

## اثر افزایش آهک بر خصوصیات تحکیمی خاک‌های رسی-گچی

فاطمه بهروزی<sup>۱\*</sup> و جواد احدیان<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز [Fa.behroozi66@gmail.com](mailto:Fa.behroozi66@gmail.com)

۲- استادیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۷

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۴

### چکیده

شبکه آبیاری و زهکشی مارون در جنوب شرق استان خوزستان واقع شده و در بیشتر بخشها دارای خاک‌های گچی است. در این تحقیق با توجه به تخریب‌های موجود در شبکه که در اثر زیرشویی و انحلال خاک رخ داده بود از محل‌های تخریب شده نمونه برداری گردید. با توجه به آزمایش‌های متعدد فیزیکی، شیمیایی و مقاومتی خاک، مشخص شد عمده‌ترین عوامل تخریب ناشی از شرایط ژئوتکنیکی خاکریز کانالها نظیر تورم و وجود املاحی نظیر گچ یا ماسه در آن می‌باشد. در این تحقیق با در نظر گرفتن ویژگی‌های آهک، از این ماده جهت بهسازی خاک مورد مطالعه، با عیارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب خاک استفاده و آزمایش تحکیم به منظور بررسی تاثیر آن بر خصوصیات مکانیکی و تحکیمی خاک رسی-گچی انجام گردید. نتایج به طور کلی نشان داد که تمام عیارهای ذکر شده در کاهش ضریب تحکیم خاک مورد مطالعه، تاثیر بسزایی داشته‌اند؛ به طوری که، در عیار ۱۰۰ مشخص شد که ضریب تحکیم در بیشترین مقدار ۵۰ برابر و در کمترین مقدار ۴ برابر کاهش می‌یابد. به علاوه نتایج نشان داد که در عیار آهک ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هر مترمکعب در اولین مرحله بارگذاری، زمان مورد نیاز برای ۵۰ درصد تحکیم ۲۶ برابر این زمان در نمونه شاهد خاک منطقه است. همچنین نتایج نشان داد که در عیار ۵۰ کیلوگرم در هر مترمکعب، شاخص فشردگی، ۱۸۰ برابر نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. از طرفی، شاخص تورم‌پذیری در نمونه‌های بهسازی شده نیز از نمونه شاهد کمتر بدست آمد. در بیشترین میزان برای عیار آهک ۵۰، این شاخص ۷ برابر کاهش یافت.

کلید واژه‌ها: آهک، خاک‌های گچی، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، خصوصیات تحکیمی.

## Effect of Adding Lime to the Consolidation Properties of Clay – Gypsum Soils

Behroozi. F.<sup>1</sup> and Ahadiyan. J.<sup>2</sup>

1- M.Sc student in Hydraulic Structure of Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

2- Assistant Professor in Hydraulic Structure of Shahid Chamran University (SCU), Ahvaz, Iran.

Received: 24Dec2012

Accepted: 28May2013

### Abstract

Maroon irrigation and drainage network is located in the south east of Khuzestan province of Iran where the most regions the soils are chalky. In this research, the very specimens were gathered in the destroyed canal locations of existing irrigation network. Then, the various engineering tests were performed to determine of the physical, chemical and mechanical properties of the soil samples. The results showed that often destruction have occurred due to poor geotechnical condition of embankment such as swelling and dissolving of gypsum soils. In this research, the lime was used to rehabilitation of problematic soils which the content of lime in per cubic meter was 50, 100 and 200 kg. The consolidation tests were performed in order to investigate of mechanical properties of clay-gypsum soils. Findings showed that all contents have a significantly effect on decreasing the rate of soil consolidation. So that the calculations showed that at the maximum and minimum

cases, the consolidation coefficient decreases to 50 and 4 times for 100 kg content of lime respectively. Moreover, findings showed that the 50% time of consolidation in the first loading, increases to 26 times rather than natural soil of zone for 50 and 100 kg content of lime. In addition, the results showed that the compression index 180 times decreased for 50 kg content of lime. While, the swelling index in rehabilitated samples were smaller than the natural soils also. For 50 kg content of lime, this index decreased to about 7 times.

**Keywords:** limestone, gypsum, soils, irrigation systems and drainage, consolidation.

### مقدمه

سازه‌هایی که بار وارده از آنها به پی زیاد نمی‌باشد استفاده نمود (۱۸). نوآیوو و اسینوبی<sup>۲</sup> مطالعاتی در مورد تاثیر افزایش آهک بر روی خصوصیات تراکم و مقاومت محوری مخلوط خاک رس و آهک انجام دادند. این محققین به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان تأخیر در تراکم کردن نمونه‌ها، رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها کاهش می‌یابد (۲۱). اسینوبی در مورد تأثیر نیروی تراکم و افزایش آهک و خاکستر حاصل از زباله‌های یک کارخانه نظامی بر روی مقاومت خاک رس منطقه گرمسیری، مطالعاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که بیشترین مقاومت برای نمونه ۷ روزه با نسبت ۷/۵ درصد خاکستر حاصل از زباله و ۸ درصد آهک بدست می‌آید (۲۲). دیگرمنسی و همکاران<sup>۳</sup> اثر گچ حاوی فسفر، سیمان، خاکستر آتشفشان را بر پایداری خاک بررسی نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که افزودن این مواد باعث کاهش شاخص خمیری خاک می‌شود (۱۷). کومار و همکاران<sup>۴</sup> در مورد تاثیر خاکستر آتشفشان، آهک و فیبرهای پلی‌استر بر روی خصوصیات تراکم و مقاومتی خاک‌های متورم شونده مطالعاتی انجام دادند (۲۰). ژانگ و سالیز<sup>۵</sup> مطالعاتی در مورد خاک گچی بهسازی شده با خاکستر بادی انجام دادند. آنها آزمایش‌هایی قبل و بعد از افزودن ماده مورد نظر انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که خواص مهندسی این خاک مسئله‌دار به علت افزایش جرم حجمی خشک، کاهش پتانسیل تورم‌زایی و همچنین افزایش مقاومت برشی آن تا حد رضایت‌بخشی بهبود می‌یابد (۲۷). ایلماز و سولکوکلو<sup>۶</sup> پس از انجام مطالعاتی در مورد پایداری خاک‌های رسی متورم شونده به این نتیجه رسیدند که گچ می‌تواند تأثیر بسزایی بر پایداری این نوع خاک‌ها داشته باشد (۲۶). ونگ و همکاران<sup>۷</sup> در هنگ کنگ مطالعاتی بر روی تراکم استاتیکی و دینامیکی خاک گرانیتی، جهت بهبود رفتار این نوع خاک انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تراکم دینامیکی ۲ تا ۵ برابر موثرتر از تراکم استاتیکی می‌باشد که این مقدار بستگی به فرکانس و دوره تناوب تراکم دینامیکی دارد (۲۵). چای و

گچ یکی از نمک‌های محلول بوده که می‌تواند تأثیر بسزایی بر ساختمان‌ها و سازه‌های آبی داشته باشد. چنانچه خاک‌های گچی در تماس با آب باشند، دچار انحلال گشته و ممکن است مشکلات زیادی را برای سازه به وجود آورد. با توجه به این موضوع و نیز با توجه به توسعه فعالیت‌های عمرانی، مشکلات ناشی از استفاده خاک‌های گچی به‌عنوان مسئله‌ای مهم در ساخت سازه‌های آبی مطرح می‌باشد و تثبیت این خاک‌ها می‌تواند از نظر اقتصادی در بسیاری از پروژه‌ها به خصوص پروژه‌های آبی مقرون به صرفه باشد. در نظر گرفتن راهکارهای ساخت سازه‌ها در خاک‌های مسئله‌دار موجب پیشگیری از بوجود آمدن خسارهای احتمالی و نیز ترمیم و یا تثبیت سازه‌های موجود ساخته شده بر روی این‌گونه خاک‌ها خواهد شد (۷). وجود مواد انحلال‌پذیر نظیر نمک طعام و گچ موجب می‌شود تا بر اثر تماس این خاک‌ها با آب، مواد مذکور در آب حل شده و قسمتی از ذرات جامد موجود در توده خاک ضمن انحلال خارج شوند. این پدیده در صورت تداوم می‌تواند موجب افزایش تخلخل و پوک شدن خاک گردیده و نهایتاً با ایجاد نشست، موجب تخریب ساختمان خاک و فروریزش خاک شود (۳). باید توجه داشت که بهسازی خاک با استفاده از مواد افزودنی باید با درصد معینی از مواد بهسازی صورت پذیرد. استفاده از درصدهای بیشتر مواد افزودنی ممکن است کاهش مقاومت خاک را به همراه داشته باشد (۴). احدیان در تحقیقی به بررسی ضریب فشردگی خاک‌های منطقه اهواز پرداخت. در تحقیق وی، از مناطق مختلف شهر اهواز نمونه دست نخورده تهیه گردید و ضریب فشردگی از طریق آزمایش تحکیم و بازسازی نتایج آن به منحنی‌های بکر صحرایی تخمین زده شد. نتایج وی نشان داد که ارتباط بین شاخص فشردگی و نسبت پوکی اولیه خاک بیشترین همبستگی آماری را داراست (۲). علیزاده، برای تثبیت رمبندگی خاک تحقیقاتی انجام داد. بر اساس نتایج تحقیق وی تزریق برجای خاک موثرتر از سایر روش‌ها جهت تثبیت می‌باشد (۶). هاموند<sup>۱</sup> در مورد بهسازی و افزایش مقاومت خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک مطالعاتی را انجام داد. ایشان به این نتیجه رسید که مقاومت مخلوط خاک رس و آهک به حدی است که می‌توان از آن جهت عملیات خاک‌برداری کانال‌ها، تثبیت شیب جانبی کانال‌ها و همچنین جهت پی‌سازی در

2- Nwaiwu and Osinubi

3- Degirmenci *et al.*

4- Kumar *et al.*

5- Zhang and Solis

6- Yilmaz and Civelekoglu

7- Wang *et al.*

1- Hammond

افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های تعمیرات و نگهداری شبکه‌های آبیاری و کاهش راندمان سالیانه انتقال آب این تأسیسات می‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده یافتن راه‌حلی برای بهبود خاک‌های گچی برای جلوگیری از تخریب سازه‌های احداث شده بر روی آنها و مخصوصاً شبکه‌های آبیاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق با توجه به ویژگی‌های ذکر شده برای آهک، این ماده به عنوان ماده افزودنی انتخاب گردید و آزمایش‌های تعیین درصد رطوبت، تعیین دانه‌بندی، تعیین حدود اتربرگ، تعیین چگالی نسبی، تراکم، آنالیز شیمیایی خاک برای یافتن درصد گچ موجود و آزمایش تحکیم برای خاک شاهد و نمونه‌های تهیه شده با عیار ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ انجام گردید. در این آزمایش خاک شاهد از منطقه جایزان، که مختصات این منطقه در مختصات یوتی‌ام<sup>۵</sup>، ۳۰۵۲۳۰۴۳+ و ۴۹۵۱۱۱۵۶+ می‌باشد، تهیه گردید. لازم به ذکر است که در حالت استاندارد و برای خاک‌های معمولی برای خشک کردن نمونه‌ها از دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. در مورد گچ و خاک‌های گچی چنان‌چه از این دما استفاده شود، گچ با از دست دادن آب تبلور خود به سولفات کلسیم نیمه آبدار تبدیل می‌شود و این آب از دست رفته نیز جزء رطوبت خاک تلقی می‌شود که می‌تواند خطای زیادی را در تعیین درصد رطوبت ایجاد کند. با بررسی‌هایی که در این زمینه انجام شد و با توجه به ریزدانه بودن خاک مورد مطالعه در این تحقیق، رابطه (۱) که در تحقیق تاتالاری (۳) استفاده شده است، برای تعیین درصد رطوبت خاک گچی استفاده شد.

$$W = 1.007w^{60} + 0.007 \quad (1)$$

در این رابطه W درصد رطوبت در دمای استاندارد ۱۰۵ درجه و  $w^{60}$  درصد رطوبت در دمای ۶۰ درجه می‌باشد. در این تحقیق نیز جهت اندازه‌گیری رطوبت بهینه از رابطه (۱) استفاده گردید. برای دانه‌بندی خاک مورد مطالعه در این تحقیق، با توجه به ریزدانه بودن این خاک از آزمایش هیدرومتری استفاده گردید. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D421 و ASTM D422 انجام گردید (۱۰ و ۹). حالت پلاستیسیته برای خاک‌های رسی و لای تعریف می‌شود و قابلیت تغییر شکل یافتن بدون خرد شدن خاک است. برای بررسی پلاستیسیته از آزمایش حدود اتربرگ استفاده می‌شود. حدود اتربرگ، میزان رطوبت مطابق با رفتار متفاوت رس‌ها و لای‌ها می‌باشد. این حدود شامل حد روانی<sup>۶</sup>، حد خمیری<sup>۷</sup> و حد انقباض<sup>۸</sup> است. آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ شامل، تعیین حد روانی (LL)، طبق ASTM D423، تعیین حد خمیری (PL)، طبق ASTM D424 و تعیین حد انقباض طبق

همکاران<sup>۱</sup>، در آزمایش‌های خود از نوعی مخروط نفوذ سنج جدید استفاده کرده و با شبیه سازی میزان تغییرشکل مخروط نفوذ در مقابل تغییرات فشار آب منفذی، مقدار ضریب تحکیم افقی را پیش بینی نموده و نشان دادند که این شیوه دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد (۱۶). پله و لی<sup>۲</sup> به بررسی اثر الیاف پلی پروپیلن بر بهبود رفتار مکانیکی رس سیلتی پرداختند. پس از انجام آزمایش کشش و آزمون تراکم، بهبود مقاومت خاک در رس سیلتی تقویت شده با این نوع الیاف مشاهده گردید (۲۳). هورپیبولسوک و همکاران<sup>۳</sup> در تحقیقی به بررسی رفتار نشست رس نرم در اثر استفاده از سیمان پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از سیمان تاثیر بسیاری در بهبود ضریب تحکیم این نوع خاک داشته است به طوری که، تحقیق آنها توسط مدل دوبعدی Plaxis کنترل گردید (۱۹). اصلاح عملکرد یا تثبیت خاک به طور کلی برای دستیابی به افزایش مقاومت، تغییر نفوذپذیری و پیشگیری از نشست انجام می‌شود. از جمله موادی که برای تثبیت و یا بهسازی خاک کاربرد بسیار دارد آهک است. از آنجایی که اکثر خاک‌ها دارای ترکیبات سیلیکا و آلومین سیلیکا هستند، افزایش مقداری آهک زنده (CaO) یا آهک شکفته  $(Ca(OH)_2)$  و آب، برای به وجود آوردن یک ترکیب پایدار، بسیار موثر است. تجربه نشان داده است که انواع خاک رس با آهک زنده و یا شکفته ترکیبی تولید می‌کنند که خواص آنها مانند خواص ترکیبات سیمانی است. اصول ترکیبات شیمیایی براساس ترکیب رس پوزولانی و آهک در مجاورت آب اتفاق می‌افتد به این ترتیب که یون مثبت تغییر می‌کند و ذرات خاک به صورت توده ای بهم پیوسته در می‌آید و پس از آن واکنش پوزولانی<sup>۴</sup> یا سیماناسیون صورت می‌پذیرد یا کربناسیون رخ می‌دهد (۸). از این‌رو، تحقیق حاضر به بررسی اثر استفاده از آهک بر روی خواص تحکیمی خاک‌های رسی - گچی می‌پردازد.

## مواد و روش‌ها

شبکه آبیاری بهبهان در چارچوب طرح توسعه بهره برداری از منابع آب رودخانه مارون در دهه ۶۰ توسط سازمان آب و برق خوزستان و در جنوب شرقی استان خوزستان احداث شد. کانال اصلی بخش شمالی دشت با نام کانال A مساحتی نزدیک به شش هزار هکتار را پوشش می‌دهد. این کانال در طول بهره برداری با مسایل جابجایی، نشست و شکستگی بتن پوشش رو به رو بوده و در موارد متعدد جریان آب در آن قطع گردیده است. کانال A به طول ۲۰ کیلومتر از منطقه‌ای گچی عبور می‌نماید. عبور چنین سازه‌های بزرگی از مناطق گچی باعث نشت شدید آب از سازه، نشست قابل ملاحظه و شکستگی بدنه کانال و در نتیجه

5- UTM System  
6- Liquid Limit  
7- Plasticity Limit  
8- Shrinkage Limit

1- Chai *et al.*  
2- Ple and Le  
3- Horpibulsuk *et al.*  
4- Pozzolan

برآورد می‌شود. ضرایب یاد شده شیب این خطوط بوده که پس از ترسیم منحنی  $e - \log \sigma$  برآورد می‌گردند. چنانچه  $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$  باشد، نشست ناشی از تحکیم اولیه در خاک از هر دو قسمت منحنی تحکیم صحرایی به دست می‌آید. در این حالت مقدار نشست از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (4)$$

که در آن  $\Delta\sigma'$ : مقدار تنش مؤثر سربار بر روی لایه خاک و  $\sigma'_0$ : فشار مؤثر یا تنش مؤثر درجا،  $e_0$ : نسبت پوکی اولیه،  $H$ : ارتفاع لایه خاک و  $S_c$ : مقدار نشست می‌باشد که بخش اول در سمت راست معادله یاد شده به قسمت اول منحنی تحکیم صحرایی، موازی با منحنی بازگشت صحرایی است و بخش دوم آن به قسمت دوم منحنی تحکیم، به صورت خطی است، مربوط می‌شود (۲). در بخش نتایج و بحث نتایج آزمایش‌های انجام گرفته آورده شده است.

### نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر گردید، آزمایش‌های تعیین پارامترهای فیزیکی خاک، مطابق با استانداردهای ذکر شده، بر روی نمونه‌های خاک شاهد و بهسازی شده انجام گردید. نتایج این آزمایش‌ها در جدول اول آورده شده است. در جدول (۱)، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌هایی از خاک منطقه مورد مطالعه، برای مشخص نمودن درصد گچ موجود را نشان می‌دهد.

عمده‌ترین تأثیر مخرب وجود گچ در خاک را می‌توان در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا است مشاهده نمود. در این مناطق خاک پیرامون سازه، اشباع گردیده و با انجام واکنش‌های شیمیایی بین آب و گچ موجود در خاک، تخریب‌های شیمیایی در سازه به وجود می‌آید. با فرض برابر بودن مشخصه‌های خاک گچی، شکل گچ موجود در خاک به صورت پودر (ژپس) و یا بلوری (انیدرید)، نحوه پخش آن در خاک (متمرکز یا مخلوط با خاک)، دانه بندی (ابعاد اکثر دانه‌ها به رس یا ماسه نزدیک تر باشد) و غیره، با افزودن مواد مختلف به این نوع خاک، در مشخصات خاک تغییر ایجاد می‌کنند. علت مسئله‌دار بودن خاک گچی، انحلال یون کلسیم گچ در آب و خطر پوک شدن خاک و شسته شدن ذرات خاک می‌باشد (۵). لازم به ذکر است که از دیدگاه سازه‌ای بیش از ۴ درصد گچ در خاک عمدتاً سبب تخریب سازه ای خواهد گردید. با توجه به ارقام موجود در جدول (۱) بستر طبیعی خاکریز کانال شبکه آبیاری مارون بهبهان واقع در استان خوزستان دارای گچ بوده و احداث کانال بر روی

ASTM D427 انجام گردید (۱۱ و ۱۲ و ۱۳). در انجام محاسبات مکانیک خاک، اغلب چگالی نسبی دانه‌های خاک لازم می‌گردد. در این تحقیق آزمایش تعیین چگالی نسبی طبق استاندارد ASTM D854 انجام شد (۱۴). همچنین در این تحقیق، تراکم که عبارتست از کاهش دادن تخلخل خاک با خارج کردن هوا، با آزمایش تراکم پروکتور استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D698 انجام شد (۱۵). از آنجایی که، افزایش تنش، ناشی از احداث ابنیه سبب متراکم شدن لایه‌های خاک می‌گردد، با استفاده از آزمایش تحکیم و دستگاه تحکیم‌سنج، پتانسیل نشست محاسبه گردید. برای محاسبه ضریب تحکیم، براساس داده‌های به دست آمده از آزمایش تحکیم، از معادله ترفافی (۲۴) که در رابطه (۲) ارائه شده است، استفاده شد:

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

در رابطه (۲)  $u$ : فشار آب منفذی،  $t$ : زمان و  $z$ : عمق لایه خاک می‌باشد. در این رابطه  $C_v$ ، ضریب تحکیم نامیده می‌شود. برای محاسبه زمان تحکیم چند روش وجود دارد که می‌توان از روش لگاریتم زمان و همچنین روش جذر زمان نام برد. در این تحقیق از روش لگاریتم زمان استفاده شده است. در این روش برای محاسبه  $C_v$ ، نیاز می‌باشد که منحنی لگاریتم زمان-تحکیم برای یک افزایش بار معین مشخص باشد. در این روش از رابطه (۳) استفاده می‌گردد:

$$C_v = \frac{0.197 H^2 dr}{t_{50}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $H_{dr}$ : بزرگترین مسیر زهکشی در حین تحکیم می‌باشد به طوری که، برای نمونه‌هایی که از یک طرف زهکشی می‌شوند، مقدار آن برابر با کل ارتفاع لایه و برای نمونه‌هایی که از دو طرف زهکشی می‌شوند مقدار آن نصف ضخامت لایه رس است (۱). در آزمایش تحکیم و پس از رسم نمودارهای  $e - \log \sigma$  (که  $e$  نسبت پوکی و  $\sigma$  تنش مؤثر در نمونه خاک می‌باشد) برای نمونه‌ها می‌توان ضرایبی را برای خاک محاسبه نمود که برای پیش‌بینی مقدار نشست خاک بسیار مهم هستند (۲). این ضرایب شامل شاخص فشردگی ( $C_c$ )، شاخص تورم ( $C_s$ ) و شاخص دوباره تحکیمی ( $C_r$ ) می‌باشند. شاخص فشردگی برای محاسبه مقدار نشست لایه خاک استفاده می‌گردد. در رس‌های بیش تحکیم یافته منحنی تحکیم صحرایی از دو قسمت تشکیل می‌شود، قسمت اول شبیه تقریباً مساوی با منحنی برگشت آزمایشگاهی دارد و قسمت دوم که خطی است و شاخص فشردگی  $C_c$  با استفاده از آن

## جدول ۱- درصد گچ در نمونه‌های جمع‌آوری شده از خاک منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	درصد اشباع	درصد مواد محلول	درصد گچ
۱	۱۱۶	۰/۴۱	۱۱/۴
۲	۷۵	۰/۲۷	۶/۷
۳	۴۵	۰/۱۸	۷/۵
۴	۴۵/۵	۰/۱۶	۵/۷
۵	۴۴/۵	۰/۱۴	۴/۵
۶	۳۷	۰/۱۶	۰/۵۵
۷	۲۶	۰/۰۶	۰/۲
۸	۲۵	۰/۰۳	۰/۲۲
۹ (زیرگذر)	۸۱	۰/۲۶	۷

مقادیر ضریب تحکیم بر اساس روش جذر زمان محاسبه گردید. در جدول (۳) ضرایب تحکیم طی بارگذاری‌های آزمایش تحکیم برای خاک شاهد و نمونه‌های بهسازی شده نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش تحکیم و رسم نمودار فشردگی در مقابل لگاریتم زمان رسم گردید و با استفاده از رابطه (۳) مقدار ضریب تحکیم با استفاده از روش لگاریتم زمان برای هر بارگذاری محاسبه شد. در جدول (۳)،  $P$  مقدار تنش وارد بر نمونه در هر بارگذاری است.

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که استفاده از آهک سبب ایجاد تغییرات زیادی در مقدار ضریب تحکیم خاک منطقه جایزان که از نوع خاک‌های رسی-گچی است، شده است. تثبیت خاک رس به وسیله آهک به معنای ترکیب و مخلوط کردن آهک با رطوبت بهینه به صورت هیدروکسید کلسیم (آهک شکفته و یا آهک زنده) با خاک رس و متراکم کردن این مخلوط است، که عمل تثبیت خاک رس به علت واکنش‌های شیمیایی رس و آهک می‌باشد، اصولاً آهک با بیشتر خاک‌های رسی دارای خواص خمیری بالا واکنش شیمیایی خوبی خواهد داشت. متداول‌ترین آهکی که معمولاً برای پایدار نمودن خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل آهک شکفته  $\text{Ca(OH)}_2$ ، آهک شکفته دولومیتی  $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$ ، آهک زنده و آهک زنده دولومیتی است. فرآیند تثبیت خاک رس با آهک مشابه تثبیت با سیمان است با این تفاوت که آهک در تثبیت خاک‌های دانه‌ای، بدون رس و محتوی مواد

چنین بستری و یا با استفاده از چنین مصالحی نیازمند تمهیدات ایمنی و احتیاطی برای جلوگیری از نفوذ آب به درون خاک است. در این شبکه آبیاری خاک مورد نیاز جهت ایجاد شفته آهک از منطقه جایزان خوزستان و همچنین آهک مورد نیاز از معادن هفتگل به منطقه مورد مطالعه آورده می‌شدند، از این‌رو آزمایش‌هایی جهت تحلیل شیمیایی بر روی این نمونه‌ها صورت گرفت و مشخص گردید که مقدار گچ موجود در خاک مورد نیاز جهت شفته آهک در منطقه جایزان  $0/222$  و درصد گچ موجود در  $10$  گرم خاک به مقدار  $320/5$  میلی‌اکی‌والان است و همچنین نمونه آهک معدن هفتگل شامل  $\text{Ca(OH)}_2$ ،  $\text{CaCO}_3$  و  $\text{CaO}$  بوده که مقادیر آنها به ترتیب  $5/47$ ،  $72/59$  و  $11/9$  درصد می‌باشد. پس از انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی خاک منطقه مشخص شد که نمونه خاک از نوع شن رس‌دار همراه با ماسه (GC) است. حدود اتربرگ شامل حد روانی و حد خمیری برای خاک منطقه جایزان به ترتیب  $27/26$  و  $21/5$  به دست آمد. نتایج آزمایش تراکم بر روی نمونه خاک جایزان و خاک‌های بهسازی شده توسط آهک در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به نتایج آزمایش تراکم که در جدول (۲) آورده شد و با توجه به نحوه اجرای شفته آهک در پروژه‌ها که اکثراً از تراکم  $85$  درصد استفاده می‌شود، مقدار  $\gamma_d$  محاسبه گردید و بر اساس آن مقدار خاک و آهک برای هر یک از آزمایش‌های تحکیم محاسبه شد. در تمامی نمونه‌ها

## جدول ۲- نتایج آزمایش تراکم برای خاک شاهد و خاک بهسازی شده با آهک

نوع خاک	$(\gamma_d)_{\max}$	$\omega_{opt}$
شاهد	۱/۸۹	۲۸/۶۱
عیار ۵۰	۱/۲	۱۶
عیار ۱۰۰	۱/۴	۱۶/۵
عیار ۲۰۰	۱/۲	۱۴

## جدول ۳- ضرایب تحکیم مربوط به نمونه‌های بهسازی شده توسط آهک

نمونه با عیار ۲۰۰		نمونه با عیار ۱۰۰		نمونه با عیار ۵۰		نمونه خاک شاهد	
P ( $\frac{Kg}{Cm^2}$ )	$C_v * 10^{-3}$ ( $\frac{Cm^2}{s}$ )	P ( $\frac{Kg}{Cm^2}$ )	$C_v * 10^{-3}$ ( $\frac{Cm^2}{s}$ )	P ( $\frac{Kg}{Cm^2}$ )	$C_v * 10^{-3}$ ( $\frac{Cm^2}{s}$ )	P ( $\frac{Kg}{Cm^2}$ )	$C_v * 10^{-3}$ ( $\frac{Cm^2}{s}$ )
۰/۲۵	۱/۷۶۴	۰/۲۵	۰/۱۳۲۳	۰/۲۵	۰/۱۲۱۵	۰/۲۵	۶/۷۰۵
۰/۵	۰/۷۱۸۸	۰/۵	۰/۵۴۴۶	۰/۵	۲/۰۴۳۹	۰/۵	۸/۱۴۹
۱	۰/۴۰۳۱	۱	۰/۸۲۰۴	۱	۰/۵۳۰۵	۱	۸/۱۴۲
۲	۰/۳۱۳۲	۲	۰/۷۷۰۲	۲	۰/۳۴۰۱	۲	۵/۵۴
۴	۰/۳۴۷۶	۴	۰/۵۴۹۸	۴	۰/۱۶۰۸	۴	۵/۹۷۷
۸	۰/۲۲۲۷	۸	۰/۵۲۲۷	۸	۰/۴۵۴۴	۸	۲/۴۱۸

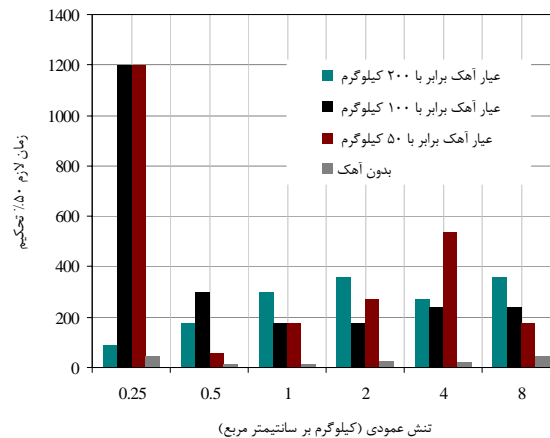
کیلوگرم و در دومین بار گذاری می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ضریب تحکیم در خاک بهسازی شده با عیار ۵۰ کیلوگرم و در اولین بارگذاری است. با توجه به جدول (۳) می‌توان گفت که به طور میانگین کمترین مقادیر ضریب تحکیم مربوط به خاک بهسازی شده با عیار ۱۰۰ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، ضریب تحکیم در خاک بهسازی شده با عیار ۱۰۰، در بیشترین مقدار کاهش ۵۰ برابر و در کمترین مقدار کاهش ۵ برابر کم می‌شود. ضریب تحکیم نشان دهنده سرعت تحکیم خاک بوده و هر چه مقدار این ضریب بیشتر باشد، تحکیم سریع‌تر رخ می‌دهد. همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، اضافه کردن آهک به خاک منطقه به دلیل رخ دادن واکنش‌های شیمیایی سبب بهبود یافتن خواص مکانیکی خاک از جمله کاهش سرعت تحکیم می‌گردد. در جدول (۴) زمان ۵۰ درصد تحکیم برای نمونه‌های خاک منطقه و خاک‌های بهسازی شده در هر بارگذاری آورده شده است.

همان‌گونه که در جدول (۴) نشان داده شده است، زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم در تمام نمونه‌های بهسازی شده بسیار بیشتر از زمان لازم در نمونه خاک منطقه است. با توجه به جدول (۴) باید گفت زمان ۵۰ درصد تحکیم برای نمونه‌های با عیار ۵۰ و ۱۰۰ در مجموع ۱۴ برابر زمان برای خاک منطقه است و برای نمونه با عیار ۲۰۰ در مجموع ۹ برابر زمان برای خاک منطقه است. با توجه به توضیحات داده شده، استفاده از آهک در کاهش سرعت تحکیم و افزایش زمان تحکیم بسیار مهم است و به حفاظت از سازه و جلوگیری از تخریب آن کمک خواهد نمود. در شکل (۱) تغییرات زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم در حالت‌های مختلف بارگذاری برای تمام نمونه‌ها نشان داده شده است.

آلی (مواد آلی باعث کند شدن هیدراسیون می‌شوند) بی تأثیر است. وقتی آهک به خاک رس اضافه می‌شود، واکنش‌های متعددی در آن ایجاد می‌شود که شامل واکنش تبادل کاتیون‌ها که باید ذکر نمود که تقریباً تمامی خاک‌های ریزدانه وقتی با آهک و آب مخلوط می‌شوند طی مدت زمان کوتاهی واکنش تبادل کاتیونی را نشان می‌دهند. در این واکنش، کاتیون‌های قابل تبادل خاک رس (کاتیون‌های تک ظرفیتی) با کاتیون‌های آهک جایگزین می‌شوند. واکنش پوزولانی که این واکنش باعث افزایش چشمگیر مقاومت در ترکیبات خاک رس و آهک می‌شود و تابع زمان می‌باشد. واکنش کربناسیون، در این واکنش آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث می‌شود که آهک به حالت غیر فعال سنگ آهک باز گردد. با توجه به زمان انجام واکنش‌های شیمیایی در دراز مدت خواص مکانیکی ترقی یابنده‌ای می‌توان از مخلوط‌های رسی آهک‌دار انتظار داشت. از عوامل اصلی افزایش مقاومت نمونه‌ها، زمان عمل‌آوری است که باعث تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی و فعل و انفعالات شیمیایی بین آهک و خاک رس می‌باشد (۸). با توجه به تغییراتی که در اثر افزایش مقداری آهک به خاک اتفاق می‌افتد، فروریزش سریع خاک به دلیل سیمانی شدن آن و نتیجتاً کاهش سرعت تحکیم و افزایش ضریب تحکیم توجیه می‌گردد. استفاده از آهک سبب کاهش شدید ضریب تحکیم در تمامی درصدهای ترکیبی است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، کمترین ضریب تحکیم در خاک شاهد در ششمین بارگذاری بوده و مقدار آن  $\frac{cm^2}{s}$  ۲/۴۱۸ و بیشترین مقدار در بارگذاری دوم رخ داده و مقدار آن  $\frac{cm^2}{s}$  ۸/۱۴۹ می‌باشد این در حالی است که بالاترین مقدار ضریب تحکیم در خاک بهسازی شده با عیار ۵۰

## جدول ۴- زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم در هر بارگذاری برای نمونه‌ها

زمان ۵۰ درصد تحکیم (عبار ۲۰۰ درصد) (sec)	زمان ۵۰ درصد (عبار ۱۰۰ درصد) (sec)	زمان ۵۰ درصد (عبار ۵۰ درصد) (sec)	زمان ۵۰ درصد (خاک منطقه) (sec)	بار گذاری (kg/cm <sup>2</sup> )
۹۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۴۵/۲۸	۰/۲۵
۱۸۰	۳۰۰	۶۰	۱۷/۶۹	۰/۵
۳۰۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۷/۳۴	۱
۳۶۰	۱۸۰	۲۷۰	۲۴/۵۷	۲
۲۷۰	۲۴۰	۵۴۰	۲۱/۵۳	۴
۳۶۰	۲۴۰	۱۸۰	۴۹/۶	۸



شکل ۱- زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم در حالت‌های مختلف

## جدول ۵- مقادیر شاخص‌های مختلف تحکیمی برای کلیه نمونه‌ها

شاخص (C <sub>r</sub> ) دوباره تحکیمی	شاخص تورم (C <sub>s</sub> )	شاخص فشردگی (C <sub>c</sub> )	نمونه خاک
۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۴۱	خاک منطقه
۰/۰۲۶۶۶۷	۰/۰۰۰۵۳۳	۰/۰۰۲۲۸۶	عیار ۵۰٪
۰/۰۳	۰/۰۰۰۵۷۱	۰/۰۲۵	عیار ۱۰۰٪
۰/۰۱۱۱۱۱	۰/۰۰۰۵۲۶	۰/۰۱۰۶۶۷	عیار ۲۰۰٪

رخ داده است که ۱۸۰ برابر است. برای عیار ۱۰۰ این مقدار کاهش ۱۷ برابر و برای عیار ۲۰۰، ۳۸ برابر است. کاهش در میزان شاخص فشردگی نشان دهنده کاهش در مقدار نشست است که برای نمونه‌های مورد بررسی از این نظر خاک بهسازی شده با عیار ۵۰ بهترین نمونه است. همان‌طور که در گذشته ذکر گردید، انجام فعل و انفعالات شیمیایی نظیر واکنش تبادل کاتیون‌ها، واکنش پوزولانی و واکنش کربناسیون که سبب افزایش مقاومت خاک و سیمانی شدن آن می‌گردد، نقش بسیار مهمی در

در شکل (۱) افزایش زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش تحکیم بر روی خاک منطقه و نمونه‌های بهسازی شده، شاخص فشردگی (C<sub>c</sub>)، شاخص تورم (C<sub>s</sub>) و شاخص دوباره تحکیمی (C<sub>r</sub>)، برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید و در جدول (۵) آورده شد.

با توجه به جدول (۵)، مقادیر شاخص فشردگی در تمام نمونه‌های بهسازی شده کاهش یافته است. برای عیار ۵۰ بیشترین مقدار کاهش

و ۳/۸ تا ۱۷ برابر در بارگذاری‌های مختلف، کاهش یافت. ضریب تحکیم در عیار ۱۰۰ کیلوگرم به طور میانگین بیشترین کاهش در مقدار ضریب تحکیم را داشته است.

- تمامی عبارهایی که برای بهسازی خاک استفاده گردید نتایج قابل قبولی در افزایش مقدار زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم داشتند. در عیار ۵۰ و ۱۰۰ بیشترین زمان در اولین مرحله بارگذاری رخ داد که ۲۶ برابر زمان لازم برای نمونه خاک منطقه است. در عیار ۵۰ زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم در مجموع ۱۴ برابر افزایش یافت. در عیار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم زمان لازم برای ۵۰ درصد تحکیم به ترتیب ۱۳ و ۹ برابر افزایش یافت.

- مقادیر شاخص فشردگی در تمام نمونه‌های بهسازی شده کاهش یافته است. برای عیار ۵۰ کیلوگرم بیشترین مقدار کاهش رخ داده است که ۱۴ برابر است. در عیار ۱۰۰ این مقدار کاهش ۲/۵۱ برابر و برای عیار ۲۰۰، ۱/۷۱ برابر است. کاهش در میزان مقادیر شاخص تورم نشان دهنده کاهش در مقدار نشست است که برای نمونه‌های مورد بررسی از این نظر خاک بهسازی شده با عیار ۵۰ بهترین نمونه است.

- مقادیر شاخص تورم و شاخص دوباره تحکیمی در نمونه‌های بهسازی شده بسیار بیشتر از نمونه خاک منطقه است. شاخص تورم‌پذیری برای نمونه‌های با عیار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب به ترتیب ۵/۷، ۵/۵ و ۶ برابر کاهش داشته است. همچنین شاخص پیش‌بارگذاری ( $C_r$ ) برای نمونه‌های با عیار ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر هر متر مکعب به ترتیب ۱/۳ و ۱/۵ برابر افزایش داشته است و این در حالی است که برای عیار ۲۰۰ کیلوگرم، ۱/۸ برابر کاهش یافته است.

- در نهایت با توجه به یافته‌های این تحقیق، از نظر تحکیمی، می‌توان به این نکته اشاره نمود که عیار ۵۰ کیلوگرم آهک بر هر متر مکعب، برای بهسازی خاک، کمترین پتانسیل نشست تحکیمی را دارا بوده و از نظر میانگین سرعت تحکیمی عیار ۱۰۰ کیلوگرم آهک بر هر مترمکعب کمترین مقدار را شامل بوده است.

کاهش مقدار شاخص فشردگی و در نتیجه مقدار نشست خاک خواهند داشت. مقادیر شاخص تورم در نمونه‌های بهسازی شده کمتر از نمونه خاک منطقه است. شاخص تورم برای نمونه‌های با عیار ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب ۷/۵ و ۶ برابر کاهش داشته است. این شاخص بیان کننده مقدار تورم‌پذیری خاک در اثر وجود رس در نمونه خاک است. استفاده از آهک در خاک‌های رسی سبب کاهش چشمگیر تورم‌زایی در نمونه خاک می‌گردد، که این در اثر تغییرات ایجاد شده در اثر انجام فعل و انفعالات شیمیایی ذکر شده در قسمت‌های گذشته است. شاخص دوباره تحکیمی برای نمونه‌های با عیار ۵۰ و ۱۰۰ به ترتیب ۱/۳ و ۱/۵ برابر افزایش داشته است و این شاخص برای عیار ۲۰۰، ۱/۸ برابر کاهش یافته است. پدیده تحکیم به دلیل تأثیر فراوانی که بر روی تخریب سازه دارد، بسیار مهم است. بنابراین اگر بتوان در سازه‌های آبی سرعت تحکیم و مقدار نشست خاک را تا حد امکان کاهش داد، علاوه بر کاهش هزینه‌های اولیه ساخت سازه، از تخریب زود هنگام سازه در اثر پدیده نشست جلوگیری می‌گردد. همچنین چون خاک مورد مطالعه در این تحقیق خاک گچی می‌باشد و در اثر شسته شدن گچ در حضور آب، خصوصاً در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالاست، سرعت نشست خاک و نتیجتاً تخریب سازه‌های احداث شده بر روی آن بیشتر از خاک‌های غیر گچی است، یافتن راهکاری برای کاهش ضریب تحکیم و نتیجتاً کاهش سرعت تحکیم برای سازه‌های آبی احداث شده در مناطقی مانند خوزستان بسیار مفید است. آهک به دلیل ایجاد حالت سیمانی شدن در خاک، سبب بهبود خواص مکانیکی خاک از جمله خواص تحکیمی خاک می‌گردد. لذا استفاده از آن در پروژه‌های عمرانی می‌تواند سبب کاهش هزینه‌های اولیه ساخت سازه‌ها، افزایش عمر و کاهش هزینه نگهداری و حفاظت از آنها شود و علاوه بر آن از تخریب آنها نیز جلوگیری نماید.

### نتیجه‌گیری

بر اساس آنچه که در این تحقیق گذشت می‌توان نتایج را به صورت زیر خلاصه نمود:

- تمامی عبارهایی که برای بهسازی خاک استفاده گردید نتایج قابل قبولی در کاهش مقدار ضریب تحکیم داشتند. در عیار ۵۰ کیلوگرم آهک بر متر مکعب، کمترین مقدار ضریب تحکیم اتفاق افتاد به طوری که در این عیار، ضریب تحکیم بین ۳/۹ تا ۵۵ برابر، در بارگذاری‌های مختلف، کاهش یافت. در عیار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نیز ضریب تحکیم به ترتیب بین ۵ تا ۵۰ برابر

### منابع

- ۱- ابن جلال. ر. و شفاعی بجستان. م. ۱۳۷۰. اصول نظری و عملی مکانیک خاک، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۷۳۰ صفحه.



- ۲- احدیان، ج.، ۱۳۸۳. برآورد شاخص فشردگی (CC) با استفاده از خصوصیات فیزیکی در منطقه در منطقه اهواز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته‌ی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- تاتلاری، س. ۱۳۷۵. بررسی رفتار خاک‌های گچی در مجاورت سازه‌های آبی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۴- رحیمی، ط. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر مواد پلیمری بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های گچی به کار رفته در دایک‌ها و سواحل رودخانه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی رودخانه، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- عباسپور، س.، دعاوی. ح. و ج. فیلی. ۱۳۸۷. روش اجرایی علاج بخشی کانال‌های ساخته شده در خاک‌های گچی شبکه‌های آبیاری در حال بهره برداری. اولین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
- ۶- علیزاده، م. ر. ب. ۱۳۸۸. پایدارسازی خاک رمبنده با استفاده از تکنولوژی تزریق-مطالعه موردی راه آهن سمنان-دامغان. پایان نامه کارشناسی ارشد عمران خاک و پی، دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین.
- ۷- منصوری کیا، م. ت. و ر. محمدعلی‌زاده. ۱۳۸۶. ترمیم ژئوتکنیکی یک کانال ساخته شده در خاک مسئله‌دار. دومین کنفرانس ملی تجربه‌های ساخت تاسیسات آبی و شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران.
- ۸- نادری، ح. ۱۳۸۸. تأثیر سرباره دانه‌ای کوره بلند ذوب آهن اصفهان (GGBS) بر مقاومت و خصوصیات توری خاک رس تثبیت شده با آهک در مجاورت سولفات. پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.
- 9- Anonymous. 1998a. Book of ASTM standards. Standard No. D 421-85, Dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants, Vol. 14.02.
- 10- Anonymous. 1998b. Book of ASTM standards. Standard No. D 422-63, Particle-size analysis of soils, Vol. 04.08.
- 11- Anonymous. 1958a. Book of ASTM standards. Standard No. D 423-59T, Tentative method of test for liquid limit of soils, Part 4, 1132. P.
- 12- Anonymous 1958b. Book of ASTM standards. Standard No. D 424-59, Standard method of test for plastic limit and plasticity index of soils, part 4, p. 1137.
- 13- Anonymous. 2004a. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, Soil and Rock (I). Standard No. D 427-98, Standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method, West Conshohocken, PA, pp. 22-25.
- 14- Anonymous. 2004b. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, Soil and Rock (I). Standard No. D 854-02, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water Pycno-meter, West Conshohocken, PA, pp. 96-102.
- 15- Anonymous. 2004c. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, Soil and Rock (I). Standard No. D 698-00, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, West Conshohocken, PA, pp. 81-91.
- 16- Chai, J., Sheng, D., Carter, J. P. and H. Zhu. 2012. Coefficient of consolidation from non-standard piezocone dissipation curves, Journal of Computers and Geo-techniques, 41: 13-22.
- 17- Degirmenci, N., Okucu. A. and A. Turabi. 2007. Application of phosphor gypsum in soil stabilization. Journal of Building and Environment, 42: 3393-3398.

- 18- Hammond, A. 1992. Manufacture and use of lime and pozzolana cements in Africa. Lime and other alternative cements. Neville Hill, Stafford Holmes, and David matter, Intermediate Technology Publications, London, U.K., pp. 35-46.
- 19- Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat. A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J. and M. D. Liu. 2012. Consolidation behavior of soil-cement column improved ground", Computers and Geotechnics, 43: 37-50.
- 20- Kumar. A., Walia. B. S. and A. Bajaj. 2007. Influence of fly-ash, lime and polyester fibers on compaction and strength Properties of expansive soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(3): 242-248.
- 21- Nwaiwu, M. O. and K. J. Osinubi. 2006. Compaction delay effects on properties of lime-treated soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2): 250-258.
- 22- Osinubi. K. J. 2006. Influence of compactive efforts on lime-slag treated tropical black clay. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2): 175-181.
- 23- Ple, O. and T. N. H. Le. 2012. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty-clay. Geotextiles and Geo-membranes, 2: 23-32.
- 24- Terzaghi, K. 1925. "Erdbaumechanik ouf boden physikalischer grundlage. Deuticke, Vienna, Austria.
- 25- Wang. S. Y., Chan, D. H. and K. C. Lam. 2011. Laboratory study of static and dynamic compaction is grouting in tri-axial condition. Journal of Geo-mechanics and Geo-engineering, 6(1): 9-19.
- 26- Yilmaz. I. and B. Civelekoglu. 2009. Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. Applied Clay Science, 44: 166-172.
- 27- Zhang. L. and R. Solis. 2008. Fly-ash-stabilized gypsiferous soil as an embankment material. Science Press Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, 1: 809-814.