مطالعه مروری: خاک‌های متورم شوندهٔ گچ‌دار و روش‌های بهسازی آن‌ها با رویکرد ویژه بر تثبیت بستر راه

کریم شکوهیانمدیر عمرانی حوزه معاونت فنی و عمرانی شهرداری شیراز، کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان
امیدرضا بهادری‌نژاد*دانشجوی دکتری عمران دانشگاه بوعلی سینا، کارشناس معاونت فنی و عمرانی شهرداری شیراز

چکیده

وجود خاک‌های متورم‌شونده در سراسر دنیا خسارت جبران ناپذیری را به ساختمان‌ها از جمله سازه‌های روسازی وارد می‌نماید. خاک‌های گچی به دلیل خاصیت تورم‌زایی که دارند از دیرباز مشکل‌هایی مانند ایجاد ترک در نمای ساختمان‌ها، شکم دادن دیوارها و برآمدگی کف سازی‌ها را به‌وجود آورده‌اند. از طرفی بهسازی این‌گونه خاک‌ها که در زمره خاک‌های مسأله‌دار هستند همیشه مورد توجه محققان بوده است. در این مطالعه سعی شده تا با بررسی جامع، راهکاری جهت تثبیت خاک‌های متورم شونده گچ‌دار ارائه گردد و هم‌چنین درخصوص تثبیت با آهک بر اساس آزمون pH و بررسی میزان تنش پیش تحکیمی، میزان درصد آهک لازم برای تثبیت خاک‌ها تعیین می‌گردد. به گونه‌ای که بر اساس آزمون‌های مکانیکی به ازای افزایش هر درصد آهک، افزایش میزان تنش پیش تحکیمی مدنظر قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: تثبیت، کانی تورم‌پذیر اترینگایت، خاک متورم‌شونده گچ‌دار، آهک

---

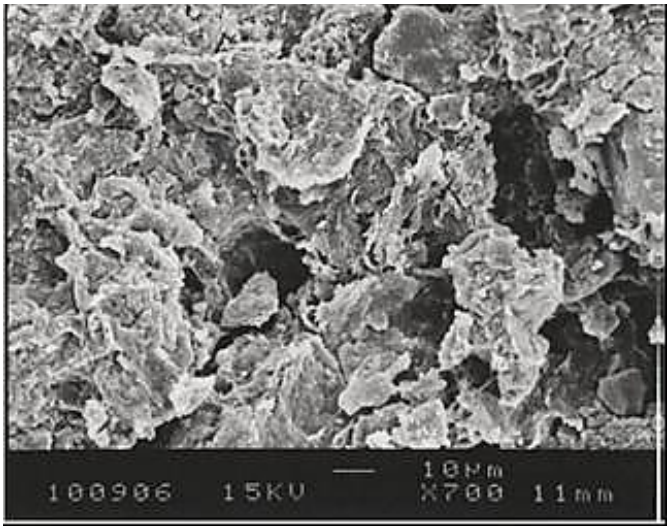
*نویسنده مسئول obahadorinezhad@gmail.com

۱. مقدمه

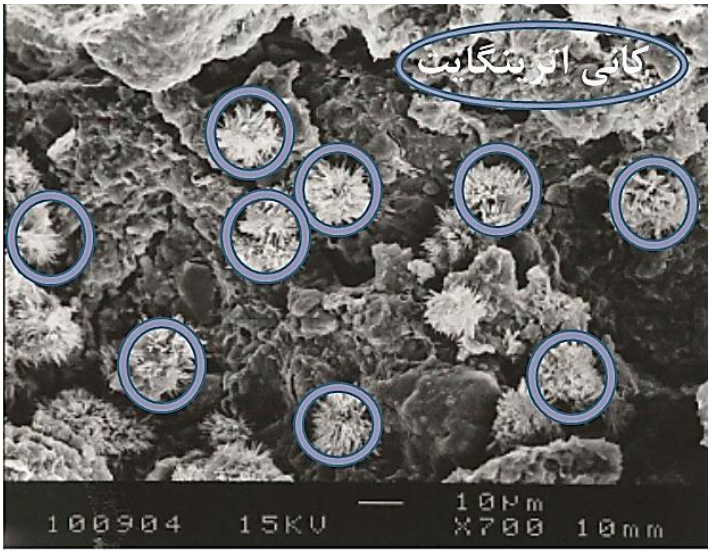
در اغلب پروژه‌های عمرانی، خاک و زمین به علت داشتن نقش‌های مؤثر و مهم، مورد توجه مهندسان عمران و محیط زیست قرار دارد. در کنار مطالعهٔ رفتار مکانیکی خاک‌ها از جمله مقاومت بر شی، هدایت هیدرولیکی وتراکم‌پذیریموارد دیگری نیز تحت عنوان کلی «خاک‌های مسأله‌دار» مطرح شده است.خاک تورمینمونه‌ای از خاک‌های مسأله‌دار است.مسألهٔ خاک‌های متورم شونده تا اواخر سال ۱۹۳۰ناشناخته بود (چن[1]، ۱۹۸۸).برای اولین بار در سال ۱۹۳۸ ادارهٔ آبادانی زمین ایالات متحده مشکل‌های خاک‌های متورم شونده را درعلوم مهندسی شناسایی نمود. از آن زمان به بعد مهندسان بر این نکته واقف شدند که دلایل خرابی ساختمان‌ها می‌تواند چیزی به غیر از نشست درسازه‌ها باشد (پرین[2]، ۱۹۹۲). هزینهٔ سالانه خسارت‌های ناشی از خاک‌های تورمی در امریکا ۱۰۰۰ میلیون دلار، در انگلستان ۱۵۰ میلیون پوند و چندین بیلیون دلار در سراسر جهان می‌باشند (ویسواندهام و همکاران[3]، ۲۰۰۹).

خاک‌های رسی تحت شرایط دست نخوردهٔ طبیعی تا حدودی تورم و انقباض از خود نشان می‌دهند (یاجن و همکاران[4]، ۱۹۹۹). انیدریت یا سولفات کلسیم خشک ($CaSO_4$)نیز با جذب آب به ژیپس یا سولفات کلسیم آبدار ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) تبدیل می‌شود که دراین فرآیند، حجمش بین ۳۰ تا ٦۲ درصد افزایش می‌یابد که به این خاک‌ها، خاک متورم‌شونده گچ‌دار گفته می‌شوند (اینستین[5]، ۱۹۹٦). خاک‌های متورم شونده هنگامی‌که خشک شوند کاهش حجم و هنگامی که مرطوب شوند باد کرده و حجمشان بیش‌تر می‌شود (غیاثیان، ۱۳۸۱). به همین منظور لزوم اصلاح این خاک‌ها، مدنظر قرار گرفته شده است. همان‌گونه که در بالا اشاره شد خاک رسی حاوی سولفات (خاک تورمی گچ‌دار) در صورت ترکیب با تثبیت‌کننده‌های کلسیم‌دار (آهک و سیمان) منجربه به تشکیل کانیاترینگایت ($Ca_6(Al(OH)_6)_2 \ (SO_4)_3 \ . \ 26H_2O$) می‌شود (شکل۱ و۲) که تشکیل این کانی در خاک موجب ایجاد تورم و کاهش شدید مقاومت فشاری آن شده است (رجسکران[6]، ۲۰۰۵).

1.Chen
2. Perrin
3. Viswanadham et al
4. Yaujun et al.,
5. Einstein
6. Rajasekaran



شکل ۱- قبل از تثبیت با آهک (پوپالا و همکاران[1]، ۲۰۱۲)



شکل ۲:بعد از تثبیت با آهک (همان)

بهترین مثال برای خرابی ناشی از این مورد، بزرگراه استیوارت[1] در لاس‌وگاس است. خاک منطقه حاوی مخلوط کائولینیت و مونت موریلونیت و درصد عظیمی گچ

1.Puppala et al.

بوده‌است که به منظور تثبیت آن از ٤/٥ درصد آهک استفاده شد. مشاهده گردید ٦ ماه پس از ساخت اولین خرابی‌ها و ۲ سال پس از ساخت خرابی‌ها بسیار شدید (بالازدگی‌های تا ۱۲ اینچ و ترک‌هایی با بازشدگی ۱ تا ٦ اینچ) در نتیجه تشکیل کانی اترینگایت (در ابتدا اشاره شد) ایجاد گردید (هانتر[2]، ۱۹۸۸)؛بنابراین پاسخ برای چگونگی اصلاح به صرفه و کارآمد این خاک‌ها سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده تا با اشاره به عوامل اصلی تشکیل کانی تورم‌پذیر اترینگایت و روش‌های بهسازی خاک‌های متورم‌شونده گچ‌دار با رویکرد ویژه بر تثبیت آن پرداخته شود.

۲. خاک تورمی

بهترین تعریف از پدیدهٔ تورم عبارت است از واکنش فیزیکی-شیمیایی خاک و محیط که مقدار تورم در آن بستگی به شدت نیروهای جاذبه و دافعهٔ فیزیکی و شیمیایی دارد.پدیدهٔ تورم پدیده‌ای برگشت‌پذیر است، یعنی خاک بعد از کم شدن رطوبت منقبض می‌شود (فاخر و عسگری، ۱۳۷۲).منشأ خاک‌های متورم شونده از هوازدگی و یا مواد اولیه سازنده می‌باشند. تون هافلاشاره نمود که تشکیل رس‌های متورم شونده یا مونت موریلونیت به وجود محیط‌های بازی و حضورکانی‌های فلزی مثل آهن و منیزیم مربوط است (تونهفل[3]، ۱۹۵۰).هم‌چنین دونالدسون مصالح تشکیل دهندهٔ خاک‌های متورم شونده را به دو دسته تقسیم بندی نمود: دسته اول سنگ‌هایی با پایهٔ آذرین و دسته دوم سنگ‌های رسوبی (دونالدسون[4]، ۱۹٦۹) مکانیزم‌های تورم شامل: ۱- تورم مکانیکی (وقتی که تنش‌های وارده کاهش می‌یابد آب از طریق حفرها جذب سنگ یا خاک شده و افزایش حجم یا تورم اتفاق می‌افتد). ۲- تورم اسمزی (اختلاف زیاد در غلظت یون‌ها در نزدیکی سطح ذرات رس و یون‌هایی که داخل آب منفذی قرار دارند، باعث تورم اسمزی می‌شود). ۳- تورم درون کریستالی یا هیدراسیون (این

1. Stewart 2. Hunter 3. Twenhofel 4. Donaldson

نوع تورم در اسمکتیت، رس‌های با لایه‌های مختلط، انیدریت و پیریت (FeS_2) وجود دارد. ویژگی‌های مکانیزم بسته به نوع مصالح (زمین) متفاوتمی‌باشد (باندیوپادیا[1]، ۱۹۸۱).

از جمله عوامل مؤثر بر تورم ۱-ترکیب خاک ۲- شرایط محیطی ۳- ترکیب سیال، می‌باشند.

۱- ترکیب خاک عبارتست از: نوع کانی‌های رسی موجود در خاک،مقدار هر کانی، نوع کاتیون‌های جذب شده،دانه‌بندی خاک، درصد کلی رس موجود در خاک (ترزاگی و همکاران[2]، ۱۹۹۶ و باسما[3]، ۱۹۹۳).

۲- شرایط محیطی عبارتست از: شرایط خاص در محیط (شرایط محیطی ثابت و نمونه‌ها دارای شرایط متفاوت باشند)، شرایط محیطی در یک حالت خاص خاک (نمونه مشخص خاک تحت شرایط محیطی متنوع)، شرایط تراکم (با افزایش درصد رطوبت تراکم و وزن واحد خشک، تورم به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد به گونه‌ای که ۲۶٪ ازدیاد در وزن واحد خشک باعث حدود ۱۳ برابر شدن فشار تورمی شده‌است (چن، ۱۹۸۸).

۳- ترکیب سیال: ویژگی‌های سیال می‌تواند پتانسیل تورم در ذرات خاک را کاهش و یا افزایش دهد، این تغییر رفتار با بررسی تغییر در بافت ریزساختاری خاک قابل توجیه است. به عنوان مثال افزایش غلظت و ظرفیت کاتیون‌ها منجربه افزایش نیروهای جاذبه بین ذرات، کوچک‌تر شدن ضخامت لایه دوگانه و نزدیک‌تر شدن ذرات خاک به یکدیگر و در نهایت پتانسیل تورم کاهش می‌یابد.

خاک‌های متورم‌شونده را می‌توان با استفاده از شناسایی کانی (پراش پرتو ایکس و یا میکروسکوپ الکترونی)، روش‌های غیرمستقیم (حدود اتربرگ، آزمایش انقباض خطی وآزمایش محتویات کلوئیدی) و اندازه‌گیری مستقیم (تورم آزاد، تورم با سربار مشخص و تورم با حجم ثابت) تشخیص داد (چن، ۱۹۸۸).

---

1. Bandyopadhyay 2. Terzaghi et al. 3. Basma

۳. گچ

سولفات‌ها به سه صورت در طبیعتیافت می‌شوند:سولفات کلسیم (گچ $CaSO_4$)، سولفات منیزیم($MgSO_4$)، سولفات سدیم (Na_2SO_4).

سولفات کلسیم (گچ) در طبیعت به دو صورت ذیل یافت می‌شود (وانگ[1]، ۲۰۰۲):

۱- سنگ گچ یا سولفات کلسیم آبدار($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) که در صنعت به ژیپس معروف است.

۲- انیدریتیا سولفات کلسیم خشک($CaSO_4$) که به گچین معروف است.

انیدریت هنگامی که به گچ تبدیل می‌شود،به میزان ٦۰ ٪ حجم ذرات جامد افزایش پیدا می‌کند.سولفات کلسیم، کم حلال‌ترین ولی رایج‌ترین سولفات در خاک است.درجه حلالیت ژیپساغلب کم‌تر از انیدریت است.ژیپس در سطح و انیدریت در اعماق زمین تشکیل و اغلب با سنگ‌های کربنات یافت می‌شوند.هر دو نوع از سنگ‌های تبخیری به جا مانده از محیط‌های دریایی‌اند.مسأله مهم در مورد انیدریت پدیده تورم آن است، این واکنش افزایش حجمی بین ۳۰ تا ٦۲ درصد وفشاری بین ۲ تا ٦۵ مگاپاسکال را ایجاد می‌کند (اعظم و عبدالجواد[2]، ۲۰۰۰)

٤. خاک گچی

اراضی گچی جز خاک‌های معمول در مناطق خشک و نیمه خشک با بارندگی سالیانه کم‌تر از ٤۰۰ میلی‌متر می‌باشند.حدود ۳٦٪ از خشکی‌های سطح زمین دارای آب‌وهوای خشک است.خاک‌های گچی۱۷/۵ درصد از مساحت کل کشور ما را به خود اختصاص داده‌اند.تنها در منطقه اصفهان براساس مطالعه‌های خاک شناسی، نزدیک به یک میلیون هکتار خاک گچی وجود دارد.وجود تقریباً ۲۰٪ گچ درخاک‌ها، ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (همان). خاک‌های گچی خاک‌هایی هستند که بیش از ۲٪ گچ داشته باشند و در زیرزمین آن‌ها لایه‌ای با بیش از

1. Wang
2. Azam and Abduljouwad

۱٤٪ گچ وجود داشته باشد (الراوس و همکاران[1]، ۲۰۰۵).در طبقه بندی قدیمی(1977) USBR متوسط ٤۰٪ حضور گچ را برای این منظور ذکر شده است.خاک‌های گچی، خاک‌های هستند که دارای حداقل ۱۰٪ گچ و یا دارای حداقل ۱۵٪ گچ باشند (وانگ، ۲۰۰۲؛ اعظم و عبدالجواد، ۲۰۰۰)

از جمله روش‌های مقابله با خاک تورمی عبارتست از: کنترل تراکم، بالشتک‌های ماسه، پیش مرطوب کردن (غرقاب کردن)، تثبیت با آهک، تثبیت با سیمان، تثبیت با ماده‌آلی، روش‌های الکتریکی (الکتروسینتیک)، کنترل رطوبت، کنترل سربار(فاخر و عسکری،۱۳۷۲).

۵- تشکیل اترینگایت و توموسایت

تثبیت خاک‌های رسی از طریقافزودن آهک یا سیمانو افزایشpH خاک تا حدود ۱۰/۵ منجربه گسسته شدن کانی‌های رسی و آزاد شدن آلومینیوم و سیلیسیم موجود در آن‌ها و واکنشکلسیم موجود در تثبیت کننده‌ها با سیلیکا و آلومینای موجود برای تشکیل ترکیب‌های سمنتاسیون می‌گردد و درصورتی که کانی‌های رسی حاوی سولفات باشند منجربه قطع شدن واکنش‌های پوزولانی درازمدت و ایجاد تورم وکاهش مقاومت فشاری می‌گردد. علت آن به دلیل تشکیل کانی اترینگایت و یا توموسایت باتوجه به بنیان کانی رسی می‌باشد (راجسکران، ۲۰۰۵). از سویی محققان دیگری نیز گزارش دادند که در اثر حضور سولفات در خاک رسی تثبیت شده با آهک، pH خاک تثبیت شده بایستی۱۲/٤ به بالا باشد در صورتی‌که اندازه‌گیریpH مقدار آن را بین ۸ الی۱۰/۵ نشان داد و این بیانگر رخ دادن واکنش‌های دیگری (تشکیل کانی تورم‌پذیر اترینگایت) در خاک است (میتشل[2]، ۱۹۸٤ و هانتر[3]، ۱۹۸۸)

تورم ناشی از واکنش بین رس، آهک و سولفات با مکانیزم تورم خاک رس به تنهایی و یا تورم ناشی از تبلور سولفات کلسیم ($CaSO_4$) متفاوت است.تورم خاک رس و هم‌چنین تورم ناشی از تبدیل انیدریت ($CaSO_4$) به ژیپس

1.Al-Rawas et al. 2. Mitchell 3. Hunter

($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)تنها فیزیکی بوده، ولی تورم ناشی از ترکیب آهک، رس و سولفات در اثر تولید کانی‌های تورم‌زای جدیدی از قبیل اترینگایت است که یک واکنش شیمیایی می‌باشد (یانگ و اوحدی[1]، ۲۰۰۷). میزان تورم اترینگایت در درجه اول تابع مقدار اترینگایت تشکیل شده، مورفولوژی و سایز کریستال‌های اترینگایت است. هم‌چنین محدودیت‌های سیستم و یون‌های در دسترس نیز بر میزان تورم تاثیر گذارند. حداقل کانی اترینگایت که موجب تورم می‌شود ۸٪ گزارش شده است. مکانیزم‌های تورمی اترینگایت شامل: افزایش حجم ناشی از محصول‌های که از واکنش‌ها حاصل می‌شوند، نیروی تورم ناشی از رشد کانی اترینگایت و نیروی تورم ناشی از رسیدن آب به محصول‌ها می‌باشند (همان).

مقادیر بحرانی درصد خاک رس و سولفات برای تشکیل اترینگایت:

در بین پژوهشگران زیادی که محدوده بحرانی مقدار سولفات را برای تشکیل اترینگایت ارائه نموده‌اند هانتر در سال ۱۹۸۸ محدوده ذیل را گزارش نمود (هانتر، ۱۹۸۸):

تورم متوسط	0.5%>B>0.01%
تورم زیاد	1.2%>B>0.5%
تورم بسیار زیاد	B>1.2%

هم‌چنین حداقل مقدار رس برای تشکیل اترینگایتدر حضور سولفات زیاد (۲۰۵۰۰ppm) برابر ۱۰ درصد می‌باشد (همان). با توجه به موارد ذکر شده از شناخت کلی خاک‌های متورم شونده گچ‌دار و تشکیل کانی اترینگایت بایستی به منظور بهسازی این نوع خاک‌ها روشی مناسب را انتخاب نمود که به همین منظور در بین پژوهش‌های مختلفی که شده مناسب‌ترین روش را در این مقاله ارائه می‌نماییم.

1.Yong and Ouhadi

٦. روش‌های بهسازی خاک‌های متورم شونده گچ‌دار

روش دو مرحله‌ای اختلاط آهک:

سال‌هاستکهازروشتثبیتباآهکبرایبهبودخواصخاکاستفادهمی‌شود.افزودن آهک به خاک منجربه کاهش شاخص خمیری، تورم آزاد، انقباض، نفوذپذیری و افزایش مقاومت برشی می‌گردد که از دلایل آن می‌توان به تبادل کاتیونی، فلوکوله شدن ساختار، واکنش-های پوزولانی و کربناتاسیون اشاره نمود (اسکات[1]، ۱۹۹۹ و لیتل[2]، ۱۹۸۷). میزان آهک مورد استفاده در روش معمولی، ۱٪ آهک به ازای هر ۱۰٪ خاک رس است (اینگل و متکالف[3]، ۱۹۸۷). هم‌چنین اصلاح خاک توسط آهک موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه، کاهش پتانسیل تورم، افزایش مقاومت و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود.

تأثیر آهک بر خاک را می‌توان به دو گروه تثبیت کوتاه مدتو تثبیت بلند مدت تقسیمکرد. افزایش کارپذیری خاک جزء اصلاح کوتاه مدت می‌باشد و مهم‌ترین عامل در مرحلهٔ ساخت اولیه است. افزایش مقاومت و دوام را می‌توان در نتیجهٔ اثر بلند مدت آهک در نظر گرفت که در طی دورهٔ عمل‌آوری و بعد از آن رخ می‌دهد (تامپسون[4]، ۱۹٦٦؛ نالبانتگلو و تانسر[5]، ۲۰۰۱). اغلب مصالح پلاستیک می‌توانند با آهک اصلاح شوند، اگر چه برخی از رس‌ها واکنش موثرتری با آهک می‌دهند. خاک‌های حاوی مونت موریلونیت به علت سطح مخصوص بزرگ این کانی، اغلب واکنش‌های بسیار مناسب‌تری با آهک دارند، اگر چه آهک با کائولینیت و ایلیت نیز به خوبی واکنش می‌دهد. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که آهک برای مخلوط شدن با خاک‌های رسی به خصوص خاک‌های با پلاستیسیته متوسط و زیاد (PI>15) مناسب‌تر است (ختاب[6]، ۲۰۰۲؛ مالا و همکاران[7] ۲۰۰٤ و نالبانتگلو و تانسر، ۲۰۰۱). اگرچه این قاعده، معیاری کلی برای نشان دادن مقدار رس موجود برای واکنش با آهک نمی‌باشد.

1.Schoute 2. Little 3. Ingles and Metcalf
4. Thompson 5. Nalbantoglu and Tuncer 6. Khattab
7. Mallela et al.

در اثر مخلوط آهک با خاک دو واکنش پایه، اما پیچیده به شرح زیر رخ می‌دهد: الف) بهبود تا حدودی سریع و یا آنی که ممکن است به تبادل یون‌ها نسبت داده شود. ب) واکنش پوزولانی که در بازهٔ زمانی از چند دقیقه تا چند ماه و یا بیش‌تر رخ می‌دهد. هنگامی که آهک و خاک رسی با هم مخلوط شده و در معرض رطوبت قرار می‌گیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ می‌دهد که شامل تبادل کاتیون، کلوخه شدن[1]، واکنش پوزولانی و کربناسیون[2] می‌باشد (باسما، ۱۹۹۱؛ الرواس و همکاران، ۲۰۰۵ و لیتل، ۱۹۸۷). تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزء واکنش‌های اولیه هستند که بلافاصله بعد از مخلوط شدن رخ می‌دهد. در جریان این واکنش‌ها، کاتیون‌های یک ظرفیتی واقع در لایهٔ دوگانه پولک‌های رسی با کاتیون‌های دو ظرفیتی کلسیم جایگزین می‌شوند. این واکنش‌ها موجب تغییرهای سریع در نشانه خمیری و بهبود مقاومت خاک می‌شود. واکنش پوزولانی میان آهک، آلومینا و سیلیکای کانی‌های رسی رخ می‌دهد و باعث تولید مواد سیمانی شامل کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم آلومینات هیدراته می‌شود. به شکل کلی واکنش‌های پوزولانی اولیه به شرح ذیل می‌باشند (اوحدی و همکاران، ۲۰۱٤):

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 \rightarrow CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$$
$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \rightarrow CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$$

واکنش‌های پوزولانی وابسته به زمان و دما هستند و ممکن است به مدت طولانی ادامه یابند، در واقع از آن جا که افزودن آهک به خاک موجب افزایش pH خاک می‌شود؛ هنگامی که pH خاک (که در واقع pH آب آهک اشباع می‌باشد) به ۱۲/٤ افزایش می‌یابد حلالیت سیلیکا و آلومینای بخش رسی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. تا زمانی که کلسیم کافی در نتیجهٔ افزودن آهک در محیط وجود داشته باشد و pH حداقل ۱۲/٤ باقی بماند، واکنش پوزولانی ادامه می‌یابد (باسما، ۱۹۹۱). از مسائل مهم دیگر در فرایند تثبیت، مقدار آهک مورد نیاز است. مقدار آهک مورد نیاز بر اساس درصد رس در خاک، ویژگی‌های خاک مورد نظر و درجهٔ تثبیت مطلوب متغیر می‌باشد.

1.Flocculation-agglomeration 2.Carbonation

اگر هدف تنها اصلاح[1] ویژگی‌های خمیری خاک باشد افـزودن آهـک بـه میـزان ۲ تـا ۳ درصد وزن خشک خاک کافی اسـت (داس[2]، ۱۹۹۰ و مهتـا[3]، ۱۹۷۳). ومقـادیر بیش‌تـر برای انجام واکنش پوزولانی و کسب مقاومت نیاز اسـت. بـه منظـور تثبیـت، آهـک بـه میزان ۵ تا ۱۰ درصد وزن خشـک خـاک اسـتفاده مـی‌شـود (داس، ۱۹۹۰). گروهـی از پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که حداقل آهک مورد نیاز برای تثبیـت، بایـد بـه انـدازه‌ای باشد که بتواند pH =۱۲ را تامین کند (اوحـدی و همکـاران، ۲۰۱٤). تثبیـت خـاک بـا آهک به دلیل مؤثر و اقتصادی بودن آن روشـی متـداول در تثبیـت خـاک‌هـای رسـی و رس‌دار به شمار می‌رود.

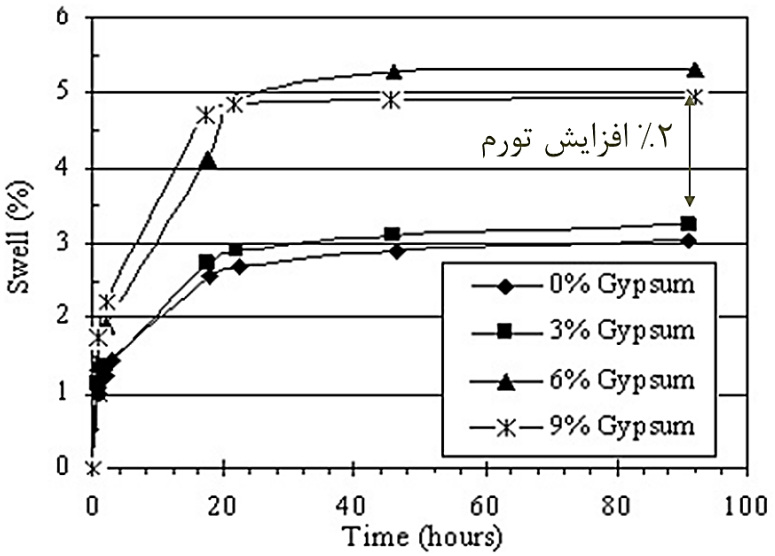
روش دو مرحله‌ایمخلوط کردن آهک به ایـن صـورت اسـت کهـدر خـاک در دو مرحله با آهک ترکیب شـده اسـت. در مرحلـهٔ اول، ابتـدا درصـدی از آهـک بـا خـاک مخلوط می‌شـود و در فاصـله زمـانی بـین ایـن دو مرحلـه کانی‌هـای تـورم‌زا تشـکیل می‌شوندکه با توجه به عدم استفاده از باربری خاک در این مرحله مشـکل تـورم مطـرح نخواهد بود. در مرحلهٔ دوم درصد باقی ماندهٔ آهک با خاک مخلـوط شـده، بـا افـزودن آهک در مرحلهٔ دوم و متراکم نمودن مجدد مخلـوط، تـورم خـاک اصـلاح می‌شـود.در روش دو مرحله‌ای انتخاب درصد بهینه آهک مهم می‌باشد. قابل ذکر است که در روش دو مرحله‌ای آگاهی از میزان سولفات موجود در خاک و هم‌چنین منابع تامین کننـده آن مهم می‌باشد.در این روش خاک باید حاوی میزان سولفات قابل حل کمی باشـد.به نظـر می‌رسد که خاک‌های با سولفات قابل حل تا ۷۰۰۰ppm(با توجه بـه آزمـایش ۱بـه ۱۰ خاک نسبت به آب) را می توان با روش دو مرحله‌ای تثبیت کرد (پراکش و همکـاران[4]، ۱۹۹٦).

در پژوهش‌های آزمایشگاهی که توسط فریس و همکاران[5] (۱۹۹۱) بر روی ۳ نـوع خاک متورم شونده حاوی سولفات انجام گردید، مشخص شد که روش دو مرحله‌ای به صـورت قابـل تـوجهی مقاومـت خـاک و میـزان تـورم آن را بهبـود بخشـیده اسـت.

---

1. Modification
2. Das
3. Mehta
4. Prakash et al
5. Frries et al.

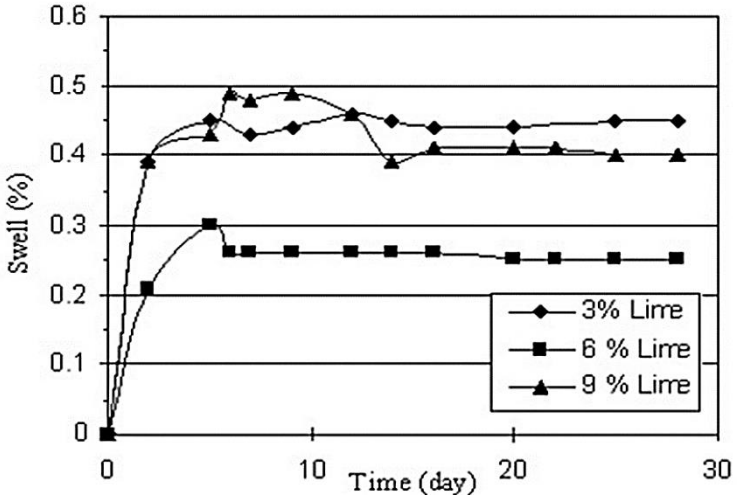
هم‌چنینتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونینشان از آن داشت کـه مقـدار کمـی اترینگایت در خاک اصلاح شده به این روش وجود دارد.در پـژوهش مـورد بررسـی ٤ نمونه بدون آهک، ۱۲ نمونه مخلوط با آهک به روش معمـول و ۱۲ نمونـه مخلـوط بـا آهک به روش دو مرحله‌ای ساخته شده است. درصد آهک مـورد اسـتفاده در پـژوهش مورد بررسی ۳٪ ، ٦٪ و ۹٪ و هم‌چنین درصـد گـچ مـورد اسـتفاده ۰٪ ، ۳٪ ، ٦٪ و ۹٪ می‌باشد (جهانشاهی، ۲۰۰۵). همان‌گونه که در شـکل ۳ مشـاهده مـی‌شـود بـا افـزایش حضور گچ در خاک میزان تورم افزایش می‌یابد که ایـن تـورم ناشـی از هیدراتـه شـدن مولکول‌های گچ است. حضور گچ تاثیری بر میزان تورم کانی‌هـای رس نـدارد و تـورم حاصل مجموع تورم گچ و رس است (همان).



شکل ۳:منحنی تورم – زمان برای نمونه های بدون آهک (جهانشاهی، ۲۰۰۵)

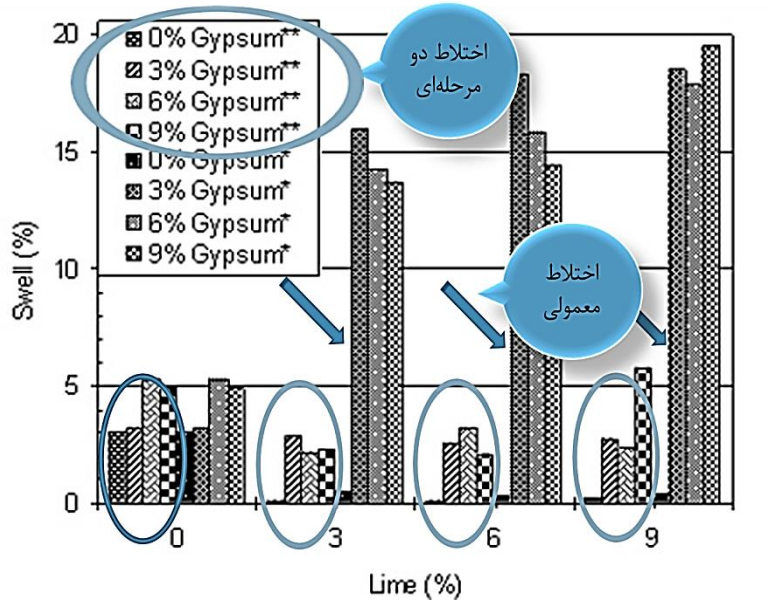
حضور آهک دارای تأثیرهای آنی مثـل کـاهش تـورم و خصوصـیت‌های خمیـری استکه ناشی از تبادل کاتیونی می‌باشد و دارای تأثیرهای بلند مدت مثل افزایش مقاومـت

است که ناشی از انجام واکنش‌های پوزولانی می‌باشد (شکل ٤). همان‌گونه که در شکل ٤ مشاهده می‌گردد در ۹ درصد آهک به دلیل افزایش پلاستیسیته و رخ دادن کربناتاسیون که در خاک‌های رسی یک واکنش تورمی و مضر را به دنبال دارد که منجربه افزایش تورم شده‌است. در پروژه‌های عمرانی تشخیص مقدار بهینه آهک جهت تثبیت یک امر ضروری می‌باشد که اوحدی و همکاران در سال ۲۰۱٤ نحوهٔ تشخیص مقدار بهینه آهک را با نگرش بر تشکیل واکنش‌های پوزولانی از لحاظ ریزساختاری بررسی نموده است که در ادامه به تفصیل ارائه می‌گردد.



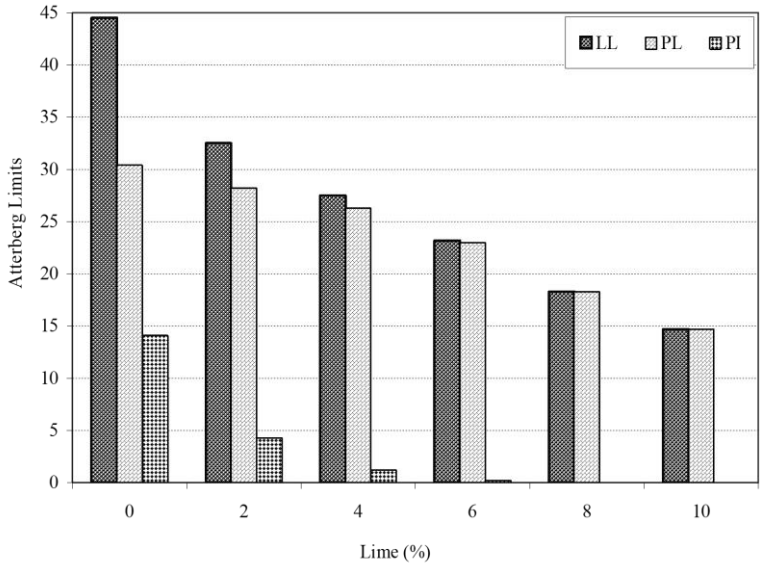
شکل ٤:منحنی تورم – زمان برای نمونه های فاقد گچ (جهانشاهی، ۲۰۰۵)

شکل ۵ تغییرهای تورم نمونه‌های حاوی درصدهای متفاوت گچ در مقابل درصد حضور آهک در دو روش اختلاط معمولی و دو مرحله‌ای را نشان می‌دهد (همان). استفاده از روش دو مرحله‌ای تقریبا باعث کاهش ۱۲ تا ۱۵ درصدی میزان تورم شده‌است.حتی حضور درصد کمی گچ نیز سبب ایجاد مقدار زیاد تورم می‌شود.حضور گچ تاثیری بر واکنش‌های آنی بین آهک و خاک رس ندارد.



شکل ۵:تغییرهای تورم نمونه‌های حاوی درصدهای متفاوت گچ در مقابل درصد حضور آهک در دو روش مخلوط شدن معمولی و دو مرحله‌ای (جهانشاهی، ۲۰۰۵)

اوحدی و همکاران با مطالعهٔ تثبیت خاک با آهک، میزان بهینهٔ درصد آهک را تعیین نمودند. در شکل ٦ منحنی تغییر ویژگی‌های خمیری با درصدهای مختلف آهک ارائه شده‌است. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش درصد آهک مقدار دامنهٔ خمیری و حد روانی کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در حالت اضافه کردن حدود ٦٪ آهک به خاک، نمونهٔ رسی مورد مطالعه رفتار تقریباً غیر خمیری از خود نشان داده‌است. رفتار مشاهده شدهٔ فوق را می‌توان به حل شدگی بخشی از کانی‌های رسی و جانشینی یون‌های کلسیم ناشی از یونیزه شدن آهک شکفته با یون‌های سدیم و پتاسیم موجود در لایه دوگانه پولک رسی نسبت داد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ٦، در نمونهٔ تثبیت شده با ٦٪ آهک و بعد از دوره عمل آوری ۷ روز میزان حد روانی حدود ٤٧٫٨٪ کاهش و دامنهٔ خمیری تقریباً به صفر تقلیل یافته است (اوحدی و همکاران، ۲۰۱٤).



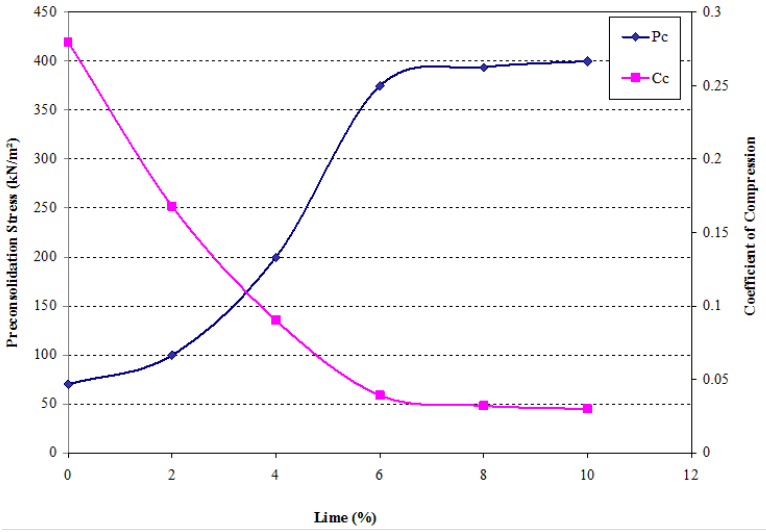
شکل ٦- منحنی تغییرهای حدود اتربرگ نمونه‌های اصلاح شده با درصدهای متفاوت آهک (دوره عمل‌آوری ۷روز) (اوحدی و همکاران، ۲۰۱٤)

از سوی دیگر، اصلاح خاک با آهک موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود. افزایش مقاومت در کوتاه مدت توأم با وقوع واکنش‌های کوتاه مدت کلوخه شدن[1] و بهبود کارپذیری خاک صورت می‌گیرد. علت این افزایش مقاومت را می‌توان به تبادل کاتیونی و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. به بیان دیگر، واکنش میان آهک و کانی‌های رسی موجب حل شدگی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیب‌هایی هم‌چون ژل آلومینات کلسیم هیدراته (CAH) و سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) می‌شود. این ترکیب‌ها شبیه به ترکیب‌های موجود در سیمان پرتلند هیدراته هستند. متبلور و سخت شدن این ژل‌ها باعث افزایش مقاومت می‌شود. شکل ۷ منحنی تغییرهای ضریب فشردگی (C_C) را برای نمونه‌های اصلاح شده با آهک پس از ۷ روز دوره عمل‌آوری نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ۲٪ آهک ضریب فشردگی حدود ٤۰٪ کاهش یافته‌است. این در حالی است که با افزودن ٦٪ آهک ضریب

1. Flocculation-Agglomeration

فشردگی به ۰,۰۳٤ رسیده‌است. در حقیقت استفاده از ٦٪ آهک حدود ۸۸٪ کاهش در مقدار ضریب فشردگی ایجاد کرده‌است. باید توجه کرد که افزایش بیشینه میزان آهک نیز موجب تغییر عمده‌ای در ضریب فشردگی نمی‌شود. کاهش ضریب فشردگی تحکیم (Cc) در نمونه‌های تثبیت شده با آهک را نیز می‌توان به پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، روند افزایش تنش پیش‌تحکیمی نیز در نمونه‌ها با افزایش درصد آهک مشاهده می‌شود. در واقع بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷ وقوع واکنش‌های پوزولانی و کاهش ضخامت لایه دو گانه سبب ایجاد یک پیش تحکیمی در خاک شده‌است (اوحدی و همکاران، ۲۰۱٤).

اگر به صورت خاص به بررسی منحنی تنش پیش تحکیمی بر اساس میزان درصد آهک افزوده پرداخته شود (شکل۷)، مشاهده می‌شود به ازای افزایش ۲٪ آهک میزان تنش پیش تحکیمی حدود ٤۲٪ افزایش یافته است. به عبارت دیگر، به ازای هر درصد آهک میزان تنش پیش تحکیمی حدود (kN/m^2) ۱۵ افزایش یافته‌است. در این راستا، با افزایش ٤٪ آهک میزان تنش پیش تحکیمی حدود ۱۸۰٪ افزایش یافته و به ازای هر درصد آهک میزان تنش پیش تحکیمی حدود (kN/m^2) ۳۲,۵ افزایش یافته است. هم‌چنین با افزایش ٦٪ آهک نرخ رشد درصد تنش پیش تحکیمی ادامه یافته و به حدود ٤۳۵٪ رسیده است و میزان افزایش تنش پیش تحکیمی به ازای هر درصد آهک حدود (kN/m^2) ۵۰,۸ می‌باشد. توجه به این نکته دارای اهمیت است که با افزایش ۸٪ و ۱۰٪ آهک، میزان درصد افزایش تنش پیش تحکیمی به حدود ٤٦۰٪ و ٤۷۰٪ رسیده‌است، اما میزان افزایش تنش پیش تحکیمی به ازای هر درصد آهک به ترتیب به مقادیر (kN/m^2) ٤۰ و (kN/m^2) ۳۳ کاهش یافته‌است (همان). بر این اساس می‌توان درصد بهینهٔ آهک را برای بهسازی تا بیش‌ترین درصد بهره‌وری ارائه کرد.



شکل ۷: منحنی تغییرهای تنش پیش تحکیمی و ضریب فشردگی (c_c) نمونه‌های بهسازی شده با درصدهای مختلف آهک (اوحدی و همکاران، ۲۰۱٤)

استفاده از سیمان ضد سولفاته (تیپ ۵):

استفاده از سیمان به عنوان تثبیت کنندهٔ خاک‌ها موجب: ۱- تغییر کاتیون‌های لایهٔ دوگانه و یا تجمع کاتیون‌ها در اطراف پولک رسی شده که این امور عامل کاهش شدت بار منفی در اطراف پولک رسی و فلوکوله شدن ساختار خاک وخصوصیت های خمیری و میزان تورم خاک را کاهش می‌دهد (بوگ و بارتلسمیر[1]، ۱۹٦۱). ۲- انجام واکنش‌های پوزولانی ناشی از حضور سیمان که منجربه افزایشمقاومت خاک می‌شود (راجسکران، ۲۰۰۵). پوپالا و همکاران در سال ۲۰۰۳ طی پژوهشی بر روی تثبیت خاک رسی با ویژگی‌های خمیری زیاد (CH) با استفاده از سیمان ضد سولفاته (تیپ ۵) دریافتند که کاهش PI ناشی از کاهش ضخامت لایهٔ دوگانه در اثر تبادل کاتیونی بوده‌است (همان). هم‌چنین مکانیزم افزایش مقاومت ناشی از فلوکوله شدن و واکنش‌های پوزولانی می‌باشد که توسط هازمن[2] (۱۹۹۰) بیان شده‌است.با افزودن سیمان تیپ ۵ میزان تورم به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، این امر ناشی از

1.Bugge and Bartelsmeyer 2. Hausmann

کاهش ویژگی‌های پلاستیسیته خاک است.بررسی نتایج پراش پرتو ایکس پس از ١٤ روز حاکی از آن بود کهمیزان کانی اترینگایت تشکیل شده بسیار کم است (پوپالا و همکاران، ۲۰۰۳).

سرباره:

سرباره محصول فرعی غیر فلزی در فرآیند تولید آهن است.اجزای تشکیل دهندهٔ سرباره بیش‌تر آهک،سیلیس و آلومین است و شباهت زیادی به اجزای سیمان پرتلند دارد. سرباره ماده‌ای با خاصیت سیمانی است. این ماده به تنهایی در مقایسه با سیمان به کندی با آب واکنش می‌دهد، اما قابلیت فعال شدن به تنهایی را دارد.این ماده می‌تواند به وسیلهٔ مواد قلیاییا سولفات فعال شده و باعث تشکیل ژلCSH شود.نتایج مطالعه‌های صورت گرفته بر تثبیت کائولینیت به وسیلهٔ سرباره نشان دهندهٔ افزایش مقاومت برشی و کاهش شاخص خمیری، تورم و پتانسیل انقباضی خاک بوده‌است (اوزیلدیریم[1]، ۱۹۹۰).

عوامل مؤثر بر افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با سرباره عبارتند از:

ترکیب شیمیای سرباره، میزان قلیایی بودن سیستم، میزان شیشه‌ای بودن سرباره، ریز بودن سرباره، دما در طول اولین فرایند هیدراسیون (همان). علت کاهش PI تغییر کاتیون‌های لایه دوگانه و تبدیل شدن ساختار به حالت فلوکوله می‌باشد. هم‌چنین علت افزایش مقاومت، انجام واکنش‌های سمنتاسیون و هیدراته شدن سرباره می‌باشد (پوپالا و همکاران، ۲۰۰۳).افزودنسرباره باعث کاهش میزان تورم شده، هم‌چنین افزایش مقدار آن و زمان عمل‌آوری نیز میزان تورم را کاهش داده‌است.کاهش میزان تورم به دلیل کاهش خصوصیت‌های خمیری خاک بوده‌است.بررسی نتایجXRD پس از ١٤ روز حاکی از آن بود که میزان کانی اترینگایت تشکیل شده بسیار کم است.بر اساس نتایج حاضر برای اصلاح خاک، حداقل ۲۰٪ وزنی خاک سرباره و ۷ تا ١٤ روز نیز عمل آوری لازم است (همان).

1.Ozyildirim

آهک + فیبر پلی‌پروپیلن:

فیبر المانی کششی است که به صورت معمول برای افزایش مقاومت و نیز کاهش میزان انقباض خاک استفاده می‌شود.دلیل استفاده از فیبر، جایگزینی بخشی از آهک با آن بوده است که در این صورت به دلیل تشکیل کم‌تر اترینگایت میزان تورم ناشی از حضور سولفات نیز کاهش می‌یابد (پوپالا و ماسندا[1]، ۲۰۰۰).حضور فیبر در جهت عمود بر صفحهٔ گسیختگی از شکست ترد جلوگیری می‌کند و مقدار فیبر بهینه بین ۰ تا ۰/۱۵ درصد بوده‌است.کاهش تورم به دلیل تأثیر توأم آهک (کاهش خصوصیات خمیری) و فیبر بوده است. حضور فیبر همراه با آهک باعث کاهش میزان تورم شده که این امر ناشی از توزیع بیش‌تر رطوبت وسرعت بخشیدن به واکنش‌ها توسط فیبر است (پوپالا و همکاران ۲۰۰۳)

خاکستر بادی:

خاکستر بادی[2]از گازهای خروجی نیروگاه‌های سوخت ذغال سنگ به دست می‌آید.خاکستر بادی را در دو کلاس F و C طبقه بندی می‌کند (ASTM C618(1994)).نوع F از سوختن ذغال سنگ‌های قیری حاصل می‌شود. خاکستربادی حاوی این ذغال سنگ به ندرت حاوی بیش از ۱۵٪ اکسید کلسیم (CaO) می‌باشد و به طور معمول تنها در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌کند.نوع C بیش از ۲۰٪ CaO دارد که ناشی از ذغال سنگ سوخته[3] شده می‌باشد (مهتا، ۱۹۷۳).خاکستر بادی به عنوان مادهٔ تثبیت کننده دارای دو واکنش کوتاه مدت و بلند مدت می‌باشد. در واکنش کوتاه مدتبا تغییر کاتیون‌های لایهٔ دوگانه، ساختار خاک نیز فلوکوله شده و این امر باعث افزایش کارایی و اصلاح خصوصیت‌های تورمی و انقباضی خاک می‌شود. هم‌چنین درواکنش‌های بلند مدتاین واکنش‌ها ویژگی‌های مقاومتی خاک را افزایشمی‌دهند که زمان این واکنش‌ها وابسته به نرخ تخریب ساختارها و هیدراته شدن سیلیکات و آلومینات است (نیکلسون و کاشیاپ[4]، ۱۹۹۳).حضور خاکستر بادی

1.Puppala and Musenda
2. Sub-bituminous Coal and lignite
3. Fly ash
4. Nicholson and Kashyap

میزانPI را کاهش داده است که این امر ناشی از تغییر کاتیون‌های لایهٔ دوگانه وکاهش ضخامت این لایه است.افزایش مقاومت، ناشی از فلوکوله شدن ساختار و مقدار کمی واکنش‌های پوزولانی بین خاک و خاکستر بادی است (پوپالا و همکاران، ۲۰۰۳).حضور خاکستر بادی میزان تورم نمونه‌ها را کاهش داده، مکانیزم این کاهش نیز همانند مکانیزم کاهش PI است.

۷. نتیجه‌گیری

از این پژوهش نتایج ذیل قابل استنتاج است:

– گچ یا سولفات کلسیم آبدار،به تنهایی تاثیری بر تورم خاک ندارد، اما سولفات کلسیم خشک یا انیدریت با جذب آب باعث ایجاد تورم در خاک می‌شود.

– میزان تراکم اثر مستقیم بر پتانسیل تورمی خاک دارد. این موضوع علت اصلی وارد آمدن خسارت‌های بهسازه‌های سبک است.

– حضور سولفات‌ها حتی در غلظت‌های پایین باعث ایجاد تورم‌های شدید در خاک‌های تورمی تثبیت شده با تثبیت کننده‌های کلسیم‌دار می‌شود.

– باید استفاده از تثبیت کننده‌های سیمان و آهک (به طور کلی تثبیت کننده‌های کلسیم‌دار) در مناطقی که خاک حاوی سولفات است، همراه با دقت بیش‌تری صورت گیرد و هم‌چنین در صورت لزوم روش‌های اصلاحی جهت جلوگیری از ایجاد تورم و خرابی در سازه‌ها صورت گیرد.

– مقدار اترینگایت و توموسایت تشکیل شده وابسته به مقدار سه کانی تشکیل دهنده یعنی رس، سولفات و آهک (یا تثبیت کننده های کلسیم دار دیگر) و هم‌چنین دما می‌باشد.

– بر اساس آزمون pH و بررسی میزان تنش پیش تحکیمی، میزان درصد آهک لازم برای تثبیت خاک موردنظر تعیین می‌گردد. به گونه‌ای که بر اساس آزمون‌های مکانیکی به ازای افزایش هر درصد آهک، افزایش میزان تنش پیش تحکیمی مدنظر قرار می‌گیرد.

– دوره عمل‌آوری بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تأثیر عمده‌ای ایجاد می‌کند. به نحوی که حد روانی، تنش پیش تحکیمی و ضریب فشردگی با تثبیت با آهک و با گذشت زمان به شدت کاهش می‌یابند.

– از بین روش‌های ذکر شده برای بهسازی خاک‌های متورم شوندهٔ گچ دار از جمله اختلاط دو مرحله‌ای آهک، سیمان ضد سولفات، سرباره، خاکستر بادی و آهک با فیبر پلی‌پروپیلن استفاده از سیمان ضد سولفاته و آهک بیش‌ترین تأثیر را در بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک داشته که از مکانیزم‌های احتمالی آن می‌توان به تبادل کاتیونی، فلوکوله شدن ساختار خاک و واکنش‌های سمنتاسیون و پوزولانی اشاره کرد.

منابع

الف. فارسی

۱. غیاثیان،حسین و ابراهیمی،مهدی. (۱۳۸۱). تاثیراختلاط آهک و نوع خاک بر مقاومت وتورم.*خاک‌های سولفاته نشریه ژئوتکنیک و مقاومت مصالح*، ۸۹: ۱–۱۳.

۲. فاخر، علی و عسگری، فرج‌اله. (۱۳۷۲). تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندسی ژئوتکنیک، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.

ب. انگلیسی

3. Azam, S., Abduljauwad, S.N., Al-Shayea, N.A., Al-Amoudi, O.S.B. (2000). Expansive characteristics of gypsiferous/anhydritic soil formations. Eng. Geol. 51: 89–107.
4. Afès, M., Didier, G. (2000). Stabilization of expansive soils: The case of clay in the area of Mila (Algeria). *Bulletin of Engineering Geological Environment*, 59(1): 75-83.
5. Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman Building and Environment, 40 (5): 681–687.
6. Bugge W. A. and Bartelsmeyer R. R. (1961). Soil Stabilization with Portland Cement. *National Research Council*, Washington, DC, Highway Research Board Bulletin, 292: 1–15.

7. Bandyopadhyay, S.S. (1981). Prediction of Swelling Potential for Natural Solis. *Journal of Geotechnical Engineering Division,* ASCE, 107. GTS.
8. Basma, A.A. (1993). Prediction of Expansion Degree for Natural Compacted Clays, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODY, 16 (4).
9. Basma A.A.,Tuncer E.R. (1991). Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays, *Transportation research record*, 1295: 52-61.
10. Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237.
11. Chen F. H. (1988). In Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 12. Foundations on expansive soils. Elsevier, Amsterdam.
12. Das, B. M. (1990). *Principle of foundation engineering*, PWS-KENT publishing company, Boston.
13. Donaldson, G.W. (1969). The Occurrence of Problems of Heave and the Factors Affecting its Nature. *Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas A & M Press.
14. Eades, J.L., Grim, R.E. (1966). A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. *Highway Research Record*, 139: 61–72.
15. Einstein H.H. (1996). Tunneling In Difficult Ground. Swelling Behavior and Identification of Swelling Rocks ،Rock Mech. *Rock Engineering*, 29 (3), 113-124.
16. Ferris, G.A., J.L. Eades, R.E. Graves and G.H. Mclellan.(1991). *Improved characteristics in sulfate soils treated with barium compounds before lime stabilization*. Transportation Res. Rec. 1295 TRR.
17. Hausmann M. R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill, New York.
18. Hunter D. (1988). Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114 (2): 150-167.
19. Ingles, O.G., Metcalf, J.B. (1987). *Soil Stabilization Principles and Practice*. Butterworths, Melbourne.
20. Jahanshahi, M. (2005). An Improvement Method for Swell Problem in Sulfate Soils that Stabilized by Lime, *American Journal of Applied Sciences*, 2(7):1121-1128.

21. Khattab S.A.A. (2002). Etude multi-échelles d'un sol argileuxplastiquetraité à la chaux. PhD thesis, University of Orléans, France, 249.
22. Little N. D. (1987). Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime. *National Lime Association Bulletin*, 332.
23. Mallela, J., Quintus, H. V. and Smith, K. (2004). Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. *The National Lime Association.*
24. Mehta, P. K. (1973). Effect of Lime on Hydration of Pastes Containing Gypsum and Calcium Aluminates or Calcium Sulfoaluminate. *Journal of the American Ceramic Society*, 56(6): 315–319.
25. Mitchell J. K. (1984). Practical problems from surprising soil behavior. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3): 259-289.
26. Nicholson P. G. and Kashyap V. (1993). Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36, 15–19.
27. Nalbantoglu, Z., Tuncer, E.R. (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 154–160.
28. Ozyildirim H. C. (1990). Admixtures and Ground Slag for Concrete. National Research Council, Washington, DC, *Transportation Research Board*, 365: 33-43.
29. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M., Ouhadi, M.H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Appl. Clay Sci*. 95: 111–118.
30. Perrin, L. (1992). Expansion of lime-treated clays containing sulphates. Proceedings of the Seventh InternationalConference on Expansive Soils, *ASCE Expansive Soils Research Council*, New York, 1, 409–414.
31. Puppala A. J. and Musenda C. (2000). Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change Behavior of Expansive Soils. National Research Council, Washington, DC, *Transportation Research Board TRR*, 1721.
32. Puppala, A. J., Wattanasanticharoen, E. and Punthutaecha, K. (2003). Experimental Evaluations of Stabilization Methods for Sulphaterich Expansive Soils. *Ground Improvement*, 7 (1), 2003. 25-35.

33. Puppala, A.J., Naga S. Talluri., Bhaskar S. Chittoori and Ahmed Gaily. (2012). Lessons Learned from Sulfate Induced Heaving Studies in Chemically Treated Soils. Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control. *Research Publishing*, 1(November): 85-98.
34. Prakash B.S. Kota, Darren Hazlett and Les Perin.(1996). Sulfate-bearing soils: Problems with calcium-based stabilizers. *Transportation Res*. Rec. 1546 TRR.
35. Rajasekaran, G. (2005). Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean Engineering*, 32 (8–9): 1133-1159.
36. Schoute, E. J. (1999). Chemical Stabilization of Soft Clay. MS thesis, Delft University. *Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands*, No. 188.
37. Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. Inc.
38. Thompson, M. R. (1966). *Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures*. Highway Research Record, Washington, D.C., 139, 1-14.
39. Twinhofel, W.H. (1950). *Principles of Sedimentation*. 2nd Ed, Mc Graw-Hill Book Co., Inc.
40. Viswanadham, B.V.S., Phanikumar, B.R., Mukherjee, Rahul V. (2009). Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 27 (1): 73–76.
41. Wang, L. (2002). *Cementitious Stabilization of Soils in the Presence of Sulfate*. Ph.D. dissertation. Louisiana State University, Baton Rouge.
42. Yaujun Du, Shenglin Li, Shigenori Hayashi. (1999). Swelling-Shrinkage Properties and Soil Improvement of Compacted Expansive Soil, Ning-Liang Highway, China. Engineering Geology 53: 351-358
43. Yong, R.N., Ouhadi, V.R. (2007). Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. Appl. *Clay Sci*. 35(3–4): 238–249.