

بهسازی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های ریزدانه منطقه سد اکباتان همدان با استفاده از آهک

محمدحسین قبادی^۱، رضا بابازاده^۲ و یاسین عبدی^۲

۱- استاد دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* amirghobadi@yahoo.com

دریافت: ۹۰/۱۱/۵ پذیرش: ۹۱/۷/۲۶

چکیده

در این پژوهش، خاک‌های ریزدانه موجود در منطقه سد اکباتان در جنوب شرق همدان، با استفاده از آهک بهسازی شده است. آهک مورد استفاده، پودر آهک زنده عبوری از الک ۴۰ بوده که با درصدهای وزنی ۱٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به خاک اضافه گردیده و تاثیر آن بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک طی زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه مطالعه شده است. تغییرات خصوصیات خمیری، مقاومت فشاری تک محوری، رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر ناشی از بهسازی خاک بررسی گردیده است. نتایج بیانگر آن است که خاک مورد مطالعه پس از گذشت ۷ روز از افزودن آهک، خاصیت خمیری خود را از دست داده و به خاک غیر خمیری تبدیل شده است. همچنین تغییرات ایجاد شده در ترکیب کانی‌شناسی و فابریک خاک، باعث افزایش رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک محوری و کاهش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک شده و قابلیت کاربرد آن را در پروژه‌های مهندسی افزایش داده است. با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده، زمان عمل‌آوری ۴۵ روزه با ۷ درصد وزنی آهک، به عنوان زمان عمل‌آوری و درصد آهک بهینه برای بهسازی منابع قرصه ریزدانه مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آهک، بهسازی، خاک‌های ریزدانه، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی، همدان

مقدمه

سازی خاک‌های ضعیف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳، ۱۱]. آهک یکی از این مصالح می‌باشد که به علت تاثیرگذاری بیش‌تر و اقتصادی بودن، برای بهسازی خاک‌های ریزدانه بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهسازی خاک با آهک، با انجام واکنش‌هایی مانند تعویض یونی، کربناسیون و پوزولانی همراه می‌باشد که بین کانی‌های رسی موجود در خاک‌های ریزدانه و کربنات کلسیم انجام می‌گیرد [۱، ۲، ۹]. با افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه، تاثیر کوتاه مدت آن بر خصوصیات خاک با شروع واکنش‌های تعویض یونی بین یون‌های فلزی سطوح کانی‌های رسی و یون‌های کلسیم آهک همراه می‌باشد. ذرات رسی با لایه آب دوگانه احاطه شده‌اند که در اثر تبادل یونی با آهک، دچار تغییراتی می‌شود و تراکم بار یونی اطراف ذرات رسی را تغییر داده و باعث می‌شود که ذرات دور هم جمع شده و مجموعه‌های بزرگ‌تری را تشکیل دهند (فلوکولاسیون). طی این فرآیند خصوصیات

خاک‌های رسی معمولا در حالت خشک، سفت و مقاوم می‌باشند ولی در شرایط اشباع، سفتی و مقاومت خود را از دست داده و به خاک‌های رسی نرم تبدیل می‌شوند. این خاک‌های نرم ظرفیت باربری کم و تراکم‌پذیری زیادی دارند و می‌توانند با ایجاد گسیختگی و نشست، خسارات زیادی به ساختمان‌ها و جاده‌ها وارد کنند [۱۸]. خاک‌های مذکور مشکل آفرین هستند ولی می‌توان خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها را با استفاده از روش‌های تثبیت فیزیکی/ شیمیایی بهسازی کرد. روش‌های متعددی برای اصلاح و بهسازی خاک‌های مساله‌ساز به کار می‌روند که شامل متراکم کردن، کاهش فشار آب حفره‌ای (به روش‌های آبدایی یا الکترو اسمز)، تقویت پیوند بین ذرات خاک (به روش انجماد، تزریق و تثبیت شیمیایی) و مسلح کردن خاک می‌باشد [۱۴، ۱۹]. افزودنی‌های مختلفی از قبیل سیمان، آهک و مواد دیگری مثل خاکستر آشفشانی، پوست برنج و غیره برای پایداری-

مقاومت فشاری تک محوری و حدود آتربرگ استفاده گردیده است. در این مطالعه، از پودر آهک زنده جهت بهسازی خاک‌های ریز دانه استفاده شده است.

مطالعات آزمایشگاهی

از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی و نیز مهندسی عمران آزمایشات ژئوتکنیکی عبارت از مجموعه آزمایش‌های انجام شده در صحرا و آزمایشگاه بر روی سنگ و یا خاک که شامل آزمون‌های مانند آزمون بارگذاری در محل و غیره و نیز آزمون‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در آزمایشگاه مانند تعیین دانسیته، دانه‌بندی، حدود خمیری، مقاومت فشاری تک محوری و..... می‌شود که در این پژوهش آزمایش‌های ذکر شده انجام شده است. برای پژوهش در مورد خاک یک منطقه و یا منبع قرضه خاکی که قرار است مورد استفاده قرار بگیرد می‌توان برای شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی خاک در قالب یک کار پژوهشی اقدام کرد و روش بهسازی آنرا در صورت مشکل آفرین بودن ارائه داد. در منطقه مورد مطالعه نیز پژوهش با این هدف انجام شده زیرا که ساخت سازه بر روی خاک قبل از شناخت خصوصیات ژئوتکنیکی اصولاً انجام نمی‌شود.

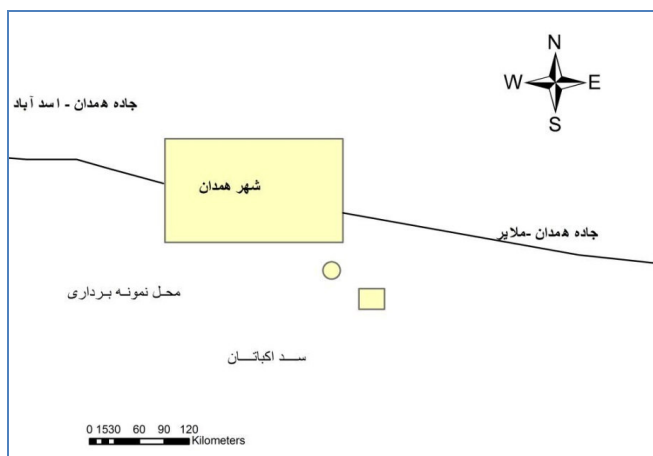
ویژگی‌های خاک پایه

در این تحقیق ابتدا بر اساس استاندارد ASTM خصوصیات فیزیکی خاک پایه (خاک مورد استفاده) تعیین گردید (جدول ۱). آزمایش دانه‌بندی انجام شد که طبق رده‌بندی یونیفاید، خاک مورد مطالعه از نوع CL می‌باشد. به منظور شناخت ترکیب کانی‌شناسی خاک، آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) انجام شد و مشخص گردید که کانی‌های موجود از نوع کوارتز، فلدسپات و ایلیت است (شکل ۲). آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های آماده شده از خاک مورد مطالعه انجام گرفت. آزمایش‌های مذکور با افزودن آهک به خاک با نسبت‌های ۱٪، ۳٪، ۵٪ و ۷٪ وزنی خاک و زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه انجام شده است.

مهندسی خاک اصلاح می‌شود [۱۷]. تمامی کانی‌های رسی موجود با آهک واکنش انجام می‌دهند، ولی کانی‌های رسی با قابلیت تورم بالا از قبیل مونت موریلونیت به راحتی با آهک واکنش انجام داده و خاصیت خمیری خود را خیلی زود از دست می‌دهند [۵]. واکنش‌های پوزولانی، زمان‌بر بوده و شامل واکنش‌هایی بین سیلیکا / آلومینای موجود در خاک با آهک می‌باشد که منجر به ایجاد انواعی از سیمان شده و مقاومت خاک را افزایش می‌دهد [۶]. خصوصیات مختلف خاک‌های بهسازی شده با آهک، توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵، ۱۶، ۸، ۴، ۷ و ۱۰]. این افراد در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های بهسازی شده با آهک، میزان رطوبت بهینه افزایش قابل توجهی یافته و مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر نیز کاهش یافته است. محققین دیگری نیز نشان دادند که رفتارهای گسیختگی نمونه خاک‌های بهسازی شده با آهک، مشابه رفتار مصالح ترد و شکننده می‌باشد [۱۲]. هم‌چنین نتایج بررسی‌های دیگر بیانگر آن است که مقاومت این خاک‌ها پس از افزودن آهک، افزایش پیدا کرده است [۱۵، ۱۶ و ۱۰]. در این مقاله فرآیند بهسازی خاک‌های ریزدانه موجود در منطقه اکباتان واقع در جنوب شرق همدان با استفاده از آهک مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). خاک‌های مذکور حاصل هوازدگی سیلتستون‌هایی با سن الیگو- میوسن می‌باشد که بین ۱ تا ۶ متر ضخامت دارند. این مقاله توسعه موضوع بهسازی خاک در منطقه‌ای از کشور در قالب یک کار پژوهشی انجام شده می‌باشد و مانند بسیاری از کارهای پژوهشی الزاماً دارای نوآوری نیست بلکه توسعه یک فن‌آوری است که به خاطر تنوع در خصوصیات زمین‌شناسی هر منطقه انجام می‌شود.

مواد و روش‌ها

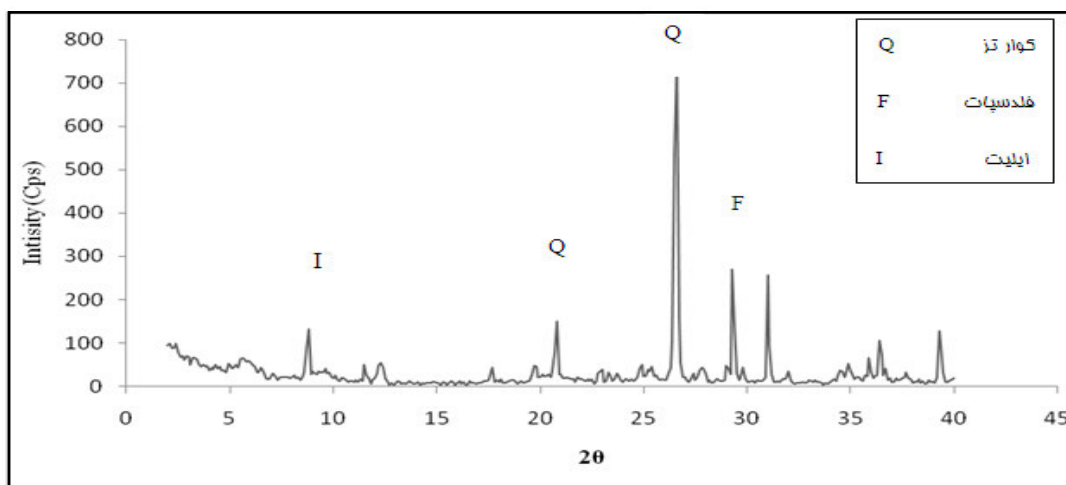
در این تحقیق ابتدا نمونه‌گیری از عمق ۱ متری سطح زمین با حفاری دستی انجام شده است (۵ نمونه از محل‌های مختلف). در مرحله بعد، خصوصیات فیزیکی خاک پایه (خاک مورد استفاده) تعیین گردید. سپس به منظور ارزیابی روند بهبود خصوصیات مهندسی خاک از آزمایش‌های تراکم،



شکل ۱: موقعیت محل نمونه برداری (مقیاس نقشه، ۱/۳۰۰۰۰).

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک پایه.

پارامتر	مقدار
رطوبت طبیعی	۵٪
وزن مخصوص قسمت جامد (Gs)	۲/۸
حد روانی	۲۷٪
حد خمیری	۱۶٪
شاخص خمیری	۱۱٪
رطوبت بهینه	۱۰٪
حداکثر وزن واحد حجم خشک ($\frac{gr}{cm^3}$)	۱/۶
مقاومت فشاری تک محوری (Kpa)	۱۵
رده خاک	CL



شکل ۲: طیف پراش اشعه ایکس نمونه خاک حاصل از هوازدگی سیلت استون، کوارتز (Q)، فلدسپات (F)، ایلیت (I).

آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش تراکم به منظور مشخص کردن تاثیر آهک و زمان عمل‌آوری، بر وزن واحد حجم خشک حداکثر (MDD^1) و میزان رطوبت بهینه (OMC^2) خاک‌های بهسازی شده و مطابق با استاندارد ASTM – D698(2000) انجام شده است (شکل ۴ و ۵).

بر روی خاک مورد مطالعه پس از افزودن آهک، آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ مطابق استاندارد ASTM – D698(2000) انجام شد و حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) تعیین شد (جدول ۲). همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود با گذشت ۷ روز از افزودن آهک به خاک، خاصیت خمیری آن کاهش یافته و در مقادیر ۵ و ۷ درصد آهک، به خاکی غیرخمیری تبدیل شد (شکل ۳).

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه خاک‌های بهسازی شده مطابق با استاندارد ASTM – D698(2000) انجام گرفت. نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، بر اساس رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک به دست آمده از آزمایش تراکم تهیه شده اند. به منظور حفظ رطوبت نمونه‌های آماده شده برای این آزمایش، از کیسه‌های پلاستیکی استفاده شد. بر روی نمونه های آماده شده با درصدهای آهک و زمان‌های عمل‌آوری مختلف، سه آزمایش انجام شد و مقدار میانگین، به عنوان مقاومت فشاری تک محوری در نظر گرفته شده است (شکل-های ۶، ۷).

آزمایش تراکم

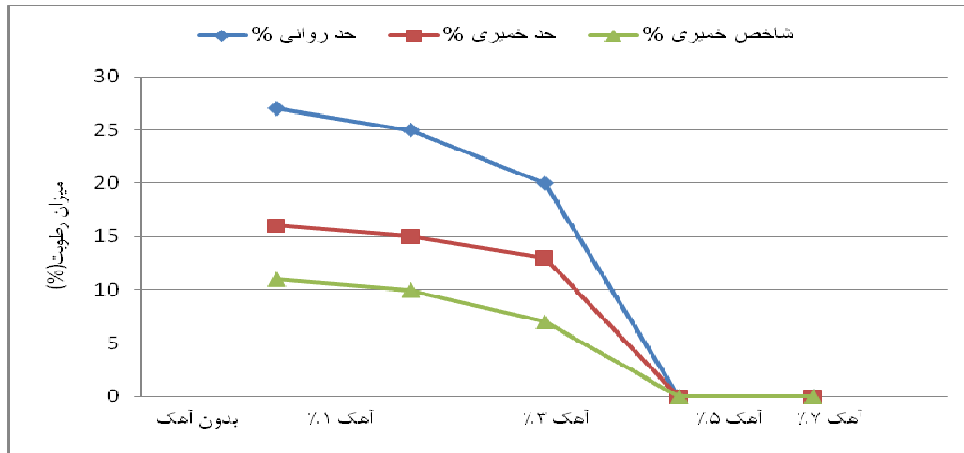
همان‌طور که در بخش پیشین نیز مطرح گردید با افزودن آهک به خاک‌های ریزدانه، میزان رطوبت بهینه آن‌ها افزایش یافته و دانسیته خشک نیز کاهش می‌یابد. کاهش میزان دانسیته خاک در این آزمایش را می‌توان به تشکیل سریع موادی با خاصیت سیمانی ارتباط داد که باعث کاهش تراکم پذیری و در نتیجه کاهش دانسیته خاک بهسازی شده می‌شود [۱۳].

جدول ۲: نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک مورد مطالعه، برای درصدهای آهک و زمان‌های عمل‌آوری مختلف.

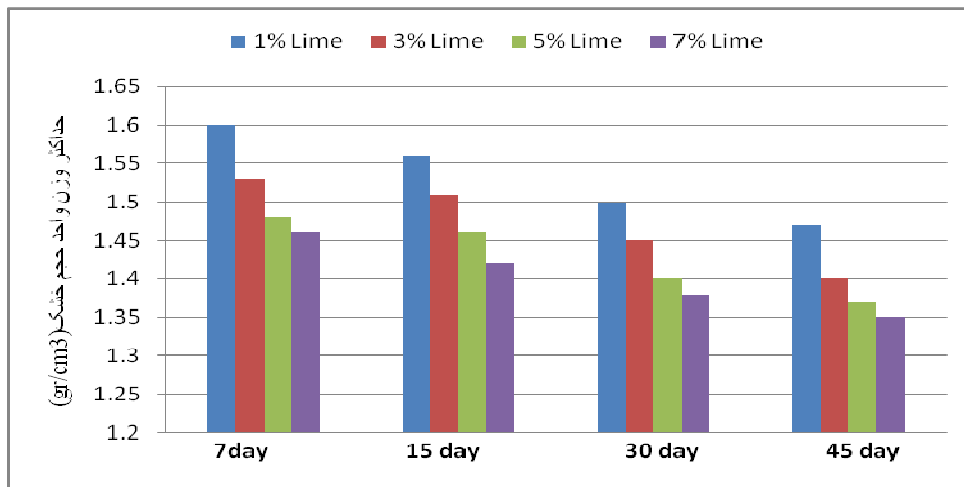
مقادیر PI (شاخص خمیری)				درصد آهک افزوده شده	نوع مصالح
۴۵ روزه	۳۰ روزه	۱۵ روزه	۷ روزه		
N.P	N.P	N.P	۱۰	۱	CL
N.P	N.P	N.P	۷	۳	
N.P	N.P	N.P	N.P	۵	
N.P	N.P	N.P	N.P	۷	

¹. Maximum Dry Density

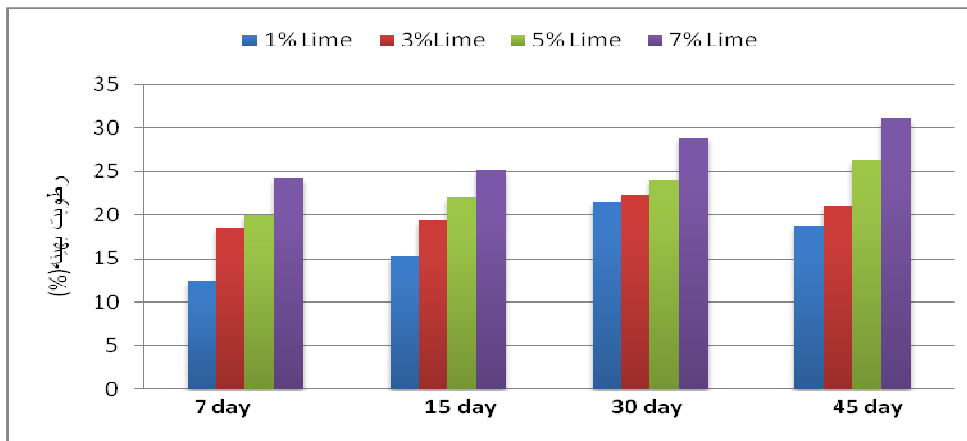
². Optimum Moisture Content



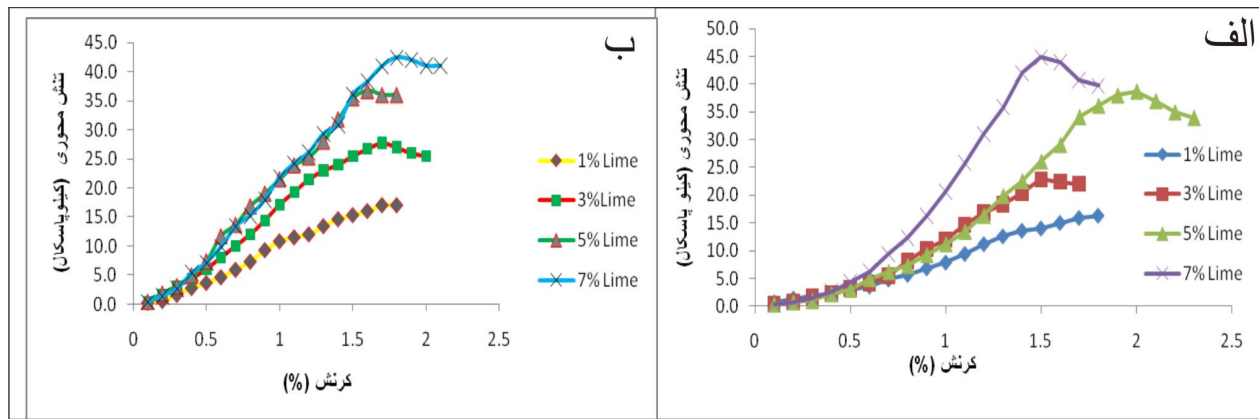
شکل ۳: تاثیر آهک بر حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه طی زمان عمل‌آوری ۷ روزه.



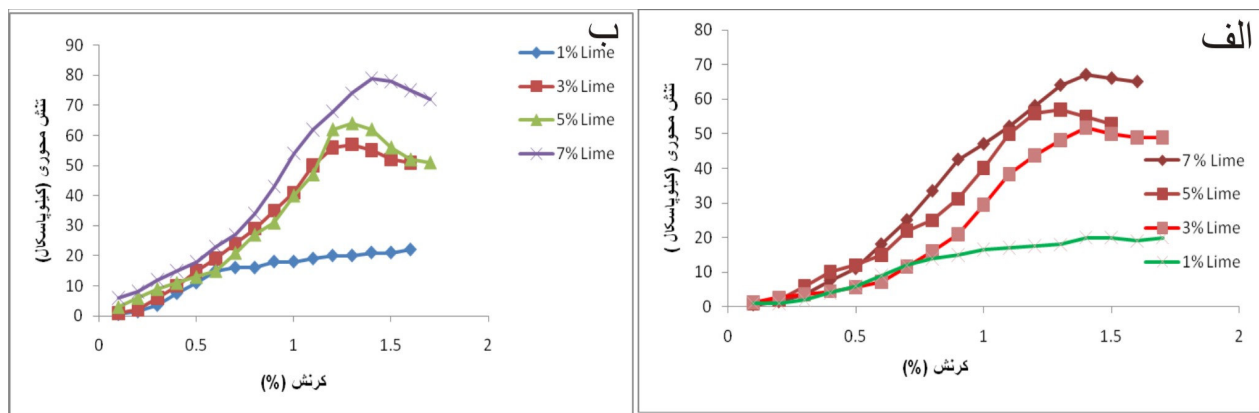
شکل ۴: تاثیر آهک بر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک مورد مطالعه طی زمان‌های عمل‌آوری مختلف.



شکل ۵: تاثیر آهک بر درصد رطوبت بهینه خاک مورد مطالعه طی زمان‌های عمل‌آوری مختلف.



شکل ۶: نمودار تنش - جابجایی، برای درصد‌های مختلف آهک طی زمان عمل‌آوری (الف) ۷ روزه و (ب) ۱۵ روزه.



شکل ۷: نمودار تنش - جابجایی، برای درصد‌های مختلف آهک طی زمان عمل‌آوری (الف) ۳۰ روزه و (ب) ۴۵ روزه.

بحث و نتیجه‌گیری

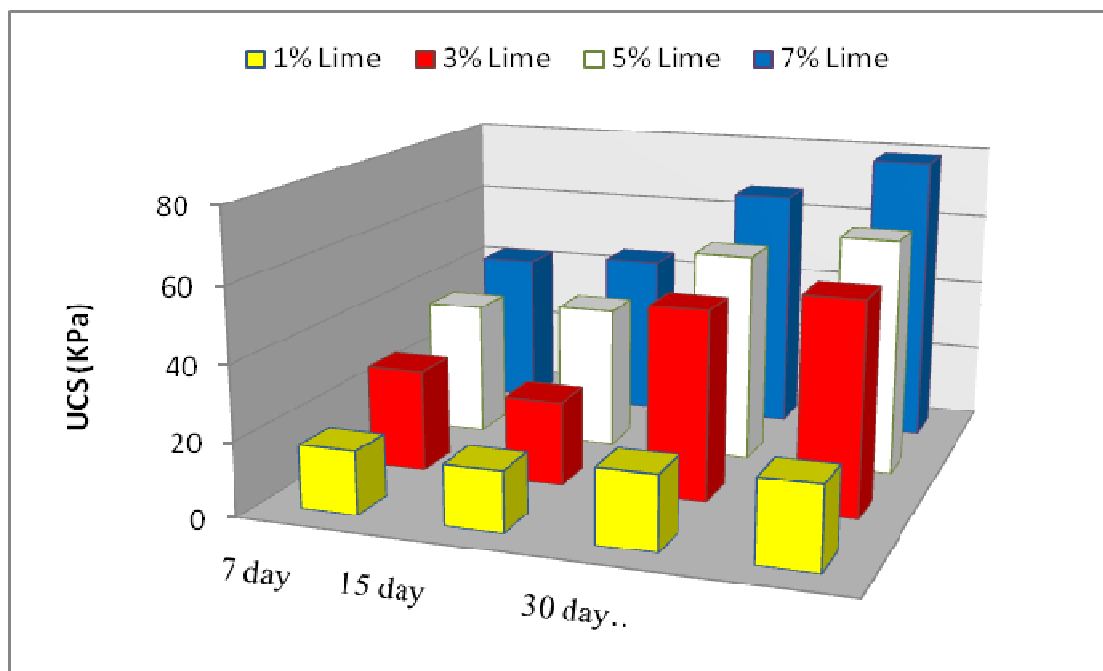
در این مقاله، بهسازی خاک‌های ریزدانه منطقه سد اکباتان همدان مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از اهداف این پژوهش، ارزیابی تغییرات ایجاد شده در حدود اتربرگ با افزودن آهک به خاک بوده است. بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و کانی‌شناسی (فقدان مونتموریلونیت)، خاک مورد مطالعه قابلیت خمیری ناچیزی دارد. برای انجام فرآیند بهسازی، آهک زنده با نسبت‌های وزنی ۰.۱٪، ۰.۳٪، ۰.۵٪ و ۰.۷٪ به خاک افزوده شده و رفتار خاک طی زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه بررسی گردید. پس از گذشت ۷ روز، به علت پیشرفت واکنش‌های شیمیایی بین آهک و کانی‌های رسی، خاک خاصیت خمیری خود را از دست داده و به خاک غیر خمیری (N.P) تبدیل شده است. این تغییر تا نقطه تثبیت آهک

(lime fixation point) ادامه می‌یابد. افزایش آهک تا این نقطه باعث بهبود قابلیت کاربری خاک شده ولی مقاومت آن را افزایش نمی‌دهد. مقادیر آهک اضافه شده فراتر از این نقطه، جهت تکمیل فرآیندهای ایجاد سیمان به کار می‌رود. در این حالت ذرات رسی با به هم پیوستن، باعث تشکیل مجموعه‌هایی با اندازه بزرگ‌تر شده که رفتاری مشابه ذرات سیلتی دارند [۴]. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها (پتانسیل تورم، مقاومت فشاری، CBR، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری) به رطوبت و دانسیته آن‌ها وابسته می‌باشد. افزودن مقادیر مختلف آهک به خاک باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵). زیرا وزن مخصوص آهک، معمولاً کمتر از وزن مخصوص خاک مورد آزمایش می‌باشد و افزودن آهک باعث تجمع

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، مقاومت فشاری تک محوری با افزایش درصد آهک، از مقدار ۱۵ کیلوپاسکال برای حالت بدون آهک تا ۸۰ کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری ۴۵ روزه افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر مقاومت تک محوری خاک بهسازی شده طی زمان عمل‌آوری ۴۵ روزه، بیش از ۵ برابر افزایش پیدا کرده است. افزایش مقاومت خاک‌های بهسازی شده با آهک را می‌توان به تشکیل کلسیم سیلیکات آبدار و کلسیم آلومینات آبدار نسبت داد که موادی با خاصیت سیمانی هستند. هر چند مواد حاصل از افزودن آهک به خاک، به ترکیب کانی‌شناسی رس، شرایط واکنش از قبیل دما، رطوبت و شرایط عمل‌آوری وابسته است، ولی افزودن ۷ درصد آهک و دوره عمل‌آوری ۴۵ روزه را می‌توان به عنوان درصد آهک بهینه و دوره عمل‌آوری بهینه برای خاک‌های ریزدانه موجود در منطقه سد اکباتان در نظر گرفت.

ذرات خاک و اشغال فضای بیش‌تر شده که دانه‌بندی موثر خاک را تغییر می‌دهد. از طرفی، واکنش پوزولانی بین کانی‌های رسی موجود در خاک و آهک، علت افزایش رطوبت بهینه خاک بهسازی شده می‌باشد [۶]. بهسازی خاک‌های ریزدانه توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که در متن مقاله نیز به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. بر اساس نظر این محققین افزودن آهک به خاک باعث کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر، افزایش رطوبت بهینه و افزایش مقاومت فشاری تک محوری می‌شود. زیرا وزن واحد حجم کربنات کلسیم کمتر از کانی‌های رسی می‌باشد.

در شکل ۸ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری (UCS) خاک متراکم شده با رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک، بر حسب مقدار آهک اضافه شده به خاک و زمان عمل‌آوری نشان داده شده است و بیانگر آن است که افزودن آهک، باعث افزایش مقاومت تراکم تک محوری خاک می‌گردد. بنابراین افزایش آهک به خاک و شروع واکنش‌های پوزولانی و تشکیل موادی با خاصیت سیمانی، مهم‌ترین عامل افزایش مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد.



شکل ۸: تاثیر آهک بر مقاومت فشاری تک محوری خاک مورد مطالعه طی زمان‌های عمل‌آوری مختلف.

- [11] Koliyas, S., Karahalios, A (2005) Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Journal of Cement and Concrete Composite* 27: 301-313.
- [12] Lin, D., Lin, K., Huang, M., Luo, H (2007) Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. *Journal of Hazardous Material* 145: 58-64.
- [13] Lees, G., Abdelkader, M.O., Hamdani, S.K (1982) Effect of the clay fraction on some mechanical properties of lime-soil mixtures, *Journal of High Institute of Engineering*, 11: 3-9
- [14] Nicholson P., Kashyap V., & Fuji, C (1994) Lime and fly ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils. *Transportation Research Record*, Washington, DC, 1440: 71-78
- [15] Ola, S (1977) The potential of lime stabilization of lateritic soils. *Eng Geol* 11: 305-317.
- [16] Rahman, M (1986) The potentials of some stabilizers for the use of lateritic soil in construction. *Build Environ* 21: 57-61.
- [17] Sherwood, P.T (1993) *Soil Stabilization with Cement and Lime: State-of-the-Art Review*. Transport Research Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, London.
- [18] Sakr, M.A., Shahin, M.A., Metwally, Y.M (2009) Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content, *Geotech Geol Eng* 27:105-113.
- [19] William, P (1997) *Soil mechanics : Concepts and Applications*, published by E&FNSpon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 & HN, UK, 420 P.

منابع

- [۱] هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایبی، ع (۱۳۸۷) مقایسه تاثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، نشریه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، سال هفدهم، شماره ۶۷، صفحات ۲۱-۱۴.
- [۲] حامی، ا (۱۳۷۱) مصالح ساختمانی، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه تهران.
- [3] Al- Rawas, A.A., Goosen, M (2006) *Expansive soils—Recent advances in characterization and treatment*. London, Taylor & Francis group.
- [4] Bell, F (1996) Lime stabilization of clay minerals and soil, *Engineering Geology* 42: 223-237
- [5] Bell, F.G., Coulthard, J.M (1990) Stabilization of clay soils with lime. *Mun. Engr.*, 7:125-140.
- [6] Chen, L (2009) Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Material* 162: 321-327.
- [7] Gay, G., Schad, H (2000) Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils. *Journal of Otto-Graf* 11: 19-31.
- [8] George, S., Ponniah, D., Little, J (1992) Effect of temperature on lime-soil stabilization. *Construct Build Mater* 6: 247-252.
- [9] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K (2011) Use of Natural Pozzolana and Lime for stabilization of Cohesive Soils, *Geotech Geol Eng* 29: 759-769.
- [10] Hossain, K., Lachemi, M., Easa, S (2007) Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea. *Resource Conserve Recycling* 51: 711-731