کاربرد خاک ومصالح شنی تثبیت شده با آهک در راهسازی

نوشته:

دکتر امیرمحمد طباطبائی
استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیـــــده

برخی از خاکها به علت مشخصات فنی‌نامطلوب از نوع بد یا نامرغوب محسوب شده و مشکلات زیادی از نظـــر فنی و اقتصادی در راهسازی ایجادمی‌نمایند. در این موارد اغلب یا اقدام به تغییر مسیر راه و یا تعویض خاک می‌گردد. هرگاه بنا به عللی امکان تغییر مسیر راه و یا تعویض خـــاک نباشد، روش تثبیت خاک[1] باید مورد بررسی قرار گیرد تااگر این روش از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد مبادرت به‌انجام آن شود. تثبیت مصالح شنی[2] با آهک سبب افزایش دوام و قدرت باربری آن می‌شود. از این جهت هرگاه از مصالح شنی تثبیت شده با آهک در لایه های اساس[3] و یا زیر اســـاس[4] روسازی ها استفاده شود می‌توان از ضخامت کل روســـازی کاست. دراین مقاله تاثیر آهک بر روی خاکها و مصالح شنی مورد بررسی قرار گرفته و خواص و ویژه گی های‌مصالح تثبیت شده با آهک شرح داده شده است تا با شناخت بیشتر ایـــن گونه مصالح ازآن بطور اصولی تر در راهسازی استفاده گردد.

۱ـ مقـــدمـــه

سال ها است که از انواع موادآهکی بادرجات‌خلوص مختلف برای تثبیت خاک و مصالح شنی استفاده می‌شود. متداول‌ترین این‌مواد :آهک شکفته[5]،آهک شکفته‌دولومیتی[6]، آهک زنده[7]،وآهک زنده دولومیتی[8] می‌باشد. تثبیت‌خاک با آهک سبب بهبود کیفیت و مشخصات فنی‌خاک و تسریع در انجام عملیات راهسازی می‌گردد. خاک تثبیت شده بـا آهک بهتراز خاک تثبیت نشده دربرابر عوامل جوی (رطوبت و یخبندان) مقاومت نموده ودارای مقاومت و قابلیت باربری بیشتری می‌باشد. تثبیت خاک با آهک با استفاده از وسائل و ماشین آلات متداول‌راهسازی امکان پذیر می‌باشدوکارگران ایرانی به استفاده از آهک آشنا هستند (شفته آهکی و بتـــن آهکی).

در راهسازی از آهک برای ساختن لایه های اساس و زیر اساس و تثبیت خاکریزهاو خاک بستر روسازی های‌راه، راه آهن و فرودگاه استفاده شده که نتایج‌خوبی داشته‌است. میزان آهک مصرفی برای تثبیت‌خاک به عوامل متعددی از قبیل جنس خاک، جنس‌آهک، نحوه استفاده از مصالـــح، شرایط جوی منطقه، هدف از تثبیت‌خاک و هزینه انجـــام عملیات بستگی داشته و معمولا" مقدار آن بین ۰/۵ تا ۸ درصد وزن خشک خاک می‌باشد.

برای تثبیت خاک از آهک به صورت زنده، شکفته و یا دوغاب می‌توان استفاده نمود. مصالح تثبیت شده بـا آهک ممکن است که درجا ساخته شده و یا پس‌از تهیه بـــه

1- Soil Stabilization
2- Granular Materials
3- Base
4- Subbase
5- Hydrated Lime ($Ca(OH)_2$)
6- Monohydrated Dolomitic Lime ($Ca(OH)_2Mgo$)
7- Quick Lime (CaO)
8- Dolomitic Quick Lime (CaO.Mgo)

محل مصرف حمل گردد . تثبیت خاک درجا شامل مراحل اصلی شیار دادن وآماده کردن خاک ، پخش آهک ، اختلاط و آب پاشی ، کوبیدن مصالح ، تسطیح و عمل آوردن می‌باشد .

۲ــ واکنش‌های خاک ــ آهک

افزودن‌آهک به خاکهای ریزدانه موجب شروع‌چندین واکنش می‌گردد .واکنش تبادل یونهای‌مثبت[1] و واکنش‌تجمع ــ تراکم[2] آنی بوده و به مجرد تماس‌آهک با خاکهای ریز دانه شروع شده وسبب بهبود خصوصیات خمیری و مقاومت خاک می‌شود . در رابطه زیر که به سری لیوتروپی[3] موسوم می‌باشد ترتیب کلی مبادله یون هائی که معمولا" در خاکها یافت می‌شود آورده شده است .

$$Na^{+} < K^{+} < Ca^{++} < Mg^{++}$$

دراین سری هریک از یون ها تمایل به جایگزینی یون هائی که درسمت چپ آن قرار دارد بوده و یون های‌یک ظرفیتی با یون های چند ظرفیتی جایگزین می‌شود . تبادل یونها در خاک پس از افزودن مقدار کافی آهک به خاک آغاز می‌شود . دراین تبادل یونی ، یون کلسیم(Ca^{++}) جایگزین یون های قابل جایگزینی خاک می‌شود . هرگاه تمام یون های قابل جایگزینی قبلا" با یون کلسیم جایگزین شده باشند ، دیگر واکنش تبادل یون ها در خاک صورت نگرفته و یا میزان آن حداقل خواهد بود .

در اثر واکنش تجمع ــ تراکم دانه های رس مجتمع گردیده و به صورت دانه های بزرگتر در می‌آیند که به طور آشکار سبب تغییر بافت خاک می‌گردد . براساس مطالعات انجام شده توسط هرزاگ و میچل[4]معلوم گردیده که واکنش تجمع ــ تراکم در اثر افزایش قدرت الکترولیزی آب های منفذی موجود در خاک می‌باشد . مطالعات انجام شده‌توسط دایموند و کینتر[5]نشان داده است‌که بوجود آمدن‌مواد سمنتی آلومینات کلسیم‌هیدراته تاثیر زیادی در شروع واکنش‌تجمع ــ تراکم در مخلوط خاک و آهک دارد .

واکنش‌دیگری که در بر خی از خاکها پس از افزودن آهک بوجود می‌آید واکنش پوزولانی[6] می‌باشد . واکنش پوزولانی به واکنشی که بین‌آهک و آب و مواد سیلیس دار و آلومین دار خاک انجام می‌شود اطلاق می‌گردد . منبع سیلیس و آلومین در اغلب خاکها وجود کانی های رسی ، کوارتز ، فلدسپات ، میکا و سایر کانی های سیلیکات دار و آلومینات ــ سیلیکات دار چه به صورت کریستال و یا به صورت بی شکل می‌باشد . واکنش پوزولانی سبب بوجود آمدن مواد سمنتی می‌شود که باعث افزایش مقاومت و دوام خاک تثبیت شده با آهک می‌گردد . واکنش پوزولانی تابع زمان بوده و بنابراین‌افزایش مقاومت خاک به کندی صورت گرفته و گاهی این‌افزایش مقاومت‌ممکن است تا چندین سال به طول انجامد . واکنش پوزولانی علاوه بر زمان تابع درجه حرارت و رطوبت نیز می‌باشد . در گرمای کم تر از ۱۳ تا ۱۶ درجه سانتی گراد واکنش پوزولانی کند شده و در درجه حرارت های بیشتر شدت این واکنش افزایش می‌یابد .

هرگاه به‌خاک مقدارکافی‌آهک اضافه شودPH مخلوط افزایش یافته ومیزان آن تا ۱۲/۴ که PH آب اشباع شده از آهک است بالا می‌رود . مطالعات انجام شده توسط کلر[7] نشان داده است که افزایش قابل توجهPH خاک سبب افزایش قابلیت حل شدن سیلیس و آلومین در آب‌می‌گردد . در مطالعات مشابهی که توسط ادز[8] انجام گرفته پیشنهاد گردیده است که میزانPH زیاد در مخلوط خاک و آهک‌سبب می‌گردد که سیلیس از ساختمان کانی های رسی جدا شده و درآب حل شده و آماده برای ترکیب با یون های کلسیم (Ca^{++}) گشته و پس از ترکیب تشکیل سیلیکات کلسیم دهد . این واکنش تا زمانی که هیدرات کلسیم ویا سیلیس در خاک موجود باشد ادامه می‌یابد . مطالعات انجام شده توسط دایموند و همکارانش[9] منتهی به این نتیجه گردید که مراحل انجام واکنش پوزولانی در مخلوط های خیلی قلیائی خاک و آهک مشتمل بر حل شدن گوشه های ذرات سیلیکاتها و سپس ته نشین شدن مواد حاصل از این واکنش می‌باشد .

1- Cation Exchange
2- Flocculation-Agglomeration
3- Lyotropic
4- Herzog and Mitchell
5- Diamond and Kinter
6- Pozzolanic Reaction
7- Keller
8- Eades
9- Diamond et al

اگرچه این مطالعات و بررسی ها بطور کلی تاکید بر وجود یک مکانیزم حلالیت کامل[1] را دارد که در آن مواد تشکیل دهنده رس در آب حل شده و از ساختمان کانی های رسی جدا می‌شودو به صورت سیلیکات و آلومینات کلسیم هیدراته دوباره رسوب می‌نماید ، لیکن واکنش مستقیم آهک‌را با سطح‌ذرات کانی های رسی نیز نمی‌توان مردود فرض‌نمود . مطالعاتی‌که اخیرا " در رابطه باجذب آهک توسط کائولینیت[2] ومونت موریلونیت[3] وهمچنین‌مطالعات انجام شده با استفاده از میکروسکپ های الکترونیکی بر روی مخلوط رس ـ آهک ـ آب انجام شده موید این امر است که‌واکنش های سطحی می‌تواند انجام گیرد و این‌واکنش هامستقیما " بر روی سطح ذرات رس موثر می‌باشد . لذا این امکان‌وجود دارد که‌واکنش پوزولانی در اثر مجموعه ای از حلالیت‌کامل (حل شدن ـ رسوب کردن[4]) و واکنش سطحی (هیدراته شدن ـ متبلور شدن[5]) انجام گیرد .

در زیر روابط ساده شده واکنش های کیفی معمول خاک و آهک آورده شده است :

$$Ca(OH)_2 \text{ - - - - - - - - - - } \rightarrow Ca^{++}+2(OH)^-$$

$$Ca^{++}+2(OH)^-+SiO_2 \quad \text{- - - } \rightarrow \bar{C}\bar{S}\bar{H}$$

$$Ca^{++}+2(OH)^-+Al_2O_3 \quad \text{- - - } \rightarrow \bar{C}\bar{A}\bar{H}$$

معمولا " انواع مختلف هیدراتها با توجه به شرایط واکنش (جنس و نسبت درصدآهک ، مشخصات خاک ، درجه‌حرارت و زمان عمل آوردن) بوجود می‌آید . واکنش های معمول آهک‌و خاک عبارتند از :

آهک + رس (کائولینیت)

$$\text{- - - - - - - - } \rightarrow \bar{C}\bar{S}\bar{H}\ (\frac{\bar{C}}{\bar{S}}=0.2-1)+\bar{C}\bar{A}\bar{H}+\bar{C}\bar{A}\bar{S}\bar{H}$$

$$\text{- - - - - - - - آهک+رس(کائولینیت)} \rightarrow \bar{C}\bar{A}\bar{S}\bar{H}$$

$$\text{- - - - - - - - آهک+ رس (مونت موریلونیت)} \rightarrow \bar{C}\bar{S}\bar{H}$$

$$\text{- - - آهک + رس (مونت موریلونیت)} \rightarrow \bar{C}\bar{S}\bar{H}+\bar{C}_4\bar{A}\bar{H}_{13}$$

$$\text{- - - - آهک+ رس} \rightarrow \bar{C}\bar{S}\bar{H}+\bar{C}_4\bar{A}\bar{H}_{13}+\bar{C}_3\bar{A}\bar{H}_6$$

در این روابط: $\bar{H}=H_2O, \bar{A}=Al_2O_3, \bar{S}=SiO_2, \bar{C}=CaO$ می‌باشد .

میزان واکنش پوزولانی در خاکها بستگی به خصوصیات خاک دارد . در مورد برخی خاکها میزان واکنش پوزولانی قابل توجه نبوده و در نتیجه مواد سمنتی زیادی بوجود نمی‌آید . براساس مطالعات انجام شده توسط تامسون[6] خاکها از نظر میزان واکنش با آهک به دو گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از خاکهای با واکنش[7] وخاکهای بدون واکنش[8] . خاکهای با واکنش خاکهائی هستند که پس از تثبیت با آهک و عمل آمدن به مدت ۲۸ روز در گرمای ۲۲/۸ درجه سانتی گراد بیش از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش مقاومت فشاری تک محوری (محدود نشده)[9] از خودنشان دهند .خاکهائی که میزان افزایش مقاومت آنها پس از اختلاط با آهک و عمل آمدن کمتر از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع باشد خاکهای بدون واکنش نامیده‌می‌شوند .

بسیاری از مشخصات خاک بر روی واکنش پوزولانی تاثیر دارد که مهم ترین آنها عبارتند از : PH خاک ، درصد کربن مواد آلی ،شرایط زهکشی ، وجود مقدار کافی یون‌سدیم قابل جایگزینی ،نوع کانی های رسی ،درجه هوازدگی ،وجود کربناتها ، آهن قابل ترکیب ونسبت سیلیس به‌آلومین‌خاک . لازم به یادآوری می‌باشدکه مشخصات و خصوصیات خاک از مهم ترین عواملی است که بر روی واکنش پوزولانی و بوجود آمدن مواد سمنتی تاثیر می‌گذارد . اگر خاکی‌از نوع غیر واکنشی باشد صرفنظر از جنس و میزان‌آهک مصرفی و نحوه عمل آوردن مخلوط خاک وآهک ، واکنش پوزولانی انجام نگرفته و در نتیجه مصالح بدست آمده‌دارای افزایش مقاومت قابل توجهی نخواهد بود .

1- Through Solution
2- Kaolinite
3- Montmorillonite
4- Solution-Precipitation
5- Hydration-Crystallization
6- Thompson
7- Reactive Soils
8- Non-Reactive Soils
9- Unconfined Compression Strength

۳ـ مشخصات فنی و ویژه‌گی های خاکهای تثبیت شده با آهک

بطور کلی تمام خاکهای ریز دانه پس از اختلاط با آهک دارای کیفیت بهتری از نظر خصوصیات‌خمیری می‌شوند ، لیکن اضافه کردن آهک به هر خاکی ممکن است سبب افزایش مقاومت آن نگردد .

۳ـ۱ـ تراکم

مشخصات مربوط به تراکم مخلوطهای خاک و آهک‌که عبارتند ازحداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت‌بهینه[1] به دو دلیل از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد . دلیل اول آن است که برای آنکه نتیجه خوبی از تثبیت خاک حاصل شود باید بتوان مصالح تثبیت شده را تا حد قابل قبول‌کوبید و متراکم نمود . دلیل دوم که شاید دلیل مهم تری باشد آن است‌که کنترل نتیجه عمل تثبیت خاک در کارگاه براساس وزن مخصوص مصالح انجام می‌گیرد .

خاک تثبیت شده باآهک دارای حداکثر وزن‌مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه بیشتری از خاک تثبیت نشده می‌باشد (شکل ۱) . هر اندازه میزان آهک مصرفی برای تثبیت‌خاک بیشتر باشد ، مقدار این اختلاف نیز بیشتر خواهد بود .ضمنا" هر اندازه‌با گذشت زمان مواد سمنتی بیشتری در خاک تثبیت شده تشکیل شود ، حداکثر وزن مخصوص خشک مصالح کمتر و درصد رطوبت بهینه آن بیشتر خواهد بود . از این جهت آهک یکی از مناسب ترین مواد برای کاهش رطوبت و اصلاح خاکهای بستر[2] ریزدانه که میزان رطوبت آنها نسبتا" زیاد است می‌باشد .

۳ـ۲ـ خصوصیات خمیری

اضافه کردن آهک به خاک سبب‌کاهش خصوصیات خمیری خاک می‌شود (شکل ۲) ، بطوری که در برخی موارد ممکن است **مخلوط خاک و آهک کاملا غیر خمیری گردد .** خاکهائی که دارای مقدار بیشتری رس هستند و یا دامنه خمیری[3] آنهابیشتو است نیاز به مقدار بیشتری آهک برای رسیدن به حالت غیرخمیری[4] دارند . اگر اضافه کردن آهک به خاک در چند مرحله انجام شود ، معمولا "مقدار آهکی که در محله اول به خاک اضافه می‌شود دارای تاثیر بیشتری در کاهش خصوصیات خمیری خاک بود و بترتیب در مراحل بعدی ازتاثیر آن کاسته می‌شود . کاهش خصوصیات خمیری خاک موجب می‌شود که کار کردن با خاک اصلاح شده سهل‌تر شده و جابجا کردن آن در کارگاه ساده تر صورت بگیرد .

۳ـ۳ـ قابلیت تورم و انقباض

اصلاح خاکهای رسی با آهک بطور قابل ملاحظه‌ای از قابلیت تورم این خاکها که در اثر افزایش رطوبت بوجود می‌آید کم می‌کند . علت این کاهش تورم کم شدن میل به جذب آب توسط ذرات رس اشباع شده از آهک و همچنین بوجود آمدن یک استخوان بندی از مواد سمنتی می‌باشد که در برابر افزایش حجم مصالح مقاومت می‌نماید .

اگر چه خاک تثبیت شده با آهک دارای انقباض کمتری از خاک تثبیت نشده می‌باشد (شکل۳) ، لیکن مساله جمع شدن یا انقباض خاکهای تثبیت شده با آهک که دراثر کاهش رطوبت مصالح بوجودمی‌آید ازاهمیت‌زیادی‌برخوردار بوده و سبب بوجود آمدن ترکهای انقباضی می‌گردد . هر اندازه دامنه خمیری خاک اولیه بیشتر باشد ، میزان‌انقباض خاک تثبیت شده نیز بیشتر خواهد بود .

اندازه گیری های رطوبت خاکهای تثبیت شده با آهک نشان داده است که تغییرات رطوبت این گونه مصالح زیاد نبوده و در عمل میزان رطوبت طبیعی این مصالح در حدود درصد رطوبت بهینه‌آنها تثبیت می‌شود .

۳ـ۴ـ مقاومت

ارزیابی مقاومت خاکهای تثبیت شده با آهک با انجام آزمایش‌های مختلفی انجام می‌گیرد . متداول ترین این آزمایشات ، آزمایش‌تعیین نشانه باربری کالیفرنیا[5] ، آزمایش فشاری تک محوری ، آزمایش کشش غیر مستقیم[6] و

1- Optimum Moisture Content
2- Subgrade Soil
3- Plasticity Index
4- Non Plastic
5- California Bearing Ratio (CBR)
6- Indirect Tensile Test

آزمایش برش سه محوری[1] می‌باشد .

مقاومت آنی

معمولا " بلافاصله پس از اضافه کردن آهک به خاک مقاومت و استقامت خاک بطور محسوسی افزایش می‌یابد (شکل ۴) . این‌افزایش آنی‌مقاومت انجام عملیات اجرائی را برروی خاکهای چسبنده و خمیری تسهیل کرده و سبب بهبود کیفیت خاک بستربرای اجرای روسازی می‌شود . مقدار افزایش آنی مقاومت خاکهای اصلاح شده با آهک بستگی به میزان آهک مصرفی دارد . هر اندازه مقدار آهک مصرفی‌بیشتر باشد ، مقاومت آنی مصالح نیز بیشتر خواهد بود (شکل ۴و۵) .

مقاومت در دراز مدت

مقاومت فشاری تک محوری خاکهای ریز دانه که در درصد رطوبت بهینه متراکم شده و عمل آمده باشد معمولا " بین ۲ تا بیش از ۲۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع متغییر بوده و بستگی به جنس خاک دارد . آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های خاک‌رس (A ـ۶) اصلاح شده باآهک که‌برای‌خاکریز راه آزمایشی اشتو[2] بکار رفته است‌نشان داد که این خاکها پس از اختلاط با ۵ درصد آهک و عمل آمدن به مدت ۷۵ روز درگرمای ۴۸/۹ درجه سانتی گراد بطور متوسط مقاومتی برابر با ۱۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع داشت .آزمایشات‌کارگاهی نشان داده است که افزایش مقاومت خاکهای تثبیت شده با آهک با گذشت زمان ادامه پیدا کرده و در برخی موارد این افزایش مقاومت تابیش از ۱۰ سال ادامه داشته است .معمولا " تفاضل عددی بین‌مقاومت فشاری خاک طبیعی و مقاومت خاک تثبیت شده با آهک به عنوان نشانه ای از درجه واکنش پوزولانی مخلوط خاک و آهک بکار می‌رود .افزایش قابل توجه مقاومت خاک نشانه ای است‌ازاینکه خاک با آهک واکنش‌خوبی داشته‌و احتمالا " قابل تثبیت با آهک بوده‌و از مصالح‌تثبیت شده می‌توان برای ساختن لایه های روسازی استفاده نمود .

اضافه کردن آهک به خاکهای ریز دانه ای که دارای واکنش خوبی باآهک هستند سبب افزایش مقاومت برشی این خاکها می‌گردد .این افزایش مقاومت به علت‌افزایش مشخصات مکانیکی خاک (چسبندگی[3] و زاویه اصطکاک داخلی[4]) می‌باشد . در مورد روسازی های انعطاف پذیر[5] (آسفالتی‌و شنی)که معمولا "فرض براین است که روسازی تحت فشارهای جانبی کمی می‌باشد افزایش مقدار چسبندگی از اهمیت ویژه ای برخوردار است . برای تعیین‌مقاومت برشی از آزمایش برشی سه محوری که بر روی نمونه های‌تحکیم‌نشده[6] و زهکشی نشده خاک انجام می‌گیرد استفاده می‌شود تا مقاومت برشی خاک در شرایطی تقریبا " مشابه شرایط کارگاهی اندازه گیری شود . آزمایشات انجام شده بر روی خاکهای رسی‌که دارای واکنش خوبی با آهک می‌باشند نشان داده است که مقدار زاویه اصطکاک داخلی این خاکها پس‌از تثبیت با آهک بین ۲۵ تا ۳۵ درجه متغیر است . پارامتر چسبندگی این‌نوع خاکها پس از تثبیت با آهک به میزان قابل توجهی افزایش یافته و مقدار این افزایش متناسب با افزایش مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد . خاکهای تثبیت شده با آهک دارای مقاومت برشی قابل توجهی هستند . نتایج بررسی های کارگاهی نشان داده است که بکار بردن خاک تثبیت شده با آهک با کیفیت خوب در روسازی سبب جلوگیری از شکست برشی[7] سیستم روسازی می‌گردد .

تعیین مقاومت کششی خاکهای تثبیت شده با آهک که در روسازی ها بکار می‌روند از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا لایه های این گونه مصالح بعلت داشتن سختی قابل توجه نظیر یک دال[8] عمل می‌کند . برای تعیین‌مقاومت کششی مصالح تثبیت شده از آزمایش کشش غیر مستقیم و یا آزمایش خمشی[9] استفاده می‌شود . نتایج آزمایشات کشش‌غیر مستقیم انجام شده بر روی خاکهای تثبیت شده با آهک نشان داده است که این گونه مصالح دارای مقاومت کششی قابل توجه ای می‌باشد .

آزمایشات تجربی انجام شده بر روی خاکهای تثبیت شده با آهک نشان داده است که مقاومت کششی این مصالح تقریبا برابر ۰/۱۳ مقاومت فشاری تک محوری آنها است . روش متداول دیگر برای تعیین مقاومت کششی مصالح تثبیت شده انجام آزمایش خمشی می‌باشد . مقاومت کششی که ازاین آزمایش بدست می‌آید به ضریب‌گسیختگی[10] موسوم

1- Triaxial Shear Test
2- AASHTO Road Test
3- Cohesion
4- Angle of Internal Friction
5- Flexible Pavements
6- Unconsolidated
7- Shear Failure
8- Slab Action
9- Flexural Test
10-Modulus of Rupture

می‌باشد و مقدار آن برای خاکهای تثبیت شده با آهک حدود ۱/۳ تا ۲/۵ برابر مقاومت‌کششی است که از آزمایش کشش‌غیر مستقیم حاصل می‌شود . مقاومت کششی حاصل از انجام آزمایش خمشی خاکهای تثبیت شده با آهک معمولا" بطور متوسط ۰/۲۵ مقاومت فشاری تک محوری این مصالح می‌باشد .

انجام آزمایش تعیین نشانه باربری کالیفرنیا (CBR) برای ارزیابی مقاومت خاکهای تثبیت شده با آهک بسیار متداول می‌باشد . اگرچه انجام این آزمایش بر روی خاکهای تثبیت شده با آهک و عمل آورده نشده امکان پذیر می‌باشد ، لیکن نتایج‌بدست آمده بر روی مصالح عمل آمده که دارای مقاومت نسبتا" زیادی هستند (CBR بیش از ۱۰۰) قابل استفاده نمی‌باشد . این گونه مصالح که دارای مقاومت زیادی هستند باید با استفاده از آزمایش فشاری تک محوری و یا کششی ارزیابی شوند .

۳ـ ۵ ـ منحنی تنش ـ تغییر شکل نسبی

به منظور تحلیل رفتار روسازی هائی که شامل لایه خاک و یا مصالح ثنی تثبیت شده با آهک هستند لازم است که منحنی نمایش تغییرات تنش و تغییر شکل نسبی این‌مصالح در دست باشد . خاکهای تثبیت شده باآهک دارای تنش نهائی بیشتر و تغییر شکل نهائی کمتری نسبت به خاک‌اصلی می‌باشد . در شکل ۶ تاثیر بارز اضافه کردن ۵ درصد آهک به یک نمونه خاک و سپس عمل آوردن آن به‌مدت ۴۸ ساعت در گرمای ۴۸/۹ درجه سانتی گراد بر روی منحنی تنش‌ـ تغییر شکل نسبی نشان داده شده است . نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های خاک‌رس تثبیت شده با آهک نشان داده است که تغییر شکل نسبی مربوط به استقامت فشاری این گونه مصالح تقریبا برابر با ۱ درصد می‌باشد .

۳ـ۶ـ خستگی خمشی

در شکل ۷ نتایج آزمایش خستگی خمشی[1] بر روی چند نمونه خاک تثبیت شده با آهک نشان داده شده است . بطوری که از این شکل مشاهده می‌شود منحنی های خستگی این مصالح مشابه منحنی های خستگی سایر مصالح مشابه از قبیل بتن سیمانی می‌باشد .استقامت خستگی خمشی‌نمونه‌های مصالح بکار رفته در این آزمایش برای ۵ میلیون دفعه بارگذاری بین ۴۱ تا ۶۶ درصد مقاومت خمشی نهائی آنها بوده که مقدار متوسط‌آن برابر ۵۴ درصد گردید . در این‌جا لازم به یادآوری است که چون مقاومت خاکهای تثبیت‌شده با آهک با گذشت‌زمان و گرمای محیط افزایش می‌یابد ، لذا اگر تنش های بوجود آمده در این مصالح مقدار ثابتی درهر بارگذاری باشد نسبت این تنش ها به مقاومت نهائی مصالح با گذشت زمان کاهش یافته و در نتیجه تعداد دفعات بارگذاری که برای خسته کردن مصالح لازم می‌باشدافزایش می‌یابد .

۳ـ۷ ـ دوام

منظور اصلی از بررسی دوام[2] خاکهای تثبیت شده باآهک تعیین مقاومت آنهادر برابر عوامل جوی (یخبندان‌ـ ذوب یخ[3] و تغییرات رطوبت) می‌باشد . تاثیر دراز مدت رطوبت بر روی این مصالح معمولا" خیلی شدید نبوده و آزمایشات انجام شده نشان داده است که نسبت مقاومت فشاری نمونه های اشباع شده در آب به مقاومت فشاری نمونه‌های اشباع نشده بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ متغیر بوده است . خاکهای تثبیت شده با آهک در اثر یخبندان ـ ذوب یخ قسمتی ازمقاومت خود را از دست می‌دهند . مقاومت فشاری اولیه خاکهای تثبیت شده باآهک بر روی‌مقاومت این مصالح در برابر یخبندان ـ ذوب یخ تاثیر زیادی داشته و هر اندازه مقاومت فشاری اولیه این مصالح‌بیشتر باشد مقاومت آنهانیز در برابر یخبندان ـ ذوب یخ بیشتر خواهد بود . تعداددفعات تکراریخبندان‌ـ ذوب یخ بر روی میزان کاهش مقاومت مصالح‌تاثیر زیادی‌داشته وبا افزایش‌دفعات‌یخبندان ذوب یخ از مقاومت مصالح بیشتر کاسته می‌شود (شکل ۸) . خاکهائی که دارای واکنش خوبی با آهک هستند معمولا" دوام خوبی از خود نشان می‌دهند ، زیرامقاومت اولیه قابل توجه این مصالح تا حد زیادی جبران کاهش مقاومت دراثر یخبندان ـ ذوب یخ را می‌نماید . در این جا باید تاکید گردد که در طرح مخلوطهای خاک و آهک مساله دوام مصالح عامل مهمی بوده که باید به‌آن توجه گردد .

1- Flexural Fatigue Test 2- Durability 3- Freeze-Thaw

۴ـ طرح مصالح تثبیت شده با آهک

منظور از طرح مصالح تثبیت شده با آهک تعیین درصد آهک مناسب برای انجام عمل تثبیت می‌باشد . قاعده کلی طرح آن است که مصالح باید طوری طرح گردد که دارای عملکرد خوبی به عنوان خاک بستر یا مصالح روسازی باشد . تعیین درصد آهک مناسب برای این عمل معمولا " براساس بررسی و تحلیل تاثیر درصدهای مختلف آهک بر روی خاک موردنظرانجام می‌گیرد .روش های زیادی‌برای‌طرح مخلوط های خاک وآهک وجود داردکه از نظرهدف و منظور از عمل تثبیت آنها را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود . گروه اول شامل روشهائی می‌باشدکه هدف از انجام تثبیت خاک کاهش خواص خمیری ، کاهش تورم و یا افزایش آنی مقاومت می‌باشد .گروه دوم شامل روشهائی است که هدف اصلی از تثبیت خاک افزایش مقاومت و دوام مصالح می‌باشد .

۴ـ۱ـ روش PH

این روش براساس اندازه گیری PH مخلوط خاک و آهک قرار دارد . روش PH یک روش نسبتا " سریع برای تعیین مقدارآهک مناسب برای تثبیت خاک با آهک می‌باشد . اساس این روش براین اصل استوار است‌که آن قدر آهک به خاک مورد نظر اضافه شود تا آنکه میزان PH مخلوط به ۱۲/۴ که مقدار لازم برای شروع واکنش پوزولانی می‌باشد برسد . با وجود آنکه روش PH یک روش سریع و ساده برای تعیین درصد آهک مناسب برای تثبیت خاک می‌باشد ،لیکن این روش‌کاملا " مشخص نمی‌نماید که خاک مورد نظر دارای واکنش خوبی با آهک می‌باشد و مصالح تثبیت شده دارای چه مقاومتی‌خواهد بود .

۴ـ۲ـ روش دامنه خمیری

این روش براساس اندازه گیری دامنه خمیری‌خاک اصلاح شده با آهک قرار دارد . نحوه انجام آزمایش به این ترتیب می‌باشد که ابتدا خاک مورد نظر با آهک مخلوط شده و پس‌از آنکه این مخلوط به مدت یک ساعت به حال خود رها گردید تا واکنش های آنی انجام گیرد تحت آزمایش حدود آتربرگ[1] قرار می‌گیرد . این عمل با درصدهای مختلف آهک تکرار می‌شود و سپس منحنی تغییرات دامنه خمیری برحسب درصد آهک رسم می‌شود . درصد آهک مناسب درصدی است که :

الف ـ بکار بردن درصد آهک بیشتر سبب کاهش دامنه خمیری به مقدار قابل ملاحظه ای نگردد ، و یا ب ـ مقدار دامنه خمیری مخلوط خاک و آهک را به حد مطلوب کاهش دهد .

۴ـ۳ـ روش نشانه باربری کالیفرنیا (CBR)

این روش براساس اندازه گیری ضریب CBR خاک تثبیت شده با آهک قرار دارد . نحوه انجام این آزمایش به این ترتیب می‌باشد که ابتدا خاک وآهک و آب با هم مخلوط شده و پس‌از آنکه به مدت معینی در شرایط مشخصی عمل آمد تحت آزمایش CBR قرار می‌گیرد . این آزمایش با درصدهای مختلف‌آهک تکرارمی‌شود و سپس منحنی تغییرات CBR برحسب درصد آهک در درصد رطوبت های مختلف رسم می‌گردد .درصد آهک مناسب درصدی است که دردرصد رطوبت موردنظر (معمولا "رطوبت بهینه و یا رطوبت‌طبیعی) ضریب CBR خاک برابر مقدار مطلوبی باشد .

هرگاه هدف از تثبیت خاک با آهک کاهش قابلیت تورم خاک باشد ، درصد آهک باید طوری اختیار شود که میزان تورم خاک اصلاح شده با آهک به مقدار مجاز کاهش یابد .

۴ـ۴ـ روش اشتو (AASHTO)

این روش براساس انجام آزمایشات دانه بندی [2] و حدود آتربرگ بر روی‌خاک مورد نظر و سپس استفاده از نموگرام تجربی نشان داده شده در شکل ۹ قرار دارد .نحوه استفاده ازاین نموگرام به این ترتیب می‌باشد که با دردست داشتن درصد مواد ریزتر از ۰/۴۲ میلی متر (مواد ردشده از الک شماره ۴۰) ودامنه خمیری خاک ، درصد وزنی آهک براساس وزن خشک خاک بدست می‌آید . با وجود آنکه روش اشتو[3] یک روش سریع و ساده برای تعیین درصد آهک مناسب برای تثبیت خاک می‌باشد ، لیکن با استفاده‌از این روش نشانه ای از مقاومت خاک تثبیت شده بدست نمی‌آید .

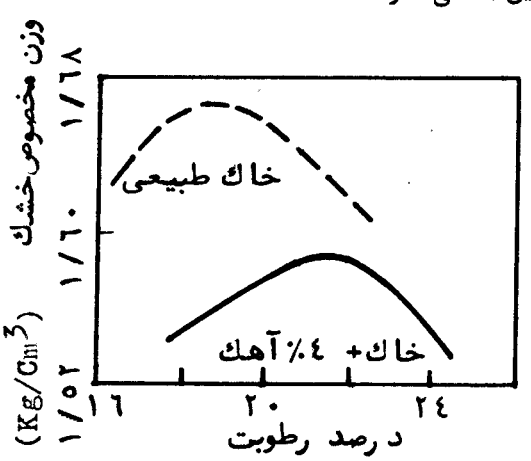
1- Atterberg Limits

2- Grain-Size Analysis of Soils

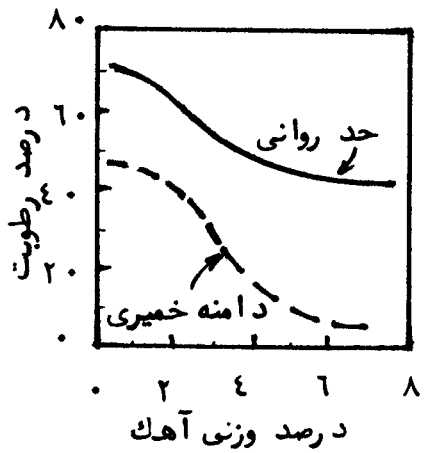
3- AASHTO-T220

۴ـ ۵ ـ روش مقاومت فشـــاری

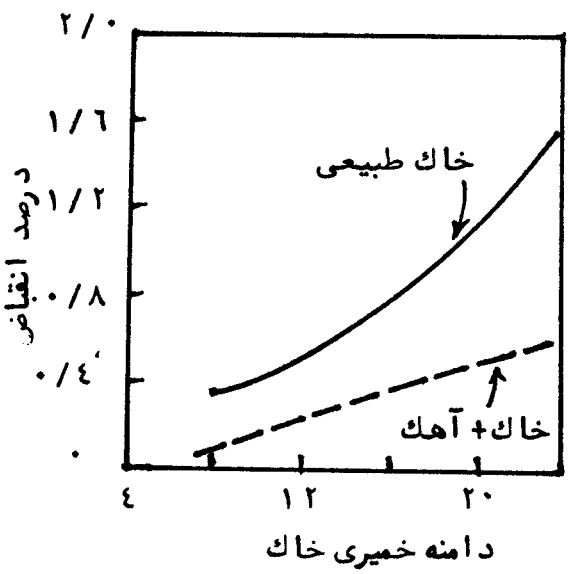
این روش براساس نتایج حاصل از آزمایش‌فشاری تک محوری که بر روی نمونه های خاک تثبیت شده با آهک انجام می‌گیردقرار دارد .نحوه انجام آزمایش به این ترتیب می‌باشد که ابتدا خاک و آهک و آب با یکدیگر مخلوط شده و نمونه‌های استوانه ای شکل با استفاده از روش تراکم اشتو [1] ساختـــه می‌شود . میزان آبی که برای تهیه نمونه ها بکار می‌رود برابر درصد رطوبت بهینه مخلوط خاک و آهک می‌باشد . نمونه‌های بدست آمده به مدت ۴۸ ساعت در گرمای ۴۸/۹ درجـــه سانتی گراد (یا هر شرایط دیگرمورد نظر) عمل آورده شده و سپس تحت آزمایش فشاری تک محوری قرار داده می‌شود .این عمل با درصدهای مختلف آهک تکرار شده و سپس منحنـــی تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصدآهک رسم می‌شـــود . درصد آهک‌مناسب درصدی است که مقدار مقاومت فشـــاری مصالح‌تثبیت شده را به حد مورد نظر افزایش دهد . حداقـل مقاومت فشاری مطلوب برای خاکهای تثبیت شده باآهک بـه عوامل زیادی از قبیل هدف از انجام تثبیت خاک ، نوع‌لایه روسازی ، شرایط جوی منطقه و میزان آمدوشد [2] وسایل نقلیـه سنگین بستگی دارد .



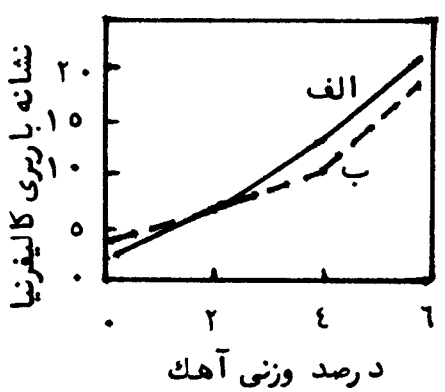
شکل ۱ـ تاثیر آهک بر روی منحنی تراکم .



شکل ۲ـ تاثیر آهک بر روی خصوصیات‌خمیری .



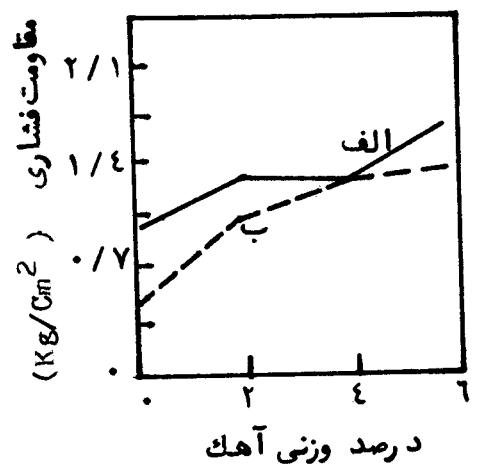
شکل ۳ـ تاثیر آهک بر روی میزان انقبـــاض.



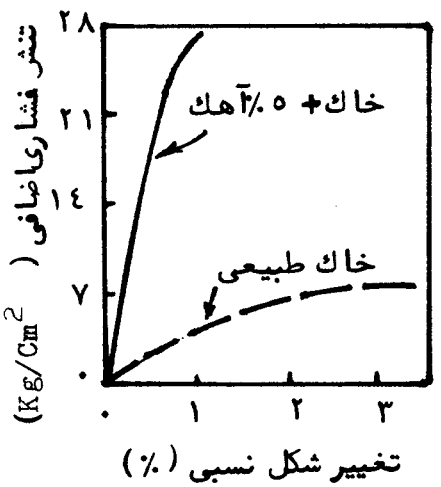
شکل ۴ـ تاثیر آهک بر روی مقاومـــت .

1- AASHTO Compaction Test

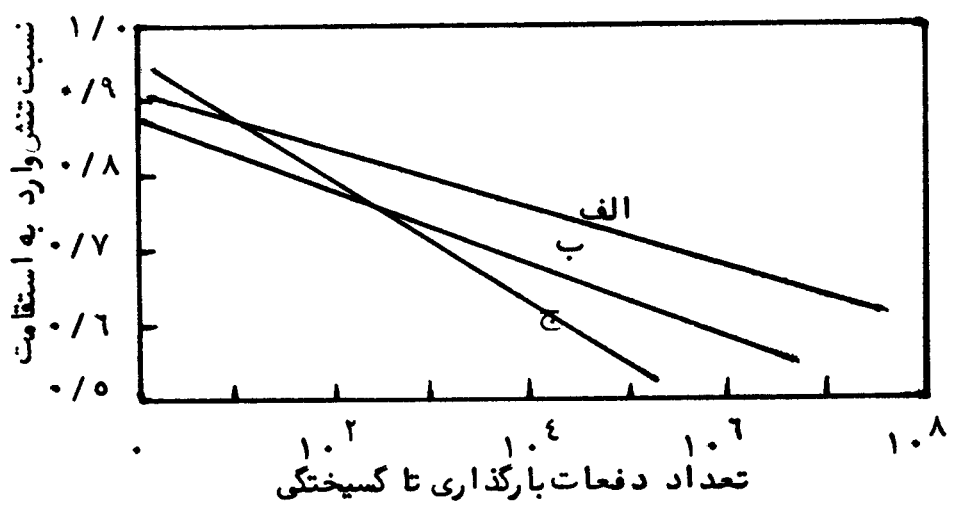
2- Traffic



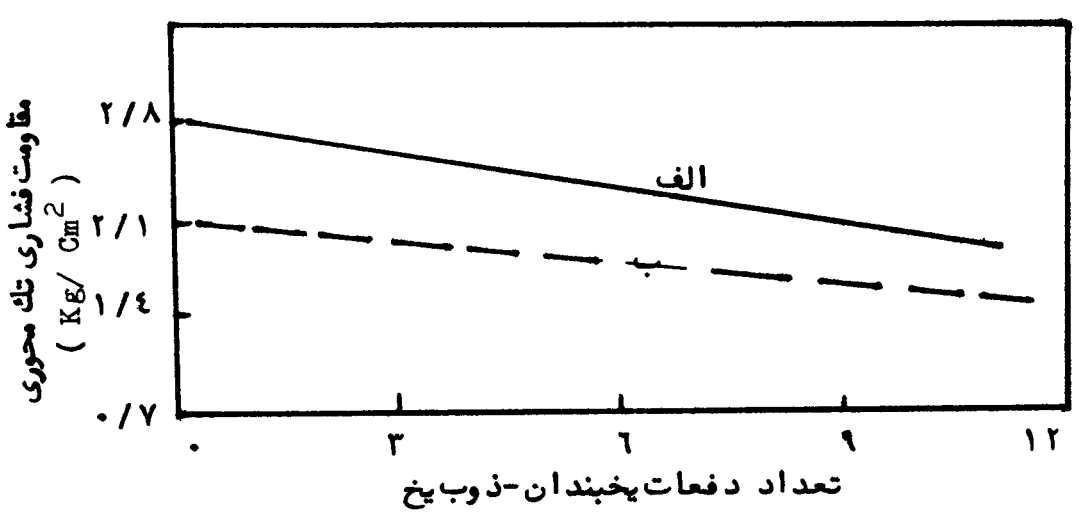
شکل ۵ ــ تاثیر آهک بر روی مقاومت فشـــاری.



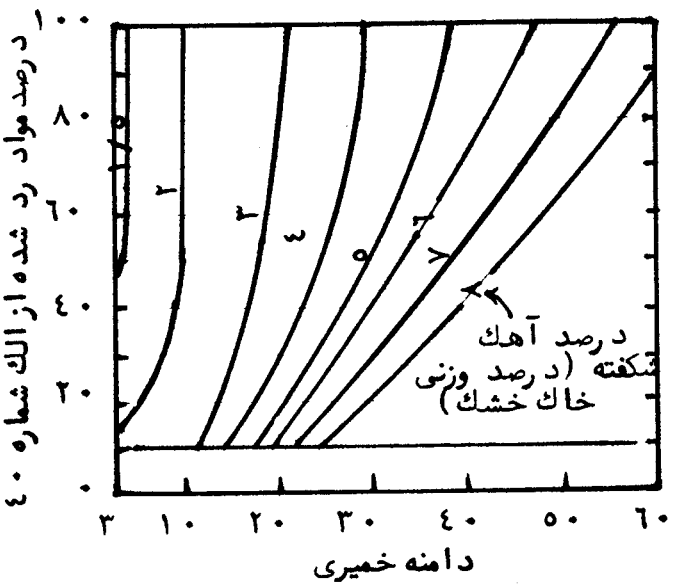
شکل ۶ــ تاثیر آهک بر روی منحنی تنش تغییر شکل نسبی .



شکل ۷ــ منحنی خستگی چند نمونه خاک رس تثبیت شده با آهک .



شکل ۸ ــ تاثیر دفعات یخبندان ــ ذوب یخ بر روی مقاومـــــت .



شکل ۹ ــ نموگرام اشتـــو برای تعیین درصد آهک .

فهرست ومنابع

1- "State of The Art:Lime Stabilization," Transportation Research Circular No. 180, Transportation Research Board (TRB),1976.

2- Herzog,A., and J.K.Mitchell,"Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement,"Highway Research Record No.36,Highway Research Board, 1963.

3- Diamond,S., and E.B. Kinter,"Mechanisms of Soil-Lime Stabilization,An Interpretive Review,"Highway Research Record No. 92, Highway Research Board, 1965.

4- Keller, W.D., "The Principles of Chemical Weathering," Lucas Brothers Publishers, Columbia, Missouri,1957.

5- Eades, J.L. "Reactions of $Ca(OH)_2$ with Clay Minerals in Soil Stabilization,"Ph.D. Thesis,Geology Department, University of Illinois, 1962.

6- Diamond, S., J.L. white, and W.L. Dolch, "Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack," Proceedings, 12th National Conference on Clays and Clay Minerals,Pergamon Press, New York, 1964.

7- Thompson,M.R., "Lime Reactivity of Illinois Soils," Journal, Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SMS, 1966.

8- Thompson, M.R., "Factos Infuencing the Plasticity and Strength of Lime-Soil Mixtures," Bulletin 492,Engineering Experiment Station,University of Illinois, 1967.

9- Holtz, W.G., "Volume Change in Expasive Clay Soils and Control by Lime Treatment,"paper presented at the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, Texas, 1969.

10-Dempsey, B.J., and M.R. Thompson, "Shrinkage and Swell Properties of Lime-Soil Mixtures,"Civil Engineering Studies, Highway Engineering Series No.29, Illinois Cooperative Highway Research Program, Series No. 94, University of Illinois, 1969.

11-Neubauer, C.H., and M.R. Thompson, "Stability Properties of Uncured Lime-Treated Fine Grained Soils," Highway Research Record No. 381, Highway Research Board, 1972.

12-Thompson, M.R., "Shear Strength and Elastic Properties of Lime-Soil Mixtures,"Highway Research Record No. 139, Highway Research Board, 1966.

13-Swanson, T.E., and M.R. Thompson, "Flexural Fatigue Strength of Lime-Soil Mixtures,"Highway Research Record No. 198, Highway Research Board, 1967.

14- Dempsey, B.J., and M.R. Thompson, "Durability Properties of Lime-Soil Mixtures,"Highway Research Record No.235, Highway Research Board,1968.

15 Eades, J.L., and R.E. Grim,"A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization," Highway Research Record No. 139, Highway Research Board, 1966.

16- American Association of State Highway Officials, "Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing,"1970.

17- Thompson,M.R.,"Suggested Method of Mixture Design Procedure for Lime-Treated Soils,"American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 479, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes, 1970.

18- Yoder, E.J., and M.W. Witczak,"Principles of Pavement Design,"Chapter 9, Soil and Base Stabilization,2nd Edition,Wiley, 1975.

19- Krebes, R.D., and R.D. Walker,"Highway Materials, "Chapter 8, Soil Stabilization, Mc Graw Hill, 1971.

۲۰ ـ استاندار ابعاد روسازی راههای جدید ،جلد۲، مشخصات عمومی مصالح را هسازی، فصل پنجم، اصلاح در جا خاکهای نرم بوسیله آهک، گزارش موقت مهندسین مشاور BCEOM وزارت راه و ترابری، ۱۳۵۶.