

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

بهسازی خاک‌های رمبنده با استفاده از خاکستر لجن

نگارنده : حسین عطاردی

استاد راهنما

دکتر سید مهدی حسینی

آذر ۹۵

شماره: ۹۱۵/۱۹۴

تاریخ:
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره 7: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات جنابان معالی و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حسین عطارودی به شماره دانشجویی 9312184 رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان بهسازی خاک‌های رسی‌نده با استفاده از خاکستر لجن که در تاریخ 95/9/17 با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد.

قبول (یا درجه) : عمر امتیاز ۱۹۳
 مردود دفاع مجدد

2- نمره خوب (18-18.99)

1- عالی (20-19)

4- عالی قبول (15-15.99)

3- خوب (17-16.99)

5- نمره کمتر از 14 غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
			1- استاندارهای اول دکتر سید مهدی حسینی
			2- استاندارهای دوم
			3- استاد مشاور
			4- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی دکتر مهدی گلی
			5- استاد منتحن اول دکتر امیر پیرقشایی
			6- استاد منتحن دوم دکتر محسن کرمانی

رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

به پاس تعبیر عظیم و انسانیشان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان
است،

به پاس قلبهای بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می‌کنم.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند توانا و مهربان را که هر چه دارم از اوست.

بر خود لازم می‌دانم در این مجال از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی در راستای انجام این پایان‌نامه، تشکر و قدردانی کنم.

هم‌چنین از جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی و آقای مهندس کلانتری بابت مساعدت و همراهی‌شان در به ثمرنشدن این پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب حسین عطاردی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهسازی خاک‌های رمبنده با استفاده از خاکستر لجن تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم .

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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 حسین عطاردی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها 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

یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوتکنیکی که می‌تواند کاربری طرح را تحت تأثیر قرار داده و یا منجر به تخریب آن گردد، خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. خاک‌های مسئله‌دار به خاک‌های واگرا، متورم‌شونده، رمبنده، روانگرا و انحلال‌پذیر اطلاق می‌شود. در این پژوهش به طور خاص خاک رمبنده مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های رمبنده در حالت طبیعی با درصد رطوبت اندک، دارای مقاومت ظاهری نسبتاً زیادی هستند ولی پس از جذب رطوبت و اشباع شدن، فضای خالی بین ذره‌ها کاهش یافته و خردشدگی در ساختار خاک به وجود می‌آید که منجر به نشست‌های ناگهانی و نامتقارن در خاک می‌گردد. این‌گونه خاک‌ها بیش‌تر در نواحی گرم و خشک و مناطق بیابانی یافت می‌شوند. کشور ایران در زمره کشورهای قرار دارد که دارای خاک‌های رمبنده می‌باشد. ضرورت بررسی خاک‌های رمبنده با توجه به گسترش نسبتاً وسیع این خاک‌ها در مناطق مختلف و لزوم طراحی سدها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌های فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ و احداث مناطق مسکونی، لوله‌های آب و فاضلاب و... روی این خاک‌ها اهمیتی دو چندان می‌یابد. محققان مختلفی در مورد تثبیت و بهسازی خاک‌های رمبنده تحقیقاتی انجام اما در این تحقیق به بررسی میزان شاخص رمبندگی خاک‌های رمبنده در اثر بهسازی آن‌ها با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب پرداخته شده است.

نمونه‌گیری‌ها از خاک رمبنده به صورت دست‌نخورده از منطقه کلاله استان گلستان انجام شده است. آزمایش‌های رمبندگی به وسیله دستگاه تحکیم معمولی انجام شدند. نمونه‌های مورد آزمایش به دو صورت دست‌نخورده و بازسازی شده بودند. نمونه‌های بازسازی شده لازم برای آزمایش در همان نسبت تخلخل محل بازسازی شدند. نمونه‌های بازسازی شده یا بصورت تثبیت نشده بودند یا با درصدهای مختلف وزنی ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۸٪ با خاکستر لجن فاضلاب و هم‌چنین ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک در نسبت ۴ به ۱ مخلوط شدند. نتایج نشان داد که دست‌خوردگی باعث کاهش شاخص رمبندگی

می‌شود و افزایش درصدی خاکستر لجن فاضلاب و یا ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک باعث ایجاد روند ثابت کاهشی می‌شود یعنی نتایج آزمایش تعیین شاخص رمبندگی نشان داد که افزودن هر یک از این مواد به خاک رمبنده، شاخص رمبندگی را کاهش می‌دهد و هرچه درصد اختلاط این ماده افزایش یابد، میزان شاخص رمبندگی افت بیشتری خواهد داشت.

کلمات کلیدی: خاک رمبنده، شاخص رمبندگی، خاکستر لجن فاضلاب، آهک

فهرست مطالب

۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	اهمیت موضوع	۲
۳-۱	ضرورت انجام تحقیق	۳
۴-۱	بررسی مسائل زیست محیطی خاکستر لجن فاضلاب	۴
۵-۱	روش‌شناسی تحقیق	۵
۶-۱	فصل‌بندی پایان‌نامه	۵
۲-۲	فصل دوم	۷
۱-۲	خاک‌های رمبنده	۸
۱-۱-۲	تعریف	۸
۲-۱-۲	ساختار فروریزی خاک رمبنده	۹
۳-۱-۲	اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها	۱۳
۴-۱-۲	عوامل مؤثر بر میزان رمبندگی خاک‌ها	۱۶
۵-۱-۲	معیارهای صحرایی شناخت خاک‌های رمبنده	۱۸
۶-۱-۲	معیارهای آزمایشگاهی شناخت خاک‌های رمبنده	۱۸
۷-۱-۲	پراکندگی خاک‌های رمبنده در ایران	۲۱
۲-۲	تثبیت خاک‌ها	۲۲

۲۲	مقدمه	۱-۲-۲
۲۲	تثبیت شیمیایی	۲-۲-۲
۲۳	آهک	۱-۲-۲-۲
۲۴	سیمان	۲-۲-۲-۲
۲۴	خاکستر بادی	۳-۲-۲-۲
۲۵	خاکستر لجن فاضلاب	۴-۲-۲-۲
۳۳	تثبیت بیولوژیکی	۳-۲-۲
۳۴	تثبیت فیزیکی	۴-۲-۲
۳۴	جمع آوری و تراکم مجدد	۱-۴-۲-۲
۳۴	تراکم دینامیکی عمیق	۲-۴-۲-۲
۳۵	اجرای شمع	۳-۴-۲-۲
۳۵	پیش مرطوب کردن	۴-۴-۲-۲
۳۵	بررسی مسائل محیط‌زیستی و نحوه کاربرد خاکستر لجن فاضلاب	۳-۲
۳۹	فصل سوم	-۳
۴۰	مقدمه	۱-۳
۴۰	محل نمونه‌گیری خاک	۲-۳
۴۱	آزمایش‌های شناسایی اولیه ویژگی‌های خاک	۳-۳
۴۱	آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک	۱-۳-۳
۴۲	آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک خاک	۲-۳-۳

۴۳	..... آزمایش تعیین حدود اتربرگ خاک	۳-۳-۳
۴۶	.....: (Gs) نسبی دانه‌های جامد خاک	۴-۳-۳
۴۹	..... آزمایشهای دانه‌بندی و هیدرومتری	۵-۳-۳
۵۲	..... خاکستر لجن فاضلاب	۴-۳
۵۴	..... آزمایش روش طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس	۱-۴-۳
۵۴	..... آهک	۵-۳
۵۵	..... آزمایش رمبندگی	۶-۳
۵۵	..... روند انجام آزمایش	۱-۶-۳
۵۶	..... تهیه نمونه دست‌نخورده	۲-۶-۳
۵۸	..... تهیه نمونه بازسازی شده	۳-۶-۳
۶۱	..... فصل چهارم	-۴
۶۲	..... مقدمه	۱-۴
۶۲	..... نتایج حاصل از آزمایش رمبندگی اشباع با آب	۲-۴
۶۲	..... خاک دست‌نخورده و دست‌خورده	۱-۲-۴
۶۵	..... خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب	۲-۲-۴
۷۱	..... خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک	۳-۲-۴
	..... بررسی تاثیر رطوبت اولیه نمونه بازسازی شده بر روی شاخص رمبندگی خاک	۴-۲-۴
۷۷	..... بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب	
۸۰	..... بحث در نتایج	۳-۴

۸۳.....	فصل پنجم	۵-
۸۴.....	مقدمه	۵-۱
۸۴.....	نتایج کلی	۵-۲
۸۶.....	پیشنهادها	۵-۳
۸۷.....	منابع ..	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ انواع مختلف نیروهای بین دانه ای در ساختارهای فروریزی (Elkady, 2002) ۱۰
- شکل ۲-۲ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت (Rogers, 1995) ۱۰
- شکل ۳-۲ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی‌های متفاوت الف) بزرگنمایی ۱۰ برابر ب) ۱۰۰ برابر ج) ۱۰۰۰ برابر د) ۱۰۰۰ برابر (Mohammad Hosseini, 2014) ۱۲
- شکل ۴-۲ نتایج آزمایش ادومتر دوگانه (Shalaby, 2014) ۱۵
- شکل ۵-۲ تاثیر نوع خاک بر روی رمبندگی (Basma and Tuncer, 1992) ۱۶
- شکل ۶-۲ تاثیر ضریب یکنواختی خاک بر روی رمبندگی (Basma and Tuncer, 1992) ۱۷
- شکل ۷-۲ نقشه پراکندگی خاک‌های رمبنده در ایران (فریدونی, ۱۳۹۰) ۲۲
- شکل ۸-۲ تغییرات پتانسیل رمبندگی خاک با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (وکیلی و همکاران, ۱۳۸۷) ۲۳
- شکل ۹-۲ تغییرات مقاومت تک‌محوری خاک با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (وکیلی و همکاران, ۱۳۸۷) ۲۴
- شکل ۱۰-۲ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در رطوبت‌های مختلف بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره الف) رطوبت بهینه ب) رطوبت اشباع (نوروزیان و همکاران, ۱۳۹۳) ۲۷
- شکل ۱۱-۲ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی شاخص خمیری خاک (AI-Sharif and Attom, 2014) ۲۸
- شکل ۱۲-۲ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر مقاومت فشاری تک‌محوره (AI-Sharif and Attom, 2014) ۲۹

- شکل ۲-۱۳ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب در زمانهای عمل‌آوری مختلف بر مقاومت فشاری تک‌محوره (AI-Sharif and Attom, 2014)..... ۳۰
- شکل ۲-۱۴ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره (Lin et al., 2007)..... ۳۱
- شکل ۲-۱۵ اثر درصدهای مختلف اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی پارامتر CBR خاک نرم بستر جاده (Lin et al., 2005)..... ۳۲
- شکل ۲-۱۶ اثر درصدهای مختلف اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی چسبندگی خاک نرم بستر جاده (Lin et al., 2005)..... ۳۳
- شکل ۳-۱ پدیده فروریزش در خاک منطقه (نوکنده, ۱۳۹۴)..... ۴۱
- شکل ۳-۲ تعیین حدود اثربرگ (الف) آماده‌سازی نمونه (ب) تعیین حد روانی با استفاده از جام کاساگرانده..... ۴۶
- شکل ۳-۳ آزمایش هیدرومتری (الف) پودر هگزامتافسفات سدیم (ب) همزدن خاک در دستگاه همزن..... ۵۱
- شکل ۳-۴ نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری..... ۵۲
- شکل ۳-۵ سوزاندن خاکستر لجن فاضلاب در کوره..... ۵۳
- شکل ۳-۶ خاکستر لجن فاضلاب مورد مطالعه (الف) کوبیده نشده (ب) عبوری از الک نمره ۲۰۰..... ۵۳
- شکل ۳-۷ دستگاه تحکیم و متعلقات (الف) دستگاه تحکیم (ب) گیج دستگاه تحکیم..... ۵۶
- شکل ۳-۸ تهیه نمونه دست‌نخورده از خاک مورد مطالعه..... ۵۷
- شکل ۳-۹ رینگ دستگاه تحکیم..... ۵۸
- شکل ۳-۱۰ نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش رمبندگی (الف) دست‌خورده (ب) بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب..... ۵۹
- شکل ۴-۱ نمودار مقایسه رمبندگی خاک شاهد دست‌نخورده و بازسازی شده اشباع شده با آب..... ۶۵

شکل ۴-۲ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با مقادیر مختلف خاکستر لجن فاضلاب.....۶۹

شکل ۴-۳ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۲ درصد خاکستر لجن فاضلاب..... ۷۰

شکل ۴-۴ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب..... ۷۰

شکل ۴-۵ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب..... ۷۱

شکل ۴-۶ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۲ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و ۰/۴ درصد آهک ۷۵

شکل ۴-۷ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و ۰/۸ درصد آهک ۷۵

شکل ۴-۸ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک ۷۶

شکل ۴-۹ نمودار مقایسه شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و خاک بازسازی شده با آهک ۷۶

شکل ۴-۱۰ نمودار مقایسه شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده با درصد‌های مختلف رطوبت و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب ۷۸

شکل ۴-۱۱ نمودار تنش - کرنش خاک بازسازی شده با ۸ درصد آب و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب ۷۹

شکل ۴-۱۲ نمودار تنش - کرنش خاک بازسازی شده با ۱۱ درصد آب و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب ۷۹

فهرست جدول

- جدول ۱-۱ مقایسه درصد عناصر سنگین خاکستر لجن فاضلاب با استاندارد آمریکا (Lin and Lin,)
..... (2009) ۴
- جدول ۱-۲ رده‌بندی شاخص رمبندگی (ASTM D 5333)..... ۱۵
- جدول ۲-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Denisov..... ۱۹
- جدول ۳-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Prikloński..... ۱۹
- جدول ۴-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Clevenger..... ۲۰
- جدول ۵-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Jennings and Knight..... ۲۱
- جدول ۶-۲ مقایسه درصد عناصر سنگین خاکستر لجن فاضلاب با استاندارد آمریکا (Lin and Lin,)
..... (2009) ۳۶
- جدول ۱-۳ مختصات محل انتخاب شده جهت نمونه‌گیری..... ۴۰
- جدول ۲-۳ تعیین درصد رطوبت خاک..... ۴۲
- جدول ۳-۳ وزن مخصوص خشک خاک..... ۴۳
- جدول ۴-۳ نتایج حدود اتربرگ..... ۴۵
- جدول ۵-۳ تعیین وزن خاک خشک برای آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک..... ۴۷
- جدول ۶-۳ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک..... ۴۹
- جدول ۷-۳ درصد وزنی اکسید عناصر خاکستر لجن فاضلاب بر اساس آزمایش XRF..... ۵۴
- جدول ۱-۴ تعیین میزان رمبندگی نمونه‌های دست نخورده خاک شاهد..... ۶۳
- جدول ۲-۴ تاثیر دست‌خوردگی بر روی شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۳
روز..... ۶۴
- جدول ۳-۴ تاثیر دست‌خوردگی بر روی شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۹
روز..... ۶۴

- جدول ۴-۴ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۳ روز ۶۶
- جدول ۵-۴ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۳ روز ۶۷
- جدول ۶-۴ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۹ روز ۶۸
- جدول ۷-۴ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۹ روز ۶۸
- جدول ۸-۴ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک به خاک بازسازی شده ۷۲
- جدول ۹-۴ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک ۷۳
- جدول ۱۰-۴ تاثیر افزودن درصدی آهک به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۳ روز ۷۳
- جدول ۱۱-۴ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با آهک ۷۴
- جدول ۱۲-۴ تاثیر رطوبت اولیه خاک بر روی شاخص رمبندگی خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۳ روز ۷۷
- جدول ۱۳-۴ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت طبیعی ۷۸

۱- فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

خاک‌های رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌داری هستند که مناطق وسیعی از جهان (حدود ۱۰٪ سطح زمین) تحت پوشش این خاک‌ها قرار دارد. این مناطق شامل نهشته‌های پیوسته‌ای از شمال چین تا جنوب شرقی اروپا و مناطق پراکنده‌ای از امریکای شمالی و جنوبی و نیوزیلند است (Jefferson et al., 2005).

از طرف دیگر امروزه با افزایش جمعیت و کمبود منابع آب و لزوم بازچرخانی آب به چرخه مصرف، نیاز به احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از امور مهم جوامع محسوب می‌شود. تصفیه و دفع لجن به عنوان محصول تصفیه‌خانه‌ها به علت حجم بالا، بوی بد و وجود انواع پاتوژن‌ها و فلزات سنگین در آن، بخش عمده تصفیه‌خانه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد.

۲-۱ اهمیت موضوع

خاک‌های رمبنده در درصد رطوبت‌های پایین، پایدار می‌باشند و به واسطه وجود پیوندهای بین دانه‌ای و مکش ساختاری، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. اما با افزایش درصد رطوبت و بارگذاری تغییر شکل‌های زیاد، نشست سریع و کاهش زیاد نسبت تخلخل در آن‌ها مشاهده می‌گردد. این خاک‌ها در هنگام اشباع شدن به طور ناگهانی کاهش حجم می‌دهند که این مسأله می‌تواند عامل ایجاد بسیاری از خطرات سازه‌ای باشد. لذا بهسازی این خاک‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

از طرف دیگر لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها به روش‌هایی از جمله مصرف کشاورزی، کمپوست، دفع بهداشتی، دفع سطحی به رودخانه‌ها، دفع جذبی، سوزاندن و دفع می‌شوند. با پیشرفت کشور و سخت شدن قوانین زیست محیطی برای جلوگیری از انتشار آلودگی‌ها و بوی حاصل از لجن، برخی از روش‌ها به دلیل وجود محدودیت‌ها قابل استفاده نمی‌باشد. هم‌چنین کمبود زمین برای دفن، وجود فلزات سنگین مضر برای کشاورزی در لجن، باعث شده است که روش سوزاندن در برخی از مناطق

کشور به ویژه مناطق ساحلی یکی از گزینه‌های مناسب برای دفن لجن محسوب شود. خاکستر تولیدی از سوزاندن لجن دارای حجم کمتری نسبت به لجن اولیه است و عاری از پاتوژن‌ها نیز می‌باشد (فتوت، ۱۳۸۵).

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

لجن فاضلاب شهری در زمینه مصارف کشاورزی و امور زراعی قابل استفاده است، هم‌چنین استفاده از کمپوست آن نیز در زمین، رایج است اما به دلایل وجود عناصر سمی و فلزات سنگین در لجن فاضلاب، کمبود زمین برای دفن لجن و آلوده شدن آب‌های زیرزمینی مجاور با زمین‌هایی که در معرض دفن لجن فاضلاب هستند به ناچار باید به دنبال روش‌های دیگری برای دفع لجن باشیم که یکی از این روش‌ها، سوزاندن لجن فاضلاب است.

مطالعات فراوانی در زمینه کاربرد خاکستر لجن فاضلاب در تولید مصالح نوین ساختمانی نظیر آجر و بتن انجام شده است. در زمینه استفاده از این ماده در خاک نیز تحقیقاتی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به (AI-Sharif and Attom, 2014)، (Lin at el., 2007)، (Lin at el., 2005) و (نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳) اشاره کرد که مطالعاتی بر روی ویژگی‌های مختلف خاک از جمله مقاومت برشی، تراکم‌پذیری، مقاومت فشاری و... انجام داده‌اند. جمع‌بندی مطالعات گذشته محققان مختلف نشان می‌دهد که می‌توان از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده پوزولانی برای بهبود خواص خاک استفاده کرد ولی از آنجایی که این بررسی در مورد کاهش رمبندگی خاک‌ها انجام نشده، در این تحقیق به بررسی بهسازی خاک رمبنده با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب پرداخته می‌شود. اگر تاثیر این مواد بر خواص مهندسی خاک‌ها قابل توجه باشد، ممکن است به عنوان جایگزینی مناسب برای انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی به کار گرفته شود.

۴-۱ بررسی مسائل زیست محیطی خاکستر لجن فاضلاب

یکی از مسائل مهم در استفاده از خاکستر لجن فاضلاب برای بهسازی خاک‌ها آن است که خاکستر لجن فاضلاب باعث آلودگی خاک و آلودگی آب‌های زیر زمینی نشود برای بررسی این موضوع (Chen and Lin, 2009) با استفاده از آزمایش تعیین سمی بودن به روش فروشویی^۱ مطابق با استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا^۲ به بررسی عناصر سنگین در خاکستر لجن فاضلاب پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها که در جدول ۱-۱ آمده است مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دما برای سوزاندن خاکستر لجن فاضلاب، مقدار عناصر سنگین موجود در خاکستر لجن فاضلاب کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند با سوزاندن لجن فاضلاب و تبدیل آن به خاکستر لجن فاضلاب مقدار فلزات سنگین موجود در خاکستر در محدوده استاندارد سازمان محیط زیست آمریکا خواهد بود. پس استفاده از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده ی پوزولانی مشکلی از منظر آلودگی ایجاد نخواهد کرد.

جدول ۱-۱ مقایسه درصد عناصر سنگین خاکستر لجن فاضلاب با استاندارد آمریکا (Chen and Lin, 2009)

Heavy metals	TCLP (105 °C) (mg/L)	TCLP (800 °C) (mg/L)	TCLP allowable leached concentration (mg/L)
Cd	0.03	0.03	1.00
Co	0.25	0.21	-
Cr	0.24	0.06	0.50
Cu	1.95	8.24	15.00
Fe	2.12	0.47	-
Ni	6.52	1.97	-
Pb	0.54	0.37	5.00
Zn	16.75	8.14	25.00

1 TCLP

2 EPA

۵-۱ روش‌شناسی تحقیق

با توجه به اهمیت خاک رمبنده در ابتدا روش‌های بهسازی موجود برای تقویت این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به این‌که سوزاندن لجن فاضلاب یکی از گزینه‌های دفع لجن است، در بخش پژوهشی این پایان‌نامه سعی شده است که اثر اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب در درصد‌های مختلف بر روی شاخص رمبندگی خاک‌های رمبنده مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی این موضوع خاکستر لجن فاضلاب با سوزاندن لجن فاضلاب به مدت یک ساعت در کوره‌ای با دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید شد و سپس از الک نمره ۲۰۰ عبور کرد سپس برای بررسی اثر بهسازی خاکستر لجن فاضلاب بر روی خاک رمبنده، این ماده در درصد‌های مختلف ۲، ۴ و ۸ درصد در زمان‌های عمل‌آوری ۳ و ۹ روز و بر اساس رطوبت‌های طبیعی خاک به خاک اضافه شد و سپس آزمایش تعیین شاخص رمبندگی نمونه‌ها انجام شد. هم‌چنین برای بررسی اثر بهسازی خاکستر لجن فاضلاب و آهک بر روی خاک رمبنده، این ترکیب با نسبت اختلاط ۴ به ۱، در درصد‌های مختلف ۲، ۴ و ۸ درصد در زمان عمل‌آوری ۳ روز و بر اساس درصد رطوبت‌های طبیعی خاک به خاک اضافه شد و سپس آزمایش تعیین شاخص رمبندگی نمونه‌ها انجام شد. برای بررسی اثر رطوبت اولیه بر روی شاخص رمبندگی با بالا بردن رطوبت اولیه در بازسازی نمونه‌ها اثر این تغییر رطوبت بر روی شاخص رمبندگی خاک به همراه درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه

در فصل دوم به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی ویژگی‌های خاک‌های مختلف با استفاده از مواد تثبیت‌کننده، تحقیقات انجام شده در مورد خاک‌های رمبنده، خواص خاک‌های رمبنده و مطالعه روش‌ها و معیارهای شناسایی این نوع خاک‌ها پرداخته شده است.

در فصل سوم آزمایش‌های اولیه جهت شناسایی ویژگی‌های خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، چگالی دانه‌های جامد خاک، درصد رطوبت طبیعی، دانه بندی به روش تر و هیدرومتری، حدود اتربرگ توضیح داده و نتایج آزمایش‌ها مشخص شد. علاوه بر این در این فصل به بررسی چگونگی تهیه خاکستر لجن فاضلاب و ترکیب اکسیدهای آن پرداخته شده است. به طور کلی، در این فصل به محاسبه و استخراج نتایج آزمایش‌های اولیه انجام شده و بررسی خاکستر لجن فاضلاب می‌پردازیم.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌ها به همراه تجزیه و تحلیل بر روی این نتایج بیان می‌شود. سپس تأثیر عوامل گوناگون از جمله درصد‌های مختلف ماده بهساز، شرایط نمونه‌ها از نظر درصد رطوبت و شرایط نمونه‌ها از نظر دست‌خوردگی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین به ترسیم نمودارها و بحث در مورد آن‌ها و مقایسه آن‌ها می‌پردازیم.

در نهایت در فصل پنجم، جمع‌بندی نتایج تحقیق و پیشنهادات برای تحقیق‌های آینده، ارائه شده

است.

۲- فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲ خاک‌های رمبنده

۱-۱-۲ تعریف

خاک‌های دارای خاصیت رمبندگی طوری رسوب‌گذاری شده‌اند که دارای ساختاری باز و سست با دانسیته نسبتاً کم می‌باشند. این رسوبات در رطوبت کم، مقاومت زیادی از خود نشان می‌دهند، اما زمانی که در معرض اشباع شدن قرار گیرند، کاهش شدیدی در تخلخل آنها رخ داده که این کاهش می‌تواند حتی در تنش‌های اندک، تنها معادل با فشارهای خاک سربار نیز، اتفاق افتد. اکثر خاک‌های رمبنده که به طور طبیعی وجود دارند از نوع ماسه و لای بادرفتی یا لس هستند. مشخصات این خاک‌ها به هنگام رسوب‌گذاری، تخلخل زیاد و دانسیته کم است (حائری و همکاران، ۱۳۹۱).

(Rogers, 1995) ویژگی‌های خاک‌های رمبنده که موجب فروریزش در این خاک‌ها می‌شود را

به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- ساختار باز و شبه پایدار که موجب چگالی حجمی پایین خاک می‌شود.
- نسبت تخلخل بالا و منافذ زیاد در خاک
- تهنه‌های جوان از لحاظ زمین‌شناسی
- تهنه‌هایی که به تازگی تغییر حالت یافته‌اند
- پیوندهای ضعیف بین ذرات خاک

(Futai and Admeida, 2002) مشخصات کلی خاک‌های رمبنده را به طور خلاصه به صورت زیر

بیان کرد:

- نسبت تخلخل بالا (بیش از ۱۳ درصد)

- درجه اشباع پایین (کمتر از ۰/۶)
- مقدار لای و ماسه ریز بالا ($> ۳۰\%$)
- از بین رفتن پیوند بین ذرات در اثر اشباع شدن

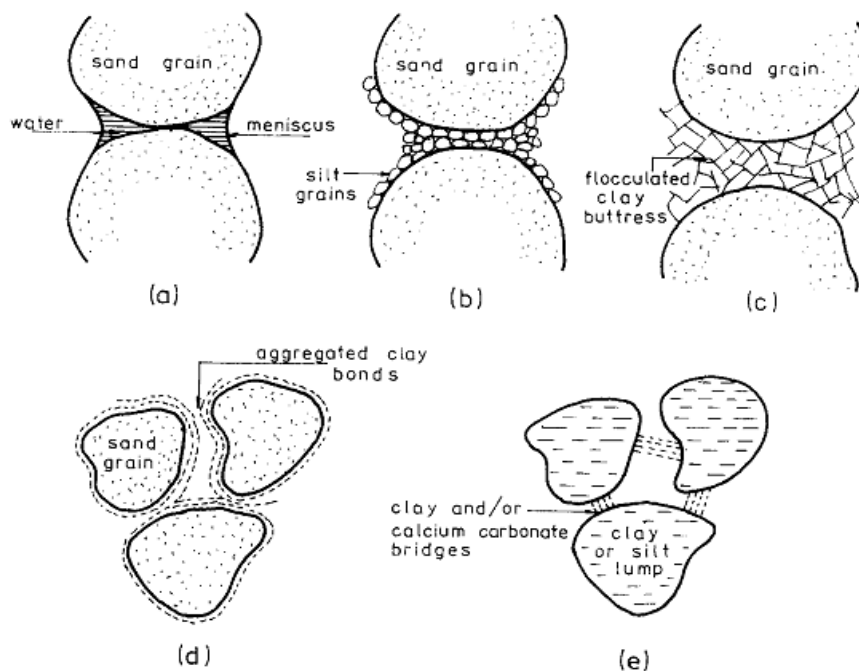
(Barden et al., 1969) تحقیقاتی بر روی خاک رَمبند انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که

خاک رَمبند به دو صورت در طبیعت یافت می‌شوند:

- خاک‌های ماسه‌ای و لای‌دار که توسط پیوندهای رسی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی را به وجود آورده‌اند. در صورتی که خاک اشباع گردد دانه‌های ماسه در اثر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می‌لغزند و خاک کاهش حجم پیدا خواهد نمود.
- خاک‌های نیمه اشباعی که در حالت طبیعی دارای فشار منفی بوده و در اثر نیروی مکش به یکدیگر چسبیده‌اند و خاک در حالت طبیعی به صورت موقت پایدار می‌باشد اما در اثر افزایش رطوبت نیروی مکشی کاهش یافته و پیوند بین دانه‌های خاک از بین رفته و اسکلت خاک فروپاشیده و خاک دچار کاهش حجم می‌شود.

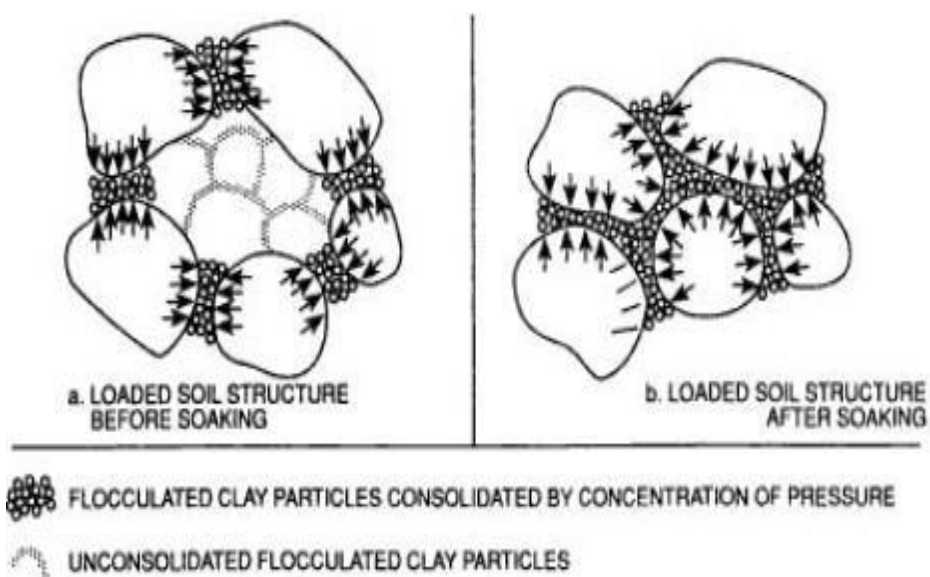
۲-۱-۲ ساختار فروریزی خاک رَمبند

در اثر مرطوب شدن، پیوند بین ذرات خاک از بین می‌رود، خاک مقاومت خود را از دست داده و در تنش ثابت موجود دچار فروریزش ساختاری می‌شود. شکل ۱-۲ انواع مختلف نیروهای بین دانه‌ای در خاک فروریزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، نیروی نگهدارنده ذرات از یک پیوند بین دانه‌ای (پیوند رسی و یا سیلتی) و یا از مکش ساختاری ناشی از کشش سطحی در خاک‌های غیراشباع به وجود می‌آید.



شکل ۱-۲ انواع مختلف نیروهای بین دانه ای در ساختارهای فروریزی (Elkady, 2002)

شکل ۲-۲ فرایند فروریزش و تغییر ساختار در خاک ماسه‌ای که بین ذرات آن پیوند رسی وجود دارد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر جذب رطوبت، فروریزش صورت گرفته و حجم خاک کاهش پیدا کرده و ذرات آن در موقعیت جدیدی قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۲ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت (Rogers, 1995)

(Larionov, 1965) ساختار خاک‌های فروریزی را مورد مطالعه قرار داد. او نتیجه‌گیری کرد

که خاک‌های فروریزی اساساً از ذرات حجیم (سیلت و ماسه و شن ریز) تشکیل شده‌اند که در میان توده‌ای ذرات ریز پراکنده، با یا بدون تماس با هم به صورت مستغرق می‌باشند. همچنین سه نوع سیستم حفره‌ای توسط لاریونو تشخیص داده شد:

- حفره‌های فرا میکروسکوپی^۱ بین ذرات ریز

اندازه این حفرات در محدوده‌ی 3×10^{-6} تا 2×10^{-3} میلی‌متر می‌باشد و ۱۳ تا ۱۰ درصد حجم تمام حفرات را تشکیل می‌دهد و همواره از آب به شدت جذب سطحی شده پر می‌باشد. با این مشخصات می‌توان نتیجه گرفت که این نوع حفرات نقش بسیار کوچکی در تغییر شکل خاک ایفا می‌کنند.

- حفرات بین ذره‌ای^۲

اندازه این حفرات بین 2×10^{-5} تا 5×10^{-1} میلی‌متر می‌باشد و ۱۳ تا ۳۶ درصد حجم کل حفرات را تشکیل می‌دهند. این نوع از حفرات نقش اصلی را در فروریزش خاک دارند.

- حفرات ماکروسکوپی^۳

این حفرات از کانال‌های کوچکی تشکیل شده‌اند که دیواره‌های آن معمولاً کلسیتی است. وجود این حفرات سبب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. در شکل ۲-۳ کلوخه‌ای از خاک مشاهده می‌شود که در آن به راحتی با چشم غیرمسلح این حفرات قابل دیدن است.

1 Interparticle voids

2 Interparticle voids

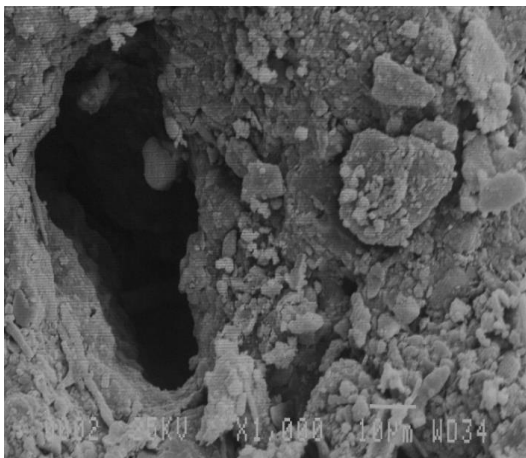
3 Macropores



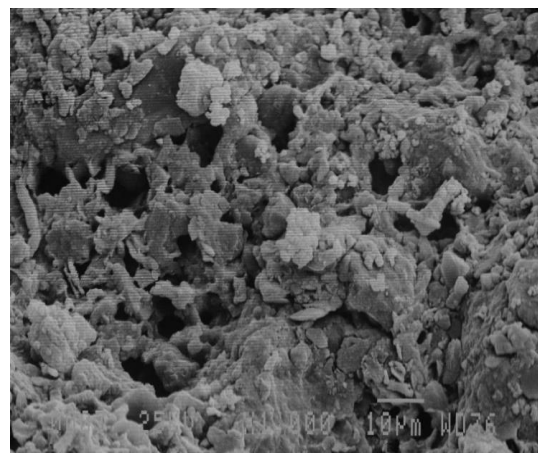
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲-۳ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی‌های متفاوت الف) بزرگنمایی ۱۰ برابر ب) ۱۰۰ برابر ج) ۱۱۰۰۰ برابر د) ۱۰۰۰ برابر (Mohammad Hosseini, 2014)

(Klukanova and Sajgalik, 1994) به این نتیجه رسیدند که روند فروریزش در خاک‌های

رمبنده مانند خاک لس به سه فاز زیر تقسیم می‌شود:

فاز اول شامل تخریب ساختار میکروسکوپی اولیه در اثر افزایش رطوبت یا تنش خارجی می‌باشد.

در این فاز توده‌های متراکم از هم باز شده، غشاها، اتصالات و پل‌های رسی شکسته و قسمت بیشتری از کربنات‌ها حل می‌شوند که باعث حرکت اکسیدهای آهن و منگنز می‌شوند.

در فاز دوم ساختار ریز خاک از هم پاشیده و می‌شکند. ذرات رس توسط آب در خاک جابجا

شده، حجم کربنات‌ها کاهش می‌یابد و بقیه المان‌ها فشرده می‌شوند. در این فاز حجم کل لس کاهش

می‌یابد.

فاز سوم شامل تشکیل ریز ساختارهای جدید بعد از کامل شدن نشست می‌شود. در این فاز ذرات رس جمع شده و در بعضی نواحی بافت چسبنده تشکیل می‌دهند. همچنین اندازه حفره‌ها تغییر کرده و به طور کلی تخلخل کاهش می‌یابد.

۳-۱-۲ اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها

پتانسیل رمبندگی نشانه‌ای از تغییرات حجمی خاک‌ها بر اثر اعمال بار و مرطوب‌سازی است. پتانسیل رمبندگی بر اساس تغییرات ارتفاع نمونه خاک که ناشی از اشباع کردن خاک و اعمال بار به آن است، به دست می‌آید. معادله زیر نشان‌دهنده یک تعریف مهندسی برای اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها است (Lutenegger and Hallberg, 1988).

$$C_p = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad ۱-۲$$

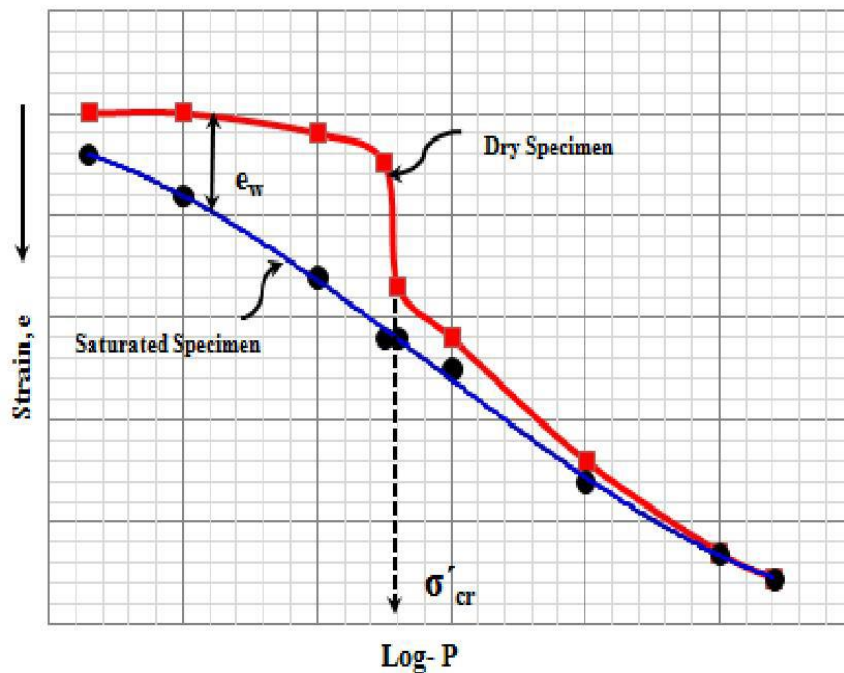
که در آن Δe کاهش در درصد تخلخل نمونه ناشی از اشباع کردن و e_0 درصد تخلخل اولیه است.

برای محاسبه پتانسیل رمبندگی انواع روش‌های آزمایشگاهی و میدانی وجود دارد. رایج‌ترین روش‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش ادومتر و آزمون سه محوری می‌باشد. مزیت اصلی روش‌های آزمایشگاهی آن است که سه عامل تاثیرگذار بر روی پتانسیل رمبندگی که شامل درجه اشباع، چگالی خشک و تنش بار اضافی می‌شود، قابل کنترل و اندازه‌گیری است (Lawton et al., 1992).

نتایج حاصل از آزمایش ادومتر بر روی نمونه‌های آماده شده برای تجزیه و تحلیل یک بعدی و نتایج آزمایش سه‌محوری برای تجزیه و تحلیل سه بعدی به کار می‌رود. در آزمایش سه‌محوری اطلاعات اضافی کمی به دست می‌آید بر این اساس انجام آزمایش ادومتر برای محاسبه پتانسیل رمبندگی توصیه می‌شود (Lawton, 1989).

دو نوع آزمایش ادومتر برای تعیین پتانسیل رمبندگی وجود دارد. در روش اول که ادومتر یگانه نام دارد، خاک در درون دستگاه ادومتر قرار می‌گیرد و به تدریج تنش‌های بار اضافی به آن اعمال می‌شود تا به کرنش متعادل شونده در نمونه برسیم پس از آن نمونه‌ی خاک به صورت ناگهانی با آب تحت تنش قرار می‌گیرد. میزان فروریزش اندازه‌گیری شده پس از اشباع نمونه با آب، پتانسیل رمبندگی نامیده می‌شود. روش دیگر ادومتر دوگانه نام دارد. این روش مبتنی بر این فرض است که تغییرشکل ناشی از اشباع‌سازی مستقل از توالی بارگذاری - اشباع‌سازی است. این روش انجام آزمایش بر روی دو نمونه مشابه انجام می‌شود که یکی از نمونه‌ها با روش معمول ادومتر و بر اساس مقدار رطوبت اصلی تست می‌شود و نمونه دیگر پس از آن که در یک سطح تنش پایین به‌طور ناگهانی با آب اشباع شد، مورد بارگذاری قرار خواهد گرفت. تفاوت در تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده در دو نمونه برابر با مقدار رمبندگی ناشی از اشباع‌سازی خواهد بود (Lawton et al., 1992). شکل ۲-۴ نتایج مربوط به یک آزمایش ادومتر دوگانه را نشان می‌دهد.

استاندارد ASTM D 5333 روش ادومتر یگانه را برای به دست آوردن پتانسیل رمبندگی توضیح می‌دهد. هم‌چنین در این استاندارد شاخص رمبندگی (I_e) تعریف شده است. شاخص رمبندگی بر اساس کرنش اندازه‌گیری شده در هنگام اشباع‌سازی نمونه در سطح تنش مرجع ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. سپس شاخص رمبندگی بر اساس رابطه ۲-۱ محاسبه می‌شود. هم‌چنین بر اساس شاخص رمبندگی، درجه رمبندگی خاک‌ها به‌صورت جدول ۲-۱ دسته بندی می‌شود.



شکل ۲-۴ نتایج آزمایش ادومتر دوگانه (Shalaby, 2014)

جدول ۲-۱ رده‌بندی شاخص رمبندگی (ASTM D 5333)

شاخص رمبندگی (I_e)	درجه رمبندگی
۰-۰/۱	غیر رمبنده
۰/۱-۲	کم
۲-۶	متوسط
۶-۱۰	نسبتاً شدید
> ۱۰	شدید

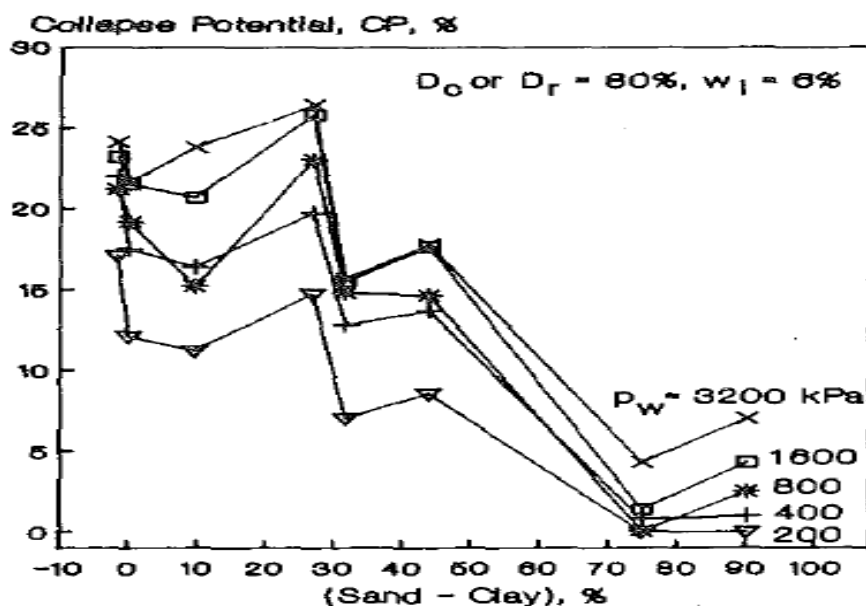
از بعضی از آزمایش‌های میدانی نیز می‌توان برای تعیین مقدار پتانسیل رمبندگی کمک گرفت. با این حال این آزمایش‌ها به صورت مستقیم مقدار پتانسیل رمبندگی را مشخص نمی‌کنند. برای مثال می‌توان پتانسیل رمبندگی را با مقادیر N آزمایش SPT و مقدار مقاومت نوک آزمایش CPT مرتبط دانست (Houston et al., 2001).

۴-۱-۲ عوامل مؤثر بر میزان رمبندگی خاک‌ها

از جمله عواملی که بر میزان رمبندگی خاک‌ها تاثیرگذار است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
 پارامترهای تراکم: یکی از موارد قابل بررسی پارامترهای تراکم خاک است به طوری که هرچه وزن مخصوص خشک اولیه خاک کمتر باشد و هرچه درصد رطوبت اولیه خاک بیشتر باشد میزان رمبندگی خاک کمتر خواهد بود (Basma and Tuncer, 1992).

عمق نمونه‌گیری: طبق تحقیقات (Lin and Wang, 1988) بین عمق نمونه مورد مطالعه و میزان رمبندگی خاک‌ها رابطه وجود دارد. بصورتی که در نمونه‌های سطحی، در تنش کمتر از ۰/۲ مگاپاسکال، رمبندگی رخ می‌دهد. در نمونه‌های کمی عمیق‌تر، رمبندگی خاک‌ها در تنش ۰/۲ مگاپاسکال و در نمونه‌های عمیق‌تر رمبندگی خاک‌ها در تنش‌های بالاتر از ۰/۴ مگاپاسکال رخ داد. پس آن‌ها دریافتند که با افزایش عمق نمونه‌گیری، قابلیت رمبندگی خاک کاهش می‌یابد و امکان رمبندگی تحت تنش‌های بالاتر وجود دارد.

تاثیر نوع خاک: همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است افزایش میزان رس در یک خاک مرکب (رس - ماسه) باعث افزایش رمبندگی می‌شود (Basma and Tuncer, 1992).

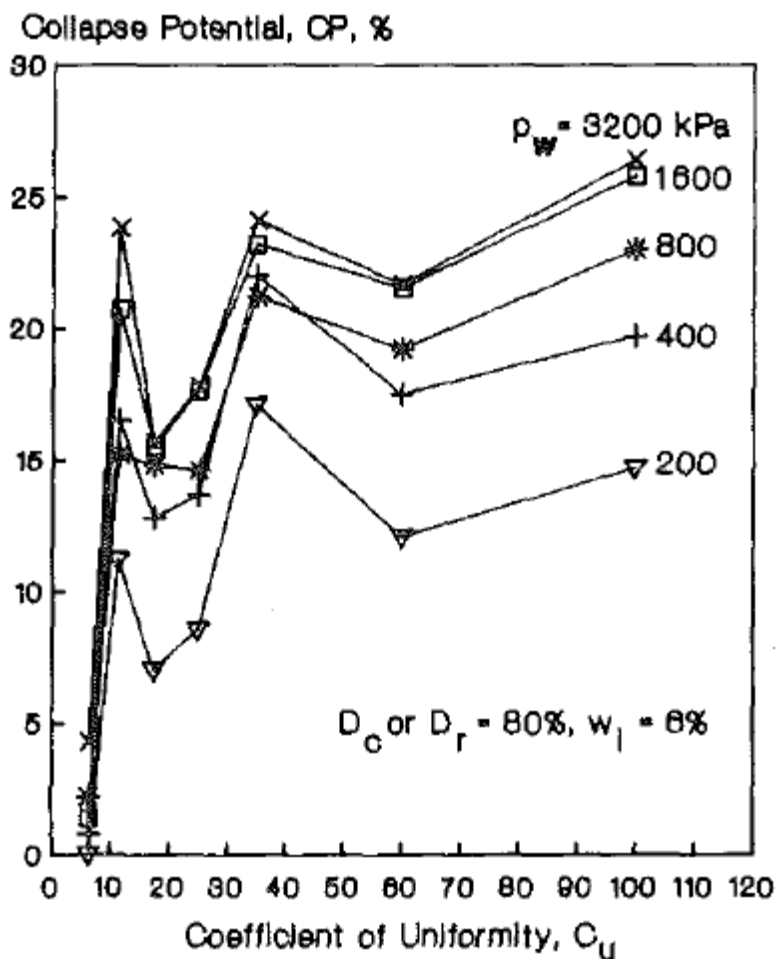


شکل ۵-۲ تاثیر نوع خاک بر روی رمبندگی (Basma and Tuncer, 1992)

پیوند سیمانی ذرات: عامل تشکیل ساختار باز بین دانه‌ای در خاک‌های فروریزی، وجود یک پیوند سست میان ذره‌ای است که در صورت جذب رطوبت سست می‌شود و با اعمال تنش سربار، ساختار خاک به طور ناگهانی فرو می‌ریزد. خاک‌های فروریزی معمولاً میزان قابل توجهی پیوند سیمانی بین ذرات خود دارند. این پیوندها معمولاً یا به صورت پیوند سیمانی شکننده و کریستالی و یا پیوند سیمانی ناشی از فشار حفره‌ای منفی بالا (مکش) خود را نشان می‌دهند که هر چه میزان لای یا رس بیشتر باشد پیوندهای سیمانی ناشی از مکش بیش‌تر می‌شود (El-Ehwany, 1989).

ضریب یکنواختی خاک: همان‌طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است ضریب یکنواختی خاک

تاثیر متفاوتی بر روی میزان رمبندگی دارد (Basma and Tuncer, 1992).



شکل ۶-۲ تاثیر ضریب یکنواختی خاک بر روی رمبندگی (Basma and Tuncer, 1992)

تنش موجود در هنگام اشباع کردن خاک: خاک‌های ماسه‌ای با افزایش میزان تنش، رمبندگی بیش‌تری خواهند داشت ولی در خاک‌های رسی در فشارهای میانی بین ۲۰۰ الی ۴۰۰ کیلوپاسکال رمبندگی بیش‌تر از سایر فشارهاست (Basma and Tuncer, 1992).

۵-۱-۲ معیارهای صحرایی شناخت خاک‌های رمبند

اکثر خاک‌های رمبند دارای منشا بادرفتی نظیر ماسه بادی‌ها و نهشته‌های خاکسترهای آتشفشانی می‌باشند. هم‌چنین این خاک‌ها ممکن است خاکهای برجای ناشی از هوازدگی سنگ‌ها یا رسوبات ناشی از سیلاب‌های گل‌آلود و یا خاک‌های آبرفتی دانه ریز در مناطق دارای آب و هوای خشک، رس‌های متخلخل و یا حتی خاک‌های دستی باشند. در مناطقی که دارای فصول خشک طولانی هستند و سطح ایستابی آب پایین می‌باشد، وجود خاک‌های رمبند محتمل است. در این مناطق تپه ماهورهای کوچک و هم ارتفاع را می‌توان به خوبی مشاهده نمود (محمدعلی‌زاده رفیع، ۱۳۸۸).

۶-۱-۲ معیارهای آزمایشگاهی شناخت خاک‌های رمبند

معیارهای متفاوتی به منظور تعیین پتانسیل رمبندگی در خاک‌ها پیشنهاد شده است. که در زیر به چند مورد می‌پردازیم (Lutenegger and Saber, 1988; Elkady, 2002; Das, 2007):

- معیار (Abelev (1948): در این معیار δ_s ضریب رمبندگی، Δe کاهش نسبت تخلخل بعد از اشباع شدن خاک و e_1 نسبت تخلخل خاک قبل از مرطوب شدن است. در این معیار اگر مقدار δ_s که از معادله ۲-۲ به دست می‌آید از ۰.۲٪ بیش‌تر باشد امکان فروریزش وجود دارد.

$$\delta_s = \frac{\Delta e}{1+e_1} \quad ۲-۲$$

- معیار (Denisov (1951): در این معیار e_{LL} نسبت تخلخل در حالت روانی و e_0 نسبت

تخلخل در حالت طبیعی است. طبق این معیار مقدار K از رابطه ۲-۳ محاسبه شده و با مقایسه آن با مقادیر جدول ۲-۲، پتانسیل رمبندگی خاک محاسبه می‌شود.

$$K = \frac{e_{LL}}{e_0}$$

۳-۲

جدول ۲-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Denisov

K	پتانسیل رمبندگی
۰/۵-۰/۷۵	رمبندگی شدید
۱	لوم بدون رمبندگی
۱/۵-۲	خاک بدون رمبندگی

- معیار Prikloński (1952): در این معیار ω_0 درصد رطوبت حالت طبیعی خاک و LL حد روانی خاک است. طبق این معیار مقدار K_0 از رابطه ۲-۴ محاسبه شده و با مقایسه آن با مقادیر جدول ۲-۳، پتانسیل رمبندگی خاک محاسبه می‌شود.

$$K_0 = \frac{\omega_0 - LL}{PI}$$

۴-۲

جدول ۳-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Prikloński

K_0	پتانسیل رمبندگی
< ۰	رمبندگی شدید
> ۰/۵	خاک بدون رمبندگی
> ۱	خاک متورم شونده

- معیار Clevenger (1958): در این معیار γ_{dry} چگالی خشک خاک است. پس از تعیین چگالی خشک خاک و بر اساس جدول ۲-۴، پتانسیل رمبندگی خاک محاسبه می‌شود.

جدول ۴-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Clevenger

$\gamma_{dry} \left(\frac{KN}{m^3} \right)$	پتانسیل رمبندگی
$< 12/6$	رمبندگی بالا
> 14	رمبندگی کم

- معیار Soviet Building Code (1962): در این معیار e_{LL} نسبت تخلخل در حالت روانی و e_0 نسبت تخلخل در حالت طبیعی است. طبق این معیار اگر درجه اشباع حالت طبیعی خاک کمتر از ۶۰٪ باشد و مقدار L محاسبه شده از رابطه ۲-۵ بیش تر از ۰/۱- باشد آن گاه خاک رمبنده خواهد بود.

$$L = \frac{e_0 - e_{LL}}{1 + e_0} \quad 5-2$$

- معیار Feda (1964): برای محاسبه رمبندگی این معیار رابطه ۲-۶ را پیشنهاد می کند. در این معیار e_0 درصد رطوبت حالت طبیعی خاک و LL حد روانی خاک و PI شاخص خمیری خاک و S_0 درجه اشباع حالت طبیعی خاک است. طبق این معیار چنانچه $S_0 < 100\%$ و $K_L > 0.85$ باشد خاک رمبنده خواهد بود.

$$K_L = \frac{\frac{\omega_0}{S_0} - LL}{PI} \quad 6-2$$

- معیار Jennings and Knight (1975): این معیار بر اساس آزمایش تحکیم مضاعف است. و برای محاسبه پتانسیل رمبندگی رابطه ۲-۷ را پیشنهاد می کند. در این معیار H_0 ارتفاع اولیه نمونه قبل از شروع آزمایش و ΔH اختلاف بین ارتفاع نمونه قبل اشباع سازی و ارتفاع نهایی نمونه بعد از اشباع سازی در آزمایش تحکیم مضاعف می باشد.

بر اساس مقدار C_p محاسبه شده و مقایسه آن با مقادیر جدول ۵-۲، پتانسیل رمبندگی خاک محاسبه می‌شود.

$$C_p = \frac{\Delta H}{H_0}$$

۷-۲

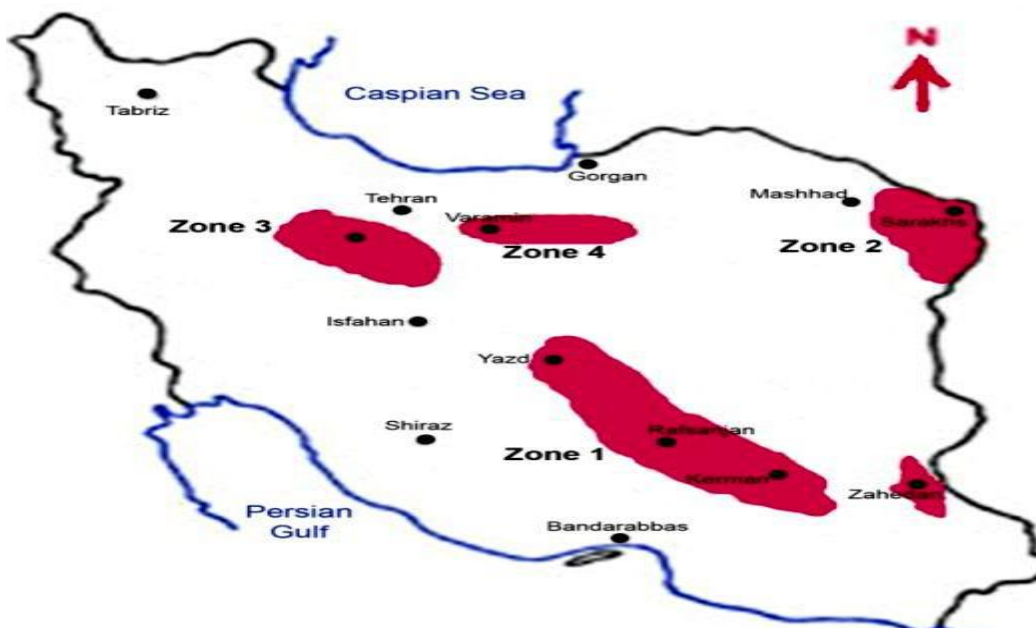
جدول ۵-۲ تعیین پتانسیل رمبندگی بر اساس معیار Jennings and Knight

C_p	پتانسیل رمبندگی
۰-۱	بدون رمبندگی
۱-۵	رمبندگی کم
۵-۱۰	رمبندگی متوسط
۱۰-۲۰	رمبندگی نسبتاً شدید
> ۲۰	رمبندگی بسیار شدید

۷-۱-۲ پراکندگی خاک‌های رمبنده در ایران

خاک‌های رمبنده در مناطق خشک و نیمه خشک مشکلات بیش‌تری ایجاد می‌کنند. ایران به عنوان یک کشور در حال رشد که حجم ساخت و سازهای عمرانی نیز در آن زیاد می‌باشد جزء مناطق خشک و نیمه خشک دنیا به حساب می‌آید و از نظر پراکندگی خاک‌های مسئله دار در آن حائز اهمیت فراوان است. با توجه به نقشه پراکندگی خاک‌های رمبنده در ایران که در شکل ۷-۲ ملاحظه می‌شود که این خاک‌های در چهار منطقه گسترش دارند. مناطق چهارگانه در امتداد رشته کوه‌های البرز و زاگرس مشاهده می‌شوند که در واقع یکی از خصوصیات صحرایی و محل تشکیل این‌گونه خاک‌ها در دامنه ارتفاعات می‌باشد. مناطق مذکور شامل ۱. منطقه یزد، رفسنجان، کرمان و زاهدان ۲. منطقه

سرخس ۳. منطقه زنجان ۴. منطقه سمنان می باشد (فریدونی, ۱۳۹۰).



شکل ۲-۷ نقشه پراکندگی خاک‌های رمبنده در ایران (فریدونی, ۱۳۹۰)

۲-۲ تثبیت خاک‌ها

۱-۲-۲ مقدمه

تثبیت خاک‌ها با روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی برای بهبود ویژگی‌های خاصی از خاک طبیعی انجام می‌شود. به‌طور کلی فرآیندهای تثبیت خاک شامل تجزیه و تحلیل خواص خاک در دسترس، پیدا کردن یک روش مقرون به صرفه اقتصادی برای اصلاح خاک و تعیین امکان‌سنجی استفاده از مواد و روش‌ها می‌شود (Hilf, 1991).

۲-۲-۲ تثبیت شیمیایی

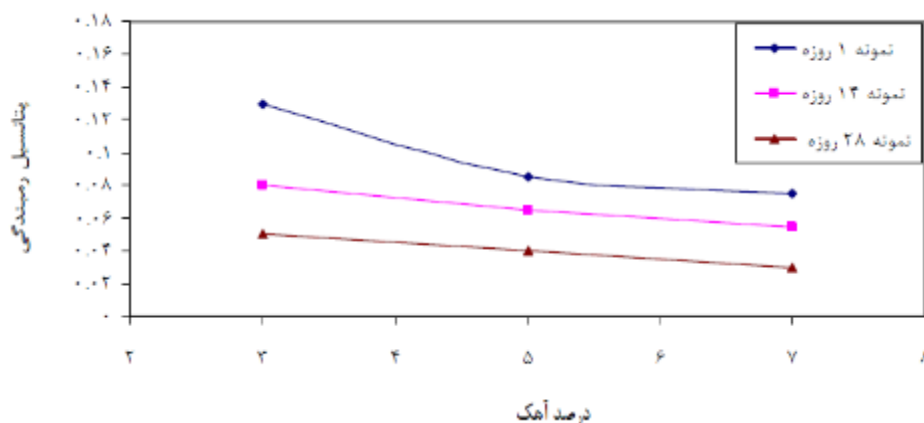
تثبیت شیمیایی یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌های تثبیت خاک است. اضافه‌شدن ترکیبات شیمیایی به خاک موجب بهبود مقاومت، رفتار تنش-کرنش، نفوذپذیری، دوام و کاهش نشست می‌شود. واکنش‌های شیمیایی که بین خاک و مواد افزودنی رخ می‌دهد شامل تبادل کاتیونی، واکنش‌های

پوزولانی، لخته‌سازی، پلیمریزاسیون، اکسیداسیون و کربناتی‌شدن می‌شود (Hans et al., 1991).

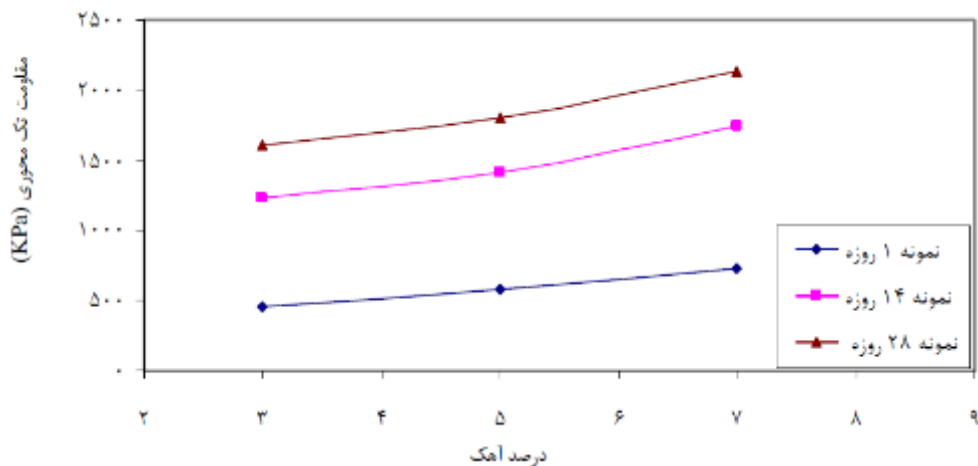
از جمله تثبیت کننده‌های شیمیایی می‌توان به سیمان پرتلند، آهک، خاکستر بادی و قیر اشاره کرد که در این بین سیمان پرتلند، آهک و خاکستر بادی از جمله عوامل فعال هستند زیرا موجب واکنش‌های شیمیایی با خاک می‌شوند. قیر از جمله عوامل غیرفعال است زیرا برای محافظت از خاک‌های چسبنده در مقابل آب به کار می‌رود (Guo, 2014).

۲-۲-۲-۱ آهک

(وکیلی و همکاران، ۱۳۸۷) آزمایشاتی را روی خاک رمل‌بند انجام دادند و اثر افزودن آهک و زمان عمل‌آوری را روی میزان رمل‌بندی خاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که در اصلاح خاک رمل‌بند زمان کافی وجود داشته باشد، درصد اختلاط بهینه آهک، ۳٪ و در شرایطی که زمان کافی در اختیار نباشد، درصد اختلاط بهینه ۵٪ می‌باشد که نتایج آن در شکل ۲-۸ نمایش داده شده است. آن‌ها با انجام آزمایش مقاومت تک محوری روی خاک رمل‌بند به این نتیجه رسیدند که همان‌طور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است با افزایش درصد آهک اضافه شده به خاک و افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۸ تغییرات پتانسیل رمل‌بندی خاک با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (وکیلی و همکاران، ۱۳۸۷)



شکل ۲-۹ تغییرات مقاومت تک محوری خاک با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف (وکیلی و همکاران، ۱۳۸۷)

آن‌ها دلیل این امر را واکنش‌های بین آهک، آب، مواد سیلیس‌دار و آلومین‌دار که به واکنش‌های پوزولانی معروف هستند، دانستند که موجب تشکیل مواد چسبنده بین ذرات خاک شده و موجب افزایش مقاومت و دوام آن می‌گردند.

۲-۲-۲-۲ سیمان

(Ziaie Moayed and Kamalzare, 2015) به بررسی بهبود خواص خاک رمبنده موجود در محل راه آهن تهران-سمنان پرداختند. آن‌ها دریافتند که با تزریق سیمان می‌توان مقدار رمبندگی خاک را کاهش داد. بر اساس آزمایشات آن‌ها خاک دست نخورده دارای رمبندگی ۳/۴۵٪ بوده است ولی پس از تزریق سیمان، مقدار شاخص رمبندگی به ۱/۲۸٪ رسید یعنی با تزریق سیمان کاهشی در حدود ۶۳٪ در شاخص رمبندگی خاک پیش آمد. آن‌ها با انجام آزمایش برش مستقیم دریافتند که افزودن سیمان به خاک موجب افزایش مقدار ϕ و ϕ' در خاک رمبنده می‌شود.

۳-۲-۲-۲ خاکستر بادی

(Misra, 1998) تحقیقاتی بر روی خاکستر بادی انجام داد و مشاهده کرد هر چقدر مقدار کلسیم موجود در خاکستر بادی بیش‌تر باشد عملکرد پوزولانی خاکستر بادی در بهبود مقاومت خاک رس بهتر

می‌شود.

(Zia and Fox, 2000) نشان داد که استفاده از خاکستر بادی موجب پایداری خاک‌های لسی می‌شود. آن‌ها نشان دادند که برای نمونه‌هایی که با خاکستر بادی مخلوط شدند و برای ۱۴ روز عمل‌آوری شدند مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها ۱۱ درصد افزایش یافت. آن‌ها همچنین نشان دادند که مقدار بهینه‌ی خاکستر بادی به مقدار وجود اکسید کلسیم در خاکستر و خاک وابسته است.

(Zhang and Zhang, 2013) تاثیر عوامل مختلفی مثل نسبت اختلاط خاکستر بادی و آهک، درصد رطوبت اولیه نمونه‌ها و زمان عمل‌آوری را بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره خاک لسی بررسی کردند. بر پایه نتایج بدست آمده، مشخص شد که استفاده از خاکستر بادی و آهک به مرور زمان باعث افزایش آرام مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های خاک می‌شود. هر چه نسبت اختلاط خاکستر بادی با آهک بیش‌تر شود مقدار افزایش مقاومت کمتر خواهد شد. آن‌ها دریافتند که میزان رطوبت تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه‌ها می‌گذارد و افزایش رطوبت باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود.

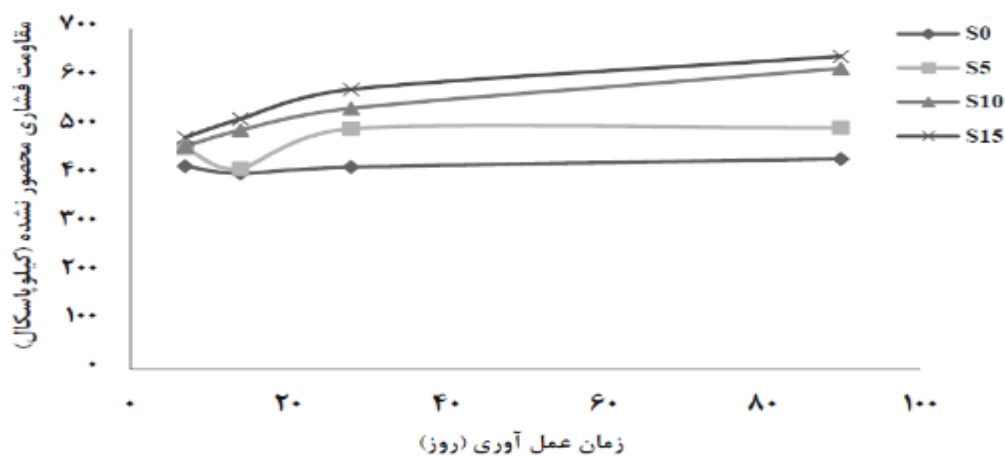
۴-۲-۲-۲ خاکستر لجن فاضلاب

در پژوهش‌های گذشته از پوزولان‌های مختلفی برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌ها استفاده شده است. اخیراً نیز ایده استفاده از خاکستر لجن فاضلاب مورد توجه قرار گرفته ولی به دلیل تجربه کمتر استفاده از این ماده و روشن نبودن چگونگی تاثیر آن بر رفتار مکانیکی خاک‌ها، تحقیق در این زمینه ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. امروزه با توجه به محدودیت منابع آب و لزوم بازچرخانی منابع آب نامتعارف به منظور استفاده مجدد در مصارف گوناگون، احداث تصفیه‌خانه‌های آب و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی، از ضروریات جدانشدنی مدیریت شهری و بهداشت عمومی است. از سوی دیگر لجن خشک تولید شده در تصفیه‌خانه‌ها عموماً زیاد است و مشکل انباشت لجن خشک در محوطه تصفیه‌خانه‌ها همواره مطرح بوده است. دفع این مواد به علت رعایت نکات زیست محیطی و محدودیت

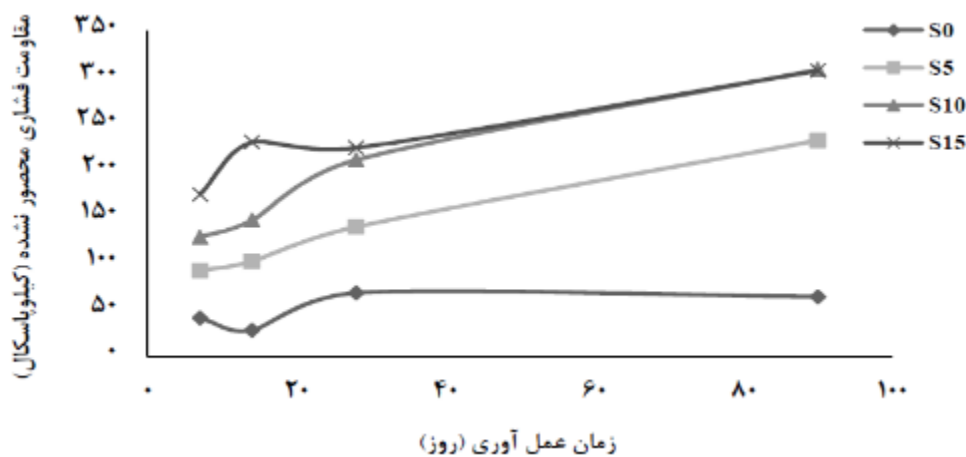
نگهداری آن‌ها، اهمیت خاصی دارد. از این رو مدیریت صحیح لجن تولیدی شده برای متولیان تصفیه-خانه‌ها بسیار بااهمیت و اجتناب‌ناپذیر است. اگر تاثیر این مواد بر خواص مهندسی خاک‌ها قابل توجه باشد، ممکن است به عنوان جایگزینی مناسب برای انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی به کار گرفته شوند. این پوزولان در مقایسه با سایر پوزولانها از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه خواهد بود زیرا تصفیه‌خانه‌ها ترجیح می‌دهند با سوزاندن پسماندها، حجم آن‌ها را به میزان ۹۵٪ کاهش دهند. بدین ترتیب خاکستر لجن فاضلاب از یک طرف به عنوان منبع قرصه مناسب در نزدیکی شهرها در دسترس خواهد بود و از طرف دیگر کمک بسار مناسبی در مدیریت پسماند تصفیه‌خانه‌های شهری خواهد بود. استفاده از لجن فاضلاب برای تثبیت خاک می‌تواند از اهمیت و توجیه فنی و اقتصادی دوچندان برخوردار باشد. خاکستر لجن فاضلاب به علت دارا بودن ترکیبات سیلیس و آهک می‌تواند به عنوان ماده‌ای پوزولانی عمل نماید. ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان می‌دهد و ترکیباتی به وجود می‌آورد که خاصیت چسبندگی و سیمانی دارند (نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳).

(نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳) تاثیر استفاده از خاکستر لجن فاضلاب را بر روی ویژگی‌های مختلف خاک رسی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوره، درصد رطوبت بهینه، وزن واحد حجم خشک حداکثر و PH را بررسی کردند. آن‌ها تاثیر مقدار رطوبت اولیه برای ساخت نمونه را بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره خاک مورد بررسی قرار دادند به این ترتیب که نمونه‌هایی را با رطوبت طبیعی و نمونه‌هایی را با رطوبت اشباع ساختند و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف عمل‌آوری کردند سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره روی نمونه‌ها انجام دادند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره آن‌ها نشان داد که افزودن خاکستر لجن فاضلاب به نمونه‌ها موجب افزایش مقاومت خاک‌های رسی می‌شود. هم‌چنین زمان عمل‌آوری طولانی تر و درصد رطوبت بیش‌تر در ساخت نمونه‌ها موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شد. به

این صورت که در نمونه‌های تحت رطوبت بهینه، افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رس موجب افزایش ۱/۵ برابری مقاومت فشاری خاک شد ولی افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی که تحت رطوبت اشباع بود موجب افزایش ۴/۸ برابری مقاومت فشاری تک‌محوره شد. آن‌ها دلیل این افزایش در مقاومت را واکنش‌های پوزولانی بین اجزای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی خاکستر لجن فاضلاب با هیدروکسید کلسیم در مجاورت رطوبت که باعث تولید هیدروسیلیکات کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم که دارای خواص چسبندگی هستند، دانستند. شکل ۲-۵ نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره را برای دو رطوبت مختلف اشباع و بهینه نشان می‌دهد.



(الف)

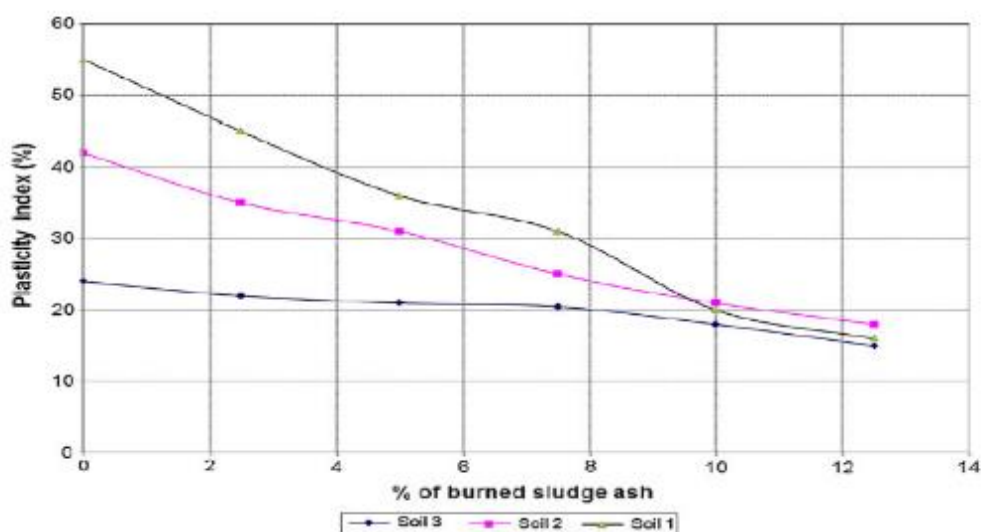


(ب)

شکل ۲-۱۰ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در رطوبت‌های مختلف بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره (الف) رطوبت بهینه (ب) رطوبت اشباع (نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳)

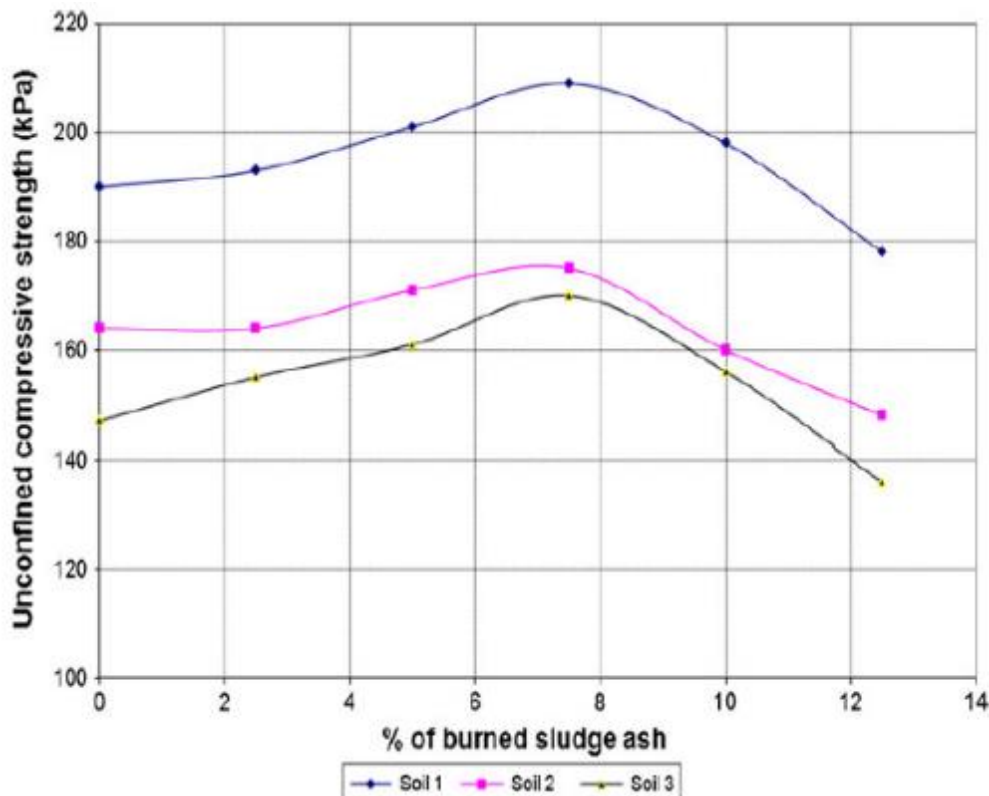
نوروزیان و همکاران به بررسی آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های حاکی که با خاکستر لجن فاضلاب مخلوط شده بودند، پرداختند. نتایج آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ها نشان داد که افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب در نمونه‌ها موجب افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها و کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک شد. آن‌ها دلیل این امر این دانستند که با افزایش خاکستر لجن فاضلاب به دلیل نرمی زیاد آن، جذب آب سطحی توسط ذرات خاکستر لجن فاضلاب افزایش می‌یابد و این عمل باعث افزایش رطوبت بهینه می‌شود. همچنین با افزایش رطوبت بهینه، آب کم‌کم جای ذرات خاک را می‌گیرد و به دلیل پایین‌تر بودن وزن حجمی آب نسبت به مصالح مصرفی، وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش می‌یابد. بررسی PH نمونه‌ها توسط نوروزیان و همکاران نشان داد که اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب منجر به افزایش PH خاک شد و در نتیجه محیط قلیایی‌تر و شرایط لازم برای انجام واکنش‌های پوزولانی مهیا شد.

(Al-Sharif and Attom, 2014) به بررسی تاثیرات اضافه کردن خاکستر لجن بر روی سه نوع خاک رس مختلف پرداخت. نتایج آزمایش تعیین شاخص خمیری بر روی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش مقدار خاکستر، مقدار PI کاهش می‌یابد. شکل ۲-۱۱ نتایج حاصل از این آزمایش را نشان می‌دهد.



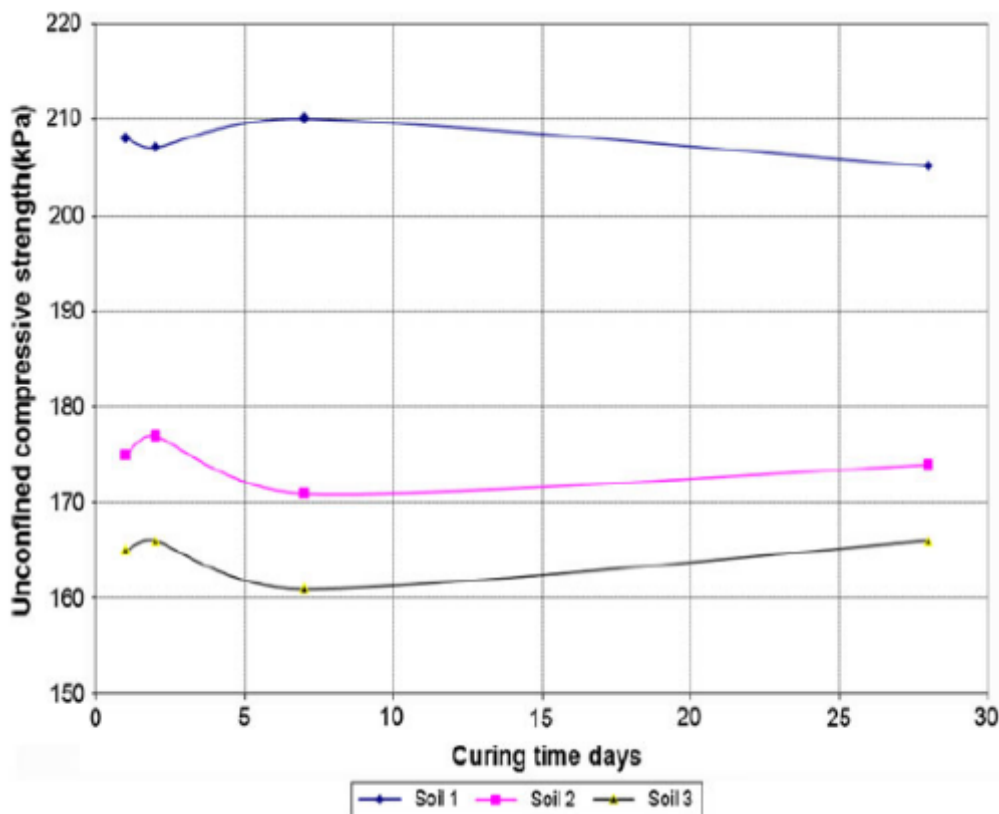
شکل ۲-۱۱ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی شاخص خمیری خاک (Al-Sharif and Attom, 2014)

بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره انجام شده توسط AI-Sharif، مشخص شد که در هر سه نوع خاک، تا اضافه شدن ۷/۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقدار مقاومت خاک افزایش، ولی برای درصد‌های بالاتر خاکستر لجن فاضلاب مقدار مقاومت نمونه‌ها کاهش یافت. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها در شکل ۲-۱۲ آمده است.



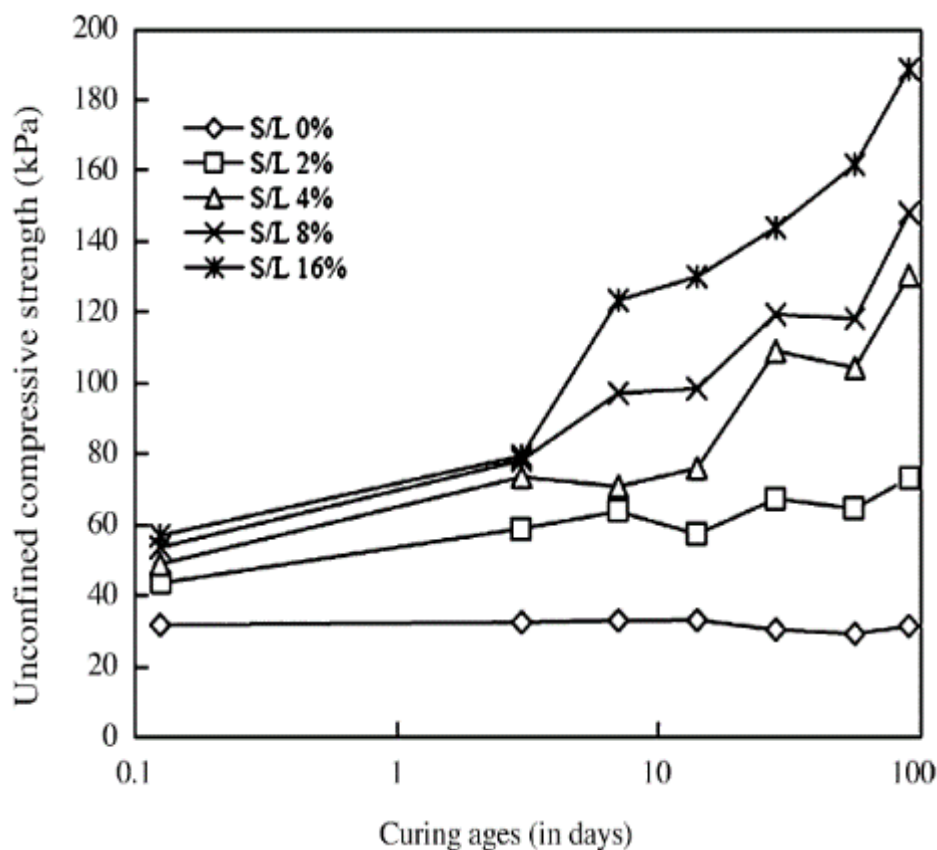
شکل ۲-۱۲ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر مقاومت فشاری تک‌محوره (AI-Sharif and Attom, 2014)

هم‌چنین تاثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های خاک آماده شده توسط AI-Sharif and Attom مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲-۱۳ نتایج حاصل از تاثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها تثبیت شده با خاکستر لجن فاضلاب را بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره نشان می‌دهد که بر اساس آن تاثیر زمان عمل‌آوری تفاوت چندانی در مقاومت تک‌محوره‌های تثبیت شده با خاکستر لجن فاضلاب ایجاد نمی‌کند.



شکل ۲-۱۳ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب در زمان‌های عمل‌آوری مختلف بر مقاومت فشاری تک-محوره (AI-Sharif and Attom, 2014)

(Lin et al., 2007) به بررسی تاثیرات خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک هیدراته به نسبت ۴ به ۱ بر روی یک خاک رسی با حد روانی پایین پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که اضافه شدن خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک به خاک رس موجب کم شدن شاخص خمیری خاک شده است و همین کم شدن شاخص خمیری خاک موجب آن شده است که خاک از نوع CL به ML تغییر کند. آن‌ها همچنین بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره برای نمونه‌های همراه با خاکستر لجن فاضلاب و آهک هیدراته که در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حاصل از آزمایش تراکم ساخته شدند، دریافتند که اضافه کردن این مواد باعث افزایش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره شده است به صورتی که هر چقدر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها بیشتر باشد مقدار افزایش مقاومت بیشتر خواهد بود. تاثیر خاکستر لجن فاضلاب بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره در شکل ۲-۱۴ نمایش داده شده است.



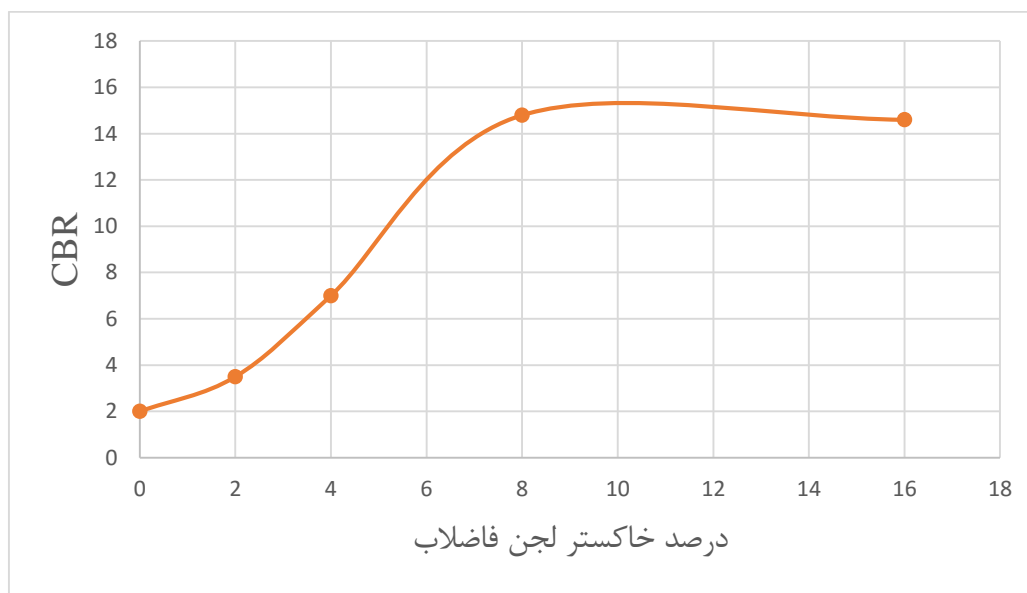
شکل ۲-۱۴ اثر درصد اختلاط خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک در زمان‌های عمل‌آوری مختلف بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره (Lin et al., 2007)

آن‌ها معتقد بودند که علت افزایش مقاومت فشاری خاک در زمان اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب و آهک آن است که خاکستر لجن فاضلاب دارای عناصر Si، Al و Fe است که به صورت اکسیدهای SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 موجود هستند. از طرف دیگر خاکستر لجن فاضلاب دارای ۸ درصد کلسیم است و بخش عمده آهک نیز از کلسیم تشکیل شده است حال این مواد با هم واکنش‌های پوزولانی انجام داده و تولید مواد چسبنده کلسیم سیلیکات و هیدرات سیلیکات آلومینیوم می‌کند.

لین و همکاران با انجام آزمایش CBR به این نتیجه رسیدند که برای خاک شاهد نرم بستر جاده مقدار CBR برابر ۲ بوده است اما با اضافه کردن ۲، ۴ و ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک موجب افزایش CBR به ترتیب به مقادیر ۱۰، ۱۵ و ۳۵ افزایش یافت.

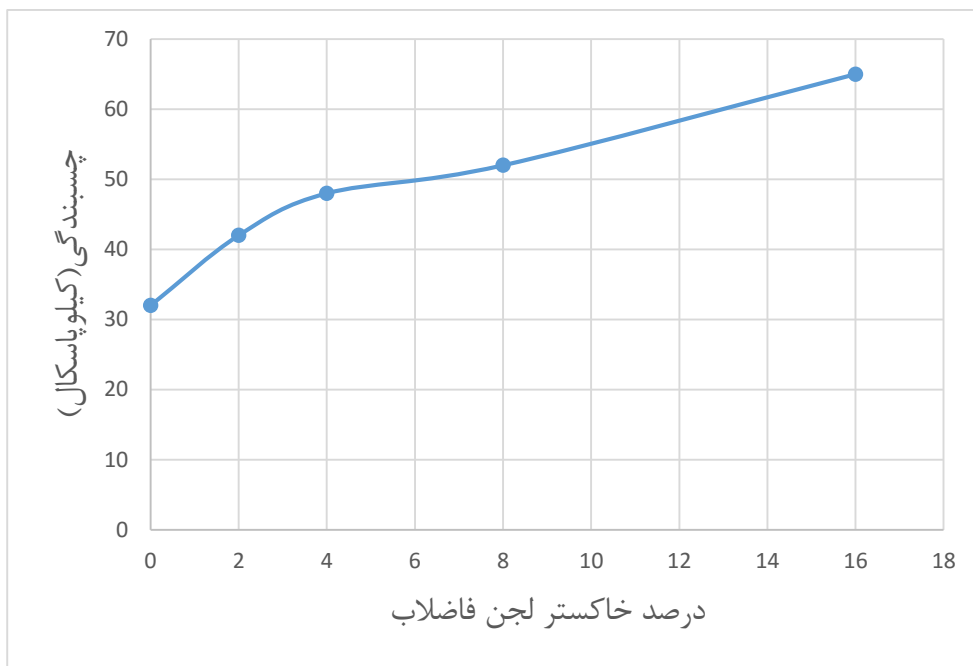
هم‌چنین (Lin et al., 2005) مقدار تغییرات CBR را بر اثر اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب

به خاک نرم بستر جاده مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که برای خاک تثبیت نشده مقدار CBR برابر ۲ است. از این رو این خاک چون دارای CBR کمتر از ۳ بود جز خاک های ضعیف برای بستر جاده محسوب می شد اما زمانی که ۲ تا ۴ درصد خاکستر به خاک اضافه شد مقدار CBR به ترتیب برابر با ۳/۵ تا ۷ شد به این ترتیب خاک جز خاک های نسبتا خوب برای بستر جاده محسوب شد زیرا محدوده خاک های نسبتا خوب برای بستر جاده دارای CBR بین ۳ تا ۸ بود. آن ها مشاهده کردند که با اضافه کردن ۸ و ۱۶ درصد خاکستر به خاک مقدار CBR برابر با ۱۴/۸ و ۱۴/۶ خواهد شد. پس آن ها نتیجه گرفتند که خاکستر لجن فاضلاب می تواند خاک بستر روسازی را بهبود دهد. نتایج مربوط به تاثیر خاکستر لجن فاضلاب بر روی CBR در شکل ۲-۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱۵ اثر درصدهای مختلف اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی پارامتر CBR خاک نرم بستر جاده (Lin et al., 2005)

آن ها هم چنین با استفاده از آزمایش سه محوری به بررسی تاثیر استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در میزان چسبندگی خاک نرم بستر جاده پرداختند و مشاهده کردند استفاده از خاکستر لجن فاضلاب همان طور که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده موجب افزایش مقدار چسبندگی خاک می شود.



شکل ۲-۱۶ اثر درصدهای مختلف اختلاط خاکستر لجن فاضلاب بر روی چسبندگی خاک نرم بستر جاده (Lin et al., 2005)

۳-۲-۲ تثبیت بیولوژیکی

استفاده از تثبیت‌کننده میکروبی یک روش بیولوژیکی جدید برای تثبیت خاک است و میکروب بزرگترین زیست توده بر روی زمین است (Karol, 2003). محصولات حاصل از واکنش میکروب با عامل رسوب ساز که شامل کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و آلومینیوم هستند باعث تغییر خواص مهندسی خاک می‌شود (Dejong et al., 2006).

(نیک اقبال سی سخت و همکاران، ۱۳۹۳) باکتری باسیلوس اسفاریکوس را همراه با رطوبت به خاک تزریق کردند و به صورت یکنواخت با خاک مخلوط کردند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده با مقادیر مختلف عامل رسوب‌ساز کلرید (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ گرم بر لیتر)، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رمبندگی به ازای هر سه درصد مختلف کلرید کلسیم کاهش یافت ولی مقدار بهینه عامل رسوب‌ساز کلرید کلسیم ۷۵ گرم بر لیتر تعیین شد. هم‌چنین آن‌ها دریافتند با ثابت نگه داشتن درصد رطوبت، چگالی خشک خاک، مقدار باکتری و عامل رسوب‌ساز با گذشت زمان عمل‌آوری، رمبندگی خاک کاهش

می‌یابد. دلیل کاهش در میزان رمبندگی نیز آن بود که باکتری باسیلوس اسفاریکوس با کمک عامل شیمیایی رسوب‌ساز به رسوب کربنات کلسیم بر روی و در بین ذرات خاک می‌پردازد و سبب تقویت ریزبافت خاک رمبنده می‌شود.

۴-۲-۲ تثبیت فیزیکی

برای تثبیت فیزیکی خاک رمبنده روش‌های مختلفی وجود دارد که در زیر به چند مورد اشاره می‌شود.

۱-۴-۲-۲ جمع آوری و تراکم مجدد

وقتی خاک‌های رمبنده قبل از ساخت شناسایی می‌شوند، عموماً روش جمع‌آوری و تراکم انتخاب شده و می‌تواند موثر باشد و در صورتی که عمق جمع‌آوری خاک سطحی یا تقریباً سطحی باشد این گزینه باعث هدر رفتن هزینه اولیه نمی‌گردد. لازم است که پس از متراکم کردن خاک، اطمینان حاصل شود که پتانسیل رمبندگی خاک اندک باشد (Houston et al., 2001).

۲-۴-۲-۲ تراکم دینامیکی عمیق

تراکم دینامیکی عمیق به‌طور گسترده در مناطق مختلف به‌کار برده می‌شود. صفت عمیق از آن جهت به‌کار برده می‌شود که عمق خاک اصلاح شده در صورت استفاده از این روش نسبت به غلتک‌های سطحی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر است. اما به هر حال به نظر می‌رسد که فرآیند تراکم دینامیکی تا عمق ۵ متر بالایی سطح زمین کارآمد بوده و بیش‌ترین تاثیر را در اعماق ۳ متر بالایی داشته باشد (Rollins and Rogers, 1994). در صورتی که وزنه‌های نسبتاً بزرگی از ارتفاع‌های بالاتر سقوط کند در آن صورت کارایی این روش می‌تواند تا اعماق بیش‌تر ادامه پیدا کند (Pengelly et al., 1997).

۲-۲-۴-۳ اجرای شمع

استفاده از شمع موجب انتقال بار به تراز پایین تری از کف خاک رمبنده یا عمق ترشدگی می‌شود. هزینه استفاده از پی‌های عمیق بیش‌تر از آن است که به عنوان گزینه اصلاح و بهسازی خاک‌های رمبنده استفاده شود (Houston et al., 2001).

۲-۲-۴-۴ پیش مرطوب کردن

اساس روش مرطوب کردن یا غرقاب کردن، آن است که ابتدا خاک را در معرض آب قرار می‌دهند تا کاهش حجم یابد، سپس بنا را احداث می‌کنند. برای این کار دور تا دور محوطه موردنظر را با خاکریز موقتی دیوارسازی می‌کنند سپس درون آن را با آب پر می‌کنند، گاهی نیز آب را درون گودبرداری پی می‌ریزند. پس از رطوبت‌گیری خاک، باید یک لایه ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتری شن یا کاسه روی خاک ریخته شود تا رطوبت در محل عملیات حفظ شود. زمان لازم برای این روش طولانی است زیرا نفوذ آب در خاک‌های رس به کندی انجام می‌شود (جهانیار مقدم و همکاران، ۱۳۸۶). استفاده از این روش در سه تا ۵ دهه گذشته بسیار معمول بوده اما در طول دهه گذشته بسار کم از این روش در آمریکا استفاده شده است (Houston et al., 2001).

۲-۳ بررسی مسائل محیط‌زیستی و نحوه کاربرد خاکستر

لجن فاضلاب

یکی از مسائل مهم در استفاده از خاکستر لجن فاضلاب برای بهسازی خاک‌ها آن است که خاکستر لجن فاضلاب باعث آلودگی خاک و آلودگی آب‌های زیر زمینی نشود برای بررسی این موضوع (Chen and Lin, 2009) با استفاده از آزمایش تعیین سمی بودن به روش فروشویی^۱ مطابق با استاندارد آژانس

1 TCLP

حفاظت محیط‌زیست آمریکا^۱ به بررسی عناصر سنگین در خاکستر لجن فاضلاب پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها که در جدول ۲-۶ آمده است مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دما برای سوزاندن خاکستر لجن فاضلاب، مقدار عناصر سنگین موجود در خاکستر لجن فاضلاب کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند با سوزاندن لجن فاضلاب و تبدیل آن به خاکستر لجن فاضلاب مقدار فلزات سنگین موجود در خاکستر در محدوده استاندارد سازمان محیط زیست آمریکا خواهد بود. پس استفاده از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده ی پوزولانی مشکلی از منظر آلودگی ایجاد نخواهد کرد.

جدول ۲-۶ مقایسه درصد عناصر سنگین خاکستر لجن فاضلاب با استاندارد آمریکا (Chen and Lin, 2009)

Heavy metals	TCLP (105 °C) (mg/L)	TCLP (800 °C) (mg/L)	TCLP allowable leached concentration (mg/L)
Cd	0.03	0.03	1.00
Co	0.25	0.21	-
Cr	0.24	0.06	0.50
Cu	1.95	8.24	15.00
Fe	2.12	0.47	-
Ni	6.52	1.97	-
Pb	0.54	0.37	5.00
Zn	16.75	8.14	25.00

یکی دیگر از مسائل مهم در تولید خاکستر لجن فاضلاب آن است که از چه دمایی برای سوزاندن لجن استفاده شود تا بهترین کارایی را داشته باشد. طبق تحقیقات (فتوت و همکاران، ۱۳۸۵) که بر روی دو نمونه خاکستر لجن فاضلاب که یکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و دیگری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد و از خاکستر حاصل در تولید بتن استفاده شد، مشخص شد که خاکستری که در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است اثر مقاومتی بهتری نسبت به خاکستر لجن فاضلاب تولید شده در دمای ۵۵۰ سانتی‌گراد داشته است.

^۱ EPA

مساله حائز اهميت ديگر آن است كه استفاده از خاكستر لجن فاضلاب براي بهسازي خاك مقرون به صرفه است يا خير، بايد توجه كرد كه در کشور ما، ايران، سالانه بيش از ۴ ميليارد مترمكعب فاضلاب شهري و روستايي توليد مي شود كه از اين مقدار تنها ۱۱ درصد آن وارد تصفيه خانه هاي کشور مي شود و بقيه آن بدون تصفيه وارد چاههاي جذبي، رودخانه ها و يا زمين هاي كشاورزي مي شود. در سال هاي اخير افزايش قابل توجه لجن كه ناشي از توسعه تصفيه خانه هاست در ايران مشاهده شده است. روش - هاي مختلفي براي دفع لجن وجود دارد كه با توجه به نوع منطقه، شرايط آب و هوايي و ملاحظات اقتصادي مورد استفاده قرار مي گيرند. دفع لجن، خصوصا در مناطقي كه با كمبود زمين و تراكم جمعيت مواجه هستند (مانند استان هاي شمالي کشور) به عنوان مهم ترين معضل مطرح مي باشد. در اين مناطق گزينه سوزاندن مي تواند بعنوان يكي از راهكارهاي دفع لجن به شمار آيد، زيرا در مناطق ساحلي علاوه بر كمبود زمين براي دفن، بالا بودن سطح آب زيرزميني نيز دفع لجن تصفيه خانه ها را با مشكل مواجه مي نمايد. پس خاكستر لجن فاضلاب از لحاظ در دسترس بودن مي تواند به عنوان يك گزينه با صرفه اقتصادي مطرح شود. از طرف ديگر طبق تحقيق (كشاورز، ۱۳۹۱) در واحد تصفيه پساب مجتمع پتروشيمي مابين براي کاهش حجم لجن ها از روش سوزاندن استفاده مي شود به اين ترتيب كه از يك زباله سوز روتاري با ظرفيت ۸۵/۵ كيلو بر ساعت در دماي ۷۰۰ درجه سيلسيوس و دو زباله سوز استاتيكي با دماي ۹۰۰ درجه سيلسيوس و ظرفيت ۳۰۰۰ كيلو بر ساعت براي سوزاندن لجن ها استفاده مي شود. از طرف ديگر طبق سايت ماشين سازي اراك كه سازنده زباله سوز پالایشگاه تهران است از خاكستر لجن توليدي اين دستگاه در توليد بلوك هاي سيماني استفاده مي شود.

۳- فصل سوم

روش تحقیق

۱-۳ مقدمه

در این فصل به ترتیب ابتدا مکان و نحوه نمونه‌گیری شرح داده می‌شود. سپس آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک مورد نظر توضیح داده شده و نتایج آزمایش آمده است. خاک مورد آزمایش و خاکستر لجن فاضلاب مورد بررسی قرار می‌گیرند و مشخصات کلی آن‌ها ارائه می‌شود. آزمایش رمبندگی اشباع برای خاک شاهد و خاک بهسازی شده که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است شرح داده می‌شود.

۲-۳ محل نمونه‌گیری خاک

خاک مورد نظر از روستای تمرقره قوزی در شهرستان کلاله استان گلستان با مختصات جغرافیایی که در جدول ۱-۳ آمده است، تهیه شد. بر اساس تحقیقات قبلی انجام شده توسط پژوهشگران در این منطقه خاک مورد نظر از نوع رمبند است و عمق لایه خاک رمبند نیز زیاد و به صورت دست‌نخورده و بکر است. بر اساس مشاهدات میدانی همان‌طور که در شکل ۱-۳ آمده است، پدیده فروریزش در خاک منطقه به وضوح قابل تشخیص بود زیرا بدون وجود هرگونه سربار و افزایش رطوبت، نشست در خاک قابل مشاهده بود (نوکنده، ۱۳۹۴).

جدول ۱-۳ مختصات محل انتخاب شده جهت نمونه‌گیری

محل نمونه‌گیری	روستای تمرقره قوزی استان گلستان
عرض جغرافیایی	۳۷°۳۰' ۱۳" N
طول جغرافیایی	۵۵°۳۰' ۴۳" E



شکل ۱-۳ پدیده فروریزش در خاک منطقه (نوکنده، ۱۳۹۴)

۳-۳ آزمایش های شناسایی اولیه ویژگی های خاک

۱-۳-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک

تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک طبق استاندارد ASTM D 2216-98 انجام شد. طبق این استاندارد برای انتخاب نمونه باید بدون آنکه خاکها رطوبتی را از دست بدهند یک نمونه را انتخاب کرد به گونه ای که نماینده کل خاک باشد. سپس جرم ظرفی تمیز و خشک را بدست می آوریم و نمونه ی انتخاب شده را در ظرف قرار می دهیم و جرم ظرف به همراه نمونه مرطوب را با ترازو بدست می آوریم. سپس ظرف حاوی خاک مرطوب را به مدت ۱۶ ساعت در درون اون قرار می دهیم تا خاک کاملاً خشک شود بعد از آن خاک خشک به همراه ظرف آن را وزن می کنیم. برای اطمینان از خشک بودن خاک می توان در فاصله ی زمانی ۱ ساعت خاک خارج شده از اون را توزین کرد اگر تغییر وزن کمتر از ۰/۱ درصد باشد نمونه خشک تلقی می شود. سپس بر اساس رابطه ۱-۳ درصد رطوبت تعیین می شود.

$$\omega = 100 * \frac{M_w - M_d}{M_d} \quad 1-3$$

M_d : وزن خشک خاک

M_w : وزن مرطوب خاک

ω : درصد رطوبت خاک

در این جا سه عدد کلوخه نمونه دست نخورده از خاک برداشته شد و آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی روی آن ها انجام شد و میانگین درصد رطوبت کلوخه ها به عنوان رطوبت خاک انتخاب شد. نتایج مربوط به این آزمایش به همراه مقدار میانگین درصد رطوبت طبیعی نمونه های خاک در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳ تعیین درصد رطوبت خاک

شماره آزمایش	% ω
۱	۵/۴۱
۲	۵/۴۷
۳	۵/۸۴
میانگین	۵/۵۷

۲-۳-۳ آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک خاک

برای تعیین وزن مخصوص خشک خاک چند روش وجود دارد. در این جا از آزمایش پارافین استفاده شد. در ابتدا وزن مخصوص پارافین مشخص شد و سپس ۳ عدد کلوخه خاک دست نخورده انتخاب شد و با استفاده از پارافین ذوب شده احاطه شد. سپس در داخل آب قرار گرفت و بر اساس حجم آب جابجاشده بر اثر قرارگیری کلوخه پوشیده شده از پارافین در دورن آب و بر اساس وزن مخصوص پارافین محاسبه شده، مقدار وزن مخصوص خشک خاک مشخص شد. سپس مقدار میانگین نتایج به عنوان وزن مخصوص خشک خاک پذیرفته شد. نتایج مربوط به این آزمایش در جدول ۳-۳ آمده است.

جدول ۳-۳ وزن مخصوص خشک خاک

وزن مخصوص خشک خاک (gr/cm^3)	شماره آزمایش
۱/۴۰	۱
۱/۳۷	۲
۱/۵۰	۳
۱/۴۲	میانگین

۳-۳-۳ آزمایش تعیین حدود اتربرگ خاک

برای تعیین حد روانی خاک از آزمایش جام کاساگرانده و برای تعیین حد خمیری از روش فیتیله استفاده شد. روش انجام آزمایش مبتنی بر استاندارد ASTM D 4318 بود. طبق این استاندارد برای تعیین حد روانی مطابق مراحل زیر باید طی شود:

- وزن ظرف تعیین درصد رطوبت تعیین می‌شود.
- نمونه خاک را در هوا خشک کرده و ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم خاک عبوری از الک نمره ۴۰ را انتخاب کنید.
- مقداری آب مقطر به خاک اضافه کرده و مخلوط را کاملاً هم‌زده تا یکنواخت شود. سپس آن را برای ۱۶ ساعت باید در قوطی سرپوشیده ای رها کنیم تا کلوخه ها نرم شود و در حین این عمل خاک رطوبت خود را نیز از دست ندهد پس از طی شدن این زمان و قبل از انجام آزمایش، دوباره باید به طور کامل خاک مخلوط شود.

- قسمتی از نمونه را با کاردک درون جام کاساگرانده قرار داده و با کاردک سطح آن را صاف می‌کنیم این عمل بصورتی باید انجام شود که عمق خاک در گودترین نقطه ۱۰ میلی متر باشد. و $\frac{2}{3}$ جام پر از خاک شود.
- با شیارکش باید شیار را ایجاد کرد.
- دسته دستگاه با سرعتی در حدود ۲ ضربه بر ثانیه چرخانده می‌شود و جام بالا رفته و فرو می‌افتد.
- نکته: ارتفاع سقوط باید $10 \pm 0/2 \text{ mm}$ باشد برای این کار از مکعب مستطیل برنجی همراه جام کاساگرانده که دارای ارتفاع $10 \pm 0/5 \text{ mm}$ کمک می‌گیریم.
- هر گاه شیار در طولی برابر ۱۳ میلی متر بسته شود عمل چرخاندن دسته دستگاه متوقف می‌شود و مقداری خاک از جمله خاک آن قسمتی که خاک به هم رسیده اند درون ظرف تعیین درصد رطوبت ریخته می‌شود و به مدت ۲۴ ساعت در اون گذاشته می‌شود و درصد رطوبت خاک تعیین می‌شود.
- جام را خالی کرده و خاک آن را به درون ظرف مخلوط منتقل کرده و به همه مخلوط آب مقطر اضافه می‌کنیم تا آزمایش بعدی را انجام دهیم و جام و شیارکش را تمیز می‌کنیم و برای آزمایش بعد آماده می‌کنیم.
- ضربه‌هایی که بین ۱۵ تا ۳۵ ضربه باشد یادداشت می‌شود و ضربات باید بین ۲۵ تا ۳۵ ، ۲۰ تا ۳۰ ، ۱۵ تا ۲۵ ضربه باشد. همچنین باید از سمت نمونه خشک (تعداد ضربه بیشتر) به سمت نمونه تر (تعداد ضربه کمتر) حرکت کنیم.
- این کار را برای سه نمونه باید تکرار کنیم.
- نمودار ضربه در مقابل درصد رطوبت را در اکسل رسم کرده و حد روانی خاک که برابر است با درصد رطوبت به ازای ۲۵ ضربه را محاسبه می‌کنیم.

همچنین طبق این استاندارد برای تعیین حد خمیری مطابق مراحل زیر باید طی شود:

- ۲۰ گرم از خاک آماده شده برای آزمایش حد روانی را برداشته و مقدار ۱/۵ تا ۲ گرم از آن را برداشت کرده و با فشردن بین انگشتان به صورت توده بیضوی درآورده و با کف دست بر روی یک صفحه شیشه ای غلتانده تا قطر آن به ۳/۲ میلی متر برسد. سپس آن را به چند قطعه می‌شکنیم و سپس این قطعات را به هم فشار می‌دهیم تا دوباره حالت بیضوی بگیرد سپس دوباره آن را فیتیله می‌کنیم. عملیات فیتیله کردن و تقسیم کردن و بهم چسباندن تا زمانی ادامه دارد که دیگر خاک فیتیله نشود سپس این تیکه‌های خک را در درون ظرفی قرار داده و ظرف بلافاصله پوشیده می‌شود این کار آن قدر ادامه پیدا می‌کند که وزن نمونه داخل ظرف تعیین درصد رطوبت، حداقل ۶ گرم باشد.
- این کار را برای یک ظرف دیگر نیز انجام می‌دهیم.
- درصد رطوبت های هر دو طرف را محاسبه کرده و میانگین آنها را به عنوان حد خمیری یادداشت می‌کنیم.

این کار بر روی خاک مورد مطالعه همان‌طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است انجام شد و حد روانی و حد خمیری آن محاسبه شد و سپس دامنه خمیری آن که تفاضل حد خمیری و حد روانی است محاسبه و در جدول ۳-۴ یادداشت شد.

جدول ۳-۴ نتایج حدود اتربرگ

حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
٪۲۸	٪۱۹	٪۹



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳-۲ تعیین حدود اتربرگ (الف) آماده سازی نمونه (ب) تعیین حد روانی با استفاده از جام کاساگرانده (ج) تعیین حد خمیری با استفاده از آزمایش فیتله

۴-۳-۳ آزمایش تعیین چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

:(Gs)

برای محاسبه چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک از استاندارد ASTM D 854 استفاده شد. طبق

این استاندارد چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک بر اساس روش زیر محاسبه می‌شود.

- ابتدا خاک را با هاون چوبی کوبیده تا کلوخه‌های از بین برود سپس آن را بر روی الک‌ها ریخته و مقداری خاک (حدود ۱۰۰ گرم) که از الک نمره ۴ عبور کرده را بر می‌داریم.
- نمونه خاک را در داخل اون قرار داده تا کاملا خشک شود.
- با توجه به جدول ۳-۵ و متناسب با حجم پیکنومتر و هم‌چنین دانه‌بندی خاک، مقداری از خاک خشک شده در اون برداشت می‌کنیم.

جدول ۳-۵ تعیین وزن خاک خشک برای آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

Soil Type	Specimen Dry Mass (g) When Using 250 mL Pycnometer	Specimen Dry Mass (g) When Using 500 mL Pycnometer
SP, SP-SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
Silt or Clay	35 ± 5	50 ± 10

- پیکنومتر ۲۵۰ میلی‌لیتری خالی، کاملا تمیز و خشک را وزن می‌کنیم. (M_p)
- نمونه خاک انتخاب شده در مرحله ۳ را در داخل پیکنومتر ریخته و وزن می‌کنیم. (M_{PS})
- وزن نمونه خاک را به‌صورت روبرو محاسبه می‌کنیم. $M_s = M_2 - M_1$
- مقداری آب مقطر به پیکنومتر اضافه کرده تا سطح آب کمی بالاتر از سطح خاک درون پیکنومتر قرار گیرد در واقع آن قدر آب به نمونه اضافه خواهیم کرد که سطح آب بین ۰/۵ تا ۰/۳۳ عمق بدنه اصلی چگالی سنج قرار گیرد و نمونه را برای ۲ ساعت رها می‌کنیم تا آب کاملا جذب خاک شود.
- پیکنومتر را روی شعله قرار می‌دهیم تا هوای داخل محلول خاک و آب کاملا خارج شود (تقریبا ۱۰ دقیقه). هم‌زمان با حرارت دیدن، پیکنومتر را به آرامی تکان می‌دهیم.
- پیکنومتر را از روی شعله برداشته و تا خط نشانه پیکنومتر به آن آب مقطر اضافه می‌کنیم. اضافه کردن آب مقطر در این مرحله باید به آرامی انجام شود تا حباب هوا ایجاد نشود.

- پیکنومتر به همراه یک بشر حاوی آب مقطر و یک دماسنج در درون ظرفی در بسته به مدت یک شب قرار می‌گیرند تا به تعادل گرمایی برسند.
- با گرفتن لبه بالایی پیکنومتر آن را برداشته تا گرمای دست موجب تغییر تعادل گرمایی پیکنومتر نشود و با ترازو آن را وزن می‌کنیم. ($M_{PWS,T}$)
- دماسنج را در دوغاب آب خاک فرو برده و دمای آب را یادداشت می‌کنیم. (T_f)
- جرم ذرات خاک و آب در دمای آزمایش را بر اساس رابطه ۲-۳ محاسبه می‌کنیم.

$$M_{PW,T} = M_P + (V_P * \rho_{W,T}) \quad 2-3$$

که در آن:

$M_{PW,T}$: جرم ذرات خاک و آب

M_P : وزن پیکنومتر خشک کالیبره شده

V_P : حجم پیکنومتر خشک کالیبره شده

$\rho_{W,T}$: چگالی آب در دمای T_f آزمایش از جداول موجود در استاندارد

- چگالی خاک در دمای T_f را با رابطه ۳-۳ به دست می‌آوریم:

$$G_t = \frac{M_S}{M_S + M_{PW,T} - M_{PWS,T}} \quad 3-3$$

- مقدار چگالی ویژه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد از رابطه ۳-۴ محاسبه خواهد شد.

$$G_{20^{\circ}C} = K * G_t \quad 4-3$$

که در آن k ضریب دما است و بر اساس دمای آزمایش از جدول موجود در استاندارد مورد نظر

که همان ASTM D 854 است، استخراج می‌شود که در این جا برای دمای آزمایش ۱۹ درجه سانتی گراد برابر با ۱/۰۰۲ محاسبه شد.

برای محاسبه چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک، سه بار این آزمایش تکرار شد که نتایج آن به همراه مقدار میانگین آن‌ها در جدول ۳-۶ آمده است.

جدول ۳-۶ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

شماره آزمایش	G _s
۱	۲/۶۶۳
۲	۲/۶۶۰
۳	۲/۶۵۹
میانگین	۲/۶۶۱

۵-۳-۳ آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری

آزمایش دانه بندی بر اساس استاندارد ASTM D 422 انجام شد. برای تعیین دانه‌بندی خاک از روش تر استفاده شد در این روش خاک ریزدانه که به صورت کلوخه‌شده است را روی الک ۲۰۰ می‌ریزند و با فشار آب، الک و خاک را تا جایی که آب خارج شده شفاف و رقیق شود، می‌شویند و بعد آن را خشک می‌کنند. سپس دانه‌های مانده روی الک ۲۰۰ را برای آزمایش الک به کار می‌برند در این جا بر اساس آزمایشات انجام شده مشخص شد بیش‌تر ذرات خاک (۹۸٪ ذرات خاک) از الک نمره ۲۰۰ عبور کرد. هم چنین برای دانه بندی ذرات عبوری از الک ۲۰۰ از آزمایش هیدرومتری استفاده شد. برای انجام آزمایش هیدرومتری ۵۰ گرم خاک خشک شده و عبوری از الک نمره ۲۰۰ را انتخاب کرده و در درون ظرفی قرار می‌دهیم سپس درون آن ظرف ۱۲۵ میلی‌لیتر محلول هگزا متافسفات سدیم می‌ریزیم. این محلول نتیجه ترکیب ۴۰ گرم پودر هگزا متافسفات سدیم در یک لیتر آب مقطر

است. پس از گذشت ۱۶ ساعت باید این محلول را به درون ظرف همزن منتقل کرد برای اطمینان از آن که تمام محلول به همراه خاک به درون ظرف همزن منتقل شده کمی آب داخل ظرف ریخته و به درون همزن منتقل می‌کنیم سپس ظرف همزن را تا نیمه پر از آب کرده و حال به مدت یک دقیقه درون دستگاه همزن قرار می‌دهیم سپس این محلول را به درون استوانه منتقل کرده و داخل ظرف همزن آب می‌ریزیم و دوباره آن را به داخل استوانه منتقل می‌کنیم تا مطمئن شویم که تمام محلول به درون استوانه منتقل شده، سپس با استفاده از آب باید حجم استوانه را به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر برسانیم. سپس با کمک درپوش یا دست، جلوی استوانه را می‌گیریم و به مدت یک دقیقه استوانه را بالا پایین کرده سپس استوانه را روی سطح صافی قرار داده و در زمان‌های ۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۲۵۰ و ۱۴۴۰ دقیقه هیدرومتر را وارد استوانه کرده و عدد هیدرومتر را قرائت و یادداشت می‌کنیم در واقع باید عدد بالای سطح هیدرومتر را بخوانیم. سپس بر اساس عدد قرائت شده و روابط موجود دانه‌بندی بخش ریزدانه مشخص می‌شود. مراحل انجام آزمایش هیدرومتری در شکل ۳-۳ نشان داده است.

پس از کامل شدن آزمایش هیدرومتری و انجام محاسبات، نتایج آزمایش دانه‌بندی برای خاک موردنظر در شکل ۴-۳ نشان داده شد.



(ب)

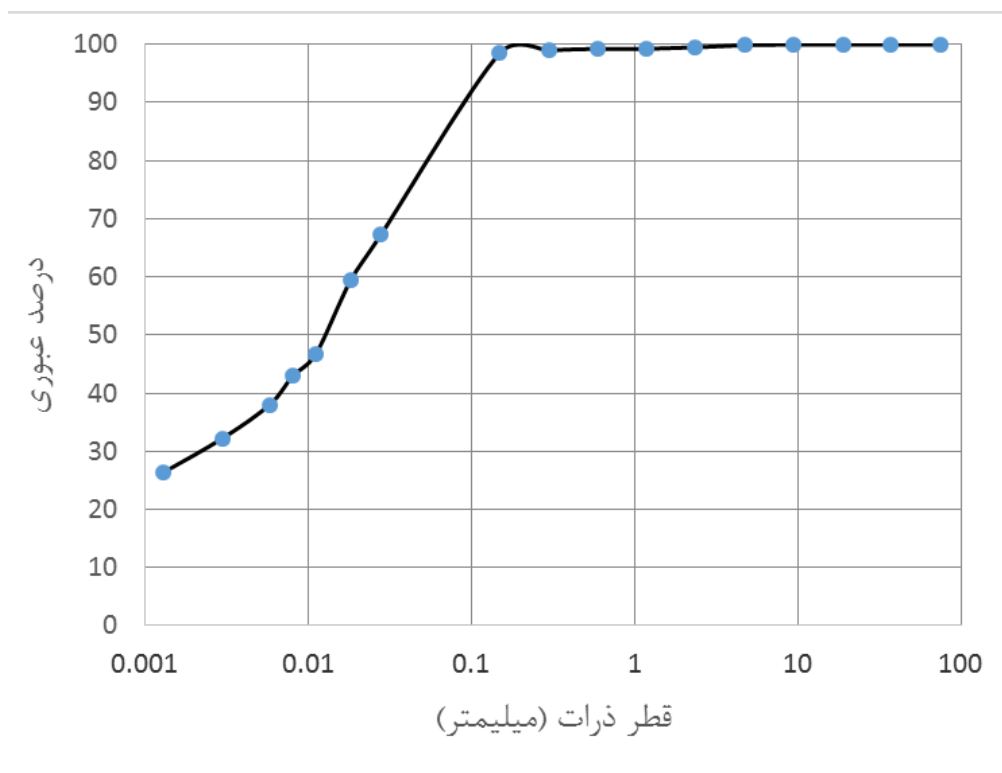


(الف)



(ج)

شکل ۳-۳ آزمایش هیدرومتری (الف) پودر هگزامتاسففات سدیم (ب) هم زدن خاک در دستگاه همزن (ج) انتقال خاک به درون استوانه



شکل ۳-۴ نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری

۳-۴ خاکستر لجن فاضلاب

در این پژوهش، لجن فاضلاب از تصفیه‌خانه شهید محلاتی در شهر تهران تهیه شد. سپس نمونه لجن فاضلاب تهیه شده در بوتله‌هایی قرار داده شد و در درون کوره‌ای با دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار گرفت. پس از طی شدن این مدت، خاکستر لجن فاضلاب تولید شده با دقت زیاد به علت گرمای بیش از اندازه کوره، تخلیه شد. مراحل مربوط به سوزانده شدن و تهیه خاکستر لجن فاضلاب که در کوره‌ای واقع در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۵ سوزاندن خاکستر لجن فاضلاب در کوره

سپس این خاکستر تهیه شده، کوبیده شد و از الک نمره ۲۰۰ عبور پیدا کرد و قسمت عبوری از الک نمره ۲۰۰ برای بهسازی نمونه‌های خاک انتخاب شد. در شکل ۳-۶ خاکستر لجن فاضلاب مورد استفاده در این آزمایش نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۶ خاکستر لجن فاضلاب مورد مطالعه (الف) کوبیده نشده (ب) عبوری از الک نمره ۲۰۰

۳-۴-۱ آزمایش روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس

به منظور شناسایی اکسید عناصر خاکستر لجن فاضلاب، آزمایش روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بر روی این ماده انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش برحسب درصد وزنی اکسید عناصر خاکستر لجن فاضلاب در جدول ۳-۷ آمده است.

جدول ۳-۷ درصد وزنی اکسید عناصر خاکستر لجن فاضلاب بر اساس آزمایش XRF

درصد وزنی	اکسید عناصر خاکستر لجن فاضلاب
۱۵/۱۰۵	CaO
۶/۴۱۵	Al ₂ O ₃
۷/۴۳۸	Fe ₂ O ₃
۲۰/۳۶۳	SiO ₂
۳/۷۰۹	MgO
۳/۰۴۰	K ₂ O
۱/۴۸۲	SO ₃
۲۲/۳۷۰	P ₂ O ₅

بر اساس نتایج جدول ۳-۷ مشخص شد که اکسیدهای CaO، Al₂O₃ و SiO₂ سهم بسیار زیادی در بین اکسیدهای عناصر خاکستر لجن فاضلاب دارند به طوری که می‌توان گفت این سه اکسید، اکسیدهای اصلی خاکستر لجن فاضلاب هستند.

۳-۵ آهک

آهک از زمان‌های قدیم برای بهسازی خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این جا

قصد داریم به بررسی اثر همزمان استفاده از خاکستر لجن فاضلاب و آهک بر بهسازی خاک رَمبنده بپردازیم و اثر استفاده از این ترکیب را روی شاخص رَمبندگی با اثر آن‌ها زمانی که به صورت جداگانه استفاده می‌شوند، مقایسه شود. در این جا بخشی از آهک برای آزمایش‌ها انتخاب شد که مثل خاکستر لجن فاضلاب از الک نمره ۲۰۰ عبور کرده باشد.

۳-۶ آزمایش رَمبندگی

۳-۶-۱ روند انجام آزمایش

برای تعیین شاخص رَمبندگی از آزمایش‌هایی شبیه آزمایش تحکیم یگانه استفاده شد. روند انجام این آزمایش‌ها منطبق بر استاندارد ASTM D 5333 است. این آزمایش هم بر روی نمونه‌های دست‌خورده و هم دست‌نخورده قابل انجام است. در این آزمایش نمونه در درون رینگ دستگاه تحکیم قرار گرفت سپس این رینگ در درون دستگاه تحکیم قرار داده شد. دستگاه تحکیم باید دارای گیج‌هایی با دقت $0/002$ باشد تا تغییر شکل‌ها را با دقت مناسب ثبت کند. در شکل ۳-۷ دستگاه تحکیم به همراه گیج آن نمایش داده شده است.

سپس بارهای معادل با تنش‌های ۵، $12/5$ ، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ کیلوپاسکال با فاصله یک ساعت از هم به نمونه درون دستگاه تحکیم وارد شد. نمونه یک ساعت پس از اعمال بارگذاری بارگذاری ۲۰۰ کیلوپاسکال غرقاب شد و بارگذاری تا ۲۴ ساعت بعد ادامه پیدا کرد. در صورت نیاز با فاصله‌های زمانی ۲۴ ساعت می‌توان بارهای ۴۰۰، ۸۰۰ و را به نمونه وارد کرد. در طول آزمایش با استفاده از گیج‌هایی با دقت $0/002$ میلی‌متر تغییر شکل‌ها ثبت شد. به تغییر شکل ناشی از بارگذاری ۵ کیلوپاسکال، تغییر شکل ناشی از تنش نشیمن‌گاهی گویند.

بر اساس این آزمایش شاخص رمبندگی که نشان دهنده میزان رمبندگی نمونه بر حسب درصد در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد، از رابطه ۳-۳ بدست می‌آید.

$$I_e = \frac{d_f - d_i}{h_0} \times 100 \quad ۳-۳$$

در رابطه بالا d_f قرائت گیج در تنش مورد نظر پس از مرطوب شدن، d_i قرائت گیج در تنش مورد نظر پیش از مرطوب شدن، h_0 ارتفاع اولیه نمونه می‌باشد.

در این جا برای کالیبراسیون گیج دستگاه تحکیم، ارتفاع چند جسم صاف را با کولیس اندازه گیری کردیم و با نتایج حاصل از گیج مقایسه کردیم تا اطمینان حاصل شود که گیج‌ها به درستی نتایج را ثبت می‌کنند. هم‌چنین وزنه‌های دستگاه تحکیم را نیز با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ کیلوگرم مورد بررسی قرار دادیم تا از وزنه‌هایی متناسب با استاندارد برای انجام آزمایش‌ها استفاده کرده باشیم.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۷ دستگاه تحکیم و متعلقات (الف) دستگاه تحکیم (ب) گیج دستگاه تحکیم

۳-۶-۲ تهیه نمونه دست‌نخورده

برای تعیین رمبندگی خاک باید نمونه دست‌نخورده خاک تهیه شود. برای انجام این کار رینگ

دستگاه تحکیم به آرامی باید وارد خاک شود تا خاک کاملاً رینگ را پر کند. این کار باید با دقت زیادی انجام شود تا در حین نمونه گیری ساختار و تخلخل خاک تغییر نکند. به این منظور باید به آرامی و با استفاده از یک چاقو، خاک اطراف رینگ تراشیده شود تا رینگ وارد خاک شود و دست خوردگی در نمونه ایجاد نشود. تهیه نمونه دست نخورده از خاک به دلیل رطوبت پایین خاک و شکننده بودن ساختار آن، سخت و نیاز به چندین بار سعی و خطا دارد تا نمونه مناسب حاصل شود. در شکل ۳-۸ تصویری از تهیه نمونه دست نخورده در آزمایشگاه مشاهده می شود.



شکل ۳-۸ تهیه نمونه دست نخورده از خاک مورد مطالعه

رینگ مورد مطالعه در اینجا دارای ارتفاع $19/1$ میلی متر و قطر 75 میلی متر بود که در شکل ۳-۹ تصویر مربوط به این رینگ همراه با سنگ های متخلخلی که بر روی آن قرار داده می شود و سپس در درون دستگاه تحکیم قرار می گیرد، آمده است.



شکل ۳-۹ رینگ دستگاه تحکیم

۳-۶-۳ تهیه نمونه بازسازی شده

به لحاظ آن که اضافه کردن ماده جامد به خاک برای انجام بهسازی و تقویت خاک بدون آن که ساختار خاک دچار تغییر شود، امکان پذیر نبود باید به بازسازی نمونه خاک در آزمایشگاه مطابق با ویژگی های طبیعی خاک پرداخت. پس در ابتدا اثر دست خوردگی بر روی رمبندگی نمونه های خاک مورد بررسی قرار گرفت. با این روش اندکی تغییر در خلل و فرج و ساختار قرارگیری دانه ها در کنار هم ایجاد می شود اما مشخصا به طور کامل خاصیت فروریزی خاک از بین نمی رود. برای تهیه نمونه بازسازی شده بر اساس نتایج آزمایش الک مشخص شد بخش اصلی خاک ریزدانه است به همین دلیل برای حذف خاک های کلوخه شده ابتدا خاک دست خورده با کمک هاون پلاستیکی خرد شد و از الک نمره ۲۰ عبور داده شد. سپس خاک مورد نظر در اون به طور کامل خشک شد. برای بازسازی نمونه بر اساس نسبت تخلخل محاسبه شده آن ها، کافی است وزن مخصوص خشک طبیعی خاک محاسبه شود و با استفاده از حجم رینگ دستگاه تحکیم، مقدار وزن خشک خاک لازم به دست آید و سپس با رطوبت طبیعی خاک مخلوط شود و در ۳ لایه در داخل رینگ ریخته و متراکم کرده تا نمونه بازسازی شده منطبق بر درصد تخلخل واقعی خاک و رطوبت طبیعی آن و وزن مخصوص خشک طبیعی خاک باشد.

برای بررسی اثر دست خوردگی بر روی شاخص رمبندگی خاک و هم چنین اثر استفاده از خاکستر لجن فاضلاب بر روی شاخص رمبندگی خاک به منظور بهسازی این خاک، برنامه ریزی صورت گرفت تا

آزمایش‌هایی به صورت زیر انجام گیرد:

۱. بازسازی نمونه‌ها بر اساس درصد رطوبت طبیعی خاک و وزن مخصوص طبیعی خاک برای تعیین اثر دست‌خوردگی بر روی میزان رمبندگی خاک‌ها
 ۲. تعیین شاخص رمبندگی نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب در دو زمان عمل‌آوری ۳ و ۹ روز
 ۳. بررسی تاثیر رطوبت بازسازی بر روی شاخص رمبندگی خاک تثبیت شده با درصد بهینه خاکستر لجن فاضلاب
 ۴. تعیین شاخص رمبندگی نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک به نسبت چهار به یک برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۳ روز
- در شکل ۳-۱۰ تصاویری از نمونه‌های تهیه شده برای بررسی آزمایش رمبندگی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۰ نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش رمبندگی (الف) دست‌خورده (ب) بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب

۴- فصل چهارم

نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

۱-۴ مقدمه

در فصل‌های گذشته به مرور و بررسی تحقیق‌های انجام شده توسط محققین، توضیح نحوه انجام آزمایش‌ها و روند انجام آزمایش پرداخته شد. در این فصل نتایج مربوط به آزمایش‌های مختلف برای بهسازی خاک رمبنده با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب بررسی می‌شود و نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۲-۴ نتایج حاصل از آزمایش رمبندگی اشباع با آب

۱-۲-۴ خاک دست‌نخورده و دست‌خورده

در ابتدا جهت بررسی فروریزی بودن خاک و تعیین شاخص رمبندگی خاک مورد آزمایش، نمونه‌هایی دست‌نخورده از خاک تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک دست‌نخورده که در جدول ۱-۴ آمده است نشان داد که شاخص رمبندگی خاک بین ۱۶/۰۱ تا ۱۹/۵۸ متغیر بوده است که میانگین شاخص رمبندگی خاک‌ها برابر با مقدار ۱۷/۷۸٪ بدست آمد. علت تفاوت در مقادیر بدست آمده را می‌توان به تفاوت در ساختار خاک نمونه‌ها و امکان دست‌خوردگی‌های احتمالی در مرحله نمونه‌گیری مرتبط دانست اما به هر حال طبق استاندارد ASTM D 5333، خاک مورد بررسی در دسته خاک‌های با رمبندگی شدید قرار گرفت.

برداشت نمونه از خاک به علت ساختار شکننده توده خاک و پایین بودن رطوبت، سخت و دشوار بود و از طرف دیگر امکان اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب به خاک به علت پخش نشدن یکنواخت این ماده بر سطح نمونه امکان‌پذیر نبود لذا جهت آسان شدن بررسی پارامترهای مختلف موثر در شاخص رمبندگی پس از اثبات رمبندگی خاک محل، سایر آزمایش‌های تحقیق بر روی خاک بازسازی شده صورت پذیرفت. لذا ابتدا به منظور بررسی اثر بازسازی و دست‌خوردگی، آزمایش رمبندگی برای تعیین شاخص رمبندگی بر روی ۳ نمونه خاک بازسازی شده در دو زمان عمل‌آوری ۳ و ۹ روز انجام

شد و تمامی نمونه‌های بازسازی شده با دانسیته ثابت در رطوبت طبیعی تهیه شده است. خلاصه نتایج آزمایش دست خوردگی خاک در جدول ۲-۴ و جدول ۳-۴ آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در آزمایش خاک با دست خوردگی شاخص رمبندگی از ۱۰/۴۹ تا ۱۱/۷۶ تغییر کرده است که میانگین آزمایش‌ها برای نمونه‌هایی که ۳ روز عمل‌آوری شدند برابر با ۱۱/۲۰٪ است و برای نمونه‌هایی که ۹ روز عمل‌آوری شدند برابر با ۱۱/۱۲٪ است. نتایج آزمایش خاک‌های دست خورده نیز تفاوت در شاخص رمبندگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد اما تفاوت‌ها قابل توجه نمی‌باشد.

جدول ۱-۴ تعیین میزان رمبندگی نمونه‌های دست نخورده خاک شاهد

درجه رمبندگی	شاخص رمبندگی (%)	دانسیته خشک خاک ($\frac{g}{cm^3}$)	رطوبت اولیه (%)	نسبت تخلخل نهایی	نسبت تخلخل اولیه	شماره نمونه
شدید	۱۹/۵۸	۱/۳	۳/۷۲	۰/۴۶	۱/۰۵	۱
شدید	۱۷/۹۴	۱/۴۱	۳/۷۹	۰/۴۳	۰/۸۹	۲
شدید	۱۹/۳۳	۱/۵۱	۲/۵۵	۰/۳۱	۰/۷۷	۳
شدید	۱۶/۰۴	۱/۵۳	۳/۱۴	۰/۳۵	۰/۷۴	۴
شدید	۱۶/۰۱	۱/۵۰	۲/۸۷	۰/۳۸	۰/۷۸	۵
شدید	۱۷/۷۸	میانگین شاخص رمبندگی				

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شاخص رمبندگی خاک مورد نظر بر اثر دست‌خوردگی کاهش می‌یابد. در واقع با دست‌خوردگی خاک مقدار شاخص رمبندگی به اندازه ۳۷٪ درصد کاهش می‌یابد. علت کاهش شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده نسبت به خاک دست‌نخورده تغییر ساختار و نحوه قرارگیری ذرات خاک در کنار هم می‌باشد. خاک رمبند دارای حفرات میکروسکوپی و ماکروسکوپی است که دست‌خوردگی حفرات بزرگ‌تر را بهم می‌ریزد ولی حفرات ریزتر همچنان وجود دارد. همین

مساله موجب کاهش میزان رمبندگی می شود که در نتایج ارائه شده نیز مشهود است. هم چنین نتایج نشان داد که زمان عمل آوری طولانی تر تاثیر چندانی بر روی کاهش پتانسل رمبندگی خاک ندارد.

جدول ۴-۲ تاثیر دست خوردگی بر روی شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در زمان عمل آوری ۳ روز

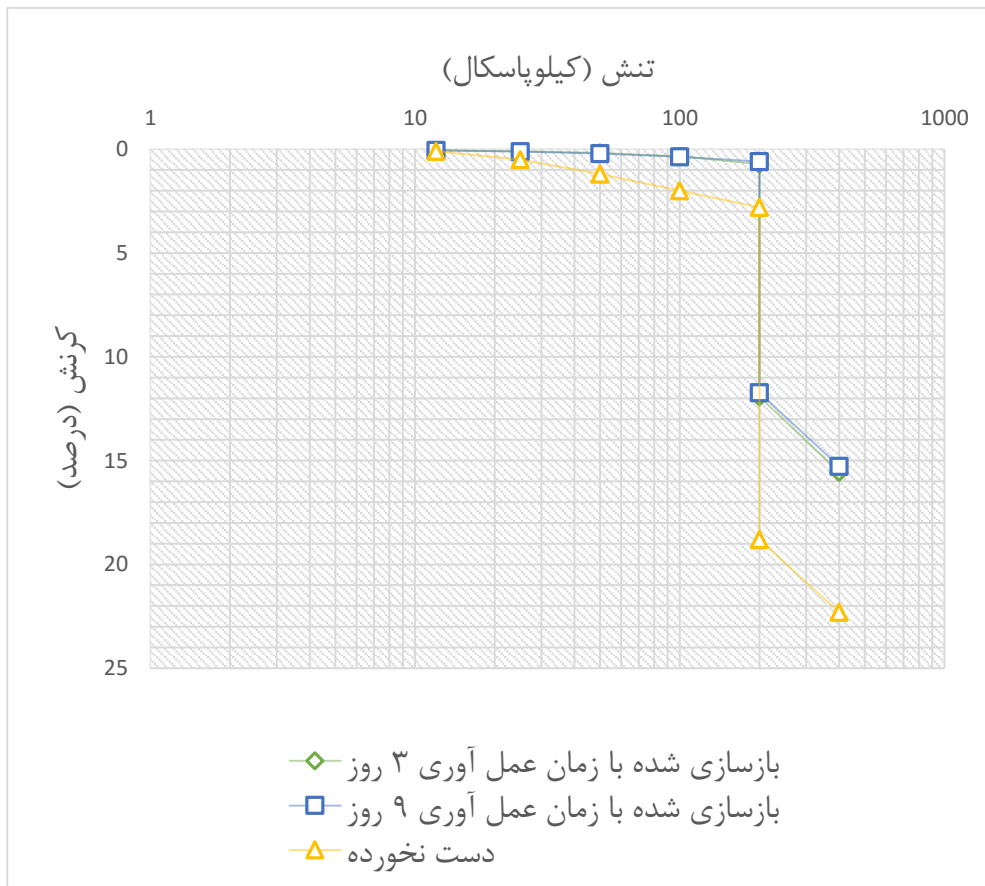
شماره نمونه	زمان عمل آوری (روز)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	رطوبت اولیه (%)	دانسیتته خشک خاک (g/cm^3)	شاخص رمبندگی (%)	درجه رمبندگی	
۱	۳	۱۹/۱۰	۱۶/۱۶	۵/۵	۱/۴۲	۱۰/۶۶	شدید	
۲	۳	۱۹/۱۰	۱۶/۲۰	۵/۵	۱/۴۲	۱۱/۱۸	شدید	
۳	۳	۱۹/۱۰	۱۶/۰۳	۵/۵	۱/۴۲	۱۱/۷۶	شدید	
میانگین شاخص رمبندگی							۱۱/۲۰	شدید

جدول ۴-۳ تاثیر دست خوردگی بر روی شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در زمان عمل آوری ۹ روز

شماره نمونه	زمان عمل آوری (روز)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	رطوبت اولیه (%)	دانسیتته خشک خاک (g/cm^3)	شاخص رمبندگی (%)	درجه رمبندگی	
۱	۹	۱۹/۱۰	۱۶/۱۴	۵/۵	۱/۴۲	۱۰/۹۴	شدید	
۲	۹	۱۹/۱۰	۱۶/۲۹	۵/۵	۱/۴۲	۱۱/۲۰	شدید	
۳	۹	۱۹/۱۰	۱۶/۱۲	۵/۵	۱/۴۲	۱۱/۲۴	شدید	
میانگین شاخص رمبندگی							۱۱/۱۲	شدید

در شکل ۴-۱ نمودار مقایسه رمبندگی خاک شاهد دست نخورده و بازسازی شده اشباع شده با

آب جهت مقایسه بهتر رفتار تغییر شکل و رمبندگی نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ نمودار مقایسه رمبندگی خاک شاهد دست نخورده و بازسازی شده اشباع شده با آب

۲-۲-۴ خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب

در این آزمایش‌ها خاکستر لجن فاضلاب در درصد‌های وزنی ۰.۲٪، ۰.۴٪، ۰.۸٪ بر اساس درصد وزنی با خاک مخلوط شد و در دو زمان ۳ روز و ۹ روز عمل آوری شد. سپس آزمایش تعیین شاخص رمبندگی بر روی آن‌ها انجام شد. برای بررسی دقیق‌تر هر کدام از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و نتایج میانگین مربوط به آن‌ها محاسبه شد. نتایج بدست آمده بر روی نمونه‌های آماده شده در زمان عمل آوری ۳ روز در جدول ۴-۴ آمده است و در جدول ۴-۶ به مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده برای زمان عمل آوری ۳ روز پرداخته شده است. نتایج بدست آمده برای

نمونه‌های با زمان عمل‌آوری ۹ روز در جدول ۴-۵ آمده است و در جدول ۴-۷ به مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده برای زمان عمل‌آوری ۹ روز پرداخته شده است. بر اساس نتایج بیان شده در جداول ذکر شده می‌توان دریافت افزایش خاکستر لجن فاضلاب به خاک رمبند باعث کاهش شاخص رمبندگی خاک می‌شود. در شکل ۴-۲ به مقایسه بین زمان عمل‌آوری ۳ و ۹ روز پرداخته شده است اما همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمان عمل‌آوری نقش چندانی در کاهش شاخص رمبندگی ندارد.

جدول ۴-۴ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۳ روز

درجه رمبندگی	میانگین شاخص رمبندگی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت اولیه (%)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	شماره نمونه	درصد خاکستر لجن فاضلاب
نسبتا شدید	۹/۲۲	۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۷۳	۱۹/۱۰	۱	۲
		۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۴۰	۱۹/۱۰	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۵۰	۱۹/۱۰	۳	
متوسط	۵/۹۸	۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۲۸	۱۹/۱۰	۱	۴
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۱۶	۱۹/۱۰	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۱۸	۱۹/۱۰	۳	
متوسط	۲/۹۸	۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۶۰	۱۹/۱۰	۱	۸
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۹۴	۱۹/۱۰	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۹۶	۱۹/۱۰	۳	

جدول ۴-۵ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۹ روز

درجه رمیندگی	میانگین شاخص رمبندگی (%)	دانسیتته خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت اولیه (%)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	شماره نمونه	درصد خاکستر لجن فاضلاب
نسبتاً شدید	۷/۲۶	۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۸۹	۱۹/۱	۱	۲
		۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۹۶	۱۹/۱	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۶/۸۵	۱۹/۱	۳	
متوسط	۵/۸۹	۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۳۹	۱۹/۱	۱	۴
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۱۲	۱۹/۱	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۲۵	۱۹/۱	۳	
متوسط	۲/۵۱	۱/۴۲	۵/۵	۱۷/۹۹	۱۹/۱	۱	۸
		۱/۴۲	۵/۵	۱۸/۰۶	۱۹/۱	۲	
		۱/۴۲	۵/۵	۱۸/۰۰	۱۹/۱	۳	

جدول ۴-۶ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن

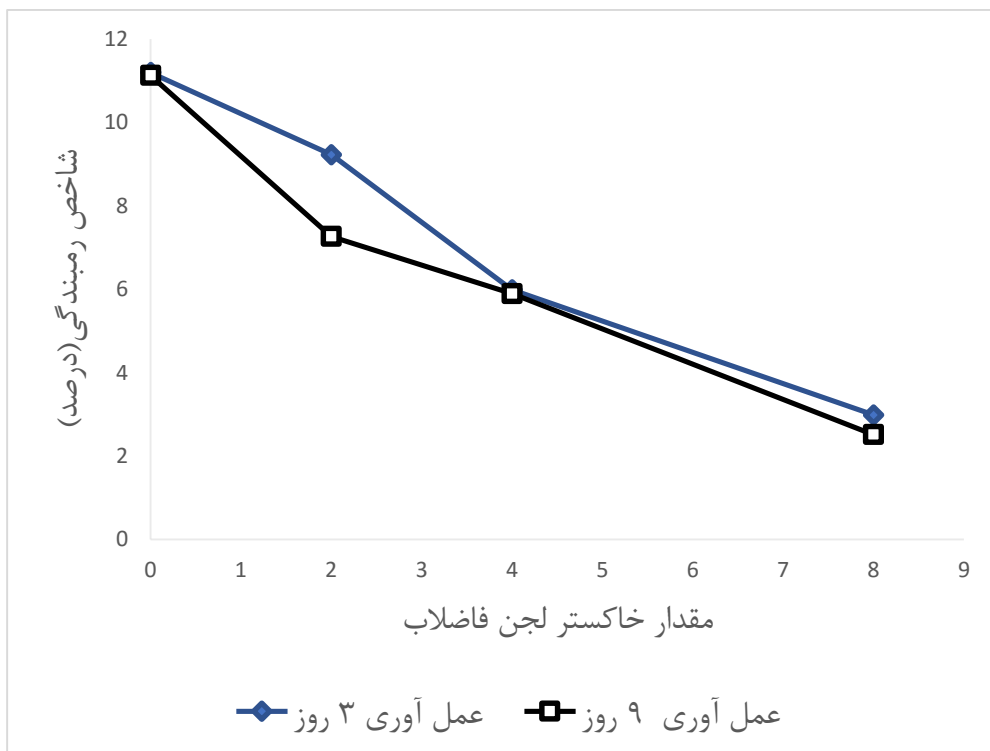
فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۳ روز

درصد خاکستر لجن فاضلاب	درصد شاخص رمبندگی	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک دست‌نخورده	درصد خاکستر لجن فاضلاب
۲	۹/۲۲	۱۷/۶۷	۴۸/۱۴
۴	۵/۹۸	۴۶/۶۰	۶۶/۳۶
۸	۲/۹۸	۷۳/۳۹	۸۳/۲۳

جدول ۴-۷ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن

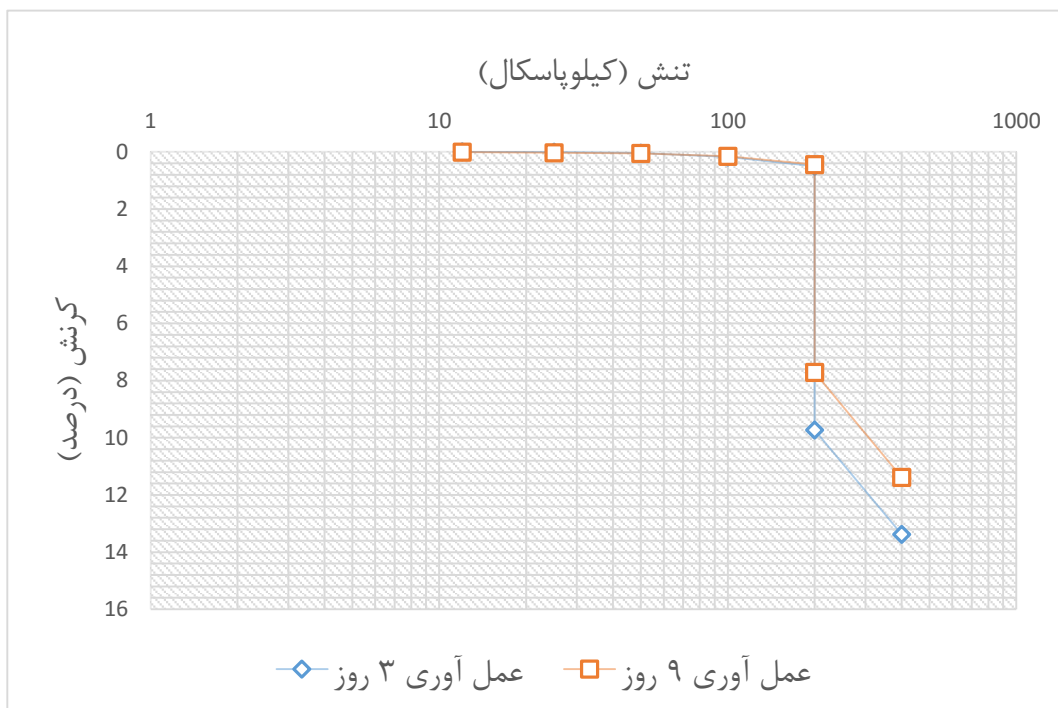
فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۹ روز

درصد خاکستر لجن فاضلاب	درصد شاخص رمبندگی	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک دست‌نخورده	درصد خاکستر لجن فاضلاب
۲	۷/۲۶	۳۴/۷۱	۵۹/۱۶
۴	۵/۸۹	۴۷/۰۳	۶۶/۸۷
۸	۲/۵۱	۷۷/۴۲	۸۵/۸۸

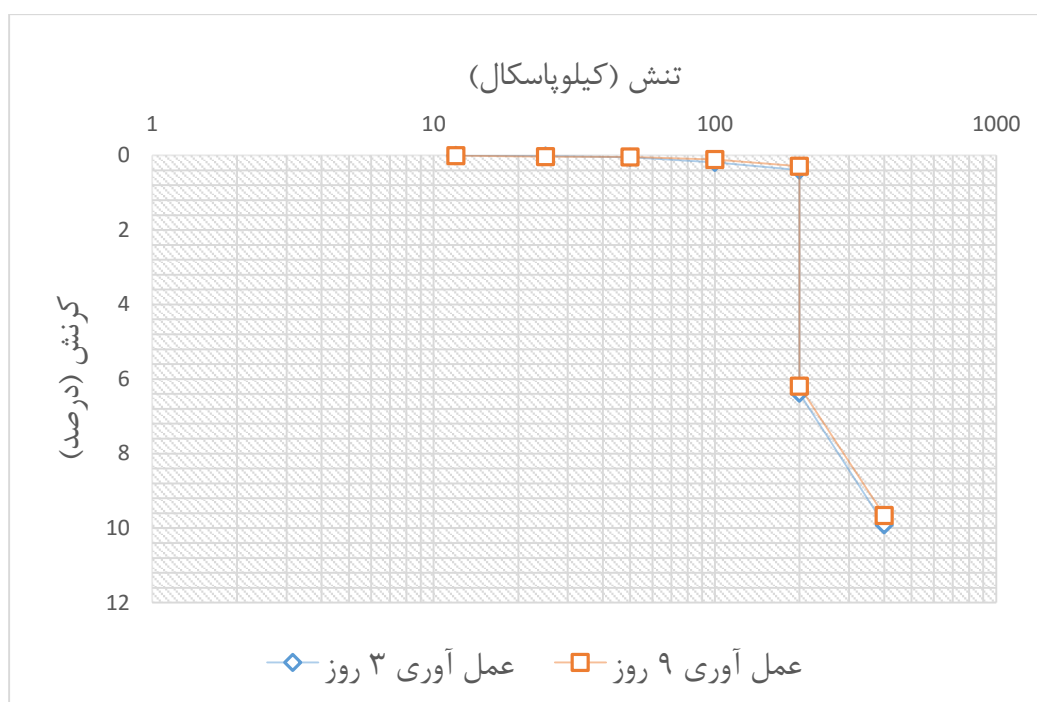


شکل ۴-۲ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با مقادیر مختلف خاکستر لجن فاضلاب در دو زمان عمل آوری مختلف

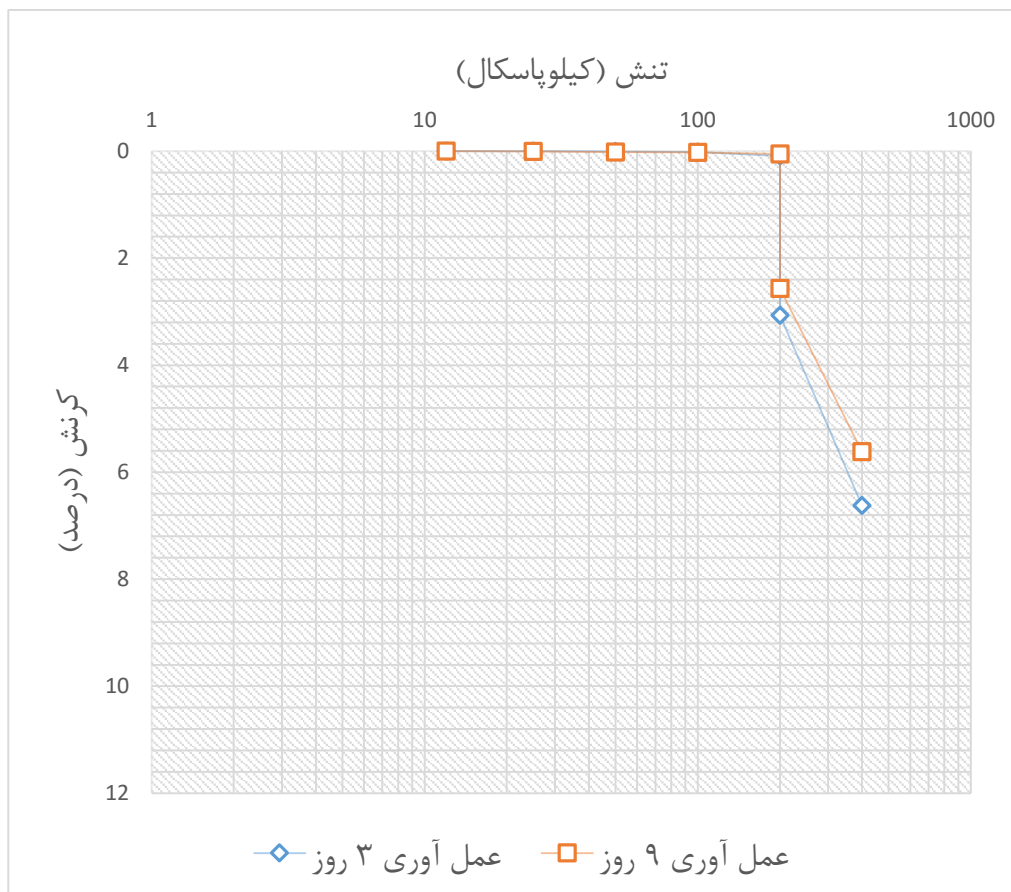
در شکل های ۴-۳ تا ۴-۵ نمودار کرنش نمونه های مختلف که با درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب بهسازی شدند در مقابل تنش های مختلف ترسیم شده است. آنچه که از این نمودارها به وضوح مشخص است، تأثیر خاکستر لجن فاضلاب در کاهش شاخص رمبندگی است. به طوری که با افزایش درصد اختلاط این ماده با خاک، میزان کرنش قائم خاک کاهش پیدا می کند.



شکل ۳-۴ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۲ درصد خاکستر لجن فاضلاب



شکل ۴-۴ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب



شکل ۴-۵ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب

۳-۲-۴ خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک

در این آزمایش‌ها خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک که به نسبت چهار به یک با هم مخلوط شده بودند در درصدهای وزنی ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۸٪ بر اساس درصد وزنی با خاک مخلوط شد و در زمان ۳ روز عمل آوری شدند. سپس آزمایش تعیین شاخص رمبندگی بر روی آن‌ها انجام شد. برای بررسی دقیق‌تر هر کدام از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و نتایج میانگین مربوط به آن‌ها محاسبه شد. نتایج بدست آمده بر روی نمونه‌های آماده شده در جدول ۴-۸ آمده است. بر اساس نتایج مشخص شده می‌توان دریافت افزایش خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک رمبند باعث کاهش شاخص رمبندگی خاک می‌شود.

جدول ۴-۸ تاثیر افزودن درصدی خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک به خاک بازسازی شده

درصد	شماره نمونه	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	رطوبت اولیه (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	میانگین شاخص رمبندگی (%)	درجه رمبندگی
متوسط	۱	۱۹/۱	۱۷/۴۸	۵/۵	۱/۴۲	۴/۴۵	
	۲	۱۹/۱	۱۷/۴۰	۵/۵	۱/۴۲		
	۳	۱۹/۱	۱۷/۳۹	۵/۵	۱/۴۲		
کم	۱	۱۹/۱	۱۸/۲۶	۵/۵	۱/۴۲	۰/۴۵	
	۲	۱۹/۱	۱۸/۲۲	۵/۵	۱/۴۲		
	۳	۱۹/۱	۱۸/۲۶	۵/۵	۱/۴۲		
غیر رمبند	۱	۱۹/۱	۱۸/۹۵	۵/۵	۱/۴۲	۰	
	۲	۱۹/۱	۱۸/۸۹	۵/۵	۱/۴۲		
	۳	۱۹/۱	۱۸/۹۲	۵/۵	۱/۴۲		

سپس در جدول ۴-۹ به مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک در زمان عمل‌آوری ۳ روز پرداخته شد. سپس آهک در درصدهای وزنی ۰/۴٪ و ۰/۸٪ بر اساس درصد وزنی با خاک مخلوط شد و در زمان ۳ روز عمل‌آوری شدند. سپس آزمایش تعیین شاخص رمبندگی بر روی آن‌ها انجام شد. برای بررسی دقیق‌تر هر کدام از آزمایش‌ها در دو تکرار انجام و نتایج میانگین مربوط به آن‌ها محاسبه شد. نتایج بدست آمده بر روی نمونه‌های آماده شده در جدول ۴-۱۰ آمده است. بر اساس نتایج مشخص شده می‌توان دریافت افزایش آهک به خاک رمبند باعث کاهش شاخص رمبندگی خاک می‌شود. سپس در

جدول ۴-۱۱ به مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با آهک پرداخته شد.

جدول ۴-۹ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک

درصد خاکستر لجن فاضلاب و آهک	درصد شاخص رمبندگی	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک دست‌نخورده	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک بازسازی شده
۲	۴/۴۵	۹۷/۷۴	۶۰/۲۶
۴	۰/۴۵	۴۶/۹۷	۹۵/۹۸
۸	۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۴-۱۰ تاثیر افزودن درصدی آهک به خاک بازسازی شده در زمان عمل‌آوری ۳ روز

درصد	شماره نمونه	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	رطوبت اولیه (%)	دانسیتته خشک خاک (g/cm^3)	میانگین معیار رمبندگی (%)	درجه رمبندگی
۰/۴	۱	۱۹/۱	۱۷/۰۰	۵/۵	۱/۴۲	۵/۷۶	متوسط
	۲	۱۹/۱	۱۶/۹۷	۵/۵	۱/۴۲		
۰/۸	۱	۱۹/۱	۱۷/۲۶	۵/۵	۱/۴۲	۴/۲۶	متوسط
	۲	۱۹/۱	۱۷/۴۵	۵/۵	۱/۴۲		

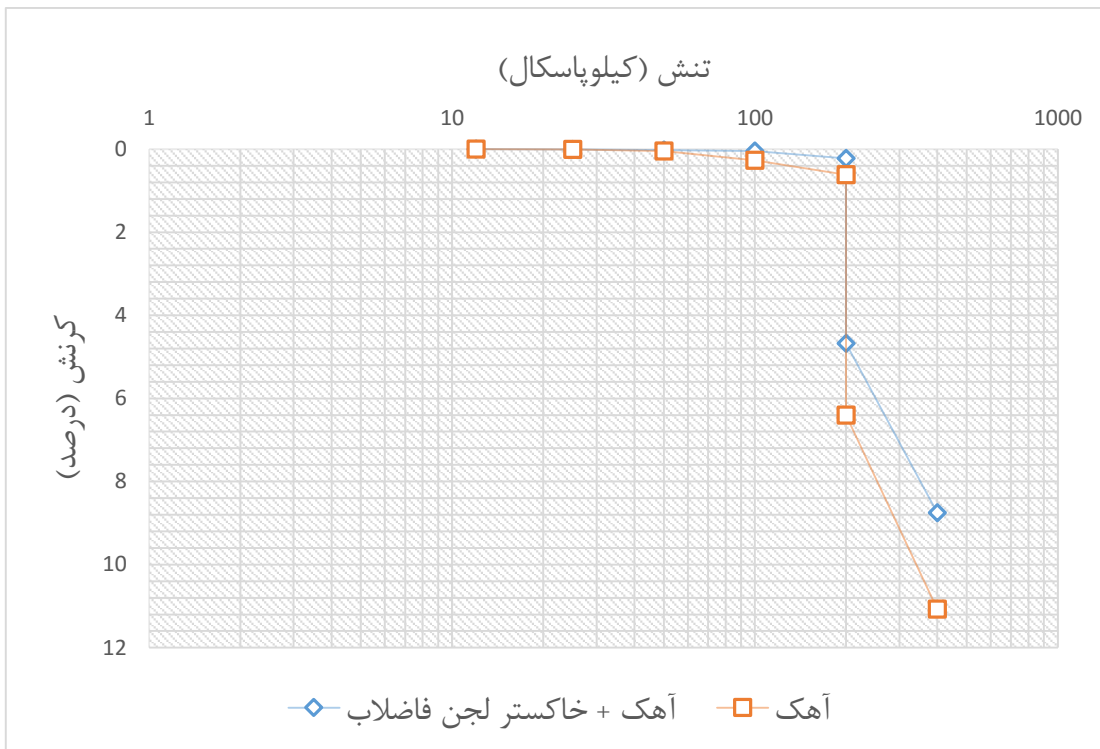
جدول ۴-۱۱ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با آهک

درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک دست‌نخورده	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک بازسازی شده	درصد شاخص رمبندگی	درصد آهک
۶۷/۶۴	۴۸/۵۷	۵/۷۶	۰/۴
۷۶/۰۴	۶۱/۹۶	۴/۲۶	۰/۸

بر اساس نتایج بدست آمده افزودن خاکستر لجن فاضلاب به آهک و استفاده از این ترکیب برای بهسازی خاک رمبنده تاثیر بیشتری نسبت به اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب به تنهایی و یا اضافه کردن آهک به تنهایی دارد.

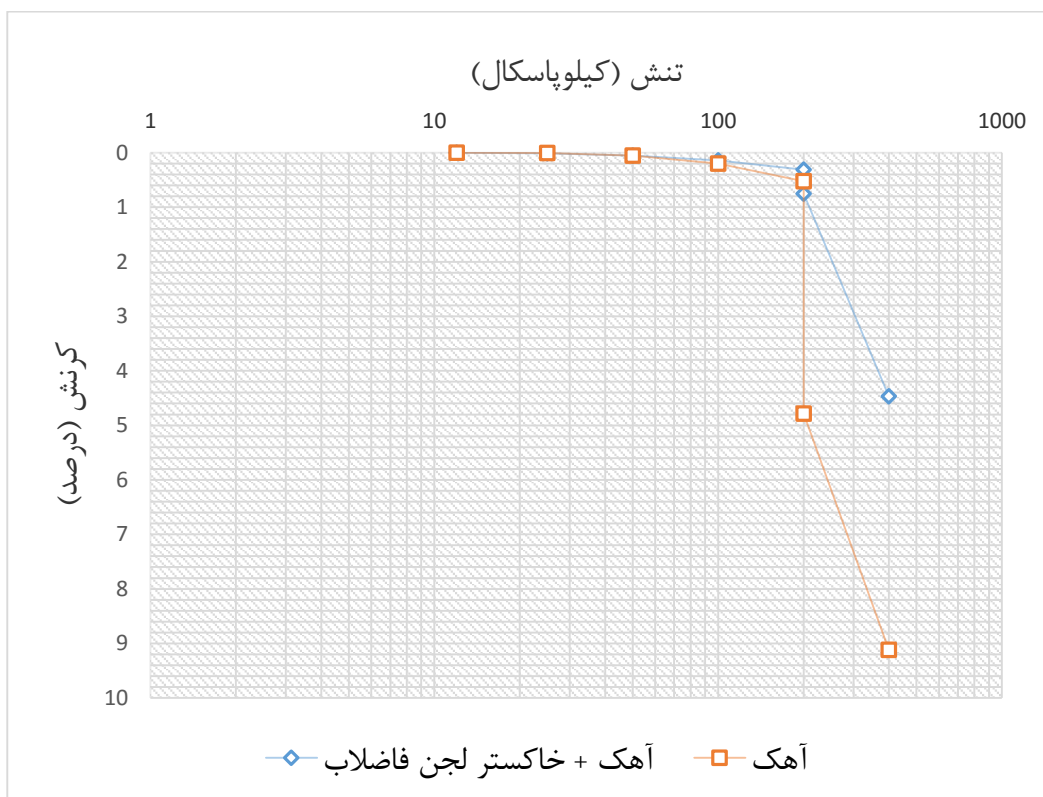
در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸ نمودار کرنش نمونه‌های مختلف که با درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب و آهک بهسازی شدند در مقابل تنش‌های مختلف ترسیم شده است. آنچه که از این نمودارها به‌وضوح مشخص است، تأثیر خاکستر لجن فاضلاب و آهک در کاهش شاخص رمبندگی است. به‌طوریکه با افزایش درصد اختلاط این ماده با خاک، میزان کرنش قائم خاک در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال که مشخص‌کننده‌ی شاخص رمبندگی است، کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۴-۹ به مقایسه بین شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب و آهک و خاک بازسازی شده با آهک پرداخته می‌شود.



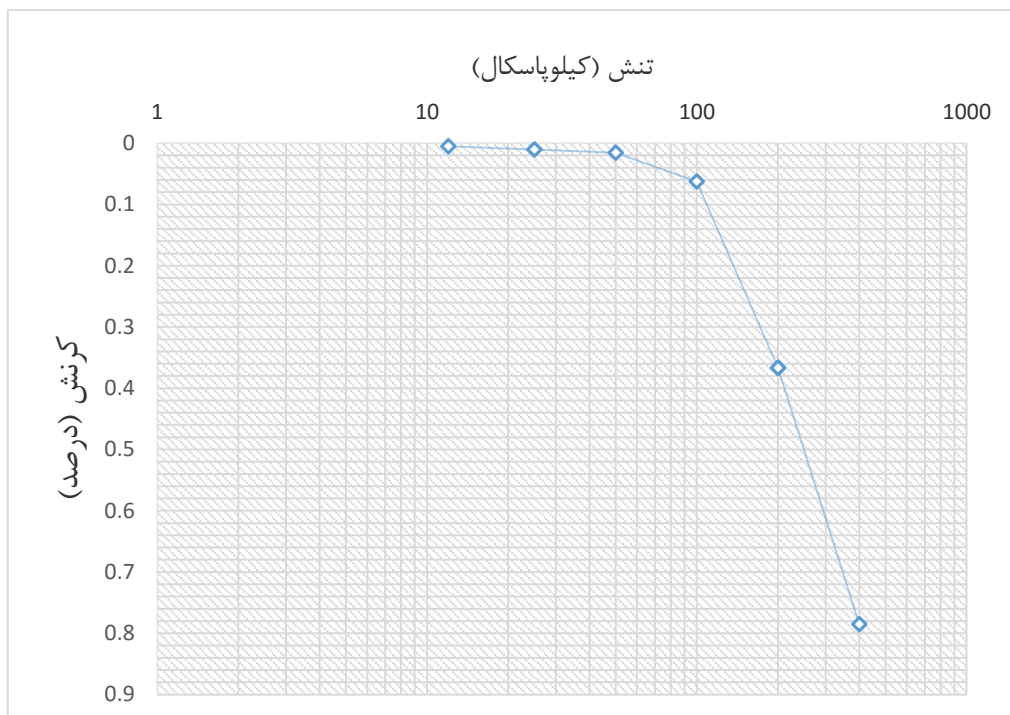
شکل ۴-۶ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۲ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و ۰/۴ درصد

آهک

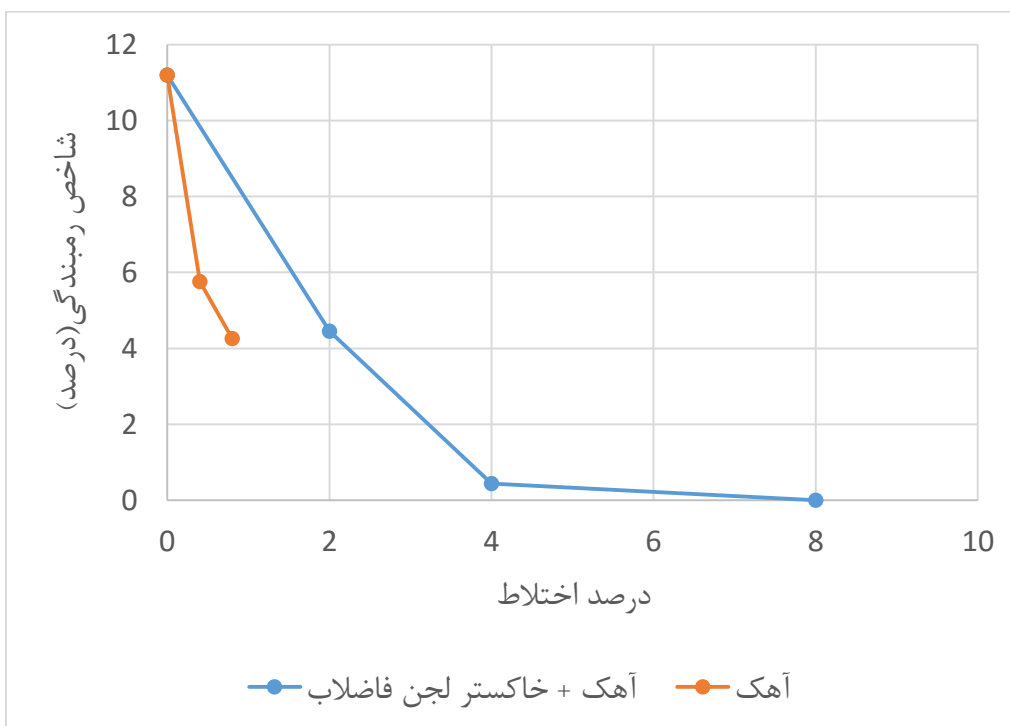


شکل ۴-۷ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و ۰/۸ درصد

آهک



شکل ۴-۸ نمودار مقایسه رمبندگی خاک بازسازی شده با ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک



شکل ۴-۹ نمودار مقایسه شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب همراه با آهک و خاک بازسازی شده با آهک

۴-۲-۴ بررسی تاثیر رطوبت اولیه نمونه بازسازی شده بر روی

شاخص رمبندگی خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب

در این مرحله تاثیر رطوبت اولیه بر روی شاخص رمبندگی خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور برای ساخت نمونه‌ها از رطوبت‌های بالاتر از ۵/۵٪ که رطوبت طبیعی خاک بود استفاده شد. درصد رطوبت‌های انتخاب شده در این مرحله ۸٪ و ۱۱٪ و زمان عمل‌آوری ۳ روز بود. بر اساس محاسبات قبلی چون باصرفه‌ترین درصد برای بهسازی خاک رمبند، همان مقدار ۴٪ خاکستر لجن فاضلاب بود در این جا برای بهسازی نمونه‌ها از همان ۴٪ خاکستر لجن فاضلاب استفاده شد. نتایج مربوط به این آزمایش در جدول ۴-۱۲ آمده است. سپس در جدول ۴-۱۳ به مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت طبیعی پرداخته شد.

جدول ۴-۱۲ تاثیر رطوبت اولیه خاک بر روی شاخص رمبندگی خاک بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب در زمان عمل‌آوری ۳ روز

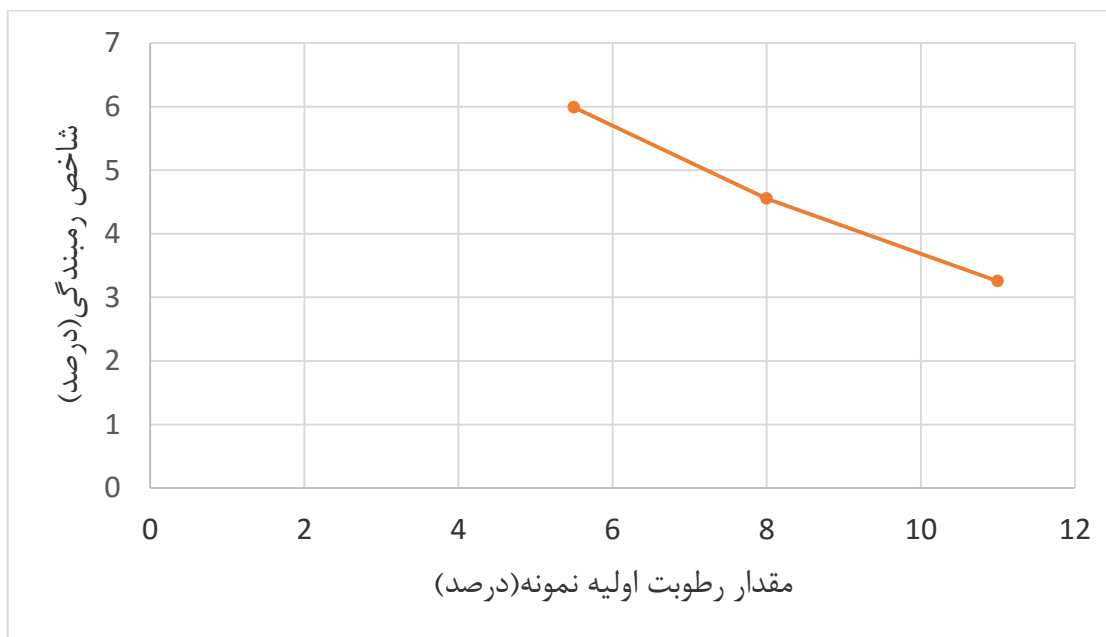
درجه رمبندگی	میانگین معیار رمبندگی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت اولیه (%)	ارتفاع نهایی نمونه (mm)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)	شماره نمونه	درصد خاکستر لجن فاضلاب
متوسط	۴/۵۵	۱/۴۲	۸	۱۷/۳۰	۱۹/۱	۱	۴
		۱/۴۲	۸	۱۷/۲۰	۱۹/۱	۲	
		۱/۴۲	۸	۱۷/۲۷	۱۹/۱	۳	
متوسط	۳/۲۵	۱/۴۲	۱۱	۱۷/۳۹	۱۹/۱	۱	۴
		۱/۴۲	۱۱	۱۷/۴۸	۱۹/۱	۲	
		۱/۴۲	۱۱	۱۷/۵۱	۱۹/۱	۳	

جدول ۴-۱۳ مقایسه بین شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده، دست‌نخورده و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر

لجن فاضلاب در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت طبیعی

درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک دست‌نخورده	درصد کاهش شاخص رمبندگی نسبت به خاک بازسازی شده	درصد شاخص رمبندگی	درصد رطوبت اولیه نمونه
۶۶/۳۶	۴۶/۶۰	۵/۹۸	۵/۵
۷۴/۴۰	۵۹/۳۷	۴/۵۵	۸
۸۱/۷۲	۷۰/۹۸	۳/۲۵	۱۱

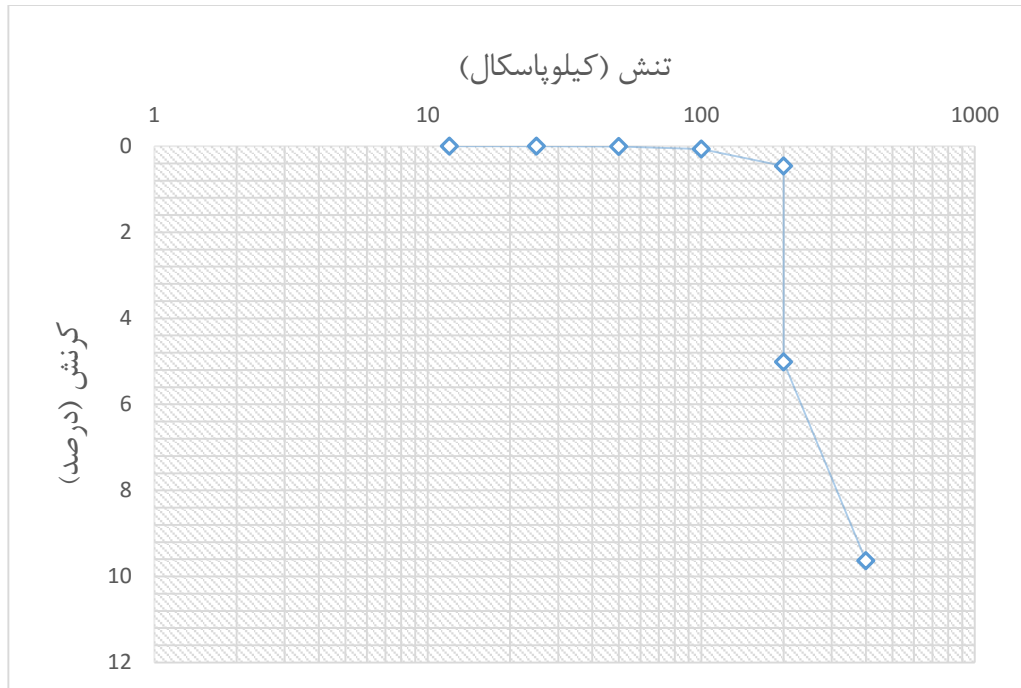
در شکل ۴-۱۰ به مقایسه بین شاخص رمبندگی خاک با درصد‌های مختلف رطوبت و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب پرداخته می‌شود.



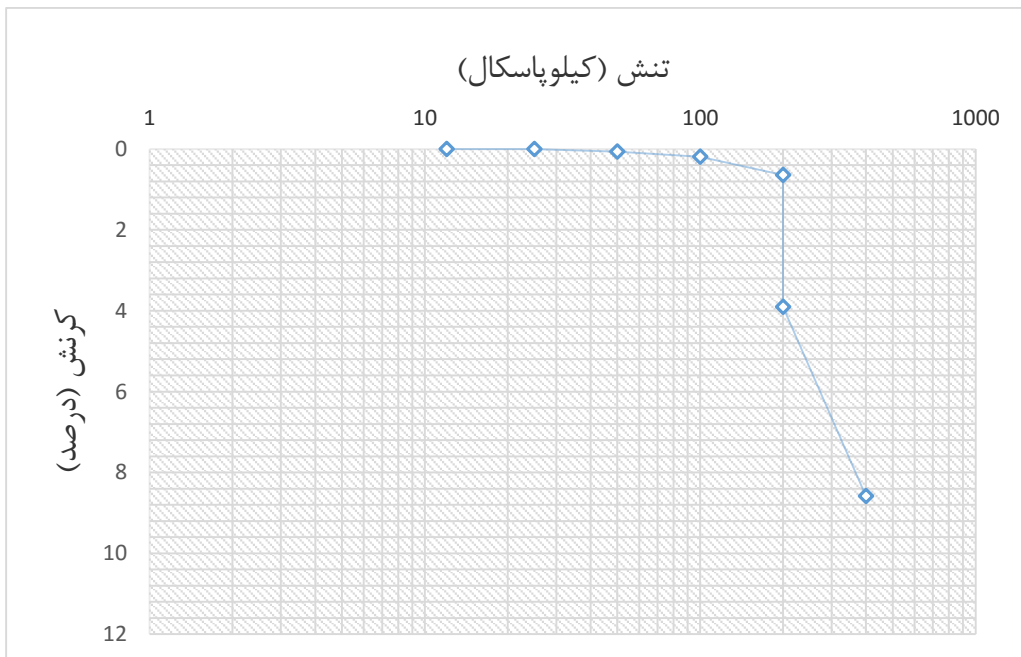
شکل ۴-۱۰ نمودار مقایسه شاخص رمبندگی نمونه‌های بازسازی شده با درصد‌های مختلف رطوبت و بهسازی

شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب

در شکل‌های ۱۱-۴ و ۱۲-۴ نمودار کرنش نمونه‌های بازسازی شده با درصدهای مختلف رطوبت اولیه که با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب بهسازی شدند در مقابل تنش‌های مختلف ترسیم شده است.



شکل ۱۱-۴ نمودار تنش - کرنش خاک بازسازی شده با ۸ درصد آب و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب



شکل ۱۲-۴ نمودار تنش - کرنش خاک بازسازی شده با ۱۱ درصد آب و بهسازی شده با ۴ درصد خاکستر لجن

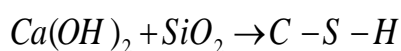
فاضلاب

۳-۴ بحث در نتایج

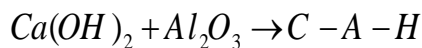
نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص رمبندگی خاک مورد نظر بر اثر دست-خوردگی کاهش می‌یابد. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت که دست‌خوردگی خاک موجب کاهش ۳۷ درصدی شاخص رمبندگی می‌شود. علت کاهش شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده نسبت به خاک دست‌نخورده تغییر ساختار و نحوه قرارگیری ذرات خاک در کنار هم می‌باشد. خاک رمبند دارای حفرات میکروسکوپی و ماکروسکوپی است که دست‌خوردگی حفرات بزرگتر را بهم می‌ریزد ولی حفرات ریزتر همچنان وجود دارد. همین مساله موجب کاهش میزان رمبندگی می‌شود که در نتایج ارائه شده نیز مشهود است.

بر اساس نتایج جدول ۳-۵ مشخص شد که اکسیدهای CaO ، Al_2O_3 و SiO_2 سهم بسیار زیادی در بین اکسیدهای عناصر خاکستر لجن فاضلاب دارند به طوری که می‌توان گفت این سه اکسید، اکسیدهای اصلی خاکستر لجن فاضلاب هستند.

حال می‌توان ادعا کرد خاکستر لجن فاضلاب به علت دارا بودن ترکیبات سیلیسی و آهکی توانسته به عنوان ماده‌ای پوزولانی عمل کند. ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی به وجود آورده که خاصیت چسبندگی و سیمانی داشته است. واکنش‌های پوزولانی به صورت معادلات ۴-۱ و ۴-۲ انجام شده و باعث تولید مواد چسبنده شامل هیدروسیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدروآلومینات کلسیم (C-A-H) شده است (نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳). حال این دو ماده چسبنده تولید شده موجب چسبندگی بین ذرات خاک شده و موجب کاهش نشست‌های ناگهانی خاک و کم شدن شاخص رمبندگی شده‌اند.



۱-۴



۲-۴

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد زمان عمل آوری تاثیر چندانی بر روی کاهش شاخص رمبندگی نداشت دلیل این امر را می توان این دانست که برای انجام واکنش های پوزولانی نیاز به رطوبت است در حالی که در این جا رطوبت نمونه ها کم بوده لذا رطوبت آن قدر بالا نبوده که نیاز به زمان طولانی عمل آوری باشد و از طرف دیگر واکنش های پوزولانی از جمله واکنش هایی هستند که در زمان کم رخ می دهند و زمان طولانی عمل آوری لازم ندارند.

با افزایش رطوبت مقدار شاخص رمبندگی برای نمونه هایی که با ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب بهسازی شده بودند، کاهش یافت که دلیل آن را می توان به دو عامل نسبت داد. مورد اول آن که افزایش رطوبت در نمونه باعث کاهش شاخص رمبندگی می شود. مورد دوم آن است که افزایش رطوبت در نمونه ها باعث تسریع در واکنش های پوزولانی ۱-۴ و ۲-۴ می شود.

کاهش در مقدار شاخص رمبندگی خاک را به هنگام اضافه کردن ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک به نسبت ۴ به ۱ و همچنین آهک به خاک رمبند را نیز می توان همین واکنش های پوزولانی ذکر شده در معادلات ۱-۴ و ۲-۴ دانست که موجب تولید مواد چسبنده و افزایش مقاومت و چسبندگی خاک و کاهش شاخص رمبندگی آن می شود.

همچنین می توان گفت با اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب و ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک واکنش تبادل یون های مثبت توسط یون های کلسیم، آلومینیوم و آهن موجود در این مواد با عناصر خاک انجام شده و خاک رمبند بهسازی شده است. در واقع باید گفت که طبق سری لیوتروپیک ترتیب کلی یون هایی که در خاک مشاهده می شوند به صورت $Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+}$ است و در واکنش تبادل یون های مثبت هر یک از یون ها تمایل به جاگزینی یون های سمت چپ خود را دارند و به این ترتیب یون های تک ظرفیتی جای

خود را به یون‌های چند ظرفیتی می‌دهند.

۵- فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این تحقیق هدف اصلی بررسی بهسازی خاک رمبنده با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب بوده است. از این رو خاک رمبنده برداشته شده در شرایط مختلف با درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب و همچنین با درصد‌های مختلف ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و آهک مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه به نتایج کلی بدست آمده از آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

۵-۲ نتایج کلی

- با آزمایش نمونه دست‌نخورده و دست‌خورده‌ی خاک شاهد مشخص شد که با دست‌خوردگی میزان رمبندگی کاهش محسوسی خواهد داشت که علت این امر از بین رفتن حفرات و منافذ ماکروسکوپیک خاک عنوان شده است. در واقع دست‌خوردگی خاک موجب کاهش ۳۷ درصدی شاخص رمبندگی خاک شد.
- زمانی که درصد‌های مختلف خاکستر لجن فاضلاب به خاک رمبنده اضافه شد مشخص شد که اضافه کردن این ماده به خاک در رطوبت طبیعی محل باعث کاهش شاخص رمبندگی آن می‌شود. در واقع خاک بازسازی شده که دارای درجه رمبندگی شدید بود با اضافه کردن خاکستر لجن فاضلاب به درجه رمبندگی متوسط تقلیل یافت. در این بین هر چه درصد خاکستر لجن فاضلاب افزایش یافت مقدار شاخص رمبندگی کاهش محسوس‌تری پیدا کرد به طوری که اضافه کردن ۲٪، ۴٪ و ۸٪ خاکستر لجن فاضلاب و ۳ روز عمل‌آوری به ترتیب موجب کاهش ۱۸٪، ۴۷٪ و ۷۳٪ شاخص رمبندگی نسبت به شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در آزمایشگاه شد. علت این کاهش در شاخص رمبندگی خاک نیز به انجام واکنش‌های پوزولانی بین خاکستر لجن فاضلاب و خاک در حضور رطوبت و واکنش تبادل یون‌های مثبت برمی‌گردد. اما نتایج به‌دست آمده نشان داد که زمان عمل‌آوری طولانی‌تر تأثیری در کاهش شاخص رمبندگی خاک

نداشت که علت این اتفاق به کم بودن رطوبت برای انجام واکنش‌های پوزولانی و سرعت بالای انجام واکنش‌های پوزولانی نسبت داده شده است.

- زمانی که درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب و آهک به خاک رمبنده اضافه شد مشخص شد که اضافه کردن این ماده به خاک در رطوبت طبیعی محل باعث کاهش شاخص رمبندگی آن می‌شود. در واقع خاک بازسازی شده که دارای درجه رمبندگی شدید بود با اضافه کردن ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب و آهک به درجه رمبندگی کم و با اضافه کردن ۸ درصد خاکستر لجن فاضلاب و آهک به درجه رمبندگی غیر رمبنده تقلیل یافت. به طور دقیق‌تر می‌توان اضافه کردن ۲٪، ۴٪ و ۸٪ خاکستر لجن فاضلاب به همراه آهک و ۳ روز عمل‌آوری به ترتیب موجب کاهش ۶۰٪، ۹۶٪ و ۱۰۰٪ شاخص رمبندگی نسبت به شاخص رمبندگی خاک بازسازی شده در آزمایشگاه شد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان ادعا کرد مقدار ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب و آهک یک مقدار بهینه برای بهسازی خاک رمبنده بود. علت این کاهش در شاخص رمبندگی خاک نیز به انجام واکنش‌های پوزولانی بین خاکستر لجن فاضلاب، آهک و خاک در حضور رطوبت و واکنش تبادل یون‌های مثبت برمی‌گردد.

- زمانی که درصد بهینه خاکستر لجن فاضلاب به خاک رمبنده با درصد رطوبت‌های بیش‌تر از رطوبت محل اضافه شد مشخص شد که اضافه کردن این ماده به خاک در رطوبت‌های بیش‌تر از رطوبت محل باعث کاهش محسوس‌تر شاخص رمبندگی آن شد. به طوری که اضافه کردن ۴ درصد خاکستر لجن فاضلاب به خاک رمبنده که با رطوبت محل بازسازی شده باعث کاهش ۴۷ درصدی شاخص رمبندگی شد اما با دو برابر کردن رطوبت مقدار کاهش در شاخص رمبندگی به ۷۱ درصد رسید که علت این اتفاق به خاطر تاثیر رطوبت در تسریع و بیش‌تر شدن انجام واکنش‌های پوزولانی و هم‌چنین تاثیر مثبت رطوبت اولیه نمونه‌ها بر روی کاهش شاخص رمبندگی ذکر شده است.

۳-۵ پیشنهادها

- بررسی رفتار خاک‌های رمبنده بهسازی شده با خاکستر لجن فاضلاب در محل و به صورت بزرگ مقیاس برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی
- انجام آزمایش‌های تعیین شاخص رمبندگی با استفاده از نمک‌های محلول
- بررسی تاثیر شاخص رمبندگی در تنش‌های متفاوت
- بررسی تاثیر استفاده از جلبک‌ها و باکتری‌ها بر روی شاخص رمبندگی و پارامترهای مقاومتی خاک‌های رمبنده
- استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در راهسازی و بررسی آزمایش CBR

منابع

- Al-Sharif M.M. and Attom M.F. (2014), "A geoenvironmental application of burned wastewater sludge ash in soil stabilization" *Environmental Earth Sciences*, 71, 5, pp 2453-2463.
- ASTM D 2216-98, (2003). "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil".
- ASTM D 2435-03, (2003). "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading".
- ASTM D 422-63, (2002). "Test method for particle-size analysis of soils".
- ASTM D 4318-00, (2000). "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity of soils".
- ASTM D 5333-03, (2003). "Standard test methods for measurement of collapse potential of soils"
- ASTM D 854-10, (2010). "Standard test method for specific gravity of soils solids by water pycnometer".
- Barden L., Madedor A. O. and Sides G. R. (1969), "Volume change calculations of unsaturated clay" *J. Soil Mech. and Found. Div, ASCE .*, 95, pp 33–51.
- Basma A. A. and Tuncer E. R. (1992), "Evaluation and control of collapsible soils" *J. Geotech. Engrg.*, 118, 10, pp 1491-1504.
- Chen L. and Lin D. F. (2009), " Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement" *J. Hazardous Mater.*, 162, pp 321-327.
- Das B. M. (2007). "Principles of foundation engineering", PWS publishing company, Boston, MA.
- DeJong J. T. and Michael B. F. (2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, 132, 11, pp 1381-1392.

- El-Ehwany M. H. (1989), Ph.D. Thesis, "Collapse Settlement Prediction: A Field and Laboratory Study", Arizona State University, USA.
- Elkady T. Y. (2002), Ph.D. Thesis, "Static and dynamic behaviour of collapsible soils", Arizona State University, USA.
- Futai M. M. and Admeida M. (2002), "Collapsible soil: a Theoretical and Experimental Study" EJGE Paper 0218.
- Guo L. (2014). Graduate Theses and Dissertations, "Investigation of soil stabilization using biopolymers", Iowa State University.
- Hans W. F. and Sibel P. (1991). "Foundation engineering handbook 2nd edition", pp 317-378, New York.
- Hilf J. W. (1991). "Foundation engineering handbook", pp 249-316.
- Houston S. L., Houston W., Zapata C. E. and Lawrence CH. (2001), "Geotechnical Engineering practice for collapsible soils" *Geotechnical and Geological Engineering.*, 19, 3, pp 333-355.
- Jefferson I., Rogers C., Evestatiev D. and Rogers C. D. F. (2005), "Treatment of Metastable Loess Soils: Lessons from Eastern Europe" *Ground Improvement Case histories*. Oxford, Elsevier., pp 723-762.
- Karol R. H. (2003). "Chemical Grouting and soil stabilization", third edition, New Brunswick, pp 97.
- Klukanova A. and Sajgalik J. (1994), "Changes in loess fabric caused by collapse" *Quaternary International*, 24, pp 35-39.
- Larionov K., (1965) "Structural characteristics of loess soils for evaluating their constructional properties", 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, pp 64-68.
- Lawton E. C., Fragaszy R. J. and Hardcastle J. H. (1989), "Collapse of compacted clayey sand" *J. Geotech. Engrg.*, 115. 9, pp 1252–1267.
- Lawton E. C., Fragaszy R. J., and Hetherington M. D. (1992), "Review of Wetting-

- Induced Collapse in Compacted Soil" *J. Geotech. Engrg.*, 118, 9, pp 1376–1394.
- Lin D. F., Lin K. L., Hung M. J. and Luo H. L. (2007) "Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil" *J. Hazardous Mater.*, 145, 1-2, pp 58-64.
- Lin D. F., Luo H. L., Hsiao D. H. and Yang, C. C. (2005), "The effect of Sludge ash on the strength of soft subgrade soil" *J. Chinese Institute of Environmental Eng.*, 15, 1, pp 1-10.
- Lin Z.G. and Wang S.J. (1988) "Collapsibility and deformation characteristics of deepseated loess in China" *Engineering Geology.*, 25, 2–4, pp 271–282.
- Lutenegger A. and Hallberg G. R. (1988). "Stability of loess" *Engineering Geology.*, 25, 2-4, pp 247-261.
- Lutenegger, A. and Saber R. (1988), "Determination of collapse potential of soils" *Geotechnical Testing Journal.*, 11, 3, pp 173–178.
- Misra A. (1988), "Stabilization characteristics of clays using class C fly ash" *Transportation Research Record.*, 1611, pp 46-54.
- Mohammad Hosseini A., (2014), M.Sc thesis, "Stabilization and improvement of collapsible soils, using Electrokinetics & Nanomaterials and assessment its strength parameters by unsaturated oedometer", Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran.
- Pengelly A., Boehm D., Rector E. and Welsh J. (1997) "Engineering Experience with in Situ Modification of Collapsible and Expansive Soils", *Unsaturated Soil Engineering*, ASCE, Special Geotechnical Publication.
- Rogers, C. D. F. (1995), "Types and Distribution of Collapsible Soils: In Genesis and Properties of Collapsible Soils", pp 1-17, E. Derbyshire et al. (Eds), Kluwer academic publishers.
- Rollins K. and Rogers, G.W. (1994), "Mitigation Measures for Small Structures on Collapsible Alluvial Soils" *J. Geotech. Engrg.*, 120, 9, pp 1533-1553.
- Shalaby S.I. (2014), "The Assessment of the Collapse Potential of Fills during Inundation using Plate Load Tests" *Life Science Journal.*, 11, 8, pp 1001-1006.

Zhang Y. and Zhang Z. (2013), "Influence Factor Analysis on Strength of Lime-Fly Ash Loess" Engineering., 5, 6, pp 561-565.

Zia N. and Fox P. (2000), "Engineering Properties of Loess-Fly Ash Mixtures for Roadbase Construction" Transportation Research Record., 1714, 49-56.

Ziaie Moayed R. and Kamalzare M. (2015), "Improving Physical Characteristics of Collapsible Soil (Case Study: Tehran-Semnan Railroad)" Journal of Engineering Geology., 9, 2, pp 2869-2890.

جهانیار مقدم م.، رحمان نژاد ر. و ابراهیمی م.، (۱۳۸۶)، "معیارهای شناسایی خاک‌های رمبنده و روش‌های مقابله با پدیده رمبندگی (مطالعه موردی: خاک ساختگاه شهر کرمان)"، همایش ملی زلزله و مقاوم‌سازی ساختمان، بهبهان.

حائری، س. م.، اکبری گرکانی ا. و روح پرور ح.، (۱۳۹۱)، "بررسی بهسازی بستر کانال‌های انتقال آب قرار گرفته بر روی خاک‌های فروریزی با افزایش آهک با انجام آزمایش ادمتر و مدلسازی عددی (مطالعه موردی خاک لس گرگان)"، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج، ایران.

فتوت ع.، (۱۳۸۵)، "استفاده از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب در تولید مصالح نوین ساختمانی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

فریدونی د.، (۱۳۹۰)، "مروری بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رمبنده و بررسی پراکندگی آن‌ها در ایران" هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود.

کشاورز م.، (۱۳۹۱)، "استفاده از لجن‌های شیمیایی، بیولوژیکی و خاکستر تولیدی پتروشیمی مبین در تهیه سیمان، آسفالت، بتن و حذف برخی فلزات سنگین از پسابهای صنعتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود.

محمدعلی زاده رفیع ب، (۱۳۸۷)، "اصلاح خاک‌های رمبنده به روش تزریق (مطالعه موردی راه آهن سمنان- تهران)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

نوروزیان ک، عباسی ن. و عابدی کوپایی ج، (۱۳۹۳)، "استفاده از خاکستر لجن فاضلاب برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های رسی در سازه های آبی"، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۵، شماره ۴، صفحه ۹۳-۱۰۸.

نوکنده ص، (۱۳۹۴)، "بررسی نشست خاک‌های فروریزی برای حالت نشت فرآورده‌های نفتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

نیک اقبال سی سخت ب، حبیب آگهی ح، نیازی ع. و نیکویی ا، (۱۳۹۳)، "بررسی اثر بیولوژیکی بر روی بهبود وضعیت رمبندگی خاک"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل.

وکیلی ا، زمردیان م، وکیلی، ا، ح. و آرام م، (۱۳۸۷)، "بررسی تأثیر آهک بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک‌های رمبنده"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، سمنان.

Abstract

One of the most important geotechnical issues is problematic soils (dispersive soils, expansive soils, Collapsible soils, liquefying soils, soluble soils) which may affect the constructing projects on these soils and even may cause their destruction. In this research, collapsing soils are studied in particular. Collapsible soils in natural manner with low moisture content, can withstand relatively high pressure but after absorbing moisture and saturation, the gap between the soil particles decreases and may cause sudden and nonsymmetric settlements. These soils are found in warm, dry and desert areas. Iran is among the countries that have Collapsible soils. The necessity of investigation of these soils according to the relatively high development of these soils in different areas and requiring to design dams, irrigation canals and other technical buildings in these areas becomes much more important. Several studies have been conducted on the improvement collapsible soils but in this study we checked the collapse index of these soils by using sewage sludge ash and sewage sludge ash/lime.

At first for testing these soils, undisturbed samples have been taken from Kalale of Golestan. Then remolded samples were made. The remolded samples had the same void ratio as undisturbed samples. In order to assess the behavior of these soils, saturated tests were done by standard consolidation device. The present study investigated the effect of the addition of sewage sludge ash and sewage sludge ash/lime on the collapse index of soil at field void ratio and different moisture content. Four samples that were tested are the addition of 0%, 2%, 4% and 8% sewage sludge ash and sewage sludge ash/lime to collapsible soil. The results showed that increasing the sewage sludge ash and sewage sludge ash/lime content of the soil decreases collapse index of soil. It was found that increasing the percentage of these materials will decrease the collapse index and also in disturbing soils, collapse index decreases even though the samples have been remolded in the same void ratio of undisturbed sample.

Keywords: Collapsible soils, collapse index, sewage sudge ash, lime



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis Geotechnical Engineering

Improvement of collapsible soils by using sludge ash

By : Hossein Atarodi

Supervisor:

Dr. S.M. Hosseini

Decembre - 2016