مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۳۳-۱۲۳، (یادداشت فنی)

Research Note

تثبیت خاک با آهک جهت بهبود پارامترهای مقاومت برشی و کاهش پتانسیل رمبندگی خاک، مطالعه‌ی موردی: جاده‌ی یاسوج - یزد

مهدی یوسفی * **(کارشناس ارشد)**
منصور پرویزی (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج

کشور ایران در زمره‌ی کشورهایی است که خاک‌های رمبنده دارد و در صورت عدم شناسایی این خاک‌ها، اگر سازه، راه و یا خطوط ریلی روی آنها احداث شود، می‌تواند در اثر اشباع‌شدن خاک، مشکلات قابل توجهی را ایجاد کند. در این پژوهش به بررسی و مطالعه‌ی آزمایشگاهی تثبیت خاک و کاهش رمبندگی و افزایش خصوصیات مقاومت برشی آن با استفاده از تزریق آهک پرداخته شده و سپس رمبندگی خاک مورد تزریق و خاک در حالت طبیعی مورد مقایسه قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تزریق آهک باعث کاهش پتانسیل رمبندگی خاک می‌شود. همچنین پارامترهای مقاومت برشی خاک پس از تزریق بهبود یافته و مقدار ϕ_u بعد از تزریق تقریباً ۲/۱۵ برابر شده و پارامتر ϕ'، ۱/۶۲ برابر شده است، که با توجه به ثابت‌بودن تنش‌ها در هر دو آزمایش خاک در حالت طبیعی و خاک تزریق‌شده با آهک، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک را به همراه داشته است، که حاکی از بهبود رفتار خاک پس از تزریق است.

واژگان کلیدی: خاک‌های مسئله‌دار، پتانسیل رمبندگی، تزریق آهک، مقاومت برشی خاک، چسبندگی خاک.

myousefi2044@yahoo.com
parvizi@mail.yu.ac.ir

۱. مقدمه

خاک‌های مسئله‌دار خاک‌هایی هستند که در اثر قرارگرفتن در شرایط مختلف بار و رطوبت ناشی از ساخت و ساز، مشکلاتی را در طول دوران ساخت و یا بهره‌برداری از آن سازه ایجاد می‌کنند. این خاک‌ها را با توجه به رفتاری که دارند می‌توان به خاک‌های متورم‌شونده، خاک‌های واگرا، خاک‌های انحلال‌پذیر و خاک‌های رمبنده تقسیم کرد.

در خاک‌های رمبنده، بافت طبیعی خاک به طور ناگهانی در هم فرو می‌ریزد و تخریب می‌شود، که در نتیجه‌ی آن خاک دچار نشست ناگهانی می‌شود. همچنین به سازه‌های احداث‌شده بر روی آن خسارت‌های قابل توجهی وارد می‌شود. این پدیده مختص خاک‌هایی است که بافت متخلخل دارند و اتصال ذراتشان به همدیگر ضعیف است. از مهم‌ترین این خاک‌ها می‌توان به رس‌ها و لایی‌هایی که بافت لانه‌زنبوری دارند، اشاره کرد.[۱و۲] در طی پدیده‌ی رمبندگی، در اثر جذب آب توسط ذرات خاک، نیروهای بین مولکولی از بین می‌رود و ساختمان خاک به هم می‌ریزد. ضرورت بررسی خاک‌های رمبنده با توجه به گسترش نسبتاً وسیع این خاک‌ها و لزوم طراحی سدها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌های فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه‌ی شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ و احداث مناطق مسکونی، لوله‌های آب و فاضلاب و... بر روی این خاک‌ها اهمیتی دو چندان می‌یابد.[۳]

ارائه‌ی معیارهایی جهت تشخیص خاک‌های رمبنده از غیررمبنده و ارزیابی میزان پتانسیل رمبندگی خاک‌ها در طول دهه‌های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ میلادی ادامه یافته و معیارهایی نیز در این رابطه توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است.[۴-۹]

۱.۱. معیارهای تخمین ارزیابی پتانسیل رمبندگی

معیارهای مختلفی برای شناسایی خاک‌های رمبنده ارائه شده است، که مهم‌ترین آنها به این شرح است.

۱.۱.۱. معیار کلونجر (۱۹۵۹)[۱۰]

در این معیار میزان رمبندگی خاک بر مبنای چگالی خشک ارائه شده است (جدول ۱).

۲.۱.۱. معیار گیبس و بارا (۱۹۶۲)[۱۱]

در این معیار از وزن واحد حجم خشک و حد روانی خاک به‌عنوان معیارهایی جهت تفکیک خاک‌های رمبنده از غیررمبنده استفاده شده است. این روش بر این فرض استوار است که خاکی که میزان فضای خالی آن گنجایش درصد رطوبت و حد روانی خاک را در حالت اشباع دارد، مستعد رمبندگی در اثر اشباع‌شدن است. این

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۰/۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۲۶، پذیرش ۱۳۹۳/۱/۱۹.

جدول ۱. شاخص پتانسیل رمبندگی براساس معیار کلونجر.

پتانسیل رمبندگی	$\gamma_d(gr/cm^3)$
رمبندگی بالا	$< ۱/۲۸$
رمبندگی متوسط	۱/۲۸-۱/۴۴
رمبندگی کم	$> ۱/۴۴$

معیار زمانی معتبر است که خاک سیمانی نشده باشد و نیز حد روانی آن بیشتر از ۲۰٪ باشد.

۳.۱.۱. معیار دنیسف (۱۹۶۴)

در این معیار از نسبت e/e_{LL} برای تعیین رمبنده‌بودن خاک استفاده شده است و در آن e_{LL} نسبت تخلخل در حالت روانی و e نسبت تخلخل خاک در حالت طبیعی است. در این معیار هرگاه $e/e_{LL} > ۱$ باشد، خاک رمبنده محسوب می‌شود.

۴.۱.۱. معیار فدا (۱۹۶۶)

در این معیار شاخص رمبندگی مطابق رابطه‌ی ۱ پیشنهاد شده است:

$$I_c = \frac{m/sr - PL}{PI} \qquad (۱)$$

که در آن، m رطوبت طبیعی، sr درجه‌ی اشباع، PL حد خمیری و PI شاخص خمیری است.

۵.۱.۱. معیار هندی (۱۹۷۳)

در این معیار نسبت حد روانی به درصد رطوبت خاک در حالت اشباع برای تعیین رمبندگی خاک پیشنهاد شده است. اگر نسبت مذکور کمتر از ۱ باشد، خاک رمبنده و اگر بیش از ۱ باشد، غیررمبنده محسوب می‌شود.

۶.۱.۱. معیار جنینگز و نایت (۱۹۷۵)[۱۲]

در این معیار آزمایش تحکیم مضاعف به‌منظور ارزیابی رفتار یک خاک در برابر اشباع‌شدن و بارگذاری در ترازهای مختلف تنش ارائه شده است. روش مذکور بعدها توسط هاوستون و همکاران (۱۹۸۸)،[۹] اصلاح شده است.

۷.۱.۱. معیار ASTM مبتنی بر نتایج آزمایش تحکیم مضاعف

مبحث شناسایی خاک‌های رمبنده در این استاندارد نخست با پیشنهاد هولتز آغاز شده است. امروزه این آزمایش به روش ASTM D۵۳۳۳-۰۳ انجام می‌شود. یک نمونه‌ی خاک با رطوبت طبیعی به گونه‌یی آماده‌ی آزمایش می‌شود که متناسب با حلقه‌ی آزمایش تحکیم باشد، سپس بارهای قائم به‌صورت پیش‌رونده اعمال می‌شود. در انتهای این بارگذاری نمونه با آب مقطر غرقاب و به مدت یک روز به همان صورت گذاشته می‌شود. در این مدت تغییرشکل‌های نمونه یادداشت می‌شود و سپس آزمایش تحکیم تا رسیدن به بارگذاری بیشینه ادامه می‌یابد. شاخص رمبندگی در این معیار به‌صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$I_c = \frac{\Delta e}{۱ + e_۰} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

که در آن، Δe کاهش نسبت تخلخل بعد از اشباع‌شدن خاک و $e_۰$ نسبت تخلخل خاک قبل از مرطوب‌شدن است. از آنجا که آزمایش به‌صورت یک بُعدی انجام می‌شود، رابطه‌ی ۲ را به‌صورت رابطه‌ی ۳ نیز می‌توان نوشت:

$$I_c = \frac{\Delta h}{۱ + h_۰} \times ۱۰۰ \qquad (۳)$$

که در آن، Δh تغییر در ارتفاع نمونه بعد از مرطوب و اشباع‌شدن خاک و $h_۰$ ارتفاع اولیه‌ی نمونه‌ی خاک قبل از مرطوب‌شدن است. با توجه به اینکه $\Delta h = (d_f - d_i)$ است، رابطه‌ی ۳ به‌صورت رابطه‌ی ۴ نیز بیان می‌شود:

$$I_c = \frac{(d_f - d_i)}{۱ + h_۰} \times ۱۰۰ \qquad (۴)$$

که در آن، d_f قرائت گیج تغییرمکان در تنش موردنظر پس از جذب آب (میلی‌متر)، d_i قرائت گیج تغییرمکان در تنش موردنظر پیش از جذب آب (میلی‌متر) است. در جدول ۲، رده‌بندی شاخص رمبندگی ASTM نشان داده شده است.[۱۳]

به موازات توسعه و پیشرفت در زمینه‌ی ارائه‌ی ساز و کارهایی برای توجیه پدیده‌ی رمبندگی و ارائه‌ی معیارها و نیز تجهیزات آزمایشگاهی و صحرایی برای ارزیابی خاک‌های رمبنده، پژوهشگران مختلف پژوهش‌هایی در مورد روش‌ها و نحوه‌ی بهسازی خاک‌های رمبنده انجام داده‌اند.

در سال ۱۹۶۷،[۱۴] پژوهش‌هایی در زمینه‌ی استفاده از دوغاب رس و تزریق آن به توده‌ی لس متراکم انجام شده است. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۳،[۱۵] استفاده از مخلوط‌های شیرابه‌یی سیمان، آهک و قیر برای تثبیت لس‌ها به‌ویژه در ارتباط با احداث جاده‌ها پیشنهاد شده است. البته پژوهشگران دیگری در سال ۱۹۸۱ خبر استفاده از اسید فسفریک برای تثبیت لس در نیوزلند را داده بودند. در پژوهش دیگری نیز در سال ۱۹۹۷ نتایج پژوهش‌ها و تجربیات ایشان در زمینه‌ی بهسازی برجای خاک‌های رمبنده انتشار داده شده بود.[۱۶]

همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)،[۱۷] نشان داده شده است که در یک خاک مشخص با درصد رس ثابت، با افزودن مقادیر مختلف سیمان پرتلند معمولی، رطوبت بهینه و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک تغییر چندانی نمی‌کند؛ اما در مورد خاک‌های ترکیب‌شده با سیمان، با تغییر ترکیب خاک و ثابت‌ماندن مقدار سیمان، این مقادیر تغییر می‌یابد. با افزایش درصد رس خاک ترکیب‌شده با سیمان، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک، کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. عامل زمان نیز عامل تعیین‌کننده‌یی در نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از تراکم خاک تثبیت‌شده با سیمان است. صرف‌نظر از نوع خاک و نوع سیمان مصرفی، با طی‌شدن زمان بیشتر از اختلاط خاک و سیمان، مقدار رطوبت بهینه افزایش و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک کاهش می‌یابد.[۱۷]

برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۱۲،[۱۸] اثر تثبیت خاک را با ترکیبات مختلفی از یک نوع پوزولان طبیعی، دارای نزدیک به ۵۰٪ سیلیس و آهک شکفته بر روی دو نوع خاک رسی بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل‌شده از آزمایش تراکم در مورد دو نوع خاک موجود در آزمایش‌ها متفاوت بوده است.

همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۱،[۱۹] به بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک در فرودگاه پارس پرداخته شده است. روش مذکور برای تقویت لایه‌های خاکی زیرین به اجرا در آمده و برای تثبیت لایه‌های رویه از سیستم کف قیر و سیمان استفاده شده است. با این روش، مقاومت CBR خاک بستر از مقادیر بین ۳-۱ در تراکم ۹۵٪ به بیش از ۲۰ و مقاومت فشاری نمونه‌های مغزه‌گیری‌شده از لایه‌های تثبیت‌شده به حدود ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است.

جدول ۲. دسته‌بندی شاخص رمبندگی.

شاخص رمبندگی	درجه‌ی رمبندگی
۰-۰/۱	ندارد
۰/۱-۲	اندک
۲/۱-۶	متوسط
۶/۱-۱۰	تا حدی شدید
> ۱۰	شدید

در پژوهشی در سال ۲۰۱۰،[۲۰] نیز به بررسی تأثیر رطوبت در مقاومت CBR خاک تثبیت‌شده با آهک و سرباره‌ی کوره‌ی ذوب آهن (GGBS) در مجاورت سولفات پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها اهمیت میزان رطوبت را در ساخت نمونه‌ها نشان می‌دهد. در صورت وجود رطوبت کافی جهت فعال‌سازی و هیدراتاسیون سرباره و انجام واکنش پوزولانی خاک و آهک، وجود سرباره در کنار گچ و آهک باعث افزایش مقاومت و کسب نتایج مناسب‌تر می‌شود و در صورت عدم وجود رطوبت کافی، وجود سرباره می‌تواند نتیجه‌ی عکس داشته باشد و از مقاومت نمونه‌ها بکاهد.

همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۱،[۲۱] به بررسی تأثیر پوزولان در خصوصیات تورمی و تراکمی خاک رس تثبیت‌شده با آهک در معرض سولفات پرداخته و با استفاده از نتایج آزمایش تراکم استاندارد مشاهده شده است که با اضافه‌کردن هر ۳ ماده‌ی آهک، گچ، و پوزولان به خاک، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از پوزولان می‌توان به میزان زیادی تأثیر مخرب سولفات در خاک رس تثبیت‌شده با آهک را کاهش داد. لذا در شرایطی که خاک در محل حاوی سولفات باشد، اضافه‌کردن پوزولان تا درصد مشخصی می‌تواند موجب کاهش تورم شود و افزایش بیشتر پوزولان، کاهش چشم‌گیری در تورم به وجود نمی‌آورد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، مقدار بهینه‌ی پوزولان می‌تواند در حدود ۴٪ باشد.

در مطالعه‌ی دیگری در همان سال،[۲۲] به بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک بستر راه کرمان ـ زنگی‌آباد با استفاده از ۴ ماده‌ی آهک، ZAM I، ZAM II، و RRP پرداخته شده است. نتایج آزمایش تک‌محوری حاکی از آن بود که افزودن پلیمرها موجب افزایش سریع و بسیار زیاد مقاومت نمونه‌ها می‌شود، اما پس از غوطه‌ورشدن، این مقاومت به چند صدم مقدار اولیه کاهش می‌یابد. افزودن درصدهای مختلف RRP اثر قابل ملاحظه‌یی در مقاومت این خاک نداشته و در تثبیت با آهک بیشترین مقاومت با افزودن ۲٪ از این ماده به‌دست آمده است. براساس نتایج آزمایش تورم و تصویر میکروسکوپ الکترونی احتمال شکل‌گیری کانی‌های اترینگایت در جریان تثبیت با آهک ضعیف به نظر می‌رسد.

همچنین در سال ۲۰۱۲،[۲۳] از الیاف فرش برای تثبیت دو نوع خاک رسی استفاده شده است که در هر دو مورد با افزایش مقدار الیاف استفاده‌شده در خاک‌های رسی، مقدار رطوبت بهینه افزایش و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک تثبیت‌شده کاهش یافته است.

برای اصلاح خاک‌های رمبنده از روش‌هایی مانند مرطوب‌سازی و تراکم برای خاک‌هایی با ضخامت تا ۱/۵ متر، گودبرداری و تراکم مجدد (با یا بدون تثبیت توسط مواد افزودنی)، تزریق آهک و غرقاب‌سازی برای خاک‌هایی با ضخامت ۱/۵ تا ۱۰ متر و ترکیبی از این روش‌ها برای خاک‌های با ضخامت بیش از ۱۰ متر می‌توان استفاده کرد.[۲۴] البته روش‌های جدیدی مانند اولتراسونیک و الکتروشیمیایی نیز وجود دارد که نیاز به هزینه و تکنولوژی بالایی دارند.[۱۵]

عدم توجه به وجود خاک‌های رمبنده، موجب خرابی‌های گسترده در سازه‌های عمرانی شده است، لذا پیشنهاد روشی در خاک‌های رمبنده و مقابله با عوامل مؤثر در پدیده‌ی رمبندگی می‌تواند از موارد اهمیت این پژوهش باشد. لذا پس از تشخیص رمبنده‌بودن خاک و تعیین پتانسیل رمبندگی، خاک موردنظر برای درصدهای مختلف اختلاط آهک طی زمان‌های عمل‌آوری متفاوت تثبیت شده و آنگاه مشخصات خاک از لحاظ پتانسیل رمبندگی و سایر مشخصات مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مشخصات خاک مورد مطالعه

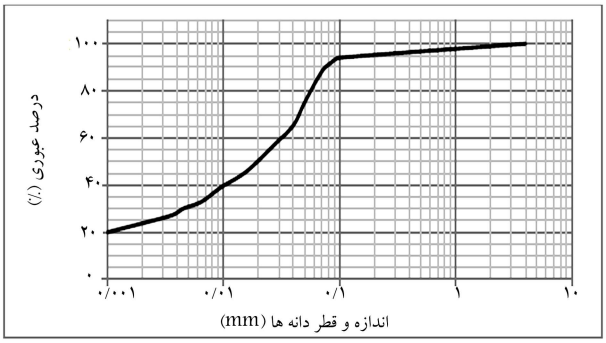
قبل از تهیه‌ی نمونه‌های آزمایش، مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مذکور تعیین شده است، که در ادامه ارائه شده‌اند. کلیه‌ی آزمایش‌های صورت‌گرفته در این پژوهش مطابق استانداردهای مندرج در ASTM انجام شده است. مشخصات حدود اتربرگ نمونه‌ی مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک از نوع CL است. این خاک عمدتاً رس سیلتی و با حالت خمیری کم است. همچنین چگالی ویژه‌ی خاک مورد مطالعه (GS) برابر ۲/۵۹ است. شکل ۱، منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲.۲. درصد رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها

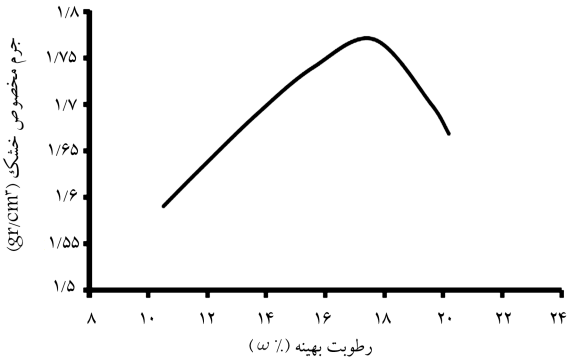
جهت آماده‌سازی خاک برای تهیه‌ی نمونه‌های لازم، ابتدا کلوخه‌های خاک توسط حرکت چکش لاستیکی بر روی خاک خرد و همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شده است، برای یکنواخت‌کردن خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها، خاک از الک شماره‌ی ۱۰ عبور داده شده است. خاک عبوری از الک شماره‌ی ۱۰ به مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شده است، تا کاملاً خشک شود. سپس آزمایش تراکم استاندارد بر روی خاک طبیعی انجام پذیرفته است. شکل ۲، منحنی تراکم خاک مورد استفاده

جدول ۳. حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه.

شاخص خمیری (PI)	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)
۱۰	۲۴/۲	۳۴/۲



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.



شکل ۲. نمودار رطوبت بهینه ـ جرم مخصوص خشک خاک مورد مطالعه.

را نشان می‌دهد، که مطابق آن رطوبت بهینه‌ی خاک ۱۷٫۶۵٪ و جرم مخصوص خشک بیشینه‌ی آن (gr/cm^3) ۱٫۷۸ است.

جهت عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت‌شده، نمونه پس از ساخت درکیسه‌های نایلونی به نحوی نگهداری شده‌اند که در تمام مدت در معرض هوا قرار نگیرند. ضمن آنکه در تمامی مدت عمل‌آوری سعی شده است تا با استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی، دما نیز تا حد امکان کنترل شود.

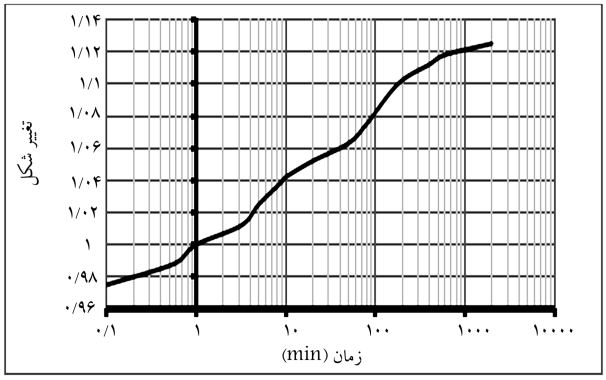
۳.۲. روش اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پتانسیل رمبندگی خاک‌ها وجود دارد، از جمله روش‌های در محل از طریق آزمایش بارگذاری صفحه، روش‌های آزمایشگاهی به‌وسیله‌ی روش سه‌محوری و تحکیم. در این پژوهش از دستگاه تحکیم جهت تعیین پتانسیل رمبندگی خاک قبل و بعد از تثبیت استفاده شده و آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی به‌وسیله‌ی دستگاه تحکیم مطابق با استاندارد ASTM D۵۳۳ انجام شده است. این استاندارد ارائه‌دهنده‌ی روش تعیین مقدار رمبندگی یک بُعدی خاک غیراشباع پس از غرقاب‌شدن است و با توجه به روابط ۲ الی ۴، پتانسیل رمبندگی (I_c) کلیه‌ی نمونه‌ها قبل و بعد از تثبیت تعیین شده است. پس از تعیین پتانسیل رمبندگی با توجه به جدول ۲، رده‌بندی شاخص رمبندگی انجام و درجه‌ی رمبندگی نمونه‌ها قبل و بعد از تثبیت تعیین شده است. از آنجا که در بیشتر پروژه‌های عمرانی مانند سدسازی یا راه‌سازی، خاک در شرایط رطوبت بهینه کوبیده می‌شود تا به جرم مخصوص خشک بیشینه‌ی خود برسد، لذا به همین دلیل در شرایط $\rho_{d\,\max}$ و ω_{opt} نمونه‌یی ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته است. شکل ۳، نمودار تغییرشکل با زمان برای نمونه‌ی ساخته‌شده در این شرایط را نشان می‌دهد.

از نمودار و روابط ذکرشده، میزان پتانسیل رمبندگی نمونه‌ی ساخته‌شده برابر ۱٫۱۲۵ به‌دست آمده است، که در این شرایط درجه‌ی رمبندگی خاک در رده‌ی کم قرار گرفته است.

۴.۲. مشخصات آهک

آهک مورد استفاده از نوع آهک شکفته بوده است که در بسته‌های ۵۰ کیلوگرمی از بازار مصالح شهر یاسوج تهیه شده و در شرکت آزمونه‌ی فولاد اصفهان بر روی آهک مصرفی، آزمایش XRF انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار تغییرشکل ـ زمان برای نمونه‌ی مورد مطالعه.

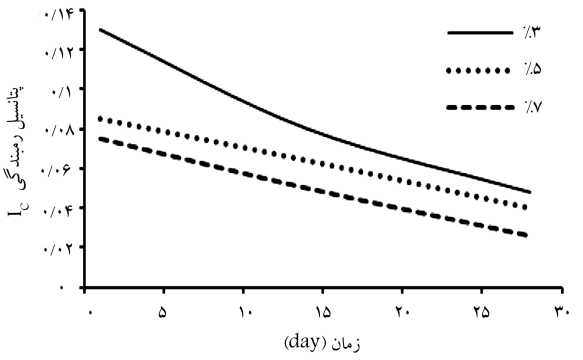
۳. نتایج آزمایش استاندارد تعیین پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک

شکل ۴، نتایج آزمایش تعیین پتانسیل رمبندگی بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت و در شرایط $\rho_{d\,\max}$ و ω_{opt} را نشان می‌دهد.

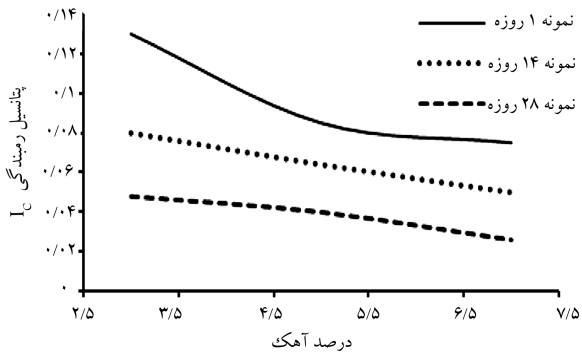
چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری از میزان پتانسیل رمبندگی کاسته شده است. منحنی‌های زمان با پتانسیل رمبندگی نشان‌دهنده‌ی

جدول ۴. نتایج آزمایش XRF بر روی آهک.

ترکیب شیمیایی	میزان موجود در آهک (٪)	ترکیب شیمیایی	میزان موجود در آهک (٪)
Na_2O	۰٫۰۹۴	MnO	۰٫۰۲۷
MgO	۱۲٫۳	Fe_2O_3	۰٫۳۳
P_2O_5	۰٫۰۲۵	Co_3O_4	۰٫۰۰۵
SO_3	۰٫۳۳	CuO	۰٫۰۱۴
Cl	۰٫۰۳۹	ZnO	۰٫۰۰۴
K_2O	۰٫۰۳۱	As_2O_3	۰٫۰۰۹
CaO	۵۷٫۸	SrO	۰٫۰۲۸
TiO_2	۰٫۰۰۹	L.O.I	۲۸٫۸۵
Cr_2O_3	۰٫۰۰۳	-	-



الف) درصد آهک؛



ب) زمان های عمل آوری متفاوت.

شکل ۴. نمودار تغییرات پتانسیل رمبندگی، در شرایط $\rho_{d\,\max}$ و ω_{opt}.

جدول ۵. دسته‌بندی پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تهیه‌شده در شرایط $\rho_{d\,\max}$ و ω_{opt}.

درصد آهک	وضعیت رمبندگی نمونه‌ها		
	نمونه‌ی ۱ روزه	نمونه‌ی ۱۴ روزه	نمونه‌ی ۲۸ روزه
۳	کم	غیررمبنده	غیررمبنده
۵	غیررمبنده	غیررمبنده	غیررمبنده
۷	غیررمبنده	غیررمبنده	غیررمبنده

ادامه‌ی روند کاهش پتانسیل رمبندگی خاک تا ۲۸ روز پس از اصلاح است، هر چند با افزایش درصد آهک از پتانسیل رمبندگی خاک کاسته می‌شود، اما نتایج نشان می‌دهد که به‌خصوص در نمونه‌های ۱ و ۱۴ روزه برای افزایش درصد آهک از ۳ درصد تا ۵ درصد نرخ تغییرات کاهش پتانسیل رمبندگی شدیدتر از حالت افزایش درصد آهک از ۵ درصد تا ۷ درصد است. در صورتی که در اصلاح خاک زمان کافی وجود داشته باشد، نتایج نشان‌دهنده‌ی اصلاح خاک‌های رمبنده با ۳ درصد آهک است، ولی در شرایطی که زمان کافی در اختیار نباشد، توصیه به اصلاح خاک رمبنده با ۵ درصد آهک است.

جدول ۵، نتایج رده‌بندی پتانسیل رمبندگی نمونه‌های تهیه‌شده در شرایط $\rho_{d\,\max}$ و ω_{opt} را نشان می‌دهد.

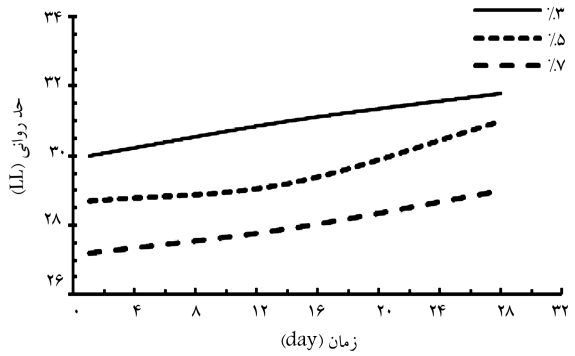
۴. اثر آهک در حدود اتربرگ خاک رمبنده

علت بررسی حدود اتربرگ خاک تثبیت‌شده، اهمیت این پارامتر در تبیین رفتار و خصوصیات خاک است. اصولاً حد روانی در خاک‌های رسی توسط ۳ عامل مهم کنترل می‌شود: ۱. مقاومت برشی بین سطح ذرات، ۲. ضخامت لایه‌ی دوگانه‌ی پراکنشی، ۳. نوع کانی‌های خاک.

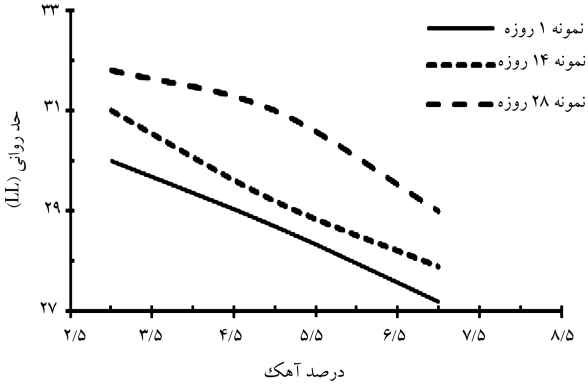
در واقع می‌توان بیان کرد که افزایش مواد تثبیت‌کننده به خاک باعث افزایش نیروهای جاذبه و افزایش تنش مؤثر و در نتیجه افزایش مقاومت بین سطوح و کاهش ضخامت لایه‌ی دوگانه می‌شود، که نتیجه‌ی چنین عملی کاهش PI خاک است. همچنین در مقالات متعدد اشاره شده است که در خاک‌های حاوی کانی‌های کائولونیت و ایلیت هر چند با افزایش مواد شیمیایی تثبیت‌کننده مانند آهک از حد روانی خاک کاسته می‌شود، ولی با زمان عمل‌آوری حد روانی افزایش می‌یابد. توضیح دیگر اینکه واکنش‌های تبادل یونی بزرگ‌ترین عامل در کاهش خصوصیات خمیری خاک‌های ریزدانه است.[۲۵] شکل ۵، تغییرات حد روانی نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت را نشان می‌دهد.

در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، با افزایش درصد آهک از حد روانی کاسته می‌شود، در حالی که با افزایش زمان عمل‌آوری، حد روانی خاک افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۶، با افزایش درصد آهک، شاخص خمیری نیز همانند حد روانی کاسته می‌شود؛ اما با افزایش زمان عمل‌آوری اگر چه حد روانی افزایش می‌یابد، ولی از شاخص خمیری خاک کاسته می‌شود. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت روند افزایشی حد خمیری با زمان نسبت به حد روانی از یک نرخ بیشتر برخوردار است، که این باعث کاهش شاخص خمیری خاک با افزایش زمان می‌شود.

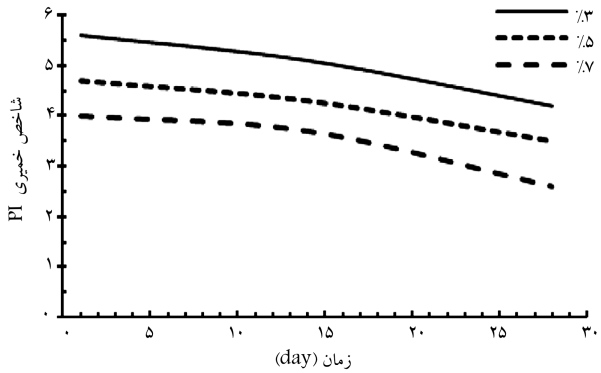


الف) درصدهای مختلف آهک؛

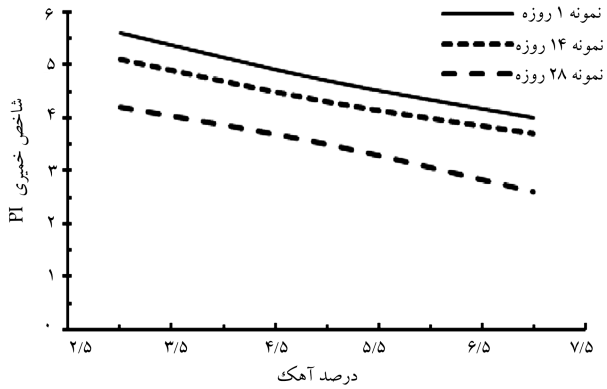


ب) زمان های عمل آوری متفاوت.

شکل ۵. تغییرات حد روانی نمونه‌های تثبیت‌شده.



الف) درصدهای مختلف آهک؛



ب) زمان های عمل آوری متفاوت.

شکل ۶. تغییرات شاخص خمیری نمونه‌های تثبیت‌شده.

۵. بررسی تزریق آهک بر روی مقاومت تک‌محوری خاک رمبنده‌ی مورد مطالعه

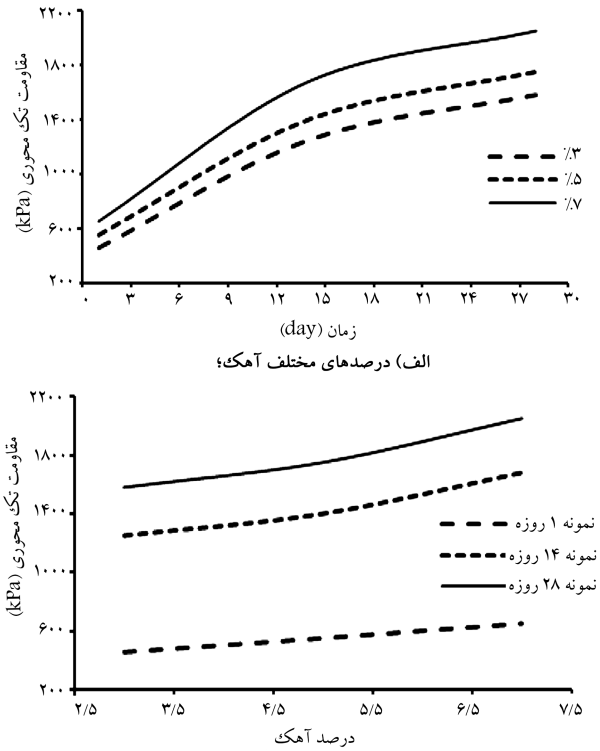
در اثر اضافه‌کردن مواد شیمیایی به خاک واکنش‌های مختلفی به وجود می‌آید، که از جمله‌ی این واکنش‌ها که در مقاومت و دوام خاک تأثیر عمده‌یی دارند، می‌توان به واکنش‌های پوزولانی و هیدراسیون اشاره کرد. مهم‌ترین خصوصیت موردنظر در تثبیت خاک‌های ریزدانه یا دانه‌یی با مواد تثبیت‌کننده‌ی سیمانی، افزایش خاک تثبیت‌شده با زمان است، در حالی که این مقاومت‌ها با پارامترهایی نظیر مقاومت تک‌محوری بررسی می‌شوند. در یک جمع‌بندی می‌توان افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در اثر افزودن مواد تثبیت درکوتاه‌مدت را به واکنش هیدراسیون و در درازمدت را به واکنش پوزولانی ربط داد.[۲۶و۲۷]

شکل ۷، تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف آهک و در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت را نشان می‌دهند. با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابند.

چنانچه از نمودار مقاومت تک‌محوری ـ زمان مشخص است، نرخ تغییرات مقاومت تک‌محوری در ۱۴ روز اول اصلاح بیشتر از نرخ تغییرات بعد از ۱۴ روز است.

۶. آزمایش سه محوری

هدف از این آزمایش بررسی مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه در حالت طبیعی است. این آزمایش بر روی نمونه‌ی دست‌نخورده‌ی خاک طبیعی و به‌صورت CU طبق استاندارد «ASTM D-۲۸۵۰-۹۸» انجام شده است. روش انجام این آزمایش بدین‌صورت است که ابتدا نمونه‌ها را زهکشی می‌کنند تا تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیکی $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ تحکیم یابند، آنگاه در حالی که شرایط زهکشی‌شده حذف می‌شود، تنش عمودی σ_1 را افزایش می‌دهند تا خاک به مرحله‌ی گسیختگی برسد.



الف) درصدهای مختلف آهک؛

ب) زمان های عمل آوری متفاوت.

شکل ۷. تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده.

۱.۶. نحوه‌ی نمونه‌برداری خاک برای آزمایش

با مشاهده‌ی وقوع ترک‌هایی در راستای عمود بر جاده در منطقه و طبق مطالعات قبلی و اطلاعات اولیه‌یی که از خاک منطقه موجود است و همچنین بازدیدهای انجام‌شده از سایت درخصوص وجود پتانسیل رمبندگی در خاک منطقه و همچنین پایین‌بودن رطوبت خاک، خاک منطقه از نظر دست‌خوردگی، حساسیت بالایی دارد. از آنجایی که مطالعات آزمایشگاهی نیازمند نمونه‌ی خاک دست‌نخورده بوده و امکان استفاده از تجهیزات ماشینی برای گرفتن نمونه‌ی دست‌نخورده مهیا نیست، بدین منظور تصمیم بر انجام نمونه‌گیری به روش مونولیتی و با استفاده از جعبه‌ی چوبی ۴۰ × ۴۰ گرفته شده است (شکل‌های ۸ و ۹). در زمان نمونه‌گیری بعد از خاک‌برداری از سطح به‌منظور کنارگذاشتن خاک دست‌خورده و هوازده، جعبه بر روی خاک قرار گرفته و اطراف آن به آرامی خالی شده است. بعد از اطمینان از خالی‌بودن اطراف جعبه و امکان پوش جعبه به داخل خاک، از بالای جعبه و به آرامی جعبه به داخل خاک رانده شده است. بعد از ورود کامل جعبه به داخل خاک، خاک زیر جعبه با اره بریده شده است. برای جلوگیری از تبخیر رطوبت خاک

شکل ۸. نمونه‌گیری با جعبه‌ی ۴۰ × ۴۰.

شکل ۹. پوشاندن روی جعبه‌ی ۴۰ × ۴۰ با پارافین و شمع.

بر روی جعبه‌ی یونولیتی به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر که قبلاً آماده شده بود، قرار گرفته و سپس مایع پارافین و شمع در فضای خالی بین جعبه‌ی چوبی و یونولیت ریخته شده است. همین کار بعد از اتمام طرف بالای جعبه و بعد از برگرداندن جعبه بر روی طرف دیگر آن نیز انجام شده است. در انتها، جعبه داخل کیسه‌ی نایلونی قرار گرفته و به آزمایشگاه حمل شده است. این تذکر لازم است که از دو عمق ۰/۵ و ۱ متر و دو نقطه‌ی مختلف از سطح زمین نمونه‌برداری انجام شده است.

۲.۶. روند تزریق بر روی خاک منطقه‌ی مورد مطالعه

بعد از مطالعات اولیه‌ی آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک، همچنین بعد از تشخیص رمبنده‌بودن خاک منطقه‌ی مورد مطالعه، که در بخش ۲ به آن اشاره شده است، از آهک به علت دسترسی آسان به‌عنوان ماده‌ی تزریقی استفاده شده است. عملیات تزریق به‌صورت تزریق به‌وسیله‌ی لوله‌ی مانشیت و پکر در عمق حدود ۱ متری انجام شده است. ابتدا گمانه‌های تزریق با استفاده از یک اوگر دستی و به قطر ۱۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۱ متر از سطح زمین حفاری شده است. اوگر مذکور به‌وسیله‌ی دسته‌یی که بر روی آن بسته شده بود، می‌چرخید. سر اوگر که به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بود، بعد از پُرشدن بیرون کشیده و خالی شده است. سپس لوله‌ی مانشیت در گمانه قرار گرفته و برای لوله‌ی مانشیت مورد استفاده قطری به‌اندازه‌ی ۷/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

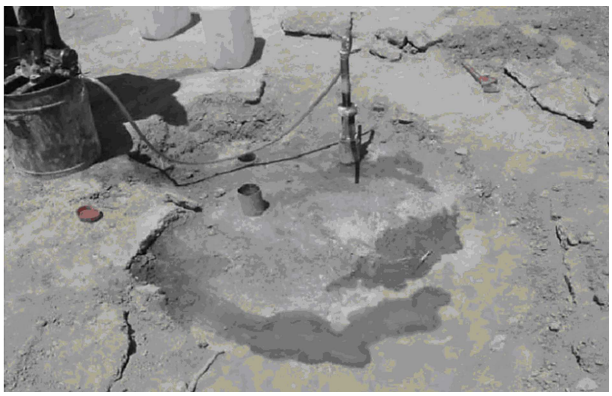
دوغاب تزریقی (مخلوط مواد تزریقی و آب به نسبت ۱ به ۱) آماده و تزریق شده است. نحوه‌ی تزریق هم بدین صورت بوده است که ابتدا پکر بر روی لوله، پک شده و سپس تزریق با فشار اعمالی حدود ۲۵۰-۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. تزریق انجام‌شده به‌صورت تراکمی بوده و بعد از تزریق اولین گمانه، با جابجایی سطحی خاک، شعاع حدودی تزریق مشاهده شده است (شکل ۱۲).

با اطلاع از شعاع تزریق و با استفاده از پیش‌فرض‌ها، مثلث متساوی‌الاضلاعی که مرکز ثقل آن حدوداً دو سوم شعاع تزریق گمانه است، محاسبه و در رئوس آن، گمانه‌های بعدی حفر و سپس تزریق انجام شده است (شکل ۱۳). بعد از گذشت

شکل ۱۰. نحوه‌ی حفر گمانه به وسیله‌ی اوگر.

شکل ۱۱. گمانه‌ی حفرشده و لوله‌ی مانشیت.

شکل ۱۲. لوله‌گذاری در سایت بعد از اولین تزریق.

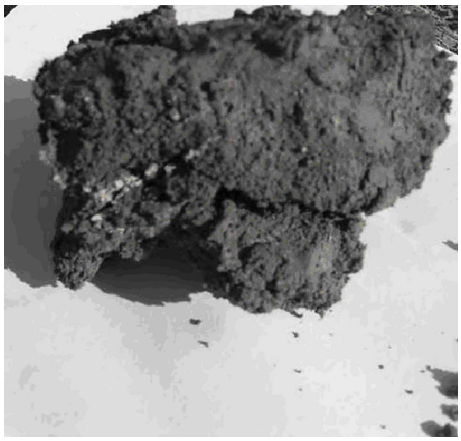


شکل ۱۳. لوله‌گذاری در سایت بعد از اولین تزریق.

۲۸ روز و در دمای ۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد، نمونه‌گیری انجام و اخذ نمونه‌ها به‌صورت دست‌نخورده و به روش مونولیتی انجام شده است.

۳.۶. نمونه‌گیری بر روی خاک تزریق‌شده

بعد از تزریق و گذشت ۲۸ روز از انجام عملیات تزریق در محل، از وسط مثلث تزریق‌شده، نمونه‌های دست‌نخورده برای آزمایش‌های تحکیم مضاعف و سه‌محوری گرفته شده است (شکل ۱۴). این نمونه‌ها به‌صورت کلوخه بوده و از عمق ۰/۵ متری گرفته شده است. قطر نمونه‌های آزمایشی در آزمایش تحکیم و سه محوری ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع آنها ۷۶ میلی‌متر است.



شکل ۱۴. نمونه‌ی گرفته‌شده بعد از تزریق آهک.

جدول ۶. نتایج تحکیم نمونه‌ی شماره‌ی ۱ خاک تزریق‌شده با آهک.

Gs	C_c	C_s	$\omega_0(\%)$	e_f	e_0
۲٫۵۹	۰٫۲۱	۰٫۰۵۹	۵	۰٫۴۶	۰٫۷۹

جدول ۷. نتایج تحکیم نمونه‌ی شماره‌ی ۲ خاک تزریق‌شده با آهک.

Gs	C_c	C_s	$\omega_0(\%)$	e_f	e_0
۲٫۵۹	۰٫۲۲	۰٫۰۶۱	۶	۰٫۴۴	۰٫۷۵

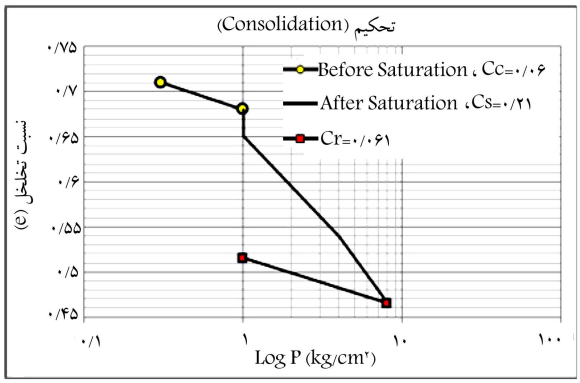
۴.۶. نتایج آزمایش تحکیم خاک بعد از تزریق

نتایج آزمایش‌های تحکیم نمونه‌ی شماره‌ی ۱ خاک تزریق‌شده با آهک: مقدار شاخص فشردگی (C_c) نمونه‌ها ۰٫۲۱-۰٫۲۵ است و مقدار شاخص باربرداری (C_s)، بین ۰٫۰۵۹ تا ۰٫۰۶۲ قرار دارد. در آزمایش تحکیم مضاعف، که بر روی خاک طبیعی انجام شده است، تخلخل آن تغییراتی از ۰٫۷۵ تا ۰٫۸۱ را نشان داده است (جدول ۶).

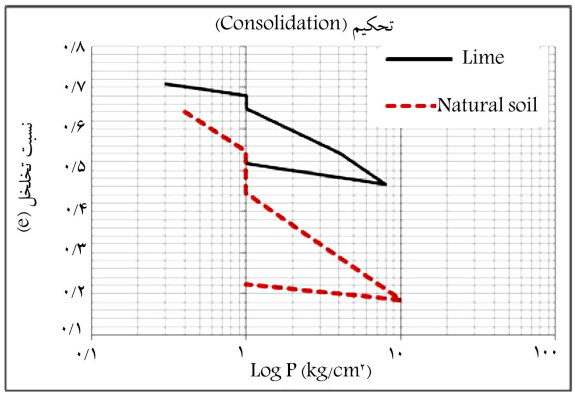
که در آن، e_0 نسبت تخلخل اولیه‌ی نمونه و e_f نسبت تخلخل پس از پایان تحکیم نمونه هستند. شیب نمودار تحکیم قبل از اشباع‌شدن ۰٫۰۶ بوده است، که بعد از اشباع‌شدن نمونه به ۰٫۲۱ افزایش یافته است. میزان نشست خاک بعد از اشباع‌شدن ۰٫۰۳۶ سانتی‌متر بوده است (شکل ۱۵).

مطابق شکل ۱۵، نمونه‌ی تزریق‌شده حدود ۷۰٪ کاهش تخلخل در اثر اشباع‌شدن داشته است، که حاکی از کاهش چشم‌گیری در میزان رمبندگی این نمونه‌ی خاک تزریق‌شده با آهک است. همچنین شیب نمودار هم قبل و هم بعد از اشباع‌شدن کاهش یافته است.

نتایج تحکیم نمونه‌ی شماره‌ی ۲ خاک تزریق‌شده با آهک ، که در آن، e_0 نسبت تخلخل اولیه‌ی نمونه و e_f نسبت تخلخل پس از پایان تحکیم نمونه هستند.(جدول ۷) شیب نمودار تحکیم قبل از اشباع شدن ۰٫۰۵۸ بوده است، که بعد از اشباع‌شدن نمونه به ۰٫۲۲ افزایش یافته است. میزان نشست خاک بعد از اشباع‌شدن ۰٫۰۳۱ سانتی‌متر بوده است (شکل ۱۶). مطابق شکل ۱۶، نمونه‌ی تزریق‌شده حدود ۷۰٪ کاهش تخلخل در اثر اشباع‌شدن داشته است، که حاکی از کاهش چشم‌گیری در میزان رمبندگی این نمونه‌ی خاک تزریق‌شده با آهک است.

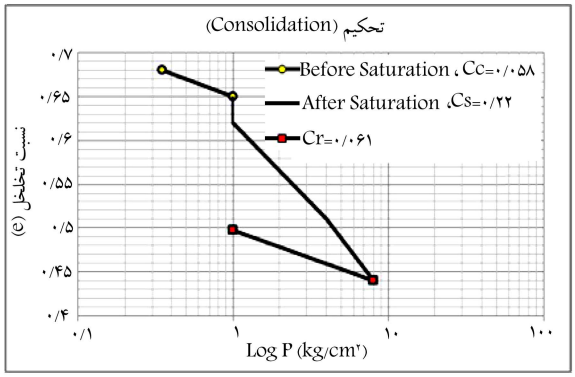


الف) تزریق شده با آهک؛

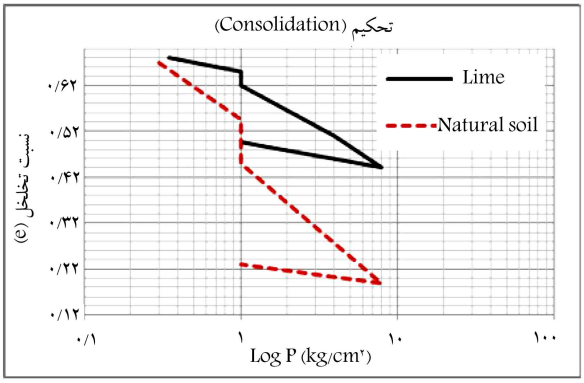


ب) خاک طبیعی و آهک.

شکل ۱۵. نمودار تحکیم نمونه‌ی ۱.



الف) تزریق شده با آهک؛



ب) تزریق شده با آهک و خاک در حالت طبیعی.

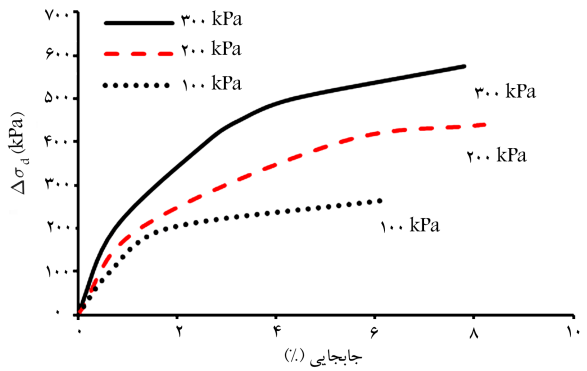
شکل ۱۶. نمودار تحکیم نمونه‌ی ۲.

۷. نتایج آزمایش سه محوری بعد از تزریق

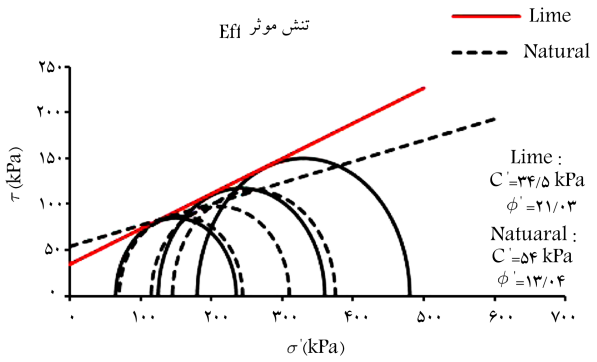
نتایج آزمایش تحکیم‌یافته‌ی زهکشی‌نشده (CU) برای خاک تزریق‌شده با آهک در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ و جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

۸. اثر تزریق آهک در خصوصیات مقاومت برشی خاک

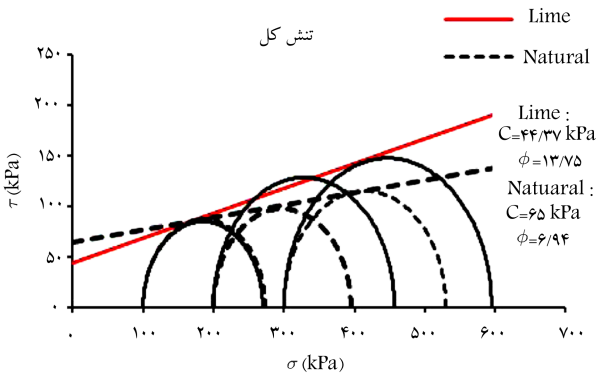
با توجه به جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که پارامترهای مقاومت برشی خاک پس از تزریق بهبود یافته‌اند و مقدار ϕ_u بعد از تزریق تقریباً ۲/۱۵ و پارامتر ϕ'، ۱/۶۲



شکل ۱۷. نمودار تغییرات تنش ـ کرنش آزمایش سه محوری خاک تزریق‌شده با آهک.

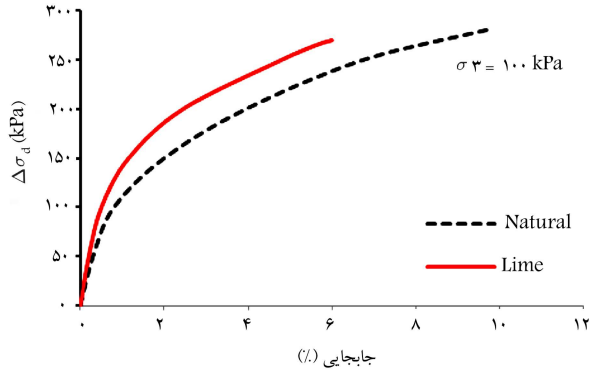


الف) تنش موثر؛

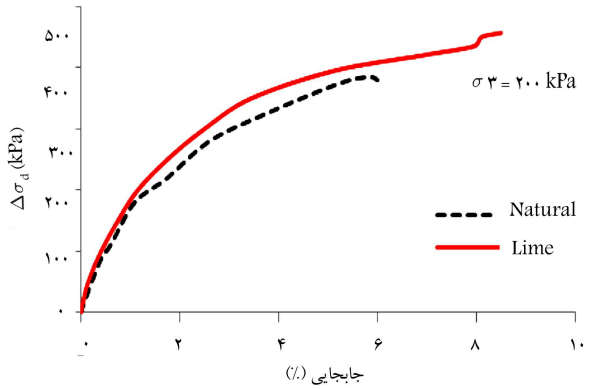


ب) تنش کل.

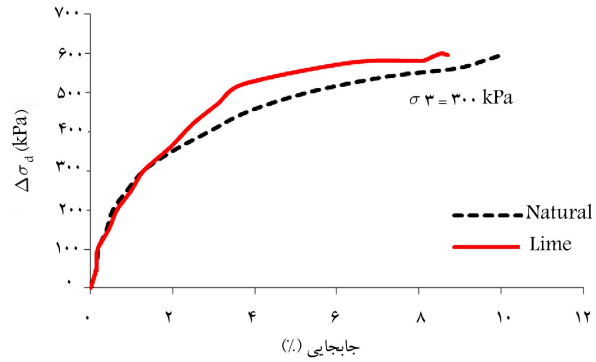
شکل ۱۸. رسم دایره‌های موهر و ترسیم پوش گسیختگی آزمایش سه محوری خاک تزریق‌شده با آهک (خط توپر) و خاک طبیعی (خط چین).



الف) σ_3=۱۰۰ kPa



ب) σ_3=۲۰۰ kPa



ج) σ_3=۳۰۰ kPa

شکل ۱۹. نمودارهای تنش ـ کرنش آزمایش سه محوری خاک تزریق‌شده با آهک (خط توپر) و خاک طبیعی.

جدول ۸. داده‌های اولیه‌ی آزمایش سه محوری نمونه‌ی خاک تزریق‌شده با آهک.

درجه‌ی اشباع اولیه (٪)	رطوبت اولیه (٪)	چگالی خاک (gr/cm^3)
۳۲/۹۵	۹	۱/۴

جدول ۹. نتایج آزمایش‌های سه محوری خاک تزریق‌شده با آهک.

C_u (kg/cm^2)	ϕ_u (درجه)	C' (kg/cm^2)	ϕ' (درجه)
۰/۴۴۳۷	۱۳/۷۵	۰/۳۴۵	۲۱/۰۳

جدول ۱۰. مقایسه‌ی پارامترهای مقاومت برشی خاک طبیعی و خاک آهکی.

نوع خاک	ϕ' (درجه)	C' (kg/cm^2)	ϕ_u (درجه)	C_u (kg/cm^2)
طبیعی	۱۳٫۰۴	۰٫۵۴	۶٫۹۴	۰٫۶۵
آهک	۲۱٫۰۳	۰٫۳۴۵	۱۳٫۷۵	۰٫۴۴۳۷

برابر شده است. ثابت‌بودن تنش‌ها در هر دو آزمایش حالت طبیعی و حالت تزریق، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک را به همراه داشته است، که نشان از بهبود رفتار خاک پس از تزریق دارد.

۹. نتیجه‌گیری

برای اصلاح خاک‌های رمبنده روش‌های مختلفی از جمله تثبیت با مواد افزودنی و خاک‌برداری و تراکم مجدد بررسی شده و در نهایت تصمیم به اشباع‌کردن و بارگذاری خاک و انجام آزمایش‌های تحکیم مضاعف و سه محوری بر روی نمونه‌های مورد بررسی گرفته شده است. نتایج کلی در این پژوهش را می‌توان به این صورت جمع‌بندی و خلاصه کرد:

۱. به‌طورکلی اضافه‌کردن آهک به خاک باعث افزایش مقاومت و ظرفیت باربری و نیز کاهش نرمی خاک می‌شود.

۲. افزایش آهک به خاک سبب کاهش پتانسیل رمبندگی خاک می‌شود، ضمن آنکه با افزایش زمان عمل‌آوری، از میزان رمبندگی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک کاسته می‌شود.

۳. در صورت در دسترس‌بودن زمان کافی در حدود ۱۴ روز به نظر می‌رسد اختلاط خاک با ۳٪ آهک به نحو مناسبی مشکل رمبندگی خاک را برطرف کند، اما چنانچه زمان کافی وجود نداشته باشد، ۵٪ آهک می‌تواند مشکل رمبندگی را برطرف کند.

۴. با افزایش درصد آهک از میزان حد روانی و شاخص خمیری خاک کاسته می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، بر میزان حد روانی خاک افزوده و از شاخص خمیری آن کاسته می‌شود.

۵. با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد، که می‌توان این افزایش مقاومت در اثر افزودن مواد تثبیت در کوتاه‌مدت را به واکنش هیدراسیون و در درازمدت به واکنش پوزولانی ربط داد.

۶. نتایج آزمایش سه محوری CU انجام‌شده بر روی نمونه‌های خاک طبیعی نشان می‌دهد که به علت تخلخل بالا و چگالی اولیه‌ی کم، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در حالت طبیعی بسیار کم است؛ اما پس از انجام تزریق، افزایش قابل ملاحظه‌یی در مشخصات مقاومت برشی خاک ایجاد شده است.

۷. پارامترهای مقاومت برشی خاک پس از تزریق بهبود یافته و مقدار ϕ_u بعد از تزریق تقریباً ۲٫۱۵ برابر شده و مقدار ϕ' ، ۱٫۶۲ برابر شده است. ثابت‌بودن تنش‌ها در هر دو آزمایش حالت طبیعی و حالت تزریق، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی خاک را به همراه داشته است، که نشان از بهبود رفتار خاک پس از تزریق دارد. همچنین نمودارهای تنش ـ کرنش خاک‌های طبیعی و تزریق‌شده نشان می‌دهد که با ثابت‌ماندن تقریبی سطح تنش، رفتار خاک بهبود می‌یابد و اثرات آن در افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و کم‌شدن چسبندگی خاک مشاهده می‌شود.

منابع (References)

1. Rezaei, M. and Ajel Loueiyan, R. "Study swelling potential of clay minerals", *4th Student Conference on Geological* (2003).
2. Askari, F. and Fakher A. "Soil swelling and divergence of Soils", Tehran University, pp. 245-247 (1993).
3. Derbyshire, E. "Geological hazards in loess terrains with particular reference to the loess regions of china", *Earth Science, Reviews*, **54**(1-3), pp. 231-260 (2001).
4. Fookes, P.G. and Best, R. "Consolidation characteristics of some late Pleistocene periodical metastable soils of east kent", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **2**, pp. 103-128 (1969).
5. Feda, J. "Structural stability of subsidence loess soils from Praha–Dejvice", *Engineering Geology*, **1**, pp. 201-219 (1966).
6. Feda, J. "Collapse of loess upon wetting", *Engineering Geology*, **25**(2-4), pp. 263-269 (1988).
7. Denisov, N.Y. "About the nature of high sensitivity of Quick clays", *Osnov. Fudam. Mekh. Grunt.*, **5**, pp. 5-8 (1964).
8. Handy, R.L. "Collapsible loess in Iowa", *Soil Sei. Amer. Proc.*, **37**, pp. 281-284 (1973).
9. Houston, S.L., Houston, W.N. and Spadola, D.J. "Prediction of field collapse of soils due to wetting", *J. of Geot. Engineering Division, ASCE*, **114**(1), pp. 40-58 (1988).
10. Clevenger, W.A. "Experiences with loess as a foundation material", *Transactions American Society for Civil Engineers*, **123**(1), pp. 51-80 (1959).
11. Gibbs, H.J. and Bara, J.P. "Predicting surface subsidence from basic soil tests", *ASTM Spec. Tech. Pub.*, **322**, pp. 231-246 (1962).
12. Jennings, J.E. and Knight, K. "A guide to construction or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure", *6th Regional Conference for Africa on Soil Menchanics and Foundation Engineering*, Durban, South Africa, pp. 99-105 (September 1975).
13. ASTM: D5333-03, Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils (2003).
14. Gibbs, H.J. and Bara, J.P. "Stability problems of collapsing soil", *Proceeding American Society for Civil En-*

gineering, Journal of the Soil Menchanics Foundation Division, **93**(4), pp. 572-594 (1967).

15. Bell, F.G., *Engineering Properties of Soil and Rocks*, 3rd Edn., Oxford, U. K., Butter worth-Heinemann, 345 p. (2002).

16. Penglly, A., Boehm, D., Rector, E. and Welsh, J. "Engineering experience with in- situ modication of collapsible and expansive soils", Unsaturated Soil Engineering, ASCE, Special Geotechnical Publication (1997).

17. Reddy, B.V. "Cement stabilized rammed earth. Part A: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilized soils", *Materials and Structures,* **44**(3), pp. 681-693 (2011).

18. Harichane, Kh., Ghrici, M. and Kenai, S. "Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: A preliminary study", *Environmental Earth Sciences*, **66**(8), pp. 2197-2205 (2012).

19. Kavoussi, B. and Hashemian, L. "Study soil stabilization using of lime at paris airport", *First Conference on Earth Improvement,* Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2001).

20. Makarchian, M. and Naderi, H. "Effects of soil moisture on CBR resistance stabilized with lime and steel furnace slag (GGBS) in the presence of sulfate", *The 5th National Congress on Civil Engineering,* Ferdowsi University, Mashhad, Iran (2010).

21. Pashabavandpoori, M.A. "Pozzolan impact on inflation and compression properties of clay stabilized with lime exposed to sulfate", *The 6th National Congress on Civil Engineering,* Semnan University, Semnan, Iran (2011).

22. Farzaneh, A. and Mosadegh, A. "Experimental investigation of soil stabilization to Kerman - Zangyabad using four lime, ZAM I, ZAM II and RRP", *Journal of Civil and Surveying Engineering, Faculty of Engineering*, **45**(1), pp. 23-33 (2011).

23. Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M. and McMahon, P. "Impact of carpet waste fibre addition on swelling properties of compacted clays", *Geotechnical and Geology Engineering,* **31**, pp. 173-182 (2012).

24. Tadayoun, F., *Geotechnical Design of Soil Collapse and The Importance of the Dams Foundation*, Iranian National Committee on Large Dams, 64 p. (1999).

25. Sherwood, P.T., *Soil Stabilization with Cement and Lime*, State of the at Review, HMSO, London, UK (1993).

26. Martin, P. Rollings, Reymond S., Rollings and J. Pete Burkes "Sulfate attack on cement stabilized soil", *Journal of geotechnical and Geoenviormental Engineering, ASCE*, bf 125(5), pp.364-372 (1999).

27. Jagannath, M., Harold, P. and Kelly, L. "Consideration of lime- stabilized layer In mechanistic- empirical pavement design", The National Lime Association, 200 North Glebe Road, Arlington, Virginia 22203 (2004).