

معرفی روش جدید استفاده از آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های

مکانیکی خاک و ارزیابی آن

محمد هادی داودی*، فرید آستانه و حمید الوند کوهی**

* نگارنده مسئول: نشانی: تهران، تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، ص. پ. ۱۱۳۶-۱۳۴۴۵ تلفن: ۰۲۱)۴۴۹۰۱۴۱۵، پیام‌نگار:

davoudi_h@yahoo.com

** به ترتیب استادیار مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری؛ استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی؛ و کارشناس ارشد خاک و

پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

تاریخ دریافت: ۸۷/۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۲۶

چکیده

استفاده از آهک به صورت دوغاب غلیظ یا پودر خشک به منظور اصلاح خاک از قرن‌ها پیش شناخته شده و در پروژه‌های عمرانی به کار گرفته شده است. مقاله حاضر روشی جدید برای افزایش آهک به خاک در پروژه‌هایی معرفی می‌کند که به هر دلیل امکان حفر، اصلاح، و بازگرداندن آن وجود ندارد؛ این مقاله همچنین اثر بخشی روش جدید را بررسی می‌کند. در این روش، آهک به صورت محلول و به حالت ثقلی از داخل چاله‌های کم عمق به خاک وارد و با ایجاد واکنش با ذرات خاک، موجب اصلاح ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن می‌شود. یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری طراحی و ساخته شد و در آن خاک با دانسیته معین، متراکم شده به مدت ۶۰ روز محلول اشباع آهک از آن عبور داده شد و در فواصل زمانی مختلف و از نقاط متعدد آن نمونه دست‌نخورده گرفته شد. نتایج آزمایش‌های حدود ات‌برگ، برش مستقیم، و اندازه‌گیری‌های پارامترهای شیمیایی آب و خاک نشان می‌دهد که افزایش نیم درصد وزنی آهک به خاک، بدون ایجاد اثر منفی زیست محیطی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن را به ترتیب تا نزدیک به ۲۲۰ و ۳۰۰ درصد افزایش و نشست اولیه و شاخص خمیری را به ترتیب تا ۱۴ و ۵۸ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

آهک، تراکم، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، شاخص خمیری، محلول اشباع، نفوذ پذیری

مقدمه

کشورمان، معمولاً استفاده از این ماده بر سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شود. استفاده از آهک در اصلاح خاک، در حال حاضر به دو صورت است: سطحی و عمقی. در اصطلاح سطحی که بیشتر در احداث خاکریزها، عملیات راه‌سازی، محوطه‌سازی، و حتی محافظت از سطوح فرسایش‌پذیر استفاده می‌شود، دوغاب غلیظ یا پودر آهک به صورت لایه به لایه به خاک اضافه می‌شود.

در اصلاح عمقی، که برای توده‌های برجسته استفاده می‌شود، دوغاب آهک با روش تزریق^۱ (Anon, 1985) یا تزریق با فشار بالا^۲ (Broms & Boman, 1976) به اعماق توده خاکی یا سنگی درز و ترک‌دار وارد

اصلاح خاک اعم از توده‌های بر جای نامناسب از قبیل زمین‌های پست ساحلی سست، شیب‌های طبیعی ناپایدار، بسترهای متورم شونده یا منابع قرضه مورد استفاده در احداث سدها، کانال‌ها و جاده‌ها، از نظر فنی و اقتصادی نقشی مهم در طرح‌های عمرانی و حفاظت از محیط زیست دارد. در بسیاری از زمین لغزش‌های خاکی که مقاومت برشی ضعیف مصالح عامل اصلی ناپایداری است، افزایش مقاومت برشی خاک از طریق وارد کردن مواد اصلاح کننده به آن می‌تواند راه حلی مناسب باشد. به جهت فراوانی و پایین بودن قیمت آهک در بسیاری از نقاط

1- Grouting

2- Jet Grouting

آهک شکفته (Ca(OH)_2) جایگزین یون‌های یک ظرفیتی مانند سدیم (Na^+) و هیدروژن (H^+) یا یون‌های دو ظرفیتی حجیم‌تر خاک می‌شود و ذرات خاک را به هم می‌پیوندد که این امر باعث اصلاح ویژگی پلاستیسیته، ظرفیت باربری، و مقاومت خاک می‌شود. سومین واکنش از نوع پوزولانی است که طی آن Fe_2O_3 ، Al_2O_3 و SiO_2 خاک با آهک ترکیب و ژل مقاوم سیلیکات کلسیم و آلومینات تشکیل می‌شود که عملکرد آن مانند ترکیبات سیمانی است و افزایش قابل توجهی در میزان مقاومت برشی خاک ایجاد می‌کند. چهارمین واکنش زمانی اتفاق می‌افتد که آهک با خاک واکنش ندهد در این صورت ممکن است با CO_2 هوا یا خاک تشکیل CaCO_3 دهد. این واکنش که در اثر حضور آهک مازاد بر نیاز اتفاق می‌افتد و اصطلاحاً پدیده کربناته شدن نامیده می‌شود فرایندی نامطلوب است و موجب کاهش مقاومت خاک می‌شود (Anon, 1992).

باسما و تونسر (Basma & Tuncer, 1991) گزارش دادند که افزایش ۳ درصد آهک به خاک ریزدانه دارای ۷۰ درصد رس و ۲۵ درصد سیلت، ذرات کلئیدی خاک را به ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. بر اساس گزارش راهنمای فنی (Anon, 2000) آهک موجب کاهش "وزن واحد حجم خشک حداکثر" و افزایش "رطوبت بهینه" می‌شود. فرزانه و مصدق (Farzaneh & Modsadegh, 2007) گزارش دادند که افزودن ۴ درصد آهک به خاک رس لاغر با شاخص خمیری ۸ درصد، علاوه بر افزایش ۵۰ درصد در رطوبت بهینه تراکم و کاهش ۸ درصد در وزن واحد حجم خشک و ۳۰ درصد شاخص خمیری آن، موجب افزایش بسیار زیاد در CBR^۴ و مقاومت فشاری تک محوری خاک شده است. میزان این تأثیرات، با وجود آنکه با میزان رطوبتی که خاک اصلاح شده در آن نگهداری می‌شود و همچنین زمان نگهداری تناسب مستقیم دارد اما، با درصد آهک اضافه شده رابطه‌ای پیچیده دارد. ایندراواتنا

می‌شود و از طریق ایجاد چسبندگی در خلل و فرج و درزه‌ها موجب تقویت و پایداری توده می‌گردد. در خاک‌های سست برجا، با استفاده از اوگر^۱ (Tsytoovich *et al.*, 1971) آهک یا دوغاب آن به عمق مورد نظر خاک وارد و با ایجاد ستون‌های شفته آهکی^۲، توان باربری خاک افزایش داده می‌شود. این روش‌ها به دلیل نیاز به تجهیزات خاص، گران قیمت‌اند و استفاده از آنها در بسیاری از طرح‌ها فاقد توجیه اقتصادی است.

در این مقاله روش جدیدی به نام "روش محلول اشباع آهک"^۳ برای افزودن آهک به خاک معرفی می‌شود که طی آن آهک به حالت "محلول" و از طریق نیروی ثقل به اعماق توده نفوذ می‌کند و موجب اصلاح تمامی خاک آن به صورت برجا و بدون جابه‌جایی می‌شود.

پژوهشگران بسیار زیادی از قرن نوزدهم تاکنون در این زمینه تحقیق کرده‌اند که بنا بر ضرورت به نتایج تعدادی از تحقیقات این پژوهشگران اشاره خواهد شد. بنا بر گزارش انجمن ملی آهک (Anon, 1985) تأثیر آهک بر خصوصیات فیزیکی اکثر خاک‌های رسی به‌طور کلی به شرح زیر قابل دسته‌بندی است: افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تا ۴۰ برابر مقدار اولیه؛ کاهش محسوس خصوصیات تورمی و انقباضی؛ کاهش قابل توجه دامنه خمیری تا حدود ۲۵ درصد مقدار اولیه؛ کاهش سریع رطوبت خاک و تسریع در عملیات تراکم آن؛ غیرقابل نفوذ کردن خاک؛ درشت‌دانه شدن خاک در اثر فولکوله شدن، به طوری که درصد مصالح کوچک‌تر از الک شماره ۴۰ به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در تماس رس و آهک در مجاورت آب، چندین واکنش شیمیایی اتفاق می‌افتد؛ اولین واکنش، هیدراسیون است که طی مدت زمانی کوتاه درصد آب کاهش و دما و مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و سپس تثبیت می‌شود. دومین واکنش، تبادل یونی است و یون دو ظرفیتی کلسیم (Ca^{++}) موجود در آهک زنده (Cao) یا

1- Auger

2- Lime Pile

3- Saturated Lime Solution Technique

4- California Bearing Ratio

محلول اشباع آهک به صورت ثقلی به داخل توده خاک نفوذ می‌کند و پس از طی کل توده از زهکش‌های پایین دست خارج و جمع‌آوری می‌شود. به منظور جلوگیری از تبخیر محلول، سطح مدل با پلاستیک پوشیده شد. در حین آزمایش، سطح محلول در منبع تغذیه ۲ سانتی‌متر پایین‌تر از سطح خاک تنظیم می‌شد تا تمام عمق خاک را پوشش دهد و از تجمع محلول در سطح آن جلوگیری کند.

نسبت اختلاط آهک در آب نباید از حد انحلال‌پذیری آن در آب تجاوز و گرنه آهک مازاد در حفره‌های خاک مجاور منبع تغذیه رسوب می‌کند و نفوذپذیری آن را به شدت کاهش می‌دهد.

خاک مورد استفاده حاکی است رسی با خاصیت خمیری بالا (CH) با حد روانی^۱ (LL) و حد خمیری^۲ (PL) به ترتیب ۵۵/۴ و ۳۰/۳ درصد و نشانه خمیری ۲۵/۱ درصد و منشاء آن یک توده لغزشی در منطقه دنبلید طالقان است با وزن مخصوص خشک طبیعی ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تخلخل ۵۰ درصد، و رطوبت طبیعی ۶ درصد. خاک به مقدار مورد نیاز در مدل ریخته و تراکم آن به تراکم طبیعی توده رسانده شد. محلول آب آهک اشباع با انحلال ۱۳/۹ درصد و برای آزمایش تهیه شد.

در مدت ۶۰ روز، خاک به‌طور مداوم تحت نفوذ محلول اشباع آهک قرار گرفت. پیشروی جبهه اشباع در داخل خاک ابتدا سریع بوده اما به تدریج از سرعت آن کاسته شد و سرانجام ۱۲۱ ساعت پس از شروع آزمایش، محلول به تمامی توده نفوذ کرد و از انتهای مدل خارج شد. پس از برقراری جریان ماندگار، نفوذپذیری توده تا پایان آزمایش به‌طور مستمر اندازه‌گیری شد و نفوذپذیری یکنواخت $10^{-4} \times 8/7$ سانتی‌متر بر ثانیه برای آن به ثبت رسید. در طول آزمایش، حدود ۱۶۰۰ لیتر محلول به نمونه وارد شد و طی همین مدت ۲۷ نمونه دست‌نخورده

(Indraratna, 1996) گزارش داد که بیشترین افزایش مقاومت فشاری تک محوری برای یک خاک رس لاغر معادل ۸۰ درصد و به ازای افزایش ۵ درصد آهک به‌دست آمده است درحالی‌که در آزمایش‌های فرزانه و مصدق (Farzaneh & Modsadegh, 2007) بیشترین افزایش مقاومت فشاری تک محوری به ازای ۲ درصد آهک فراهم شده است. نتایج پوپالا و همکاران (Puppala et al., 2003) نشان داد که تأثیرگذاری مخلوطی از آهک و الیاف فیبری، در مقایسه با سیمان، از نقطه نظر تثبیت تورم و افزایش باربری خاک‌های شمال تکزاس، کمتر ولی از خاکستر آتشفشان و دوده کوره‌های صنعتی بیشتر است. رائو و شیواناندا (Rao & Shivananda, 2005) در زمینه تأثیر درجه حرارت بر فعالیت‌های پوزولانی مطالعه کردند و نشان دادند که در حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد فعالیت‌های پوزولانی پس از یک روز آغاز می‌شود حال آن که تحت حرارت ۱۱ درجه این فعالیت‌ها تا هفت روز به تأخیر می‌افتد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مدل آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد. این مدل دو قسمت عمده دارد که با یک ورق مشبک گالوانیزه از هم تفکیک شده‌اند. در قسمت پایین‌دست، به طول ۱۲۰ سانتی‌متر، خاک قرار می‌گیرد و قسمت بالادست، به طول ۱۰ سانتی‌متر، به عنوان منبع تغذیه با محلول اشباع آهک پر می‌شود. در دیواره انتهایی پایین دست، ۹ لوله زهکش هر یک به قطر ۸ میلی‌متر در سه تراز تعبیه شد، و انتهای آنها در تراز مساوی با تراز سطح خاک تنظیم می‌شود تا تمامی نقاط توده خاک تحت نفوذ محلول قرار گیرد. برای ایجاد جریان دایمی در داخل توده، اختلاف ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر بین نشیمنگاه‌های پایین‌دست و بالادست مدل ایجاد شد تا گرادیان هیدرولیکی ۰/۱ برقرار شود. به این ترتیب،

ASTM D423-66, D424-59, D427-61 روی نمونه‌های اصلاح‌نشده و ۶۰ روزه اجرا شد تا تأثیر این محلول بر دامنه خمیری خاک بررسی شود.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتیجه آزمایش برش مستقیم نمونه شاهد را نمایش می‌دهد که در آن زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی خاک (c) به ترتیب ۵/۱ درجه و ۱۶/۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. جدول‌های ۲ تا ۴، نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم را روی نمونه‌های ۲۰، ۴۰، و ۶۰ روزه و در فواصل ۳۰، ۶۰، و ۹۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه نشان می‌دهد. در جدول ۲، سه نمونه LIT، LIM و LIB که اولین نمونه‌های گرفته شده بودند نتایج غیرقابل اعتمادی داشتند و لذا حذف شدند. در این جدول‌ها، "نشست اولیه" عبارت است از نشست نمونه تحت بار قائم بعد از گذشت ۳۰ ثانیه و "تحکیم" عبارت است از نشست کامل نمونه تحت بار قائم قبل از برش.

یک مقایسه کلی بین جدول ۱ و جدول‌های ۲ تا ۴، تأثیر محلول اشباع آهک را بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی خاک به خوبی نشان می‌دهد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی افزایش بسیار زیاد، و در مقابل نشست اولیه و تحکیم کاهش قابل توجهی داشته‌اند به نحوی که مقدار چسبندگی از ۱۶/۵ کیلوپاسکال به ۶۵ کیلوپاسکال رسیده، زاویه اصطکاک داخلی از ۵/۱ به ۱۶/۴ درجه افزایش یافته، و بالعکس مقدار تحکیم از ۵ به ۴/۰۲ میلی‌متر کاهش یافته است. در حالی که وزن آهک وارد شده به خاک فقط معادل ۰/۵ درصد وزن خشک آن است.

خاک گرفته شد. به منظور نمونه‌گیری در زمان‌های مختلف، مدل در امتداد عرضی به سه قسمت فرضی تقسیم شد تا سه نوار فرضی با عرض ۲۰ و طول ۱۲۰ سانتی‌متر به دست آید. بعد از شروع آزمایش، با استفاده از نمونه‌گیر (کرکاتر) آلومینیومی به قطر ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۶ سانتی‌متر به فواصل زمانی ۲۰، ۴۰، و ۶۰ روز در یکی از نوارها نمونه‌گیری شد. برای این کار، در امتداد طولی در هر نوار سه محل به فواصل ۳۰، ۶۰، و ۹۰ سانتی‌متر از منبع تغذیه تعیین شد. با توجه به اینکه برای هر آزمایش برش مستقیم حداقل به سه نمونه نیاز است در هر محل، از اعماق ۱۲، ۲۲، و ۳۲ سانتی‌متری نمونه‌گیری و به این ترتیب در هر نوار فرضی ۹ نمونه دست‌نخورده گرفته شد. لازم است یادآوری شود که پس از هر نمونه‌گیری، بلافاصله محل نمونه‌ها با خاک و با دانسیته مشابه پر می‌شد. از خاک اصلاح‌نشده نیز ۳ نمونه دست‌نخورده برای آزمایش برش مستقیم گرفته شد.

مطابق استاندارد ASTM D3080-72، نمونه‌های دست‌نخورده اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده برای آزمایش برش مستقیم به ابعاد $2/8 \times 6 \times 6$ سانتی‌متر از داخل کرکاترها گرفته شده و آزمایش به صورت کند روی آنها اجرا شد. به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی: چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک (ϕ)، سه نمونه گرفته شده از یک محل، تحت سه تنش نرمال ۱۳۶، ۲۷۲، و ۴۰۸ کیلوپاسکال به مدت ۵ ساعت قرار گرفتند؛ سپس نیروی برشی با سرعت ۰/۰۸ میلی‌متر در دقیقه به نمونه‌ها اعمال و آزمایش تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۱۰ درصد ادامه یافت. آزمایش حدود اتزبرگ نیز مطابق استانداردهای

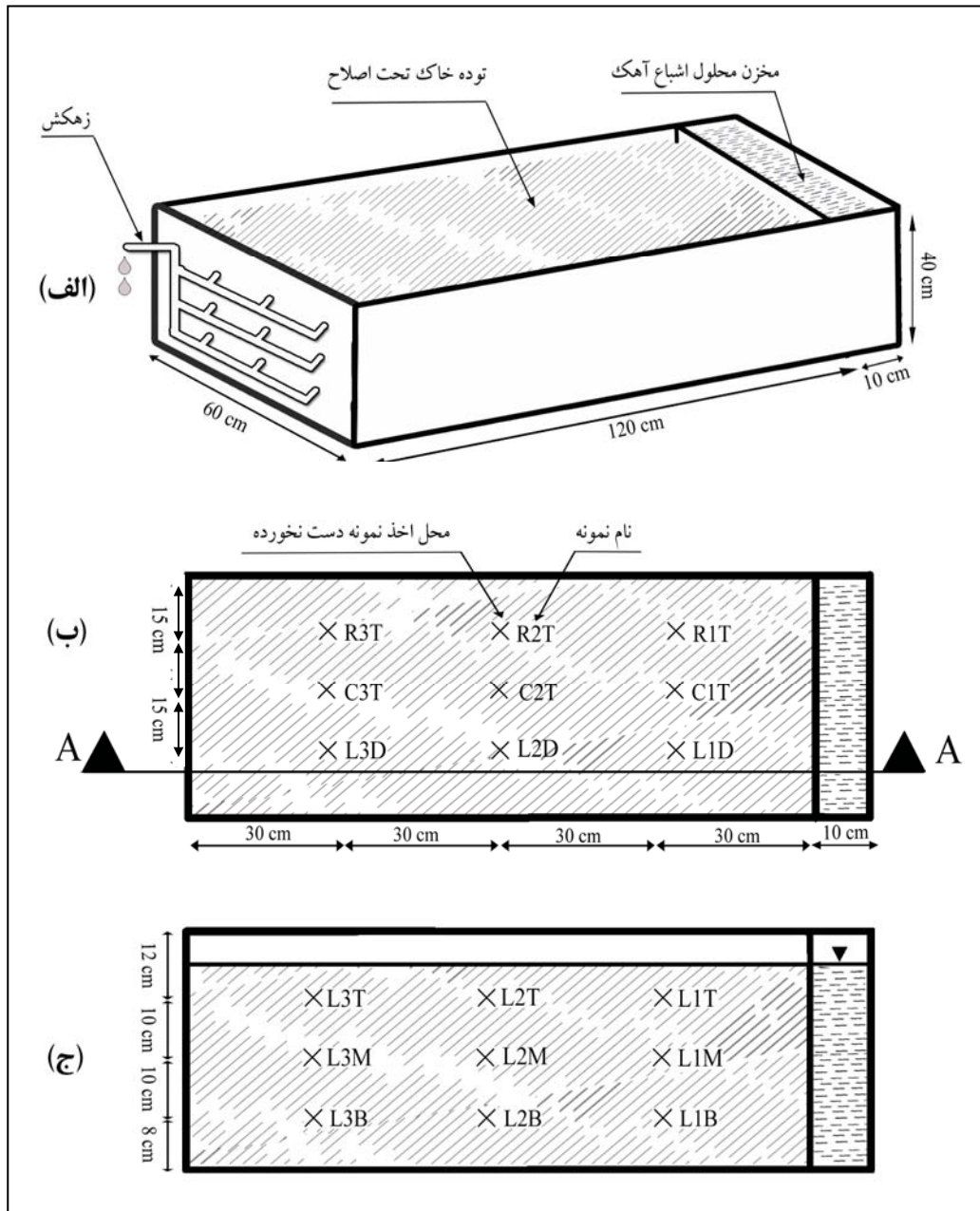
معرفی روش جدید استفاده از آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های...

جدول ۱- نتایج آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های شاهد

نام نمونه	عمق نمونه (سانتی‌متر)	تنش نرمال (کیلوپاسکال)	رطوبت اولیه (درصد)	رطوبت نهایی (درصد)	نشست اولیه (میلی‌متر)	تحکیم (میلی‌متر)	مقاومت برشی ماکزیمم (کیلوپاسکال)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
P1	-	۱۳۶	۳۵	۲۶	۲/۵۲	۳/۴۸	۲۷/۹۷		
P2	-	۲۷۲	۳۴	۳۲	۲/۹۵	۳/۹۵	۴۲/۱		
P3	-	۴۰۸	۴۱	۲۸	۳/۴۵	۵/۰۰	۵۲/۱۲		
								۱۶/۵	۵/۱

جدول ۲- نتایج آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های ۲۰ روزه

نام نمونه	فاصله از منبع (سانتی‌متر)	عمق نمونه (سانتی‌متر)	تنش نرمال (کیلوپاسکال)	رطوبت اولیه (درصد)	رطوبت نهایی (درصد)	نشست اولیه (میلی‌متر)	تحکیم (میلی‌متر)	مقاومت برشی ماکزیمم (کیلوپاسکال)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
L1T	۳۰	۱۲	۱۳۶	۳۹	۳۶					
L1M	۳۰	۲۲	۲۷۲	۳۸	۲۷					
L1B	۳۰	۳۲	۴۰۸	۳۴	۲۸					
L2T	۶۰	۱۲	۱۳۶	۳۸	۳۳	۲/۳	۳/۶۲	۵۴/۷۸		
L2M	۶۰	۲۲	۲۷۲	۳۷	۳۲	۲/۶۲	۳/۹۵	۶۹/۲۵		
L2B	۶۰	۳۲	۴۰۸	۳۷	۳۴	۳/۱۲	۴/۱۶	۸۲/۰۹		
									۴۸	۵/۴
L3T	۹۰	۱۲	۱۳۶	۴۱	۳۶	۲/۲۹	۳/۷۶	۴۵/۳۹		
L3M	۹۰	۲۲	۲۷۲	۳۹	۳۲	۲/۷۲	۳/۹۸	۶۳/۳		
L3B	۹۰	۳۲	۴۰۸	۳۹	۳۱	۳/۳۴	۵/۱۲	۷۶/۳۴		
									۳۴/۵	۶/۵



شکل ۱- شمای مدل ساخته شده: الف) شکل سه بعدی؛ ب) پلان؛ و ج) مقطع قائم A-A

اشباع آهک قرار داشته " دستهبندی و بررسی شدند. در شکل های ۲ و ۳ تأثیر این دو عامل بر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نشان داده شده است.

به منظور یافتن عوامل مؤثر و میزان تأثیر آنها، نتایج به دست آمده از نمونه ها بر حسب دو عامل "فاصله از منبع تغذیه" و "مدت زمانی که نمونه تحت جریان محلول

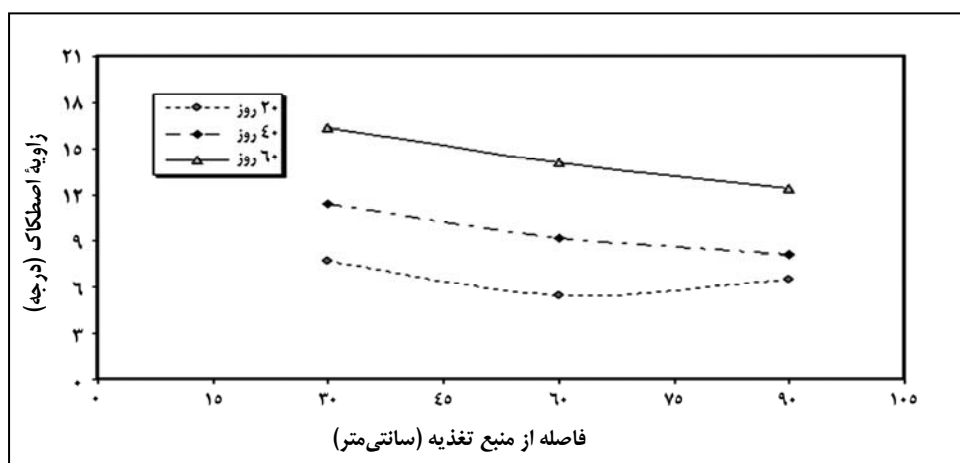
معرفی روش جدید استفاده از آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های...

جدول ۳- نتایج آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های ۴۰ روزه

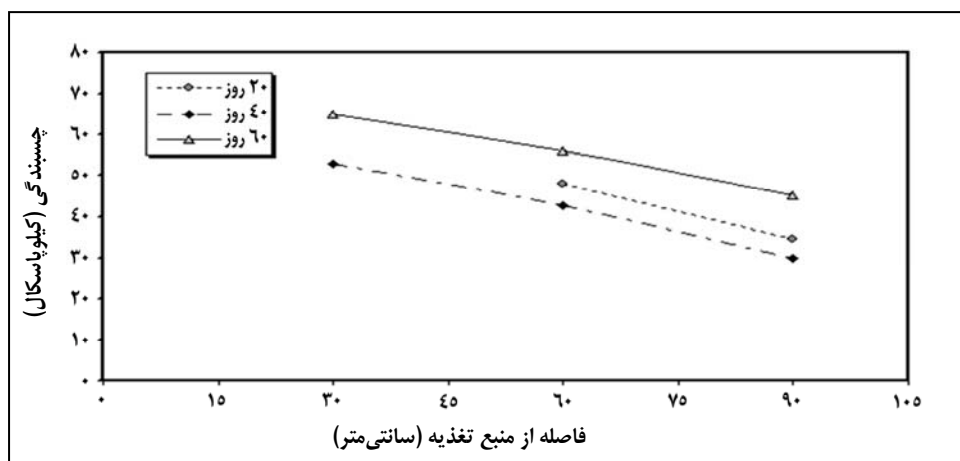
نام نمونه	فاصله از منبع (سانتی‌متر)	عمق نمونه (سانتی‌متر)	تنش نرمال (کیلوپاسکال)	رطوبت اولیه (درصد)	رطوبت نهایی (درصد)	نشست اولیه (میلی‌متر)	تحکیم (میلی‌متر)	مقاومت برشی ماکزیمم (کیلوپاسکال)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
R1T	۳۰	۱۲	۱۳۶	۳۷	۲۸	۱/۷	۲/۸۱	۸۳/۰۶		
R1M	۳۰	۲۲	۲۷۲	۳۴	۲۹	۲/۲۲	۳/۷۹	۱۱۰/۹۵		
R1B	۳۰	۳۲	۴۰۸	۳۶	۲۹	۲/۶۴	۴/۶۹	۱۱۹/۸۵		
									۵۳/۰	۱۱/۴
R2T	۶۰	۱۲	۱۳۶	۳۹	۳۴	۲/۱۲	۳/۶۳	۵۵/۳۴		
R2M	۶۰	۲۲	۲۷۲	۴۱	۳۳	۲/۴۶	۱/۴	۱۱۱/۱۱		
R2B	۶۰	۳۲	۴۰۸	۴۲	۳۲	۲/۷۴	۴/۷۱	۱۰۲/۵۵		
									۴۲/۵	۹/۲
R3T	۹۰	۱۲	۱۳۶	۴۲	۳۶	۲/۱۵	۳/۳۸	۴۹/۵۸		
R3M	۹۰	۲۲	۲۷۲	۴۱	۲۷	۲/۵۷	۴/۲۸	۸۶/۲۳		
R3B	۹۰	۳۲	۴۰۸	۴۱	۲۸	۳/۲۹	۴/۸۱	۸۸/۲		
									۳۰/۰	۸/۱

جدول ۴- نتایج آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های ۶۰ روزه

نام نمونه	فاصله از منبع (سانتی‌متر)	عمق نمونه (سانتی‌متر)	تنش نرمال (کیلوپاسکال)	رطوبت اولیه (درصد)	رطوبت نهایی (درصد)	نشست اولیه (میلی‌متر)	تحکیم (میلی‌متر)	مقاومت برشی ماکزیمم (کیلوپاسکال)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
C1T	۳۰	۱۲	۱۳۶	۴۲	۳۴	۱/۴۶	۲/۵۸	۱۰۳/۸۲		
C1M	۳۰	۲۲	۲۷۲	۴۰	۲۹	۱/۶۵	۳/۸۱	۱۴۷/۰۵		
C1B	۳۰	۳۲	۴۰۸	۳۶	۲۵	۱/۹۶	۴/۰۲	۱۸۳/۴۹		
									۶۵/۰	۱۶/۴
C2T	۶۰	۱۲	۱۳۶	۳۸	۳۲	۱/۹۸	۲/۶۳	۸۹/۴۱		
C2M	۶۰	۲۲	۲۷۲	۴۱	۲۷	۲/۳۴	۴/۶۲	۱۲۵/۴۳		
C2B	۶۰	۳۲	۴۰۸	۴۲	۲۹	۲/۶۱	۵/۲۳	۱۵۷/۶۴		
									۵۶/۰	۱۴/۱
C3T	۹۰	۱۲	۱۳۶	۴۱	۳۲	۲/۱۲	۳/۰۰	۷۵/۴۳		
C3M	۹۰	۲۲	۲۷۲	۴۰	۳۳	۲/۶۱	۴/۹۳	۱۰۴/۲۵		
C3B	۹۰	۳۲	۴۰۸	۴۳	۳۱	۳/۲۴	۵/۸	۱۳۵/۱۸		
									۴۵/۰	۱۲/۴



شکل ۲- تأثیر فاصله از منبع تغذیه در زاویه اصطکاک برای نمونه‌های گرفته شده در زمان‌های مختلف



شکل ۳- تأثیر فاصله از منبع تغذیه در چسبندگی برای نمونه‌های گرفته شده در زمان‌های مختلف

فرض کرد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر فاصله‌ای از منبع تغذیه، به مرور زمان و به دلیل افزایش مقدار محلول نفوذی به خاک، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی افزایش می‌یابد، به نحوی که در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه پس از ۲۰، ۴۰، و ۶۰ روز زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب به ۸/۱، ۱۲/۴ درجه و مقدار چسبندگی به ترتیب به ۳۰، ۳۴/۵ و ۴۵ کیلوپاسکال افزایش یافته است. این روند برای نمونه‌های گرفته شده در فاصله ۶۰ سانتی‌متری و ۳۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه نیز صادق است.

در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با فاصله از منبع تغذیه نسبت عکس دارند. به عبارت بهتر تأثیر محلول اشباع آهک در مجاورت منبع تغذیه به مراتب بیشتر از سایر نواحی است به نحوی که در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از آن، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی حدود ۳۰ درصد بیش از مقادیر متناظر در فاصله ۹۰ سانتی‌متری است. علاوه بر آن، در اغلب موارد، تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نسبت به فاصله از منبع تغذیه رفتاری شبه خطی از خود نشان می‌دهد و می‌توان آن را با دقت خوبی خطی

معرفی روش جدید استفاده از آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های...

مقدار محلول عبور کرده برای هر یک از نمونه‌ها بر حسب لیتر و حجم حفره‌های خاک (V_v) ارائه شده است. به‌طور مثال اگر در امتداد جریان حرکت کنیم، برای ۳۰ سانتی‌متر اولیه، حجم خلل و فرج خاک ۳۶ لیتر است که به عنوان یک واحد V_v در نظر گرفته می‌شود و لذا هرگاه از نمونه RIT به اندازه ۳۶ لیتر محلول عبور کند گفته می‌شود که $1 V_v$ محلول عبور کرده است. بنابراین اگر از این نمونه ۸۵۱/۵ لیتر محلول عبور کند با تقسیم این حجم بر ۳۶ می‌توان گفت که حجم محلول عبوری V_v ۲۳/۶ است.

برای نرمال کردن تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های مکانیکی خاک به ازای مقدار محلول اشباع آهک، از حجم حفره‌های خاک (V_v) به عنوان واحد حجم محلول عبور کرده استفاده می‌شود. اگر برای هر یک از نمونه‌ها فرض کنیم که کیفیت محلول عبوری در تمام طول مسیر بالادست آن یکسان است، آنگاه نمونه مورد نظر می‌تواند نماینده آن بازه (یعنی از منبع تغذیه تا محل نمونه) باشد. به عبارت بهتر می‌توان حجم حفره‌های آن بازه را به عنوان حجم حفره‌های نمونه‌ای بزرگ منظور کرد. در جدول ۵

جدول ۵- حجم محلول ورودی در نمونه‌های گرفته شده

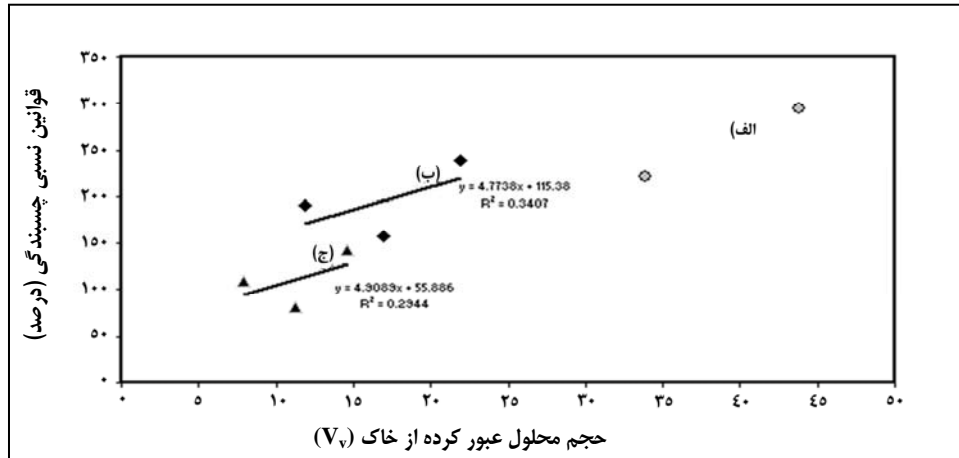
ردیف	شرح	فاصله نمونه از منبع تغذیه (سانتی‌متر)	حجم حفره‌های خاک (لیتر)	حجم محلول عبور کرده (لیتر)	حجم محلول عبور کرده (V_v)
۱	نمونه ۲۰ روزه	۳۰	۳۶	۸۵۱/۵	۲۳/۶
۲	نمونه ۲۰ روزه	۶۰	۷۲	۸۵۱/۵	۱۱/۸
۳	نمونه ۲۰ روزه	۹۰	۱۰۸	۸۵۱/۵	۷/۹
۴	نمونه ۴۰ روزه	۳۰	۳۶	۱۲۱۸/۵	۳۳/۸
۵	نمونه ۴۰ روزه	۶۰	۷۲	۱۲۱۸/۵	۱۶/۹
۶	نمونه ۴۰ روزه	۹۰	۱۰۸	۱۲۱۸/۵	۱۱/۳
۷	نمونه ۶۰ روزه	۳۰	۳۶	۱۵۷۶	۴۳/۸
۸	نمونه ۶۰ روزه	۶۰	۷۲	۱۵۷۶	۲۱/۹
۹	نمونه ۶۰ روزه	۹۰	۱۰۸	۱۵۷۶	۱۴/۶

در فاصله ۳۰ سانتی‌متری و به ازای عبور V_v ۴۴ محلول، تا ۲۹۴ درصد افزایش می‌یابد؛ و حداقل افزایش آن ۱۰۹ درصد و در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه و به ازای عبور V_v ۷/۹ محلول است که مقدار قابل توجهی است و گویای بازده بسیار بالای این روش است. نکته قابل توجه آن است که شیب دو منحنی ب و ج بسیار به هم نزدیک است که نشان می‌دهد در هر فاصله از منبع تغذیه، تداوم عبور محلول اشباع آهک از خاک، مقدار چسبندگی را با میزان ثابت ۴/۸ افزایش می‌دهد.

در شکل ۴ افزایش نسبی چسبندگی (Δc) به ازای حجم محلول عبور کرده از خاک بر حسب V_v نشان داده شده است. افزایش نسبی چسبندگی از رابطه زیر محاسبه شده است که در آن c_i و c_0 به ترتیب چسبندگی نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده هستند.

$$\Delta c = \frac{c_i - c_0}{c_0} \times 100 \quad (1)$$

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود چسبندگی،



شکل ۴- افزایش نسبی چسبندگی به ازای حجم محلول عبور کرده از خاک؛
الف) در فاصله ۳۰ سانتی متری؛ ب) در فاصله ۶۰ سانتی متری؛ و ج) در فاصله ۹۰ سانتی متری

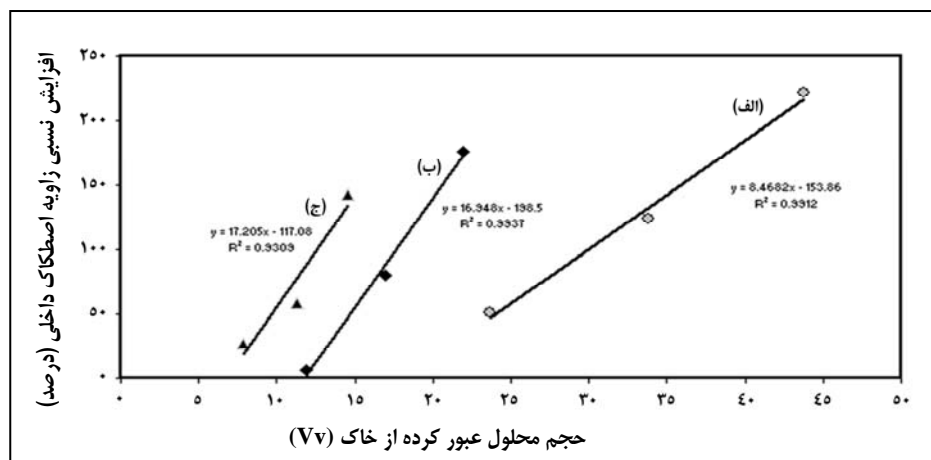
۱۲ محلول حاصل شده است. شدت افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی بر اساس دو منحنی ب و ج معادل ۱۷ است. شکل ۶، تأثیر فاصله از منبع تغذیه را بر نشست اولیه برای سه سری نمونه‌های ۲۰، ۴۰، و ۶۰ روزه را نشان می‌دهد؛ در هر یک از سری‌های فوق، نمونه‌های نزدیک به منبع تغذیه نشست اولیه کمتری از خود نشان می‌دهند و با افزایش فاصله، مقدار نشست به سمت نشست نمونه شاهد نزدیک می‌شود. به طور مثال، در نمونه‌های ۶۰ روزه تحت تنش نرمال ۱۳۶ کیلوپاسکال، کمترین نشست مربوط به فاصله ۳۰ سانتی متری به مقدار ۱/۴۶ میلی‌متر و در فواصل ۶۰ و ۹۰ سانتی متری به ترتیب ۱/۹۸ و ۲/۱۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است در حالی که برای نمونه شاهد ۲/۹۵ میلی‌متر بوده است.

به‌طور مشابه، در شکل ۵ افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی خاک ($\Delta\phi$) به ازای حجم محلول عبور کرده نشان داده شده است. افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی از رابطه زیر محاسبه شده است که در آن ϕ_0 و ϕ_i به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی خاک اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده هستند.

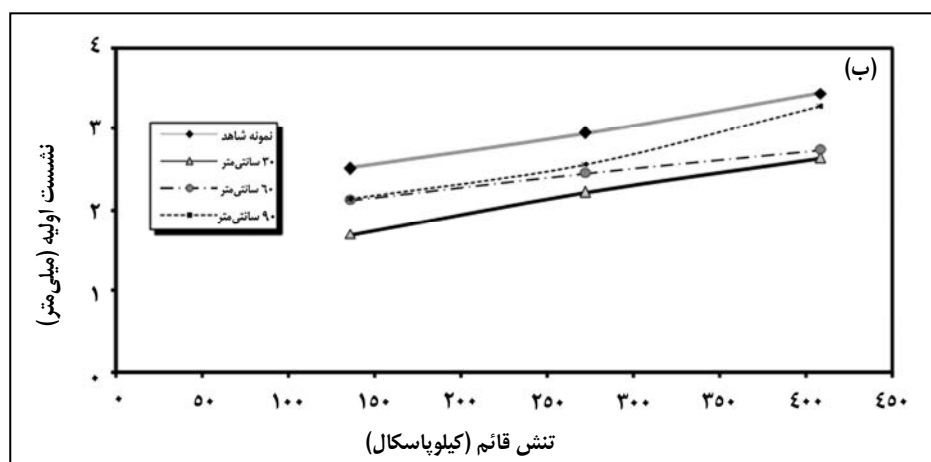
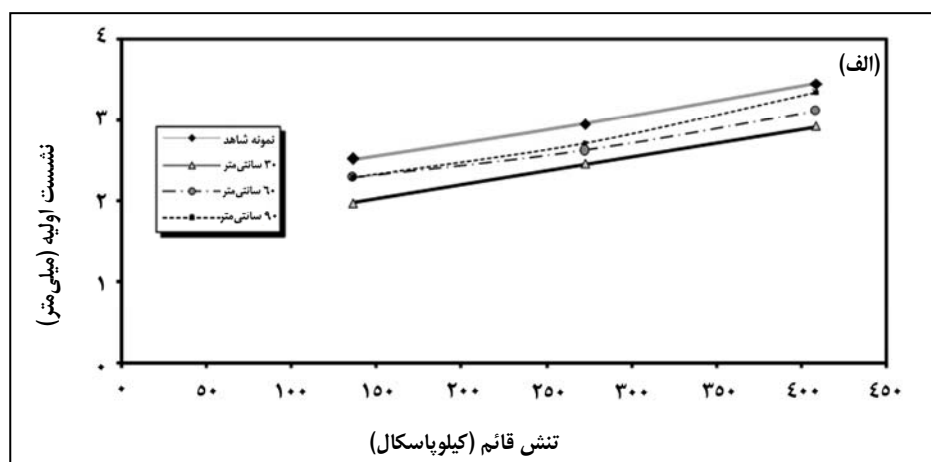
$$\Delta\phi = \frac{\phi_i - \phi_0}{\phi_0} \times 100 \quad (2)$$

مطابق شکل ۵ به ازای عبور V_v ۴۴ حجم محلول، افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی خاک به ۲۲۲ درصد رسیده است و حداقل آن ۶ درصد است که به ازای عبور V_v

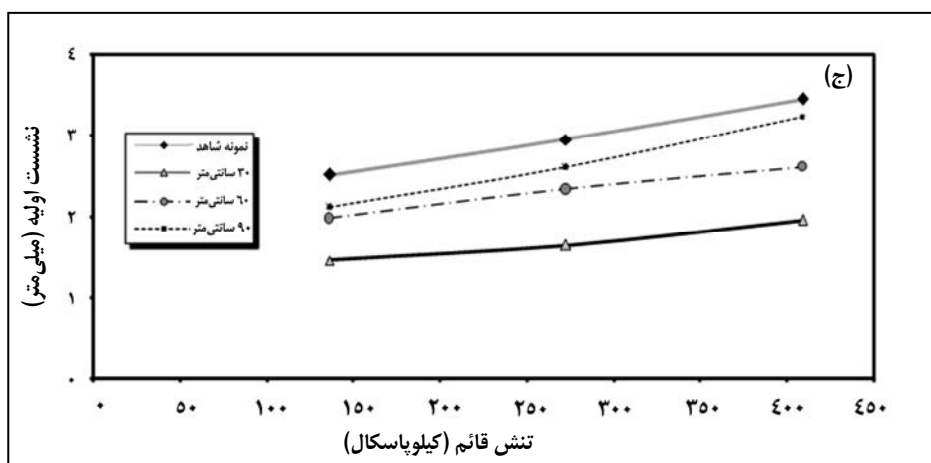
معرفی روش جدید استفاده از آهک به منظور اصلاح ویژگی‌های...



شکل ۵- افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی به ازای حجم محلول عبور کرده از خاک؛ (الف) در فاصله ۳۰ سانتی متری؛ (ب) در فاصله ۶۰ سانتی متری؛ (ج) در فاصله ۹۰ سانتی متری



شکل ۶- تأثیر فاصله از منبع تغذیه بر نشست اولیه نمونه‌ها در دستگاه برش مستقیم؛ (الف) نمونه ۲۰ روزه؛ و (ب) نمونه ۴۰ روزه



ادامه شکل ۶- تأثیر فاصله از منبع تغذیه بر نشست اولیه نمونه‌ها در دستگاه برش مستقیم؛
(ج) نمونه ۶۰ روزه

این مقدار برای نمونه شاهد ۳/۴۵ میلی‌متر است. در عین حال، فاکتور زمان به تنهایی به عنوان عامل مؤثر بر سیمان‌تاسیون می‌تواند تأثیرگذار باشد. به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری ویژگی‌های پلاستیک خاک، آزمایش تعیین حدود اتربرگ بر نمونه‌های شاهد و اصلاح شده ۶۰ روزه اجرا شد. مطابق جدول ۶، محلول اشباع آهک موجب افزایش حد خمیری و کاهش حد روانی شده و لذا نشانه خمیری (PI) به مقدار ۱۴ درصد کاهش یافته است.

مقایسه بین سری‌های الف، ب، و ج نشان می‌دهد که تأثیر محلول اشباع آهک در نمونه‌های ۶۰ روزه به مراتب بیشتر از نمونه‌های ۴۰ روزه و این نیز بیشتر از نمونه‌های ۲۰ روزه است؛ علت اصلی آن، حجم بیشتر محلول عبور کرده از خاک است. به‌طور مثال، به ازای یک تنش نرمال یکسان، مثلاً ۴۰۸ کیلوپاسکال، کمترین نشست مربوط به نمونه ۶۰ روزه با فاصله ۳۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه به مقدار ۱/۹۶ میلی‌متر و بیشترین نشست مربوط به نمونه ۲۰ روزه با فاصله ۹۰ سانتی‌متری از منبع تغذیه به مقدار ۳/۳۴ میلی‌متر است؛

جدول ۶- نتایج آزمایش حدود اتربرگ

نام نمونه	حد روانی (درصد)	حد خمیری (درصد)	نشانه خمیری (درصد)
شاهد	۵۶/۷	۳۴/۲	۲۲/۵
۶۰ روزه	۵۴/۹	۳۵/۶	۱۹/۳

نتیجه‌گیری

تغذیه " است به‌طوری‌که نمونه‌های نزدیک به منبع تغذیه، به جهت دریافت کلسیم بیشتر، از سیمان‌تاسیون بهتری برخوردارند، و نمونه‌های دارای فاصله از منبع تغذیه با محلول آب آهک غیر اشباع و در نتیجه با یون کلسیم کمتری در تماس‌اند و لذا تأثیرپذیری کمتری دارند. مدت زمان تغذیه نیز، به جهت اینکه حجم بیشتری از محلول را

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از محلول اشباع آهک به روش ثقلی برای اصلاح توده‌های خاکی برجا، روشی ساده ولی با بازده بسیار خوب است و مقدار تأثیر آن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک (ϕ و c) تابع دو مؤلفه "فاصله از منبع تغذیه" و "مدت زمان

می‌شود و یون کلسیم به صورت آزاد در اختیار خاک قرار می‌گیرد، مقدار بسیار کم آن تأثیر بسیار خوبی در کاهش نشانه خمیری دارد به طوری که افزایش نیم درصد آهک به روش فوق موجب ۱۴ درصد کاهش در نشانه خمیری خاک شده است.

مهم‌تر از همه، با آنکه روش‌های رایج مصرف آهک برای تقویت مقاومت برشی خاک، را نمی‌توان در تثبیت توده‌های طبیعی لغزشی به‌ویژه توده‌های عمیق به کار برد، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تکنیک جدید موسوم به محلول اشباع آهک این امکان را فراهم می‌سازد تا از این ماده ارزان قیمت به سهولت برای تأمین هدف فوق استفاده شود. علاوه بر آن، این تکنیک برای تقویت توده‌های ضعیف غیرلغزشی مانند خاک‌های نرم یا بستر متورم شونده کانال‌های آبیاری نیز قابل استفاده است.

در اختیار نمونه‌ها قرار می‌دهد، عامل تأثیرگذار و مهمی است به گونه‌ای که در نمونه‌های واقع در فاصله یکسان از منبع تغذیه، آنها که در معرض تغذیه طولانی‌تر هستند در پارامترهای مقاومت برشی آنها افزایش بیشتری مشاهده می‌شود. در عین حال، صرف‌نظر از حجم محلول، عامل زمان به‌طور مستقل می‌تواند تأثیرگذار باشد و باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، ورود یون کلسیم به خاک موجب می‌شود مقدار چسبندگی خاک به میزان ۲۹۴ درصد و زاویه اصطکاک داخلی ۲۲۲ درصد افزایش یابد. در مقابل، میزان نشست اولیه خاک تا ۵۸ درصد کاهش می‌یابد و این کاهش، تابع مدت زمان تغذیه و نزدیکی به منبع تغذیه است. از آنجایی که آهک به حالت محلول به خاک وارد

مراجع

- Farzaneh, A. Mosadegh, A. 2007. Laboratory Assessment of Kerman-Zangiabad Road Stabilization using Lime and RRP. 3rd National Civil Engineering. Tabriz. Iran. (in Farsi)**
- Anon. 1985. Lime Stabilization Construction Manual. National Lime Association. 8th Ed. Bulletin 326, 1-41.**
- Anon. 1992. Canadian Foundation Engineering Manual. Canadian Geotechnical Society. 4th Ed. BiTech Pub.**
- Anon. 2000. Guide Technique. Traitement des Sols à la chaux et / ou Liants Hydrauliques. Editor-LCPC-SETRA. (in French)**
- Basma A. and Tuncer E. 1991. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. Transport. Res. Rec. 1295, 70-79.**
- Broms B. B. and Boman P. 1967. Stabilization of soil with lime columns. Ground Eng. 105(4): 539-556.**
- Indraratna, B., 1996. Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia. J. Geotech. Geological Eng. 14(3): 169-191.**
- Puppala, A. J., Wattanasanticharoen E. and Hoyos, L. R. 2003. Ranking of four chemical and mechanical stabilization methods to treat low-volume road subgrades in Texas. J. Transport. Res. Board. 1819(2): 63-71**
- Rao, S. M. and Shivananda, P. 2005. Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. Geotech. Geological Eng. 23(1): 79-85.**
- Tsyvovich, N. A. 1971. Compacting saturated loess soils by means of lime piles. Proceeding of 4th Conference on Soil Mechanics. Budapest. 837-842.**



Evaluation of A New Technique Using Lime to Improve Soil Mechanical Characteristics

M. H. Davoudi*, F. Astaneh and H. Alvandkoohi

* Corresponding Author: Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), P. O. Box: 13445-1136, Tehran, Iran. E-mail: davoudi_h@yahoo.com

The influence of lime on the shear strength of soil has been known for centuries. The conventional method to increase the lime content of a soil is to add less than 10% hydrated lime in the form of powder or grout to the soil. This method is convenient for soils to be used as fill material in projects such as road construction, land fill pavements or lime pile; but is not applicable where a large quantity of naturally occurring soil requires treatment, such as on a slope experiencing slippage. In this research, a new method is examined by which a lime-saturated solution of water permeates the soil. A physical laboratory model was designed, built and tested. The results of a 60 day test showed that the pozzolanic reaction between soil particles and the dissolved calcium ions developed cementation between soil aggregates, leading to a significant increase in the soil shear strength. The results of a series of direct shear and Atterberg limit tests carried out on treated and untreated samples demonstrated an increase of 300% and 220% in cohesion and the internal friction angle, respectively. It also showed a decrease of 14% in the plasticity index of the soil resulting from the intrusion of hydrated lime equivalent to a mere 0.5% of the soil mass.

Key Words: Cementation, Cohesion, Internal Friction Angle, Plasticity Index, Lime, Shear Strength, Soil