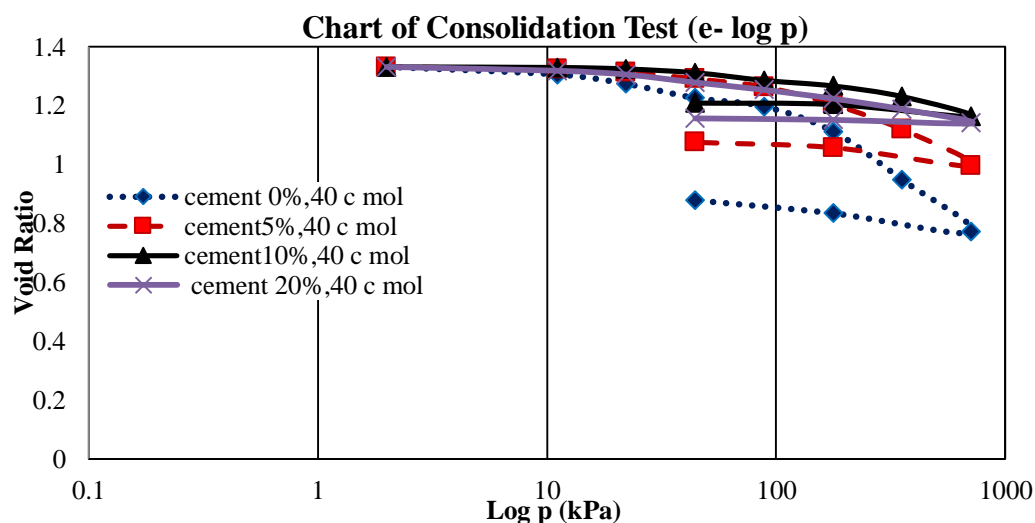
با توجه به گراف ۴-۴۷، Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۰.۹۹۷ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰.۷۷۱ میلی‌متر) حدود ۱۷٪، در نمونه‌های ۱۰ و ۲۰٪ سیمان با اختلاف جزئی، نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۱۲٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۲٪ بوده‌است. Δe نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳ حدود ۴٪ و نسبت به سیکل ۷ حدود ۰.۳٪ افزایش یافته‌است. این نتیجه بیانگر آن است که سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش و تغییر نسبت تخلخل اولیه (e_0) و افزایش حجم حفرات طی سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌شوند. و پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش می‌دهند. از طرفی با توجه به کاهش میزان نشست با افزایش سیکل‌ها نتیجه می‌شود که اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان تا سیکل ۳ بیشترین میزان آسیب را به خاک وارد می‌کند، اگرچه تغییراتی در سیکل ۷ مشاهده شده ولی به طور کلی از سیکل ۳ به بعد، میزان افت مقاومت کم شده و تغییرات ثابت و روند نزولی دارند. خصوصاً در سیکل ۱۲ کاهش تاثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان

محسوس تر می باشد.

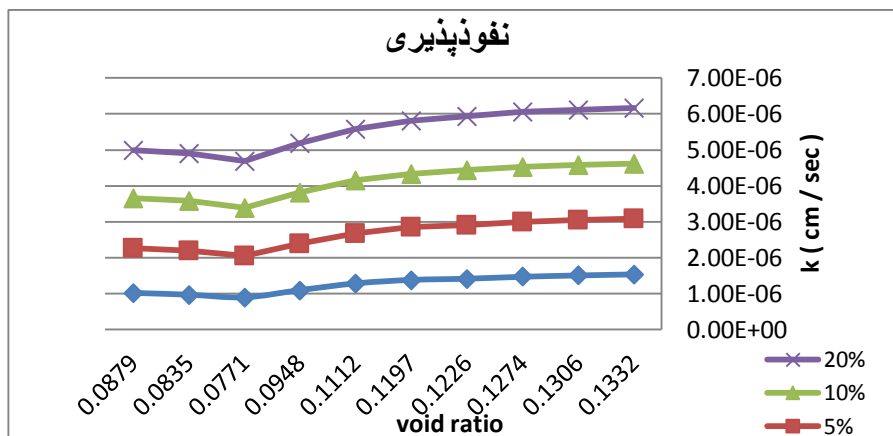
میزان نفوذپذیری از ۰ تا ۵٪ سیمان حدود ۰.۱۷٪، از ۵ تا ۱۰٪ سیمان حدود ۰.۱۲٪ کاهش یافته است. و در ۱۰ تا ۲۰٪ به مقدار جزئی حدود ۰.۳٪ افزایش یافته است. میزان نفوذپذیری در سیکل ۱۲ نسبت به همین نمونه ها در سیکل ۳، حدود ۰.۴٪ و نسبت به سیکل ۷ حدود ۰.۰۵٪ افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد با اعمال سیکل های بیشتر تغییرات کاهش یافته و خاک از لحاظ پایداری تقریباً به ثبات رسیده است. به طور کلی از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل های بیشتر آسیب کمتری به ساختار خاک وارد می کند.



شکل (۴-۶): نمودار Cc، Pc، Cs، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۷): گراف تحکیم، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۸): گراف نفوذپذیری، آلاینده ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲

شکل های ۴-۴۹ تا ۴-۵۱ حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲ ذوب و یخبندان به شرح ذیل می باشند. تغییرات C_c و C_s در این نمونه ها به شرح ذیل می باشد :

جدول (۴-۲۵): مقادیر C_c و C_s در سیکل ۱۲ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

Cc	Cs	سیمان
0.4904	0.1128	0%
0.2647	0.0345	5%
0.1519	0.0138	10%
0.1588	0.0207	20%

با توجه به نتایج فوق و شکل ۴-۴۹ ضرایب تحکیم و تورم تقریباً ثابت مانده و در برخی موارد کاهش یافته است. و تنش پیش تحکیمی با افزایش درصد سیمان افزایش یافته است. تغییرات کاهش ضریب تحکیم و تورم در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان ثابت بوده، با توجه به تاثیر یکسان سیمان می توان مقدار ۱۰ و ۲۰٪ سیمان را بهینه در نظر گرفت. این مطلب با نتایج گراف P_c نیز قابل اثبات می باشد. تغییرات تنش پیش تحکیمی تا ۵٪ سیمان روند افزایشی داشته و در ۱۰ و ۲۰٪ سیمان روند تغییرات کاهش و تقریباً ثابت شده است.

نتایج آزمایش pH :

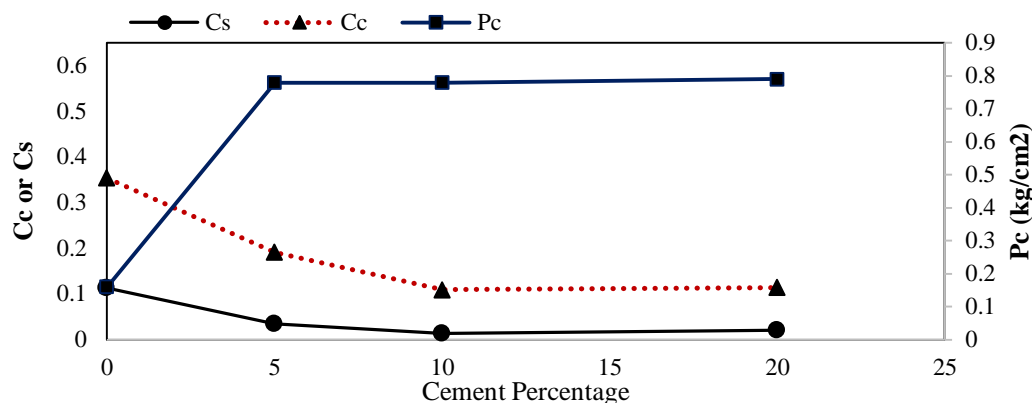
جدول (۴-۲۶) : مقادیر pH در سیکل ۱۲ و آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک

سیمان	ph
0%	7
5%	9.40
10%	10.21
20%	10.98

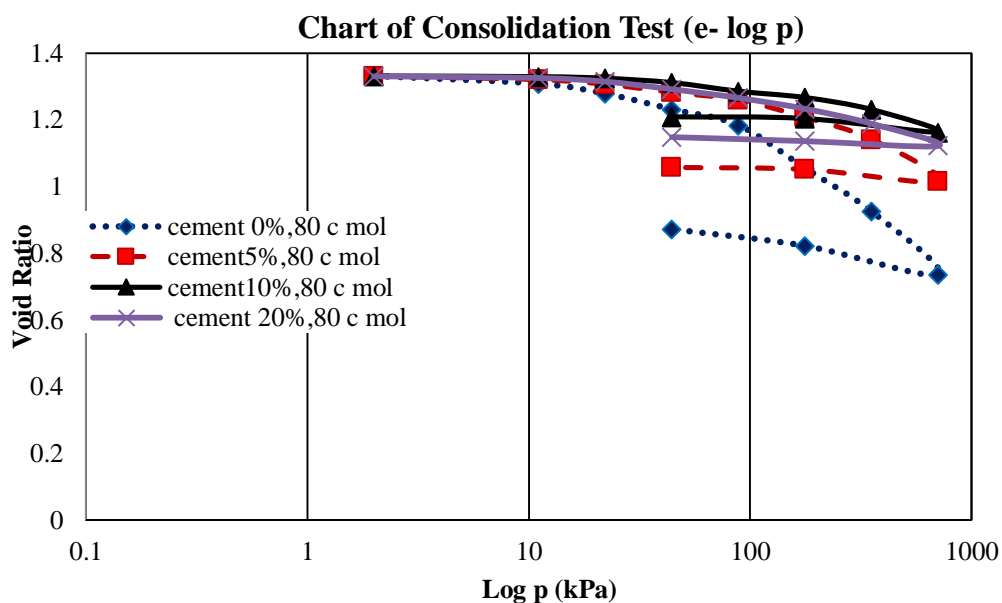
با توجه به گراف ۴-۵، Δe در نمونه ۵٪ سیمان (۱۰۱۷ میلی‌متر) نسبت به نمونه ۰٪ سیمان (۰۷۷۱ میلی‌متر) حدود ۲۱٪، و در نمونه ۱۰ و ۲۰٪ سیمان (۱۰۱۲۳ میلی‌متر) نسبت به ۵٪ سیمان حدود ۸٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe در نمونه ۰٪ سیمان حدود ۴۵٪ بوده‌است. Δe نسبت به همین نمونه‌ها در سیکل ۳ حدود ۴٪ افزایش یافته و نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۷ تقریباً ثابت بوده‌است. این نتیجه بیانگر آن است که سیکل‌های یخبندان و ذوب باعث کاهش و تغییر نسبت تخلخل اولیه (e_0) و افزایش حجم حفرات طی سیکل‌های یخ و ذوب شدن می‌شوند. و پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش می‌دهند. ولی تغییرات پس از سیکل ۳ کاهش یافته و خاک از لحاظ پایداری تقریباً به ثبات رسیده‌است. از طرفی با توجه به مقدار pH در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰٪ سیمان در اکثر آزمایشات نتیجه می‌شود تاثیر ۱۰٪ سیمان بر روی مقاومت خاک بسیار نزدیک به ۲۰٪ سیمان بوده و می‌توان گفت ۱۰٪ سیمان مقدار بهینه در افزایش مقاومت و تثبیت خاک در نمونه‌ها می‌باشد. تغییرات ضریب نفوذپذیری با توجه به گراف ۴-۵۱ به شرح ذیل می‌باشد :

میزان نفوذپذیری از ۰ تا ۵٪ سیمان حدود ۱۶٪، از ۵ تا ۱۰ و ۲۰٪ تقریباً ثابت بوده‌است. میزان نفوذپذیری در سیکل ۱۲ نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳، حدود ۱۰٪ افزایش یافته و نسبت به سیکل ۷ حدود ۱۴٪ افزایش یافته‌است. با توجه به نتایج پس از اعمال سیکل ۳ و در سیکل‌های بالاتر روند افزایشی نشست و نفوذپذیری تقریباً کاهش و در برخی موارد با اختلاف جزئی افزایش یافته‌است. با توجه به نتایج می‌توان گفت خاک از لحاظ مقاومتی تقریباً به ثبات رسیده‌است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت از سیکل ۳ به بعد، اعمال سیکل‌های بیشتر آسیب کمتری به ساختار خاک وارد

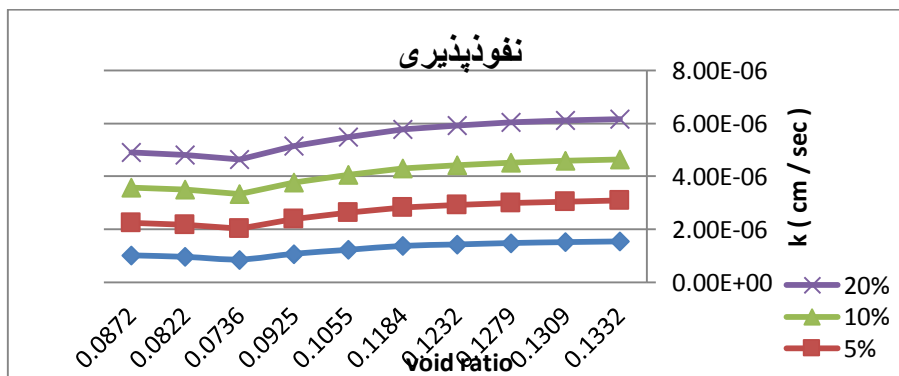
می‌کند. و خاک از لحاظ مقاومتی به ثبات رسیده‌است.



شکل (۴-۹): نمودار Cc، Cs، Pc، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۱۰): گراف تحکیم، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲



شکل (۴-۱۱): گراف نفوذپذیری، آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک در سیکل ۱۲

۴-۹-۱ تاثیر تغییر غلظت آلاینده در درصد ثابت سیمان بر خاک رس بنتونیت در سیکل ۱۲
با توجه به گراف ۴-۵۲ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک نسبت
به ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک حدود ۳٪ و در ۴۰ تا ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک حدود
۱۶٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و
حدوداً معادل ۴۵٪ می‌باشد. افزایش درصد آلاینده فلز سنگین از ۱۰ تا ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم
خاک سبب افت مقاومت خاک آلوده شده‌است.

با توجه به گراف ۴-۵۳ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده‌ی ۸۰ و ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک
(۱۰۰۱۷ میلی‌متر) نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۰۶۲ میلی‌متر)
حدود ۳٪ کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ و ۴۰ سانتی مول بر کیلوگرم
خاک بوده و حدوداً معادل ۲۴٪ می‌باشد.

با توجه به گراف ۴-۵۴ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک
(۱۰۱۳۴ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ و ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۱۶۳ میلی‌متر) حدود ۲٪
کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم
خاک بوده و حدوداً معادل ۱۵٪ می‌باشد.

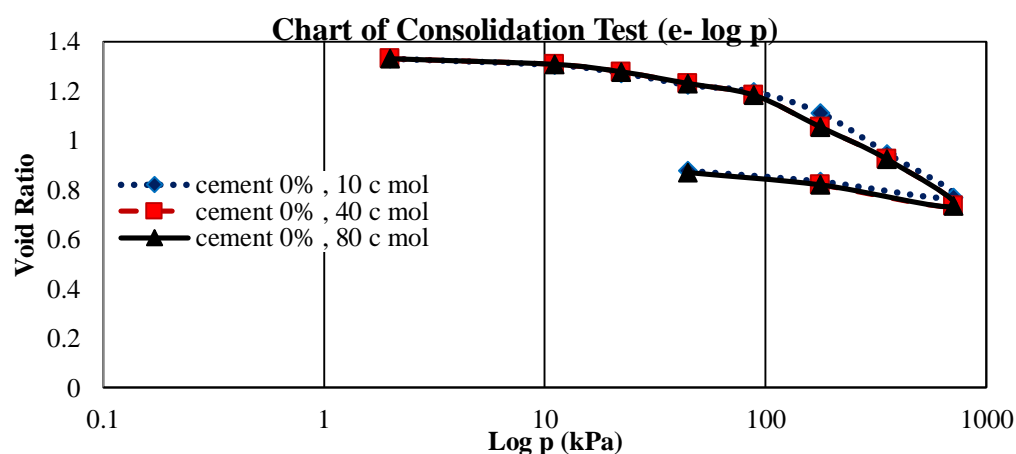
با توجه به گراف ۴-۵۵ مقدار Δe در نمونه‌های حاوی آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک
(۱۰۱۲۳ میلی‌متر) نسبت به ۴۰ و ۱۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک (۱۰۱۴۱ میلی‌متر) حدود ۲٪
کاهش یافته‌است. بیشترین مقدار Δe مربوط به آلاینده ۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده و
حدوداً معادل ۱۶٪ می‌باشد.

با توجه به نتایج فوق و مقایسه با نمونه‌های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل‌های ۳ و ۷ نتایج ذیل
استنباط می‌شود :

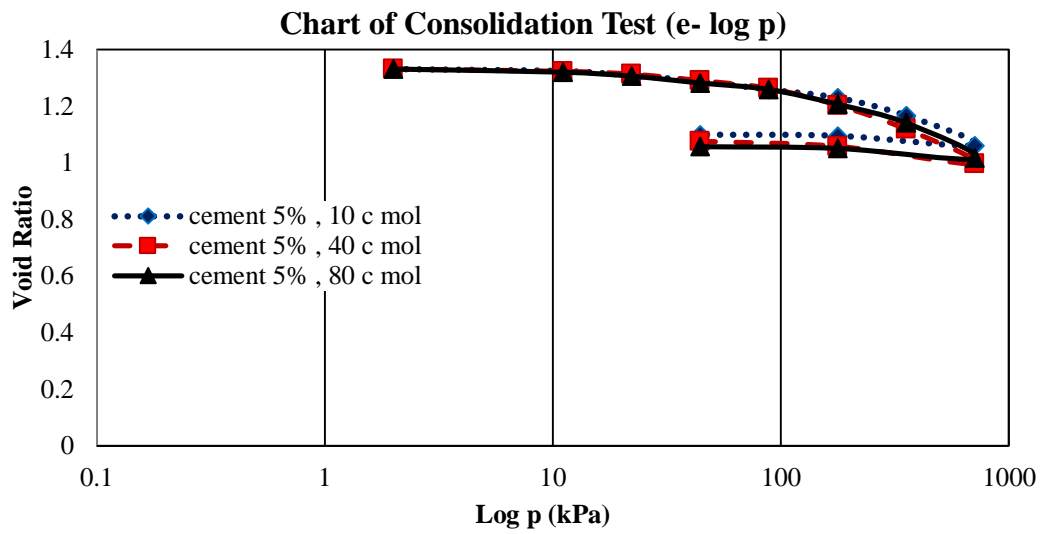
مقدار Δe در نمونه‌های حاوی ۳ غلظت آلاینده در سیکل ۱۲، نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳،
در ۰٪ سیمان حدود ۴٪ افزایش یافته و نسبت به سیکل ۷ با اختلاف ناچیز تقریباً ثابت، در ۵٪

سیمان حدود ۲۸٪ و نسبت به سیکل ۷ تقریباً ۳٪ کاهش، در ۱۰٪ سیمان حدود ۱٪ و نسبت به سیکل ۷ تقریباً ۲٪ کاهش و در ۲۰٪ سیمان حدود ۳٪ و نسبت به سیکل ۷ تقریباً ۴٪ کاهش یافته است.

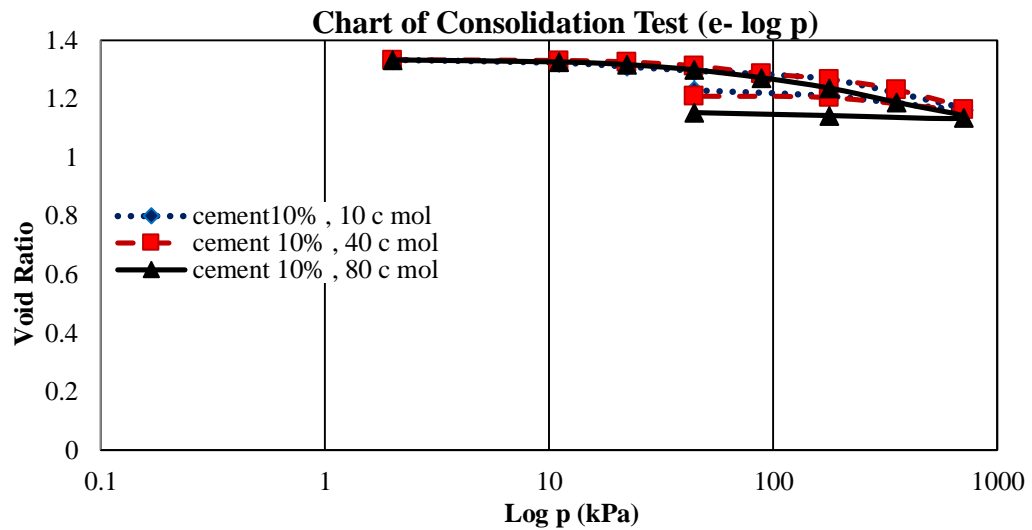
این مقایسه بیانگر تاثیر سیمان در افزایش مقاومت بنتونیت آلوده می باشد. اگرچه آلاینده موجب کندگیر شدن سیمان شده و در نهایت سبب افت مقاومت خاک می شود ولی تثبیت با سیمان به دلیل انجام واکنش هیدراتاسیون سبب سمنته شدن و افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش نشست شده است. با توجه به نتایج می توان گفت سیکل های ذوب و یخبندان باعث افت پارامترهای مقاومتی خاک رس آلوده به فلز سنگین شده از طرفی این چرخه ها سبب افزایش هدایت هیدرولیکی و ارتفاع نمونه ها می شوند، ولی این تغییرات و اثر سیکل ها تا سیکل ۳ بیشترین تاثیر را داشته و از سیکل ۳ به بعد نشست به میزان چشمگیری کاهش یافته است. خصوصاً در سیکل ۱۲ مقادیر نشست نسبت به دو چرخه ۳ و ۷ کاهش و یا ثابت مانده اند. که بیانگر متوقف شدن تاثیر سیکل ها بر پارامترهای مقاومتی خاک می باشد. از طرفی با توجه به گراف ها می توان دریافت که تاثیر ۱۰ و ۲۰٪ سیمان در تثبیت و جامدسازی بسیار نزدیک به هم بوده و عملکرد مشابهی داشته اند. به طوری که می توان نتیجه گرفت ۱۰٪ سیمان برای تثبیت خاک آلوده به نترات سرب که در معرض چرخه های ذوب و یخبندان قرار دارد بهینه می باشد.



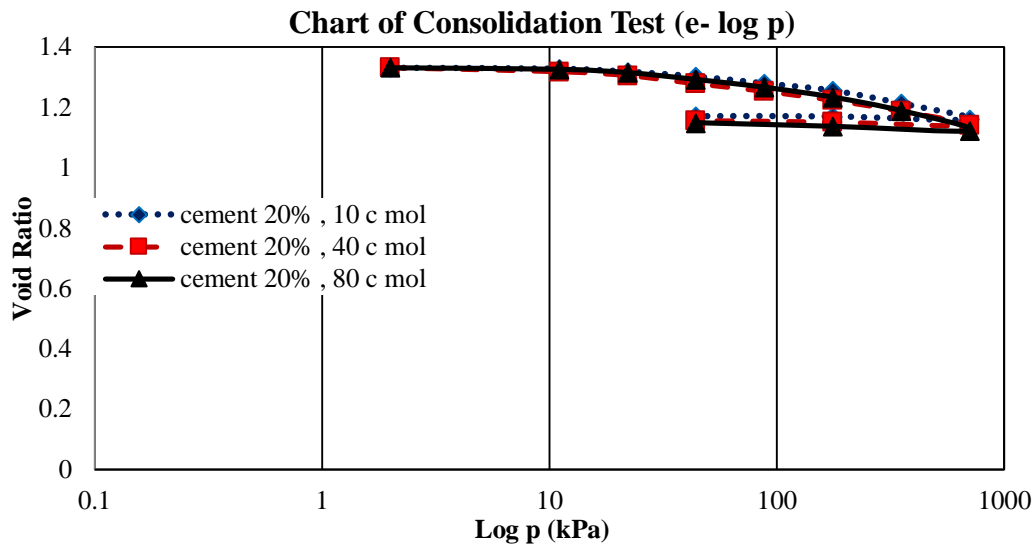
شکل (۴-۵۲): گراف ۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲



شکل (۴-۵۳): گراف ۵٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲



شکل (۴-۵۴): گراف ۱۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲



شکل (۴-۵۵) : گراف ۲۰٪ سیمان و سه غلظت آلاینده در سیکل ۱۲

نتایج آزمایش XRD یا پراش پرتو ایکس

نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس بر اعتبار نتایج حاصل از C_c ، C_s ، P_c ، گراف $e - p$ و pH دلالت دارد. به عبارتی ۱۰٪ سیمان با ایجاد ترکیبات پوزولانی و سمته سبب افزایش پارامترهای مقاومتی خاک شده است.

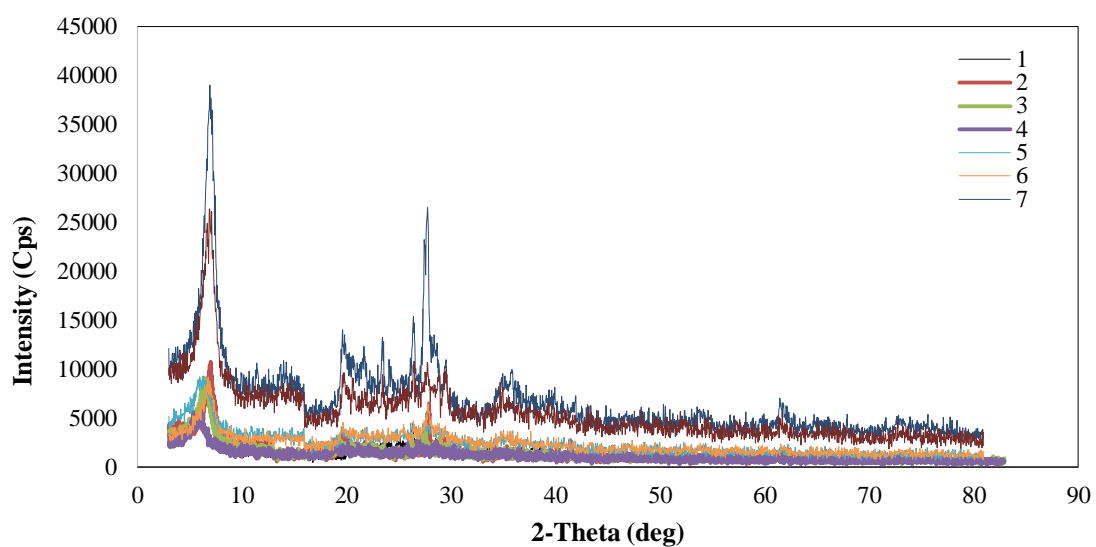
نتایج کانی شناسی به ترتیب فراوانی نوع ترکیب تشکیل شده به شرح ذیل می باشد :

- ۱- کانی های رسی، بنتونیت، کلسیت، کوارتز، نیترات سرب، هیدرات کلسیم و سیلیکات آلومینیوم - کلسیم.
- ۲- کانی های رسی، بنتونیت، کوارتز، هیدروسیلیکات آلومینیوم، کلسیت و هیدرات کلسیم.
- ۳- کانی های رسی، کلسیت، بنتونیت، سیلیکات آلومینیوم - کلسیم، هیدرات کلسیم، کوارتز و نیترات سرب.
- ۴- کانی های رسی، بنتونیت، کلسیت، نیترات سرب، سیلیکات آلومینیوم - کلسیم، هیدرات کلسیم و کوارتز.
- ۵- کانی های رسی، نیترات سرب، بنتونیت، سیلیکات آلومینیوم - کلسیم، هیدرات کلسیم، کلسیت و کوارتز.
- ۶- کانی های رسی، کوارتز، نیترات سرب، کلسیت، هیدرات کلسیم، بنتونیت و سیلیکات آلومینیوم - کلسیم.
- ۷- کانی های رسی، کلسیت، کوارتز، سیلیکات آلومینیوم - کلسیم و هیدرات کلسیم.
- ۸- کانی های رسی، بنتونیت، نیترات سرب، کلسیت، سیلیکات آلومینیوم - کلسیم، هیدرات کلسیم و کوارتز.

جدول (۴-۲۷) : ترکیب نمونه‌های تحت آزمایش XRD

کد	ترکیب نمونه‌ها
۱	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۱۰ سانی مول - سیکل ۰
۲	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۰ - سیکل ۰
۳	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۱۰ سانی مول - سیکل ۳
۴	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۴۰ سانی مول - سیکل ۳
۵	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۴۰ سانی مول - سیکل ۷
۶	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۴۰ سانی مول - سیکل ۰
۷	پنتونیت ۰
۸	۱۰٪ سیمان - آلاینده ۱۰ سانی مول - سیکل ۷

جدول (۴-۲۸) : نتایج گراف XRD



فصل پنجم
نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر، در فصل پیش ارائه گردید. در این فصل ابتدا خلاصه‌ای از مهمترین نتایج بدست آمده از پژوهش ارائه می‌گردد، سپس چند پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی بیان می‌گردد.

۵-۲ نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش تحکیم بر روی خاک بنتونیت آلوده به فلز سنگین نیترات سرب که در معرض چرخه‌های ذوب-یخبندان می‌باشد نتایج ذیل حاصل گردید:

- ۱- در طبیعت خاک‌هایی با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی وجود دارد که ممکن است به عنوان بستر سازه‌ها قرار بگیرد. از این رو نیاز به بررسی‌های ژئوتکنیکی به منظور بررسی خاک‌ها می‌باشد. یکی از مسائل مهمی که ممکن است سبب تخریب سازه گردد، احداث برروی خاک مساله‌دار می‌باشد. بنابراین یکی از راهکارهایی که جهت مقابله با پتانسیل مخرب این خاک‌ها وجود دارد بهسازی آن‌ها می‌باشد.
- ۲- مهمترین موضوع در تثبیت و جامدسازی انتخاب صحیح ماده‌ی تثبیت‌کننده می‌باشد. که متناسب با نوع آلودگی، غلظت فلز سنگین، هزینه‌های اقتصادی طرح و ... انتخاب می‌گردد.
- ۳- استفاده از سیمان تاثیر بسزایی در تغییر ویژگی‌های خاک دارد از طرفی نتایج بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که پرکاربردترین ماده‌ی نگهدارنده در جامدسازی مواد آلاینده‌ی فلز سنگین، سیمان می‌باشد. با توجه به نتایج اضافه کردن ۵ تا ۲۰٪ سیمان به خاک رس آلوده شده به فلز سنگین نیترات سرب نتایج قابل‌قبولی ایجاد خواهد کرد. نکته‌ی حائز اهمیت در تثبیت با ۴ درصد مختلف سیمان این می‌باشد که نتایج در تثبیت با ۱۰ و ۲۰٪ سیمان بسیار نزدیک به هم بوده و می‌توان تثبیت با ۱۰٪ سیمان را مقدار بهینه در نظر گرفت.
- ۴- روند افزایش درصد سیمان تاثیر مستقیمی برروی ضریب تحکیم دارد. افزایش درصد سیمان از ۰ تا ۲۰٪ با ایجاد ترکیبات پوزولانی و سیمانته کردن سبب کاهش ضریب تحکیم می‌شود.

- ۵- سیمان سبب کاهش پتانسیل تورم در خاک‌های متورم‌شونده می‌شود.
- ۶- سیکل‌های ذوب و یخبندان بر پارامترهای تحکیم خاک تاثیر می‌گذارد. این چرخه‌ها سبب افزایش CC خاک می‌شوند که در نتیجه سبب افزایش هدایت هیدرولیکی و ارتفاع نمونه‌ها می‌شوند. این تغییرات تا سیکل ۳ ادامه داشته و پس از سیکل ۳ تقریباً ثابت شده‌اند. زیرا تغییرات هدایت هیدرولیکی و در نتیجه ارتفاع نمونه‌ها پس از سیکل ۳ کاهش یافته‌است. همچنین سیکل‌های ذوب و یخبندان سبب افزایش CS خاک رس تا سیکل سوم شده‌اند با توجه به نتایج پس از سیکل سوم تغییرات کاهش یافته است.
- ۷- روند افزایش درصد سیمان سبب می‌شود ضریب نفوذپذیری در بازه‌ی کمتری قرار بگیرد.
- ۸- با توجه به این موضوع که نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری پس از ۳ چرخه کاهش، و پس از ۷ چرخه و رسیدن به یک مقدار حداکثر ثابت مانده‌است می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نفوذپذیری که تحت ۷ سیکل ذوب و یخبندان قرار بگیرد قابل استفاده در طراحی‌های مهندسی در مناطق دسردسیر می‌باشد.
- افزایش درصد سیمان سبب افزایش تنش پیش تحکیمی می‌شود و از طرفی افزایش غلظت آلاینده سبب کاهش عملکرد سیمانته‌شدن سیمان و کاهش تنش پیش تحکیمی می‌گردد.
- ۹- بیشترین نرخ تغییر در ضریب تحکیم و تورم در ۰ تا ۵٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ تغییرات ثابت شده‌است. از طرفی بیشترین تغییرات تنش پیش تحکیمی تا ۵٪ سیمان بوده و از ۱۰ تا ۲۰٪ سیمان تغییرات ثابت شده‌است. از این رو می‌توان مقدار ۱۰٪ سیمان را در جامدسازی خاک آلوده به فلز سنگین در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان بهینه در نظر گرفت.

۵-۳ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی

موضوعات زیر برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌گردد :

- ۱- تغییر درصد رطوبت بازسازی نمونه‌ها و بررسی تاثیر آن بر روی پارامترهای مقاومتی خاک. در این پژوهش نمونه‌ها با درصد رطوبت بهینه ساخته شده‌اند. پیشنهاد می‌گردد رفتار نمونه‌ها با درصد رطوبت‌های گوناگون بررسی گردد.
- ۲- مطالعه‌ی اثر انواع دیگر مواد شیمیایی بر روی خاک رس تثبیت‌شده و تاثیر آن بر روی میزان تحکیم نمونه‌ها.
- ۳- مطالعه اثر انواع دیگری از مواد تثبیت‌کننده مانند: آهک و خاکستر بادی بر روی نمونه‌ها و بررسی میزان تغییرات مقاومتی خاک.
- ۴- مطالعه اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان با دماهای متفاوت و تاثیر آن بر روی مقدار تحکیم خاک.
- ۵- مطالعه‌ی اثر خاک رس کائولینیت به جای بنتونیت و بررسی تاثیر تثبیت و چرخه‌های ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌ها.

- [۱] Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., "Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay", Cold Regions Science And Technology 48, 34-43, 2007.
- [۲] Andersland O.B., Ladanyi B., "An Introduction to Frozen Ground Engineering", Chapman & Hall, N.Y., pp. 352 (1994).
- [۳] Eigenbrod K.D., Knutsson S., Sheng D., " Pore water pressures in freezing and thawing fine-rained soils" Journal of Cold Regions Engineering Vol.10, pp. 76–92 (1996).
- [۴] Viklander P., "Laboratory study of stone heave in till exposed to freezing and thawing" Cold Regions , Science and Technology, No.27, pp. 141–152 (1998).
- [۵] Cruzda K.A., Hohmann M., "Freezing effect on strength of clayey soils" Applied Clay Science No.12 pp.165–187 (1997).
- [۶] [Haß and Seegers, 2000].
- [۷] فاخر ع، عسکری ف، (۱۳۷۲)، " تورم و واگرایی خاک‌ها "، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.
- [۸] Jessberger, H.L. (1970) , "Frost susceptibility criteria , Highway Reseach Record, No.304, pp.40-45.
- [۹] Ogata, N., Kataoka , T. And Komiya , A. (1985)., "Alteration of soil behaviour after cyclic freezing And thawing' , Freezing , Edited by Seiiti Kinosita , Masami , Fukuda.
- [۱۰] Ravaska , O. And Kujala , K (1977), "Freez – thaw effect on soil – bentonite Mixtures " , Ground Freezing– Frost Action in Soils Edited by Sven Knutsson
- [۱۱] طباطبایی، (۱۳۶۱) ، " روسازی راه " انتشارات دانشگاه تهران.
- [۱۲] کاوسی و خدایی ، (۱۳۷۳) ، " روش‌های پیشرفته طراحی روسازی راه " ، انتشارات دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).
- [۱۳] Arabi, M., (1987). , "Frost resistance of lime stabilized clay soil" , Ph.D, Thesis, University of South Glamorgan, Wales , UK.
- [۱۴] Hohmann-Porebska M., "Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters" Applied Clay Science No.21, pp77-87 (2002).
- [۱۵] Erkan Esmer , Richard D. Walker And Robert D. Kerbi , (1969)., "Freez-thaw durability of lime stabilized clay soils", Highway Research Record, NO.263, PP.27-36.

[۱۶] گودرزی ا. ر، اکبری ح.، گرگانی گ " تاثیر کانی ساخت مصالح رسی در بازده طرح تثبیت بستر روسازی "

پژوهشنامه حمل و نقل، سال دهم، ۲۳۳، ۱۳۹۲-۲۳۳.

[۱۷] Saride, S., Puppala, A. J., and Chikyala, S. R.; "Swellsrinkand strength behaviors of lime and cementstabilized expansive organic clays"; Applied ClayScience; 85, 2013, 39-45.

[۱۸] Stoltz, G., Cuisinier, O., and Masrouri, F.; "Multi scaleanalysis of the swelling and shrinkage of a limetreated expansive clayey soil"; Applied Clay Science;61, 2012, 44-51.

[۱۹] Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., and García, B.;"Stabilization of expansive soils for use in construction"; Applied Clay Science; 51, 2011, 348-352.

[۲۰] Rao, M. R., Rao, A. S., and Babu, R. D.; "Efficacy of cement-stabilized fly Ash cushion in arresting heave of expansive soils"; Geotech Geol Eng.; 26, 2008,189-197

[۲۱] Al-Mukhtar, M., Khattab, S., and Alcover, J. F.; "Microstructure and geotechnical properties of limetreated expansive clayey soil"; Engineering Geology;139, 2012, 17-27.

[۲۲] Bozbey, I., and Garaisayev, S.; "Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay"; Environmental Earth Sciences; 60, 2010, 1137-1151.

[۲۳] Winterkorn, H.F. and Pamukcu, S. (1991). "Soil Stabilization and Grouting." Springer US, Foundation Engineering Handbook, pp.317-378.

[۲۴] Bhattacharja, s. and Todres, H.A.,2003, "Stabilisation of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature" , *PCA R&D* , serial No.2066

[۲۵] Sherwood, P.T.,1993, "Reactions of soil minerals with cement and chemicals", Highway research record 139, pp15-25.

[۲۶] طباطبایی امیرمحمد " روسازی راه " مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۰.

[۲۷] Winterkorn, H.F. and Pamukcu, S. (1991). "Soil Stabilization and Grouting." Springer US, Foundation Engineering Handbook, pp.317-378.

[۲۸] Evstatiev, D. (1988). "Loess Improvement Methods." Journal of Engineering Geology, Vol.25, pp.341-366.

[۲۹] Bhattacharja, s. and Todres, H.A.,2003, "Stabilisation of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature" , *PCA R&D* , serial No.2066.

[۳۰] رجب پور اشکیکی ع . و گنجی دوست ح ، (۱۳۸۵) "جامدسازی و تثبیت خاک آلوده به فلزات سنگین توسط

سیمان پرتلند" دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ص ۱.

[۳۱] رحمت عظیمی، " خاکشناسی عمومی" دانشگاه پیام نور

[۳۲] Clem, A., Doehler, R. (1961), "Industrial application of bentonite," Tenth National Conference on Clay & Clay Materials, pp. 272-283.

[۳۳] 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, Vol. 1, pp. 307-310.

[۳۴] 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, pp. 247-255.

[۳۵] Chapuis, R. P. (1990), "Soil – bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests," Canadian Geotechnical Journal, 27, pp. 47-57.

[۳۶] غفاری ح، (۱۳۸۶)، پایان نامه ارشد: "تعیین فاصله زمانی بهینه بین مرحله اختلاط و تراکم برای درصد های

مختلف بکار رفته آهک جهت تثبیت خاک " دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

[۳۷] مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان (پی و پی سازی).

[۳۸] اسکندری ح، (۱۳۹۳) " بررسی خاک های واگرا، رمبنده و متورم شونده و راهکارهایی در

خصوص بهبود و مقابله با پتانسیل مخرب این نوع خاک ها " دانشگاه تربین دبیر شهید رجایی، تهران، ۱۲ و ۱۳ آذرماه،

ص ۲

[۳۹] بابک محمد علیزاده رفیع. (۱۳۸۷)، " اصلاح خاک های رمبنده (فروریزی) به روش تزریق مطالعه موردی راه

هن سمنان - دامغان " پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین.

[۴۰] المیرا خاکسارنجفی، ابوالفضل اسلامی، امیر هوشنگ چگینی. (۱۳۸۹)، " بررسی صدمات حاصل از اندرکنش

آب و خاک بر روی ابنیه فنی و شیوه بهینه کنترل آن " پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد،

مشهد، ایران.

[۴۱] وکیلی امیرحسین، زمردیان سیدمحمدعلی، وکیلی امیر، آرام مهرداد. (۱۳۸۸)، " ارزیابی پتانسیل واگرایی و

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رس واگرای تثبیت شده با آهک و پوزولان "، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی

عمران دانشگاه شیراز، ایران ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت.

- [۴۲] عطا جعفری شالکوهی، بهروز گنمیری، علیرضا عالم زاده. (۱۳۹۰)، "پهنه بندی خاک‌های مساله‌دار در منطقه ساحلی شمال (گیلان، مازندران، گلستان) به کمک تست‌های درجا و آزمایشگاهی" اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، اسفند.
- [۴۳] مهناز جهانپار مقدم، رضا رحمان‌نژاد، محمدعلی ابراهیمی "معیارهای شناسایی خاک‌های رمبنده و روش‌های مقابله با پدیده رمبندگی" اطلاع‌رسانی توسعه پژوهان هزاره سوم ۱۰-۱۷.
- [۴۴] مهرداد مقدس، علی رئیسی استبرق، جمال عبدالهی. (۱۳۹۱) "اثر کیفیت آب بر ویژگی‌های تورمی یک خاک متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی" مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال شانزدهم، شماره ۶۲، زمستان.
- [۴۵] Transport Road Research Board, "Lime Stabilization Reactions Properties and Construction", State of Art Report No.5, Washington D.C.(1987).
- [۴۶] <https://Wikipedia.org/wiki/>
- [۴۷] V.Shevnin, O. Delgado-Rodríguez, A. Mousatov "Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data .", Geofísica Internacional ,Vol. 45, Num. 3, pp. 195-207,(2006).
- [۴۸] سعید گیتی‌پور و غلامرضا نبی بید هندی، " بررسی اثر شیرآبه بر ضریب نفوذپذیری و ساختمان خاک‌های رسی بنتونیتی" مجله محیط‌شناسی شماره ۳۳، بهار ۱۳۸۳، صفحه ۱۵-۹.
- [۴۹] Castelbaum, D. and Shackelford, C. "Hydraulic Conductivity of Bentonite Slurry Mixed Sands." J. Geotech.Geoenviron. Eng., 135(12), 1941-1956.(2009).
- [۵۰] Won-Jin Cho, Jin Seop Kim and Jong Won Choi "Influence of Water Salinity on the Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite." J. of the Korean Radioactive Waste Society Vol.9(4), PP. 199-206, Dec.(2011).
- [۵۱] Terzaghi, K. "Die Berechnung der durchlassig -keitsziffer de tones aus demverlang der hydro-dynamischen spannung ser cheinungen." Akademie der Wissenchaften in wein 132 (1923): 125-138.
- [۵۲] Rendulic, L. "Porenziffer and poren wasserdruck in Tonen." Der Baningenieur 71, No. 51-53 (1936): 559-564.
- [۵۳] Biot, M.A. "General theory of three -dimensional consolidation." Journal of Applie Physics 12 (1941): 156-164.
- [۵۴] ASTM D D2435 – 04, standard test method for "One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading" .

- [۵۵] رضا بهرامی، محمد سیروس پاکباز، (۱۳۹۳)، "تاثیر تثبیت خاک‌های ریزدانه با سیمان بر روی ضریب تحکیم" هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه بابل، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت.
- [۵۶] Retnamony, G.R. and Mehter, M.A., (۱۹۹۸), "Effect of Clay Mineralogy on Coefficient of nsolidation," *Clays and Clay Minerals*, Vol. ۴۶, No. ۵, p۵۹۶-۶۰۰.
- [۵۷] احدیان ج، نصرافحانی م. ج، سجادی م، (۱۳۸۷)، "ارزیابی ضریب تحکیم در رس‌های با خاصیت خمیری کم تا متوسط" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران، اردیبهشت ۸۷.
- [۵۸] D. Spence R., Shi C., "Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes", CRC, 2004.
- [۵۹] USEPA, "Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report(11th E.)", EPA542-R-03-009,2004. www.epa.gov
- [۶۰] Gismera, M.J. and Sevilla, M.T. (2012), "Clayey materials as geologic barrier in urban landfills," *Applied Clay Science*, pp 23–29.
- [۶۱] Jayasekera, S. (2007), "Long term effects of landfill leachate on volume change and hydraulic conductivity properties of expansive clays," *Australian Geomechanics*.
- [۶۲] محمدرضا توکلی، سی امین گردهمایی زمین، "بررسی منابع آلاینده فلزات سنگین با استفاده از GIS" اسفند ۱۳۹۰.
- [۶۳] مهندسی مشاور شارمند، خلاصه گزارش مرحله اول طرح و توسعه و عمران، خردادماه ۱۳۸۶.
- [۶۴] <http://www.ngdir.ir>
- [۶۵] زمان هواشناسی کشور، سالنامه آماری سینوپتیک در سال ۱۹۹۰-۱۹۹۹.
- [۶۶] بهناز دهرآزما، "زمین شناسی مهندسی و محیط زیست، زمستان ۹۳، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، ص ۱۲۹-۱۳۸.
- [۶۷] Mattigod, S.V., Sposito, G., and Page, A.L., (۱۹۸۱), "Factors affecting the solubilities soils", *Soil Sci. of America*, pp. ۲۰۳-۲۲۱. of trace metals in
- [۶۸] Ou, C.Y., Chien, S.C., and Wang, Y.G., (۲۰۰۹), "On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions", *Applied Clay Science*, Vol. ۴۴, pp. ۱۳۰-۱۳۶.
- [۶۹] Baker, J.E., Rogers, C.D.F., Boardman, D.I., and Peterson, K., (۲۰۰۴), "Electrokinetic stabilization: an overview and case study", *Journal of Ground Improv.*, Vol. ۸, pp. ۴۷-۵۸.
- [۷۰] Jayasekera, S., and Hall, S., (۲۰۰۷), "Modification of the Properties of Salt Affected Soils Using Electrochemical Treatments", *Geotech. Geol. Eng.*, Vol. ۲۵, pp. ۱-

۱۰.

[۷۱] Acar, Y.B., Hamed, J., Alshawabkeh, A., Gale, R., (۱۹۹۴), "Cd(II) removal from saturated kaolinite by application of electrical current", *Geotechnique*, Vol. ۴۴, pp. ۲۳۹-۲۵۴.

[۷۲] Mattson, E.D., Bowman, R.S., and Lindgren, E.R., (۲۰۰۲), "Electrokinetic ion transport through Unsaturated soil: ۱. Theory, model development, and testing", *Journal of Contaminant Hydrology*; Vol. ۵۴, pp. ۹۹-۱۲۰.

[۷۳] Acar, Y.B, and Alshawabkeh, A., (۱۹۹۳), "Principles of Electrokinetic Remediation", *Env. Sci. and Technol.*, Vol. ۲۷, pp. ۲۶۳۸-۲۶۴۷.

[۷۴] Lasat, M.M., Pence, N.S., Garrin, D.F., Ebbs, S.D. and Koohian, L.V., (۲۰۰۰), "Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator *Thelaspis caerulescens*", *JEXP Botany*, Vol. ۵۱, pp. ۷۱-۷۹.

[۷۵] EPA, (۲۰۰۶), "In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil", *Solid Waste and Emergency Response ۵۲۰۳P*, ۵۴۲/F-۰۶/۰۱۳.

[۷۶] Kumar, P. B. N. A., Dushenkov, V., Motto, H. and Raskin, I., (۱۹۹۵), "Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. ۲۹, pp. ۱۲۳۲-۱۲۳۸.

[۷۷] Flathman, P.E., and Lanza, G.R., (۱۹۹۸), "Phytoremediation: Current views on an emerging green technology", *Journal of Soil Contamination*, Vol. ۴, pp. ۴۱۵-۴۳۲.

[۷۸] [۷۸] گودرزی ا.، اکبری ح.، ارزیابی راهکارهای مهندسی جلوگیری از انتشار آلاینده‌های حاوی فلز سنگین به محیط زیست " اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، اسفند ۱۳۹۰.

[۷۹] Spence, R.D., and Shi, C., (۲۰۰۴), "Stabilization and solidification of hazardous, radioactive, and Mixed Wastes", *CRC Press*, p. ۳۷۸.

[۸۰] Abumaizar, R.J., and Smith, E.H., (۱۹۹۹), "Heavy metals contaminants removal by soil washing", *Journal of hazardous materials*, Vol. ۷۰, pp. ۷۱-۷۶.

[۸۱] [۸۱] دکتر عبدالرحمن بهرامی، مرکز سلامت محیط کار، راهنمای کنترل سرب در محیط کار ۱-۲۰۹-۲۰۲-۲۰۵۰۲۰۲
پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور.

[۸۲] Shi, C., and Jimenez, A.F., (۲۰۰۶), "Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. ۱۳۷, pp. ۱۶۵۶-۱۶۶۳.

[۸۳] Malviya, R., and Chaudhary, R., (۲۰۰۶), "Factors affecting hazardous waste solidification/Stabilization:Review", *Hazardous Material. J.*, Vol. ۱۳۷, pp. ۲۶۷-۲۷۶.

- [⁸⁴] Batchelor, B., (2006), “Overview of waste stabilization with cement”, *Journal of Waste Management*, Vol. 26, pp. 689-698.
- [⁸⁵] Roy, A, Eaton, H.C., Cartledge, F.K., and Tittlebaum, M.E., (1991), “Solidification/stabilization of heavy metal sludge by a Portland cement/fly ash binding mixture hazard”, *Waste Hazardous Materials*, Vol.8, pp. 33-39.
- [⁸⁶] EPA, (1993), “Technology Resource Document-Solidification/Stabilization and Its Application to Waste Materials”, USA, (EPA/630/R-93/012).
- [⁸⁷] Pereira, C.F., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., and Vale, J., (2009), “Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers”, *Fuel*, Vol. 88, pp. 1180-1193.
- [⁸⁸] Glasser, F.P., (1993), “Chemistry of cement-solidified waste forms, Chemistry and microstructure of solidified waste forms”, Spence, R.D. (Ed.), Lewis Publishers, p. 310.
- [⁸⁹] 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.*, Vol. 63, pp. 1274-1283
- [⁹⁰] Eijk, R.J.V., (2001), “Hydration of cement mixtures containing contaminants”, PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [⁹¹] Antemir, A., Hills, C.D., Carey, P.J., Gardner, K.H., Bates, E.R., and Crumbie, A.K., (2000), “Long-term performance of aged waste forms treated by stabilization/solidification”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 81, pp. 60-73.
- [⁹²] Kogbara, R.B., and Al-Tabbaa, A., (2001), “Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil”, *Science of the Total Environment*, Vol. 28, pp. 2320-2330.
- [⁹³] Marion, G.M. (1995), “Freeze-thaw processes and soil chemistry,” cold regions research & engineering laboratory, America
- [⁹⁴] Yarlagadda, P.S., Matsumoto, M.R., Van Benschoten, J.E., and Kathuria, A., (1990), “Characteristics of heavy metal in contaminated soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 116, pp. 276-286.
- [⁹⁵] Yong, R.N. (2000), “Geo-environmental engineering, contaminated soils, pollutant fate and mitigation”, CRC Press, p. 307.
- [⁹⁶] Swan, C.C. (2005). “Foundations on Weak and Compressible Soils.” *Journal of Foundation Engineering*, The University of Iowa., pp.53-139.
- [⁹⁷] Murthy, V.N.S. (2007). “Advanced Foundation Engineering.” 1st ed, New

delhi,CBS,pp.555-564.

[۹۷] American Society for Testing and Materials, ASTM, 2004, "Standard Test Method for One Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading." Annual Book of ASTM Standards, Vol.04-08.

[۹۸] American Society for Testing and Materials, ASTM, 2004, "Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils." Annual Book of ASTM Standards, Vol.04-08.

[۹۹] [حمیرا پاک نیت. (۱۳۹۳)، " بررسی آزمایشگاهی اصلاح خاک‌های رمبنده با مواد شیمیایی و پوزولانی " پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

[۱۰۰] American Society for Testing and Materials, ASTM, 2004, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils." Annual Book of ASTM Standards, Vol.04-08.

[۱۰۱] [جامه بزرگ م، (۱۳۹۰)، " تاثیر نانورس بر رفتار مهندسی خاک‌های رسی در سیکل‌های یخبندان و ذوب " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

Abstract

Industrial development and mine spreading are some of the effective factors on the production of pollutants containing heavy metals. In addition to causing geotechnical problems and changing the soil strength parameters, pollutants can enter the underground water cycle and threaten human health. So, stabilization and solidifying with cement as the best modification method for adjustment pollution were chosen. High efficiency, accessibility and low cost are some of the advantages of this method. The Solidification/Stabilization of heavy metals contaminated soil by using Ordinary Portland Cement (OPC) was studied as a hazardous treatment technology. In this study, an investigation on the effect of freeze-thaw cycles on consolidation clay soil parameters were conducted. Due to the importance of settlement in clay consolidation oedometer experiments was performed clay polluted with lead nitrate was exposed to freeze-thaw cycle after stabilization. The results showed that the major changes occurred in cycles 7 & 12. According to the results (C_s, C_c & P_c), 10% of cement has been considered as the optimum amount of cement for solidifying the polluted soil exposed to freeze-thaw cycle.

Keywords : solidification/stabilization, heavy metals contaminated soil, Portland cement, freeze-thaw cycles, XRD (x ray diffraction).



Kharazmi International Campus
M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Effect of freezing and thawing on the contaminated soils
stabilized with cement

By: Fatemeh Khosravi

Supervisor:
Dr. Seyed Mahdi Hosseini

September 2016