مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹۱، جلد پنجم، شماره ۳ و۴، صفحه ۶۷ تا ۸۰

بررسی کارایی آهک زنده و شکفته جهت بهسازی خاک‌های جنگلی حاوی مواد آلی

سید داود محمدی[۱*] ، محمدرضا نیکودل[۲]، اعظم گلستانی[۳]

دریافت مقاله: ۹۱/۰۲/۱۳ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۰/۰۶

چکیده

از نظر زمین‌شناسی مهندسی، خاک‌های آلی به‌ویژه خاک‌های جنگلی در رده های خاک‌های مسأله‌دار قرار می‌گیرند که به دلیل حضور مواد آلی در آن‌ها و شرایط جوی پربارش، مشکلات عدیده‌ای را در اغلب پروژه‌ها ایجاد می‌کنند. از جمله این مشکلات می‌توان به ظرفیت باربری پایین، نشست زیاد در محل شالوده سازه‌ها و غیره اشاره کرد که در صورت حضور این خاک‌ها در محل پروژه‌ها باید آنها را بهسازی و تقویت نمود. در این مقاله تأثیر افزودن آهک زنده و شکفته و نیز دوره عمل‌آوری بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آلی جنگل شهید زارع ساری بررسی شده و کارایی روش‌های به‌کاررفته، مطالعه شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از این است که آهک شکفته بر خاصیت متراکم شدن خاک آلی موثرتر از آهک زنده است. همچنین تأثیر آهک زنده در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده مشهودتر می‌باشد. در این بررسی مقادیر بهینه آهک زنده ۵ درصد و آهک شکفته ۷ درصد تعیین گردید.

کلید واژه‌ها: پارامترهای ژئوتکنیکی، خاک مسأله‌دار، مقاومت برشی زهکشی نشده مقاومت فشاری، CBR

۱. استادیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم، همدان، s_d_mohammadi@yahoo.com
۲. استادیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم، تهران
۳. کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم، همدان
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

خاک‌های آلی و تورب جزو خاک های مساله دار بوده که در معرض ناپایداری‌هایی مانند نشست موضعی (local)، گسیختگی دامنه‌ای و نشست تحکیمی، حتی با افزایش بارهای تدریجی (مثل افت سطح ایستابی) قرار دارند (Haut et al, 2005). به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و شرایط مناسب آب و هوایی، پراکندگی خاک‌های آلی جنگلی در مناطق شمالی ایران فراوان است. با توجه به رشد روز افزون جمعیت و توسعه پروژه‌های عمرانی حضور این نوع خاک‌ها در بسیاری از موارد اجتناب‌ناپذیر بوده و در صورت وجود این خاک‌ها به عنوان پی سازه‌ها باید از روش‌های مختلف بهسازی استفاده کرد. عملیات بهسازی زمین که این وظیفه را بر عهده دارد به طرق مختلفی صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های بهسازی استفاده از افزودن مواد مختلف به خاک است که می تواند مشخصات مهندسی خاک را بهبود ببخشد. آهک از جمله مواد قابل استفاده در بهسازی و تقویت خاک‌ها است که در سطح وسیعی برای بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Muntohar and Hamtoro, 2000; Jahanshahi, 2005). بهسازی خاک‌های رسی، آلی و تورب توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ایران مجنونیان و صادقی (۱۳۸۳) خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلی جاده‌های جنگلی سری نم خانه جنگل خیرود کنار را مورد بررسی قرار داده و بهسازی آن‌ها را با آهک شکفته مطالعه کردند. بررسی آن‌ها نشان داد ویژگی‌های ژئوتکنیکی این خاک‌ها مانند مقاومت و نسبت باربری کالیفرنیا پس از تثبیت با آهک شکفته تا حد زیادی بهبود پیدا می‌کند. Chen (1975) در مورد میزان آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی، مطالعاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که محدوده آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی بین ۲٪ تا ۸٪ است. Ahnberg and Johanson (2005) افزایش مقاومت خاک آلی در اثر تثبیت با چسباننده‌های مختلف متشکل از سیمان، آهک، خاکستر بادی و سرباره کوره را بررسی کردند. نتایج آزمایش های آن‌ها نشان داد که افزایش قابل توجهی در مقدار مقاومت خاک تثبیت شده بعد از مدت زمان طولانی به‌وجود می‌آید. Huat et al (2005) اثر سیمان، آهک و دوره عمل‌آوری را بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تورب بررسی کردند. نتیجه پژوهش آن‌ها برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک نشان داد که افزایش مقدار آهک و نیز دوره عمل‌آوری موجب کاهش حد روانی و همچنین شاخص پلاستیسیته شده و این اثر برای نمونه‌های حاوی مواد آلی کمتر، بارزتر است که موجب افزایش کارایی خاک می‌شود. همچنین Chikyala (2008) ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلی تگزاس با درصدهای مختلف آهک و بهسازی آنها را مورد بررسی قرار داده است و نشان داده که درصد مواد آلی با مقدار تورم خطی و مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رابطه عکس دارد. Sakr (2009) و همکاران نیز کاربرد آهک شکفته را در تثبیت خاک‌های رسی نرم با درصد مواد آلی بالا بررسی کردند و نشان دادند که اضافه کردن ۷ درصد آهک شکفته به طور رضایت بخشی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه آنها را بهبود بخشیده، که عبارت از افزایش مقاومت فشاری، مدول کشسانی و چسبندگی و نیز کاهش شاخص خمیری و اصلاح دانه‌بندی خاک بوده است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی کارایی افزودن آهک‌های زنده و شکفته به خاک آلی جنگلی، نمونه‌برداری از خاک آلی جنگل شهید زارع ساری انجام شده است. سپس آهک زنده و شکفته با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت به خاک اضافه و آزمایش‌های مختلف مهندسی بر روی آن‌ها انجام شده و نتایج حاصل از دو مرحله با هم مقایسه گردیده است.

۲. تثبیت خاک با آهک

آهک یکی از مواد شیمیایی است که معمولاً برای تثبیت خاک استفاده می‌شود. از آنجایی که اکثر خاک‌ها، دارای ترکیبات سیلیکا و آلومین سیلیکا هستند، افزایش مقداری آهک زنده (Cao) یا آهک شکفته $Ca(OH)_2$ و آب، برای به وجود آوردن یک ترکیب پایدار، بسیار مؤثر است. تجربه نشان داده است که انواع خاک رس با آهک زنده و یا شکفته ترکیبی تولید می‌کنند که خواص آنها مانند خواص ترکیبات سیمانی است.

(Hans, 1990) آهک ها برای تثبیت رس‌های خمیری عملکرد مناسبی دارد و با رس‌های حاوی کانی مونتموریلونیت (به دلیل قابلیت جذب بالاتر کاتیون‌های بین شبکه‌ای) نسبت به رس‌های حاوی کانی کائولینیت آسان‌تر واکنش نشان می‌دهند. می‌توان با افزودن ۳ درصد وزنی آهک، عملیات اصلاح خاک را مؤثر دانست. برای ۱۰ درصد رس موجود در کل توده خاک احتساب ۱ درصد آهک می‌تواند مؤثر باشد (طباطبایی، ۱۳۷۵).

۲-۱. واکنش‌های آهک با خاک

به طورکلی افزایش آهک به خاک موجب بروز فعل و انفعالاتی می‌گردد که از نظر جنبه‌های مهندسی ژئوتکنیک عملاً بهبود کیفیت و مشخصه‌های خاک را در پی خواهد داشت. واکنش‌های انجام شده در خاک به دلیل حضور آهک به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شود:

۲-۱-۱. تغییر یون و تراکم خاک (واکنش‌های کوتاه مدت)

این واکنش نتیجه جایگزینی یون‌های قابل تبادل در شبکه و بین شبکه‌ای کانی‌های رسی با یون دو ظرفیتی کلسیم آهک(Ca^{++}) است. این واکنش باعث به هم پیوستن ذرات خاک رس شده و در نتیجه منجر به اصلاح خاصیت پلاستیسیته خاک می‌شود. از آنجایی که آهک ترکیب بسیار خوبی با آب دارد، این واکنش از انواع واکنش‌های فعال است که باعث در هم شکستن توده‌های خاک رس گشته و با بیرون کشیدن آب از میان توده‌های خاک، مصالح خشک‌تر و تراکم پذیرتری حاصل می‌گردد (کاووسی و هاشمیان، ۱۳۸۰).

۲-۱-۲. واکنش پوزولانی یا سمنتاسیون (واکنش‌های دراز مدت)

هنگامی‌که Fe_2o_3, Al_2o_3, Sio_2 موجود در خاک با کلسیم موجود در آهک ترکیب می‌شوند، یک ژل بسیار مقاوم سیلیکات کلسیم و آلومینات تشکیل می‌گردد که عملکرد آن مانند ترکیبات سیمانی است. در این مورد آهک دو نقش ایفا می‌کند که یکی اصلاح کننده و دیگری تثبیت کننده است. خاک‌های تثبیت شده با آهک، با افزایش عمل هیدراتاسیون در طی زمان، افزایش کارایی داده و این کارایی تا سال‌ها درون خاک ادامه خواهد داشت (جسمانی و همکاران، ۱۳۸۷). سمنتاسیون یک واکنش وابسته به زمان و واکنش کندی است که به میزان رس موجود در ترکیب وابسته است. تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار رس در کل نمونه نباید کمتر از ۲۵ درصد و شاخص خمیری باید بزرگ تر از ۱۰ باشد (Oates, 1998; Bengt, 1993).

۲-۱-۳. کربناسیون

کربناسیون(Carbonation) یک پدیده نامطلوب است که در نتیجه عدم انجام واکنش خاک با آهک به وجود می‌آید. به این ترتیب که Co_2 خاک یا هوا با Cao آهک ترکیب شده و باعث به وجود آمدن ترکیب $CaCo_3$ می‌گردد. این مساله زمانی به وجود می‌آید که رس پوزولانی کافی در ترکیب خاک موجود نباشد و یا آهک بیش از حد نیاز به خاک افزوده شده باشد. افزودن بیش از حد آهک به خاک نتیجه خوبی در بر نداشته و لازم است برای تعیین درصد آهک و رطوبت بهینه طرح اختلاط صورت گیرد (کاووسی و هاشمیان، ۱۳۸۰). آهک زنده به دلیل دارا بودن Cao بیشتر، تأثیر بیشتری در تثبیت خاک نسبت به آهک هیدراته ($Ca(OH)_2$) دارد (Oates,1998). به عبارت دیگر، آهک زنده قابلیت آزادسازی $Ca(OH)_2$ بیشتری داشته و از سوی دیگر تجربه نشان داده که ورود Co_2 آزاد شده از آهک زنده به عنوان تسریع کننده واکنش‌ها عمل می‌نماید. واکنش‌های آهک زنده با آب همراه با تولید گاز Co_2 و افزایش دما است که برای سلامتی انسان زیان‌آور است. از این رو کاربرد آهک هیدراته ایمن‌تر بوده و در صنعت بیشتر مرسوم است. معمولاً ۴ درصد وزنی آهک هیدراته معادل ۳ درصد آهک زنده است، با این تفاوت که آهک زنده به آب بیشتری برای هیدراته شدن نیاز دارد (هاشمی طباطبایی و آقایی آرانی، ۱۳۸۷).

با توجه به توسعه مناطق مسکونی در محدوده مورد مطالعه و نیاز به بهسازی خاک‌های آلی مساله‌دار، هدف از این پژوهش بررسی کارایی آهک زنده و شکفته، به منظور بهسازی

ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلی جنگلی می‌باشد. این ویژگی‌ها عبارتند از افزایش نسبت باربری، افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و بهبود خواص خمیری خاک‌های آلی است.

۳. مواد و روش‌ها:

خاک آلی: نمونه‌های خاک مورد آزمایش از جنگل شهید زارع در جنوب ساری و از نمونه‌های سطحی تا عمق ۱۰ سانتی‌متری برداشت شده است. برداشت نمونه‌ها به روش شطرنجی بوده که در آن سطح زمین به مربع‌هایی با ابعاد یک متر تقسیم شده و از هر گوشه آن نمونه خاک به مقدار یک کیلوگرم برداشت می‌گردد (جعفری حقیقی، ۱۳۸۲).

آهک: کربنات کلسیم رایج‌ترین کربنات موجود در خاک است. آنچه از تجزیه شیمیائی سنگ آهک یا دولومیت در اثر حرارت باقی می‌ماند، آهک زنده (اکسید کلسیم) است که ترکیب آن در ادامه آورده شده است.

(۱) (سنگ آهک بر اثر حرارت) $CaCo_3 \rightarrow CaO + CO_2$

(۲) (سنگ دولومیت بر اثر حرارت)

$$CaMg(Co_3)_2 \rightarrow CaO + MgO + 2CO_2$$

وزن مخصوص سنگ آهک زنده ۳/۲ تا ۳/۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. آهک زنده به وسیله آب یا بخار به آهک شکفته (هیدروکسید کلسیم) تبدیل می‌شود که با آزاد شدن گرما همراه است.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + heat \qquad (۳)$$

تبدیل آهک زنده به آهک شکفته با تغییر وزن مخصوص همراه است. در این فرآیند پس از شکفتن به مقدار ۲/۲ تا ۲/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش می‌یابد و حجم آن به حدود ۲/۵ تا ۳ برابر اولیه می‌رسد (حامی، ۱۳۷۱). در این بررسی از آهک زنده و شکفته همدان به صورت پودر استفاده شده است که آهک زنده به مقدار ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی خاک مرطوب و آهک شکفته به مقدار ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد وزنی مرطوب به نمونه‌های خاک آلی مورد آزمایش اضافه گردیده است. ترکیب شیمیائی آهک زنده و شکفته مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیائی آهک زنده و شکفته مورد استفاده جهت بهسازی خاک آلی

ترکیب شیمیائی	آهک زنده	آهک شکفته
SiO_2 (%)	۰/۵۰۲	۰/۶۹
Al_2O_3+Fe_2O_3 (%)	۰/۷۵	۱/۲۹
L.O.I. (%)	۲۰/۵۰	۲۸/۰۷
CaO (%)	۷۷/۹۶	۶۹/۴۵
MgO (%)	۰/۲۹	۰/۴۹

عمل‌آوری: به منظور بررسی تأثیر دوره عمل آوری (time curing) بر روی نمونه‌ها پس از آماده‌سازی نمونه‌ها با رطوبت طبیعی و سپس اختلاط با آهک، نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و مطابق با استاندارد ASTM C593 دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه را در دمای آزمایشگاه (۲۰ درجه سانتی گراد) سپری کردند. لازم به ذکر است، برای مقایسه کارایی آهک زنده و شکفته، باید شرایطی مانند درصد رطوبت و وزن واحد حجم نمونه‌ها برای تمام نمونه‌ها یکسان و ثابت در نظر گرفته شود تا بتوان تأثیر افزودن دو نوع آهک و تأثیر زمان عمل‌آوری‌های مختلف را با هم مقایسه نمود. همچنین برای انجام آزمایش‌هایی که نیاز به تهیه و بازسازی نمونه (remolded) نمی‌باشد، بعد از اختلاط خاک و آهک، دوره عمل‌آوری سپری گردید و برای آزمایش‌های دیگر (مانند مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا)، پس از تهیه نمونه مورد نظر، دوره عمل‌آوری طی شده است.

۴. برنامه آزمایش‌ها و نتایج

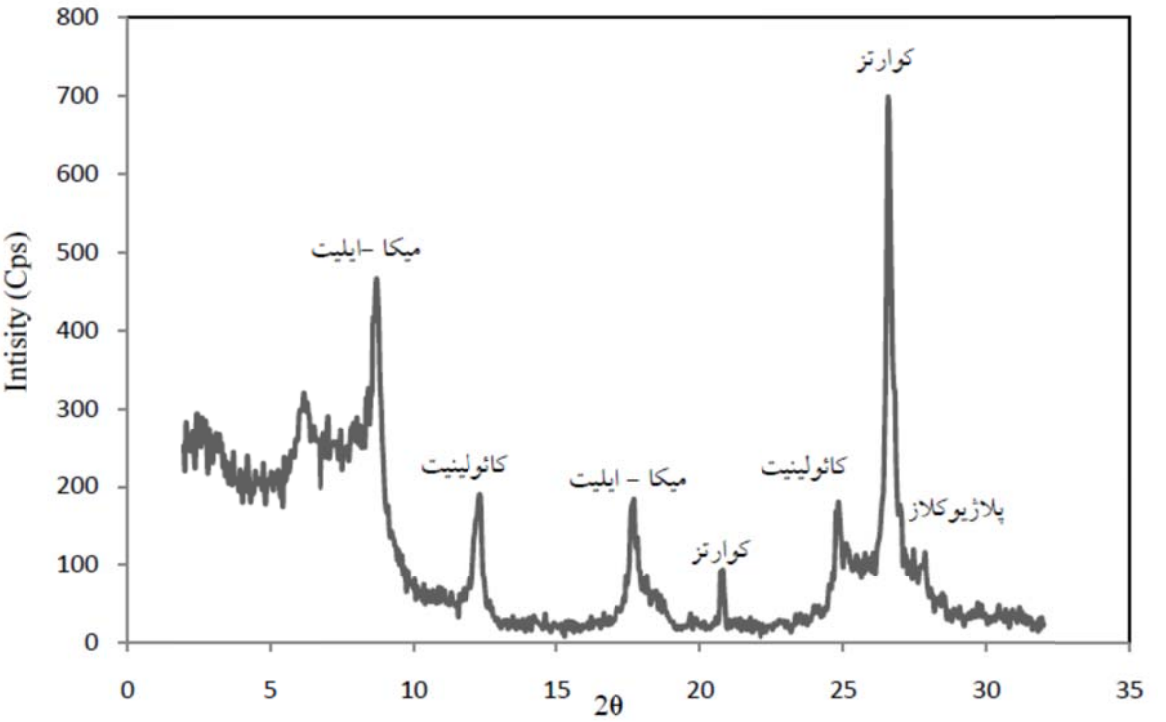
۴-۱. آزمایش‌های پایه بررسی خاک آلی

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اولیه خاک‌های آلی جنگل شهید زارع ساری، آزمایش‌های پایه مهندسی شامل دانه‌بندی و طبقه‌بندی خاک، حدود آتربرگ، تعیین وزن

مخصوص، تعیین درصد رطوبت، تعیین چگالی ذرات جامد خاک، تراکم استاندارد، برش مستقیم به روش تند و کند، تحکیم، مقاومت فشاری تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و آزمایش‌های شیمیایی خاک شامل تعیین درصد کربنات، درصد کلرور، درصد سولفات و درصد مواد آلی بر روی نمونه‌های خاک بر اساس استانداردهای ASTM انجام شد و برای کاهش درصد خطا، هر آزمایش با چندین تکرار انجام گردید. جدول ۲ خصوصیات خاک آلی مورد آزمایش را نشان می‌دهد. خاک مورد مطالعه مطابق طبقه‌بندی توصیفی خاک‌های آلی، با توجه به وجود ۱۱٪ ماده آلی، در رده (MOS) Medium Organic Soil، طبق طبقه‌بندی توصیفی- زایشی (Polish Norm PN – 86/B- 0248 (به نقل از Myslinska, 2003) در رده Humic Soil و مطابق رده‌بندی مهندسی متحد، در رده OH قرار می‌گیرد. حضور مواد آلی می‌تواند باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های آلی گردد (Cheng, et al., 2007). این موضوع برای خاک مورد مطالعه نیز صادق بوده و مقدار زاویه اصطکاک نشان داده شده در جدول ۲، بالا به دست آمده است. همچنین آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) بر روی نمونه خاک آلی قبل از بهسازی انجام شد و نشان داد که عمده کانی‌های موجود در خاک از نوع کوارتز، ایلیت – میکا و کائولینیت است. نتایج این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. جهت بررسی میزان کارایی آهک زنده و شکفته بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه، پس از تعیین خصوصیات پایه خاک آلی و اختلاط نمونه‌های خاک با آهک زنده و شکفته با درصدهای ذکر شده، آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، تعیین اسیدیته، نفوذسنج جیبی و برش پره‌ای روی نمونه‌های بهسازی شده با آهک انجام شده که شرح این آزمایش‌ها در ادامه آمده است.

جدول۲. ویژگی‌های اولیه مهندسی خاک دستخورده و دارای مواد آلی جنگل شهید زارع ساری

پارامتر	تعداد آزمایش	مقدار میانگین	شماره استاندارد
LL (%)	۵	۶۰/۳	ASTM D4318
PL (%)	۵	۴۰	ASTM D4318
PI (%)	۵	۲۰/۳	ASTM D4318
PH	۵	۶/۱۴	ASTM D4972
OC% (درصد ماده آلی)	۵	۱۱	ASTM D2974
رده خاک	۲	OH	ASTM D422
وزن واحد حجم خشک در محل(gr/cm^3)	۵	۱/۱۷	ASTM D1556
رطوبت طبیعی (٪)	۵	۱۹/۱۵	ASTM D2216
G_S	۵	۲/۴۱	ASTM D854
γ_{dmax} (gr/cm^3)	۳	۱/۳۷	ASTM D698
w_{opt} (%)	۳	۲۸/۲۶	ASTM D698
C_{CD} (KPa)	۲	۴/۵۴۸	ASTM D3080
φ_{CD} (درجه)	۲	۳۱/۷۵	ASTM D3080
C_{CU} (KPa)	۲	۳/۲۵	ASTM D3080
φ_{CU} (درجه)	۲	۳۵/۳	ASTM D3080
CBR (%)	۳	۶/۲۶	ASTM D1883
UCS (KPa)	۵	۷۵/۳۷	ASTM D2166
Cv (cm^3/s)	۲	$۱/۱۵\times۱۰^{-۴}$	ASTM D2435
C_c	۲	۰/۴	ASTM D2435
C_S	۲	۰/۰۳۶	ASTM D2435-80
K (cm/s)	۲	$۸/۵۴\times۱۰^{-۸}$	ASTM D2435-80



شکل۱. طیف پراش اشعه ایکس خاک آلی

۴-۲. آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک تثبیت شده

۴-۲-۱. نتایج آزمایش حدود آتربرگ

به منظور تعیین حد خمیری و حد روانی نمونه‌های خاک بهسازی شده با آهک زنده و شکفته، آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری طبق استاندارد ASTM D4318-87 انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها برای درصدهای مختلف آهک زنده و شکفته و نیز دوره‌های عمل‌آوری در جدول ۳ ارائه شده است. طبق نتایج این آزمایش روند تغییرات حدود آتربرگ با افزودن آهک زنده و شکفته، در جهت کاهش شاخص خمیری می‌باشد. همان طور که در جدول آمده است، آهک زنده در کاهش حد خمیری خاک آلی در درصد مشابه، مؤثرتر از آهک شکفته است. زیرا پیشرفت واکنش‌های کاتیونی و پوزولانی در اثر افزودن آهک به خاک به دمای محیط واکنش بستگی دارد و آهک زنده به دلیل ایجاد گرمای بیشتر نسبت به آهک شکفته واکنش را تسریع می‌کند (Oates, 1998).

جدول۳. تغییرات شاخص خمیری (PI) خاک دارای مواد آلی با زمان عمل آوری در درصدهای مختلف آهک

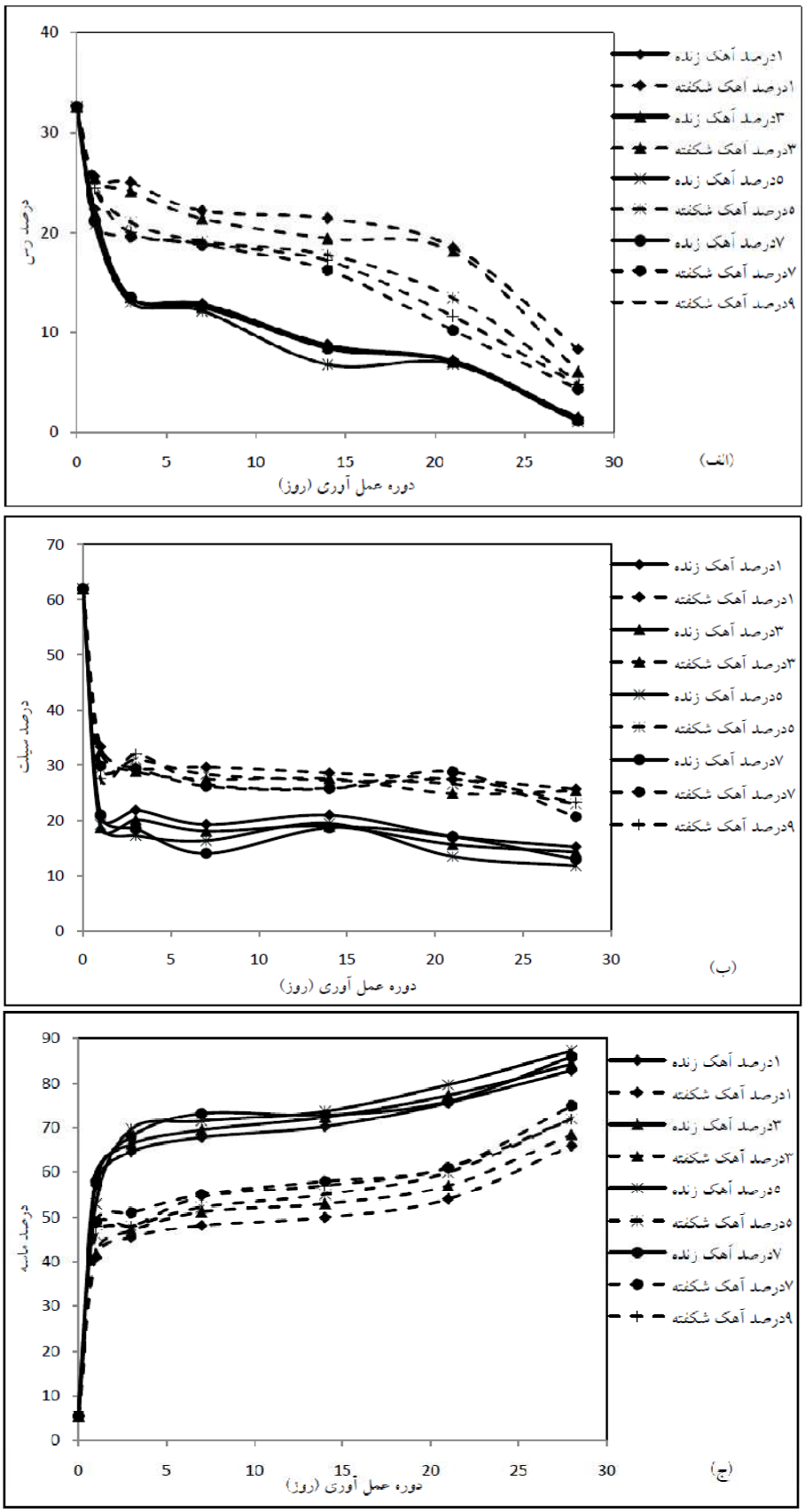
زمان عمل آوری (روز)	آهک افزوده شده به خاک	۱ درصد	۳ درصد	۵ درصد	۹ درصد
۱	زنده	۱۶/۷	۱۵/۲۲	۱۴/۱۷	۱۴/۱۹
	شکفته	۱۹/۰۶	۱۷/۶۹	۱۷/۹۴	۱۷/۲۵
۳	زنده	۱۶/۹۳	۱۴/۴۶	۱۴/۱۳	۱۴/۲
	شکفته	۱۸/۹۵	۱۶/۳۵	۱۵/۶۸	۱۵/۶۲
۷	زنده	۱۶/۵۵	۱۴/۲۴	NP	NP
	شکفته	۱۶/۴۵	۱۴/۷۵	۱۵/۲۲	NP
۱۴	زنده	۱۶/۱۲	۱۲/۱۵	NP	NP
	شکفته	۱۴/۹۲	۱۴/۵	۱۴/۴۴	NP
۲۱	زنده	۱۶/۰۳	۸/۵۱	NP	NP
	شکفته	۱۳/۸۸	۱۲/۶۲	NP	NP
۲۸	زنده	۱۵/۳۹	۷/۹۳	NP	NP
	شکفته	۱۳/۸	۱۲/۲۶	NP	NP

۴-۲-۲. *نتایج آزمون دانه بندی*

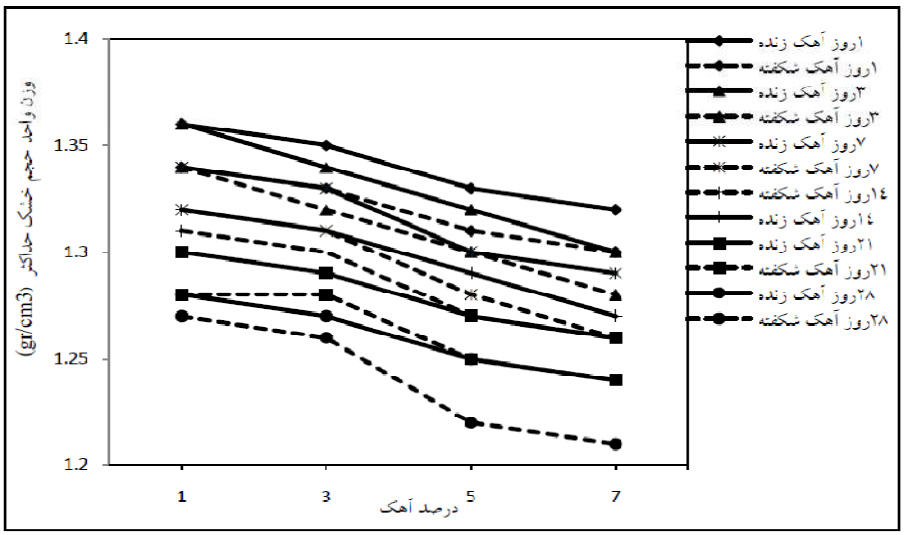
به منظور بررسی تغییر اندازه ذرات خاک آلی پس از تثبیت، آزمایش دانه‌بندی خاک به روش خشک انجام شد. منحنی دانه‌بندی مصالح بزرگ تر از ۷۵ میکرون (مانده روی الک شماره ۲۰۰) با استفاده از الک و منحنی دانه‌بندی مصالح کوچک تر از ۷۵ میکرون به روش رسوب‌سنجی و با استفاده از هیدرومتر تعیین شد. درصد ذرات ماسه، سیلت و رس در خاک آلی طبیعی (بهسازی نشده) با دانه‌بندی به روش تر به ترتیب ۵/۴۲، ۶۱/۹۵ و ۳۲/۶۳ درصد به دست آمده است. حضور بیش از ۳۰ درصد رس در این خاک، این خاک را برای واکنش با آهک مناسب کرده است. نتایج آزمایش دانه‌بندی برای خاک آلی بهسازی شده با آهک زنده و شکفته در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که نشان داده شده است، با افزودن آهک زنده و شکفته به خاک و افزایش درصد آهک، ذرات با اندازه ماسه افزایش یافته که با افزایش زمان عمل‌آوری نیز این روند همچنان افزایشی است. با افزایش درصد ذرات در حد ماسه، ذرات در حد سیلت و رس نسبت به نمونه خاک آلی بهسازی نشده روند کاهشی نشان می‌دهند که این امر باعث کاهش مقدار رس به میزان ۲ درصد برای خاک بهسازی شده با آهک زنده شده و احتمالاً با افزایش زمان عمل‌آوری برای خاک تثبیت شده با آهک شکفته، مقدار رس آن نیز به همین مقدار کاهش خواهد یافت. بنابراین تأثیر آهک زنده در تغییر دانه‌بندی خاک بیش از آهک شکفته است. افزایش ذرات در اندازه ماسه در نتیجه تشکیل سیمان در اثر واکنش‌های پوزولانی آهک با خاک آلی می‌باشد که باعث به هم چسبیدن ذرات در حد سیلت و رس و تبدیل آنها به ذرات در حد ماسه می‌گردد (Saker et al., 2009). به عبارت دیگر با افزایش آهک و زمان عمل‌آوری، نودول یا گرهگ‌هایی سفید رنگ در خاک تشکیل می‌گردد که به آسانی و با چشم غیر مسلح قابل مشاهده هستند.

۴-۲-۳. *نتایج آزمایش تراکم*

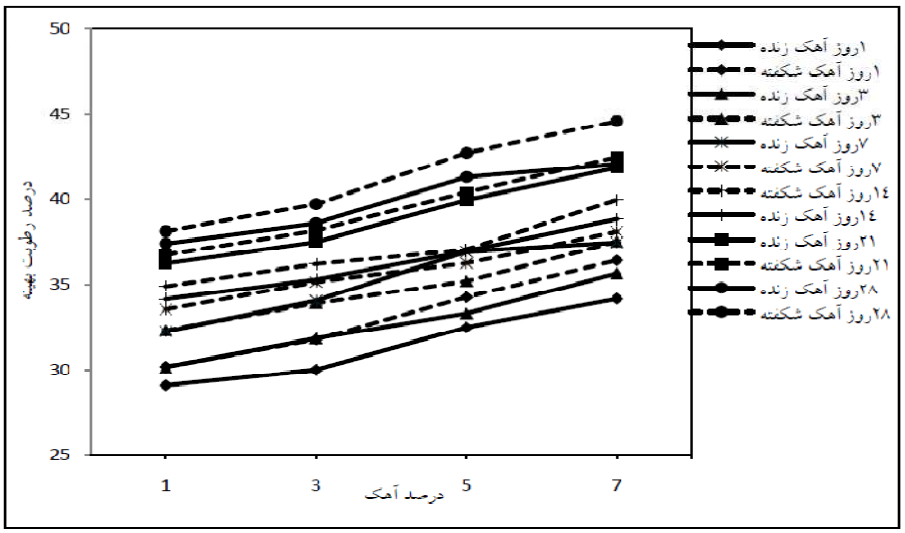
از آنجا که انجام آزمایش تراکم به روش استاندارد یا اصلاح شده مستلزم مصرف مقدار زیادی خاک برای هر آزمایش تراکم می‌باشد، به منظور تسهیل در انجام پژوهش، آزمایش تراکم کوچک مقیاس هاروارد برای به دست آوردن ویژگی‌های تراکمی نمونه‌های خاک بهسازی شده با آهک مورد استفاده قرار گرفته است (Wilson, 1950). نتایج این آزمایش در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ و ۴ افزودن آهک زنده و شکفته با روندی مشابه ولی با سرعت متفاوت موجب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم حداکثر خاک آلی می‌شود که می‌تواند به دلیل افزایش درصد مصالح ریزدانه و جذب آب به وسیله آهک شکفته باشد. اما تغییرات کمتر خصوصیات تراکمی خاک تثبیت شده با آهک زنده احتمالاً می‌تواند به دلیل جذب آب به وسیله گرما در موقع واکنش‌های کاتیونی باشد (Oates, 1998). تاثیر افزایش دوره عمل آوری بر ویژگی‌های تراکمی خاک آلی، مشابه افزایش درصد آهک است. افزودن آهک زنده و شکفته به ترتیب موجب ۵/۹ و ۱۱/۷ درصد کاهش در وزن واحد حجم خشک حداکثر و ۴۸/۶۹ و ۵۷/۷۵ درصد افزایش میزان رطوبت بهینه خاک آلی شده است.



شکل ۲. نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک تثبیت شده با آهک الف- درصد ماسه ب- درصد سیلت ج- درصد ماسه



شکل۳. تغییرات وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک تثبیت شده با آهک در آزمایش تراکم برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف

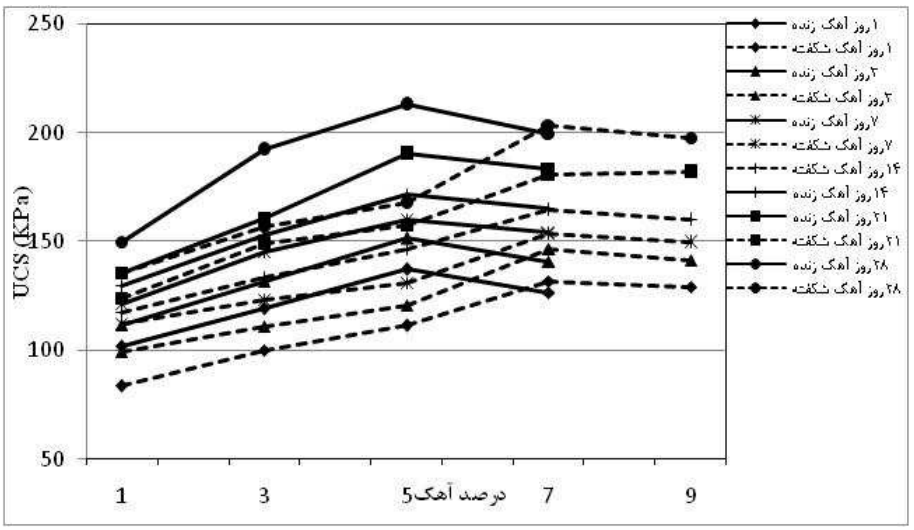


شکل٤. روند صعودی درصد رطوبت بهینه خاک دارای مواد آلی تثبیت شده با آهک در آزمایش تراکم برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف

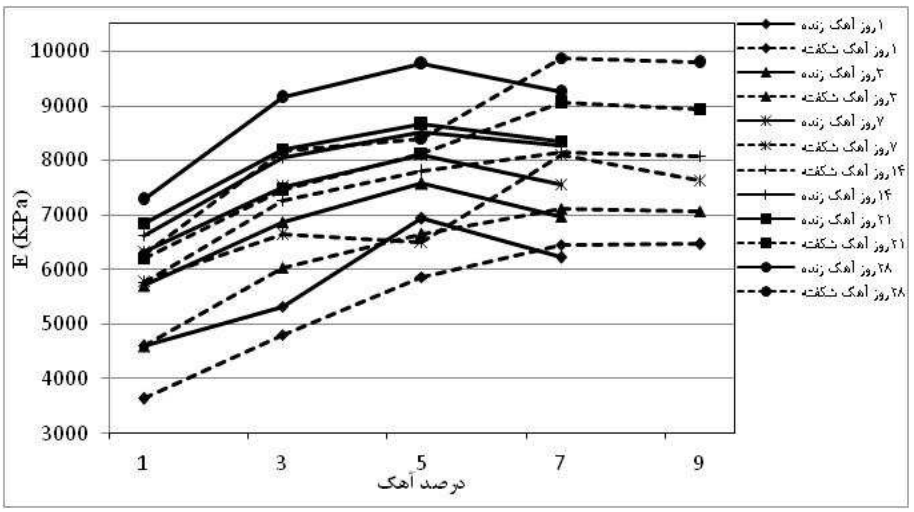
٤-۲-٤. نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری

به منظور تعیین مقاومت فشاری تک محوری (ASTM D2166-85) پس از اختلاط خاک با درصدهای مختلف آهک، نمونه‌ها با دانسیته یا وزن واحد حجم طبیعی در قالب استوانه‌ای مخصوص ساخت مغزه (با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر)، برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری آماده‌سازی شده و برای طی دوره عمل‌آوری در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده‌اند. نتایج مقادیر UCS برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک زنده و شکفته در شکل ۵ و نتایج مقادیر مدول کشسانی متقاطع (E) در شکل ٦ نشان داده شده است. همان طور که نشان داده شده، مقاومت فشاری تک‌محوری خاک آلی با افزایش درصد آهک و دوره عمل‌آوری به دلیل تشکیل ژل سیمان در اثر واکنش‌های آهک و خاک به تدریج افزایش می‌یابد. سیمان ایجاد شده به آهستگی اجزای خاک را به هم چسبانده و مقاومت آن را افزایش می‌دهد. عمل‌آوری نمونه‌ها در کوتاه مدت، زمان کمتری برای انجام واکنش‌ها در اختیار می‌گذارد، در حالی که عمل‌آوری طولانی مدت، زمان بیشتری برای انجام واکنش‌های نهائی می‌دهد و در نتیجه این

واکنش‌ها، اسکلت قوی‌تری از دانه‌ها به دلیل سیمانی شدن ایجاد می‌شود و آب بین دانه‌ای بیشتری مصرف می‌شود (Naji, 2002)، به همین علت با افزایش دوره عمل‌آوری نیز مقاومت و مدول کشسانی روند افزایشی دارند. مقاومت خاک در حالت طبیعی ۷۵/۳۷ کیلوپاسکال بوده که از نظر میزان سفتی (consistency) در رده متوسط قرار دارد (داس، ۱۳۷۷) و افزودن مقادیر بهینه ۵ درصد آهک زنده و ۷ درصد آهک شکفته با ۲۸ روز دوره عمل‌آوری به ترتیب مقاومت فشاری خاک را به مقدار ۱۸۲/۳۵ و ۱٦۹/۸۸ درصد و نیز مقدار مدول کشسانی را ۱۹۳/۵۷ و ۱۹٦/۹۵ درصد افزایش داده و رده خاک از نظر میزان سفتی به رده خیلی سفت ارتقاء پیدا کرده است.



شکل۵. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک تثبیت شده با آهک برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف



شکل٦. مدول کشسانی خاک تثبیت شده با آهک برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف

٤-۲-۵. نتایج آزمایش نفوذسنج و برش پره‌ای

در این بررسی برای تعیین مقاومت فشاری و برشی زهکشی نشده نمونه‌های بهسازی شده خاک آلی با آهک در دوره‌های عمل‌آوری مختلف، از نتایج آزمایش نفوذسنج جیبی و برش پره‌ای استفاده شده است. آزمایش نفوذسنج جیبی، آزمایشی کم هزینه و با تجهیزات ساده می‌باشد که در این تحقیق طبق استاندارد ASTM WK27337 انجام شده است. این آزمایش را می‌توان هم به‌صورت درجا و هم داخل آزمایشگاه انجام داد

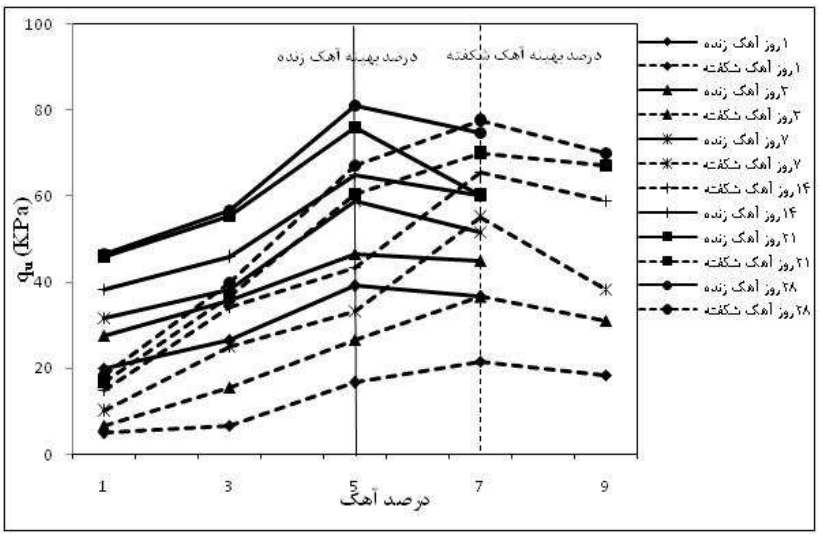
(سخاوتیان و اسلامی، ۱۳۸۹). آزمایش برش پره مطابق با استاندارد ASTM D4648/ D4648M-10 انجام شده است. برای انجام آزمایش های مذکور، نمونه‌های خاک پس از اختلاط با درصدهای مختلف آهک، با رطوبت و دانسیته (وزن واحد حجم) طبیعی، در قالب مخصوص آزمایش متراکم گردیده و پس از سپری کردن زمان عمل‌آوری و اشباع کردن نمونه‌ها، آزمایش نفوذسنج و برش پره‌ای بر روی آن‌ها انجام گردیده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ آمده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، در مجموع افزودن آهک زنده و شکفته به ترتیب موجب افزایش مقاومت فشاری زهکشی نشده خاک آلی تثبیت شده به مقدار ٥٦٦/٦٦ و ٥٣٧/٨٦ درصد شده که تأثیر آهک زنده در افزایش مقاومت بیشتر از آهک شکفته بوده است. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده در آزمایش برش پره‌ای برای خاک آلی تثبیت شده با آهک زنده و آهک شکفته به ترتیب ٣٨١/٦٤ و ٣٥٥/٤٦ درصد بوده است.

٤-٢-٦. نتایج آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا

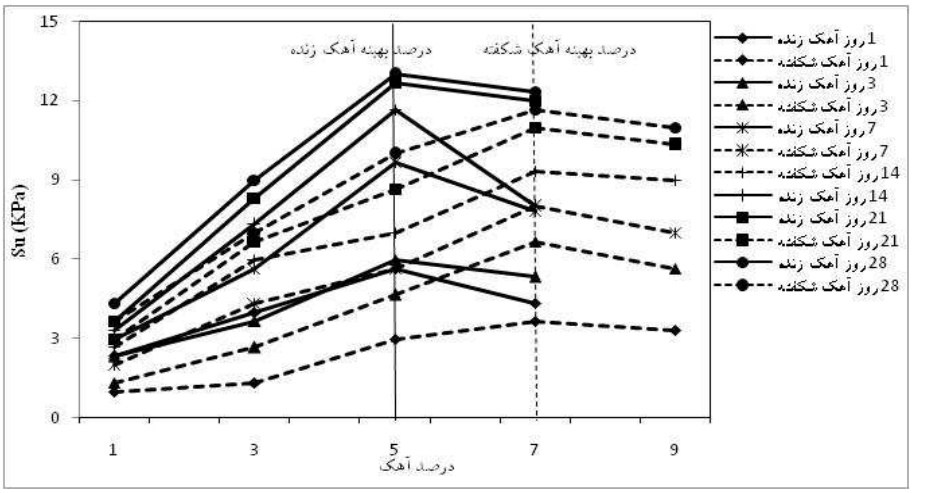
این آزمایش طبق استاندارد ASTM D1883-87 انجام شد و نتیجه آزمایش برای خاک آلی بدون آهک عدد ٦/٢٦٪ را به عنوان عدد CBR به دست داده است. لازم به ذکر است که برای انجام این آزمایش نمونه‌ها با رطوبت و وزن واحد حجم طبیعی آماده‌سازی شده و مقدار تورم در این آزمایش برای آن‌ها اندازه‌گیری نشده است. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، روند تغییر مقدار CBR با افزایش درصد آهک و دوره عمل‌آوری افزایشی بوده و مقدار این افزایش برای نمونه‌های تثبیت شده با آهک زنده و آهک شکفته به ترتیب ٢٥٦/٧١ و ٢٣١/٩٥ درصد بوده است.

٤-٢-٧. نتایج آزمایش تعیین pH

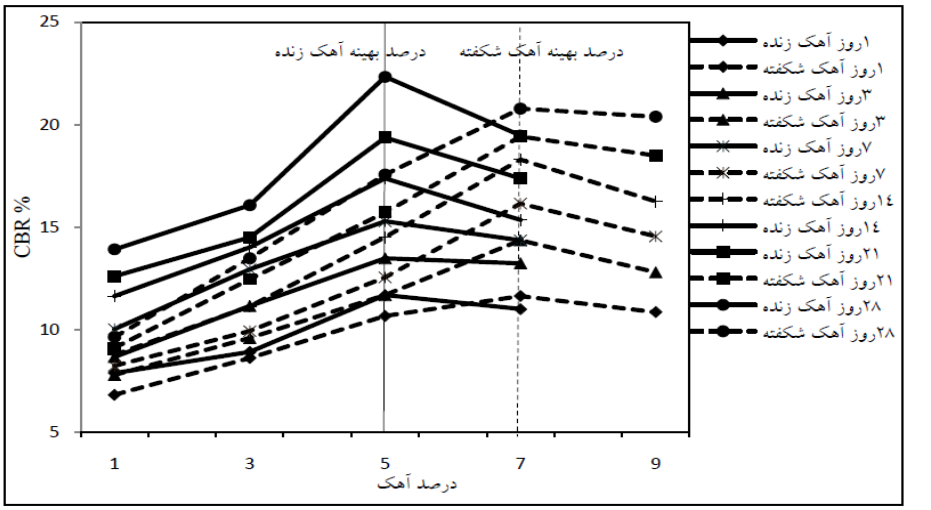
روش pH یک روش نسبتاً سریع برای تعیین مقدار آهک مناسب برای تثبیت خاک با آهک است. اساس این روش بر این اصل استوار است که آن قدر به خاک مورد نظر آهک اضافه می‌شود تا میزان pH مخلوط به ١٢/٤ که مقدار لازم برای شروع واکنش‌های پوزولانی است، برسد (Thompson, 1970). پس از اختلاط نمونه‌های خاک آلی با درصدهای مختلف آهک، به منظور تعیین مقدار آهک بهینه و مقایسه آن با نتایج آزمایش‌های مهندسی، مقدار اسیدیته محلول خاک‌های تثبیت شده با آهک تعیین گردید. نتایج این آزمایش در شکل ١٠ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، افزایش آهک زنده و شکفته موجب افزایش مقدار اسیدیته نمونه‌های بهسازی شده خاک دارای مواد آلی می‌گردد و مقدار بهینه آهک زنده و شکفته (اسیدیته ١٢/٤) در این تحقیق به ترتیب حدود ۵ و ۷ درصد است.



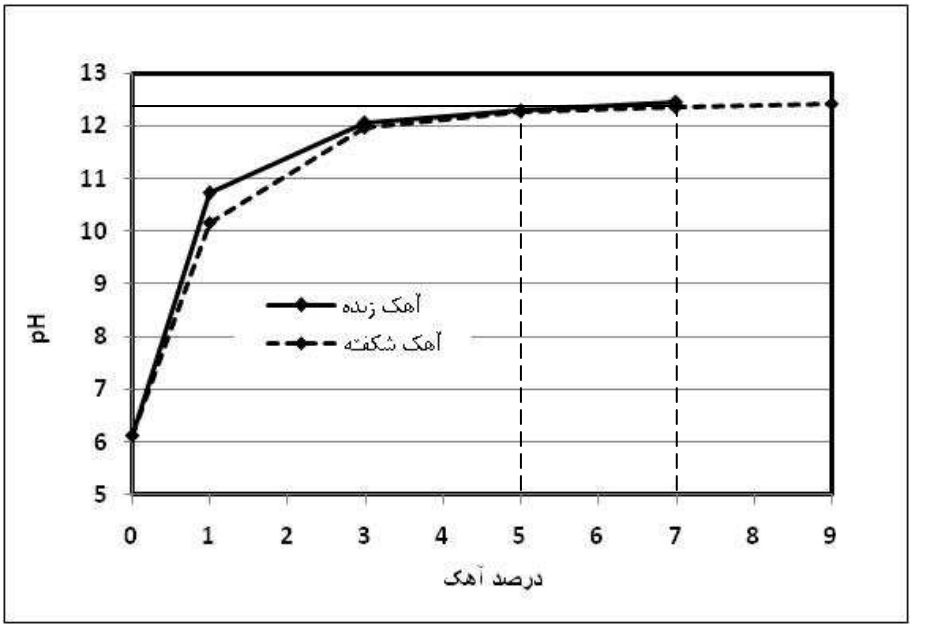
شکل۷. مقایسه نتایج آزمایش نفوذسنج جیبی خاک آلی تثبیت شده با آهک زنده و شکفته



شکل۸. مقایسه نتایج آزمایش برش پره‌ای خاک آلی تثبیت شده با آهک زنده و شکفته



شکل۹. نتایج آزمایش CBR خاک آلی تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف



شکل۱۰. مقایسه مقادیر اسیدیته نمونه‌های خاک آلی تثبیت شده با آهک زنده و آهک شکفته

۵. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر میزان کارایی آهک زنده و شکفته بر بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک دارای مواد آلی جنگل شهید زارع ساری بررسی شد و مقدار بهینه آهک با انجام آزمایش‌های مهندسی مختلف تعیین گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- طبق نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی با افزودن آهک به خاک آلی جنگلی، درصد ذرات در حد ماسه، افزایش یافته و ذرات در حد سیلت و رس کاهش می‌یابد. کاهش میزان رس با افزودن آهک زنده و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز تا مقدار ۲ درصد می‌باشد.
- با توجه به نتایج آزمایش حدود آتربرگ، آهک زنده و شکفته هر دو موجب کاهش شاخص خمیری خاک دارای مواد آلی جنگلی می‌شوند ولی تغییرات حدود آتربرگ خاک اصلاح شده با آهک زنده، بیشتر است.
- نتایج آزمایش تراکم نشان می‌دهد، افزایش آهک موجب کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. آهک شکفته نسبت به آهک زنده در کاهش دانسیته خشک حداکثر مؤثرتر است.
- طبق نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، افزودن آهک موجب افزایش مقاومت خاک آلی جنگلی شده و نیز مدول کشسانی آن را افزایش می‌دهد. این روند برای آهک زنده تا مقدار ۵ درصد آهک و برای آهک شکفته تا مقدار ۷ درصد آهک ادامه دارد.
- مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده خاک دارای مواد آلی تثبیت شده با آهک، با افزایش آهک و نیز افزودن دوره عمل‌آوری افزایش پیدا می‌کند که در این مورد هم، در درصدهای مشابه تأثیر آهک زنده بیشتر از آهک شکفته است.
- روند تغییرات مقدار CBR خاک تثبیت شده با آهک زنده و شکفته افزایشی بوده و مشابه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری است. آهک زنده CBR خاک دارای موادآلی جنگلی را به مقدار بیشتری افزایش می‌دهد.
- نتایج آزمایش pH به منظور تعیین درصد بهینه آهک زنده و شکفته، نشان داد که مقدار بهینه آهک زنده در حدود ۵ درصد و مقدار بهینه آهک شکفته در حدود ۷ درصد است. این نتایج همخوانی خوبی با نتایج آزمایش CBR و مقاومت فشاری تک‌محوری دارد.

طبق نتایج آزمایش پنترومتر و برش پره‌ای، از تغییرات مقادیر مقاومت فشاری و برشی زهکشی نشده نیز می‌توان درصد بهینه آهک افزوده شده به خاک را تعیین کرد. در این تحقیق، روند تغییرات مقادیر مذکور، با نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، CBR و pH همخوانی خوبی دارد.

منابع

حیدریان، ه.، ۱۳۸۷. روش‌های استاندارد آزمون‌های آزمایشگاه مکانیک خاک بر اساس استاندارد ASTM 2000. انتشارات آوند اندیشه.

جسمانی، م.، معماریان، ح.، و جمشیدی، م.، ۱۳۸۷. بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک کویر میقان به منظور اصلاح و تثبیت آن. مجله زمین‌شناسی مهندسی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد اول، شماره ۱، صفحات ۳۵-۲۳.

جعفری حقیقی، م.، ۱۳۸۲. روش‌های تجزیه خاک. انتشارات ندای ضحی.

سخاوتیان، ا.، اسلامی، ا.، ۱۳۸۹. ارزیابی مقاومت برشی زهکشی نشده رس رشت در اعماق سطحی با استفاده از آزمایش تک‌محوری، وین و پنترومتر جیبی با ملاحظه پدیده ناهمسانگردی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

طباطبایی، ا.، ۱۳۷۵. روسازی راه و فرودگاه. انتشارات دانشگاه تهران.

کاووسی، ا.، هاشمیان، ل.، ۱۳۸۰. بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک در فرودگاه پارس. نخستین کنفرانس بهسازی زمین، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایی، ع.، ۱۳۸۷. مقایسه تاثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده. مجله علوم زمین، سال هفدهم، شماره ٦٧.

ASTM C593, 2001. Standard specification for fly ash and other pozzolans for use with lime. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, ASTM, Philadelphia, Pa.
ASTM D1556 – 07, 1998. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method, Annual Book of ASTM Standards.
ASTM D2216, 2000. Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D854, 2000. Standard test methods for specific gravity of soils. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D 2974, 1995. Standard method for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D698, 2000. Standard test methods for laboratory compaction characteristic. Annual Books of ASTM Standard.
ASTM D2166, 2000. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils. Annual Books of ASTM Standard.
ASTM D2435, 2000. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils. Annual Books of ASTM Standard.
ASTM D422, 2000. Standard test methods for particle size analysis of soils. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D3080, 2000. Standard test method for direct shear test of soils. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D4318, 2000. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil. Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D4648 / D4648M – 10, 2000. Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil, . Annual Books of ASTM Standards.
ASTM WK27337, 2003. New test method for pocket penetrometer test, Annual Books of ASTM Standards.
ASTM D2974 - 07a, 1993. Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils, Annual Books of ASTM Standards.
Ahnberg, H., Johanson, S., 2005. Increase in strength with time in soils stabilized with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products. Reprinted with permission from the Swedish Deep Stabilization Research Centre. From Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Stockholm. Vol. 1.1.
Benjet, B.B., 1993. Ground Improvement. John Willey and Sons Publishing Company.
Chikiyala, S.R., 2008. The Effects of calcium-based treatment on organic soil behavior. M.Sc thesis. University of Texas at Arlington.
Chen, F.H., 1979. Foundations on expansive soils, Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands.
Cheng, X.H., Ngan-Tillard, D.J.M., Den Haan, E.J., 2007. The causes of the high friction angle of Dutch organic soils. Engineering Geology 93: 31–44.
Hans, F., (1990). Foundation Engineering–Soil Stabilization and Grouting. New York.
Huat, B., Maail, S.H., Mohamed, T.A., 2005. Effect of Chemical Admixtures on the Engineering Properties of Tropical Peat Soils. American Journal of Applied Sciences, 2 (7): 1113-1120.
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.
Muntohar, A.S., Hamtoro. G., 2000. Influence of rice hack ash and lime on engineering properties of a clayey subgrades. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, paper 094, Oklahoma state university, USA.
Myslinska, E., 2003. Classification of organic soil for engineering geology. Geological Quarterly, 47 (1): 39 - 42.
Naji, S.A., 2002. The use of lime to stabilize granular volcanic ash material for road construction. Journal of Sciences and Technology, Vol. 7, No. 2, 115-123.
Oates, J.A.H., 1998. Lime and Limestone. John Willey and Sons Publishing Company.
Sakr, A., Shahin, M.A., Metwally, Y.M., 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil. Geotechnical and Geolgical Engineering, 27:105–113.
Thompson, M.R., 1970. Suggested Methods of Mixture Design Procedure for Lime-Treated Soils, American Society for Testing and Materials. ASTM, Special Technical Publication, 479, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes.
Wilson, S.D., 1950. Small Soil Compaction Apparatus Duplicates Field Results Closely. Engineering News Record.