استفاده از ترکیب آهک و پوزلان برای تثبیت خاک‌های ماسه سیلتی در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی

نادر عباسی[۱*]، مسعود مهدیه[۲] و محمد هادی داودی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۲)

چکیده

با توجه به گستردگی خاک‌های ماسه سیلتی در بخش‌های وسیعی از جهان و ایران و ضعیف بودن خواص ژئوتکنیکی آنها، تثبیت و بهبود خواص مهندسی این گونه خاک‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش تأثیر مقادیر مختلف افزودنی آهک و پوزولان طبیعی در مقاومت فشاری خاک ماسه سیلتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با افزودن پنج سطح مختلف آهک شامل ۰، ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد و چهار سطح پوزلان شامل ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی به یک خاک ماسه سیلتی ۲۰ تیمار آزمایشی تهیه و سپس مقاومت فشاری آنها در سه سن مختلف ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. براساس بررسی‌ها و تحلیل‌های آماری صورت گرفته، مشخص گردید گرچه افزایش آهک و پوزلان هر کدام به تنهائی به‌طور معنی‌داری موجب افزایش مقاومت فشاری خاک مورد بررسی می‌گردند ولی کاربرد توأم آنها باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری حتی تا ۱۶ برابر خاک طبیعی می‌شود. در مجموع براساس مجموعه بررسی‌های به‌عمل آمده و تحلیل آماری انجام شده مناسب‌ترین ترکیب شامل ۳ درصد آهک و ۱۵ درصد پوزولان برای تثبیت خاک ماسه سیلتی تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: خاک ماسه سیلتی، مقاومت فشاری، پوزولان، آهک

۱. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

۲. گروه مهندسی خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

۳. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nader_iaeri@yahoo.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

مقدمه

امروزه با توجه به محدودیت منابع آب در کشور و تدوین برنامه‌های توسعه‌ای میان مدت و بلند مدت در خصوص پروژه‌های زیر بنایی آب و خاک، احداث شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی و تأسیسات وابسته به منظور استفاده بهینه از منابع آب و نهایتاً افزایش تولید، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی بررسی وضعیت موجود شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی نشان می‌دهد اغلب این شبکه‌ها در مراحل مختلف بهره‌برداری دچار مسائل و مشکلات عدیده‌ای که عمدتاً به‌صورت تخریب پوشش بتنی کانال‌ها بروز می‌نمایند، مواجه هستند(۵). گرچه ممکن است تخریب‌های صورت گرفته معلول عوامل مختلفی باشند، لیکن نتایج مطالعات و تحقیقات انجام شده در این خصوص نشان داده‌اند که عوامل مربوط به شرایط ژئوتکنیکی بستر و وجود خاک‌های مسأله دار در مسیر این گونه سازه‌ها بیشتر از سایر موارد نمود داشته و عدم توجه به آنها نه تنها باعث تخریب سازه‌ها در سال‌های اول بهره‌برداری گردیده، بلکه امکان اصلاح و بازسازی را مشکل و غیراقتصادی می‌نماید(۴). خاک‌های واگرا، انحلال پذیر، متورم شونده، رمبنده و روانگرا از جمله خاک‌های مسأله‌دار یا مشکل آفرین می‌باشند که ممکن است باعث ایجاد خسارات و مشکلات بهره‌برداری از شبکه‌ها گردند(۱).

رسوبات ماسه سیلتی از مهم‌ترین رسوبات محیط‌های کویری هستند که دارای پراکندگی زیادی در نقاط مختلف جهان از جمله ایران می‌باشد. این نوع از خاک‌ها به واسطه پتانسیل رمبندگی(Collapse) یا فرونشست زیاد و نیز ضعیف بودن خواص مکانیکی نظیر ظرفیت باربری و مقاومت فشاری به‌عنوان یکی از خاک‌های مشکل آفرین باعث ایجاد مشکلات جدی در پروژه‌های عمرانی به ویژه سازه‌های آبی احداث شده بر روی این خاک‌ها می‌گردد. تخریب پوشش بتنی کانال اصلی شبکه آبیاری و زه‌کشی ساوه یکی از بارزترین نمونه‌های قابل ذکر در این خصوص است. براساس اسناد موجود، مدت زمان کمی پس از احداث کانال اصلی شبکه مشکلاتی شامل تخریب و جابه‌جائی پوشش بتنی کانال در بخش‌هائی از طول آن مشاهده گردید. همزمان با پیشرفت بهره‌برداری و جدی‌تر شدن عوارض و تخریب‌ها کارفرما به ناچار عملیات ترمیم آن را به‌صورت تعویض برخی از قطعات بتن و یا پر کردن درز و ترک‌های پوشش انجام داد ولی این راهکار مؤثر نبوده و تخریب‌های جدیدی در محل‌های دیگر کانال به وقوع پیوست(۲). رحیمی و عباسی در سال ۱۳۸۱ با انجام بررسی‌های میدانی و تحقیقات آزمایشگاهی دریافتند که علت اصلی تخریب‌های ایجاد شده در پوشش کانال اصلی شبکه ساوه وجود رگه‌های متشکل از ماسه سیلتی و ماسه ریز و نسبتاً تمیز در خاک بستر می‌باشد. بدین ترتیب که آب‌های سطحی و آب درون کانال به پشت پوشش هدایت و پس از اشباع نمودن منجر به فرونشست لایه ماسه و شسته شدن و خارج نمودن آنها از محیط گردیده است. این امر موجب ایجاد حفره‌های فرسایشی بزرگ در پشت پوشش شده و در نهایت باعث نشست قطعات بتنی، ترک خوردگی و تخریب کانال گردیده است(۲).

نظر به برنامه‌های توسعه‌ای کشور در احداث پروژه‌های زیربنایی مانند راه‌سازی، خطوط انتقال آب و شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی و وجود چنین خاک‌هائی در نقاط مختلف کشور، تثبیت و تقویت خواص آنها به منظور کاهش هزینه‌های اجرائی در مرحله ساخت و هزینه‌های نگه‌داری پس از ساخت امری ضروری بوده و به‌عنوان راهکار مناسب برای جلوگیری از مشکلات احتمالی می‌باشد. تثبیت خاک یک اصطلاح کلی است که برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا ترکیبی از آنها که جهت بهبود خواص خاک به‌کار می‌رود، اطلاق می‌شود. از جمله روش‌های اصلاح و تثبیت خاک می‌توان به اقداماتی نظیر؛ تراکم، تسلیح، کنترل زه‌کشی، افزودن مواد شیمیایی، طبیعی یا ترکیبی از هر نوع روش فیزیکی و شیمیایی اشاره نمود. بهبود خواص خاک ممکن است برحسب نیاز به منظور تقویت مشخصه خاصی از خاک نظیر؛ کنترل نشست، افزایش مقاومت فشاری و یا بهبود مقاومت در برابر نیروهای محیطی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

صورت گیرد. نظر به این‌که در طول سالیان گذشته و به‌ویـژه در سال‌های اخیر با گسترش احداث پروژه‌های عمرانی، مـشکلات متعددی نیز نظیر نشست بستر پوشش بتنی کانال‌ها و بستر جاده و به تبع آنها تخریب سازه‌های بتنی کانال‌ها و آسفالت جـاده‌هـا به وجود آمده است، تثبیت خاک‌های سست و ضعیف بـیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. یکی از راه‌های تثبیت خـاک استفاده از آهک می‌باشد که این روش اصلاح خاک از زمان‌های قدیم متداول بوده است. تاکنون تحقیقات زیـادی بـرای تثبیـت خاک با استفاده از آهک انجام شده است. افزودن مقادیر مختلف آهک به خاک موجب تغییر در مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی نظیر دانه‌بندی، حدود اتربرگ، مقاومت فـشاری و ویژگـی‌هـای تحکیمی خاک می‌گردد. به‌طوری‌که یـک خـاک رسـی نـرم بـا حدود ۱۴ درصد ماده آلـی مـی‌توانـد بـه‌طـور رضایتبخـشی بـا افزودن ۷ آهک تثبیت شود(۱۴).

کبیـر و داوودی (۸) مقاومـت فـشاری خـاک رس سـیلتی حاوی مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصـد آهـک و ۱، ۲، ۳ و ۵ درصـد کلرید سدیم را به‌صورت مجزا و توام مطالعه و نـشان دادنـد بـا افزایش مقـدار آهـک و زمـان عمـل‌آوری نمونـه‌هـا، مقاومـت محصور نـشده خـاک رس سـیلتی افـزایش مـی‌یابـد. عبـدی و چرخیاری (۶) بیان کردند استفاده توام سرباره فولادسازی ذوب آهن اصفهان و آهک در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک و یا سـرباره بـتن‌هـایی افـزایش قابـل ملاحظـه‌ای در مقاومـت فشاری نمونه‌ها دارد. هم‌چنین مطالعه اثرات جداگانه و ترکیبـی آهک و خاکستر بادی روی خاک متورم شونده نشان داده اسـت که افزودن آهک و خاکستر بادی تأثیر معنی‌داری بر مشخـصات ژئوتکنیکی خاک دارد(۱۱). باشا و همکاران (۹) ضمن بررسـی ترکیب مخلوط‌های مختلف سیمان و خاکـستر پوسـته بـرنج بـا خاک، مخلوط ۴ درصد سیمان و ۲۰ درصد خاکستر پوسته برنج را ترکیب موثر و اقتصادی معرفی کردند. تحقیقات محمد زیـن و همکاران (۱۲) نشان داد خاکستر کوره زباله سـوزی در تـأثیر قابل تـوجهی در مقاومـت فـشاری محـصور نـشده ماسـه‌هـای کویری دارد. چن و لین (۱۰) نشان دادند کـه مقاومـت فـشاری محصور نشده خاک چسبنده رسی با افزودن توام خاکستر لجـن فاضلاب و سیمان حدود ۳ تا ۷ برابر افزایش می‌یابد. هم‌چنـین کاربرد مخلوط خاکستر لجن فاضلاب و آهک هیدراته نیز برای تثبیـت و تقویـت خـواص خـاک چـسبنده نـرم قابـل اسـتفاده است(۱۲). استفاده از مخلوط الیاف پلی پروپیلن و آهـک بـرای تثبیت و افزایش مقاومت فشاری خاک رس کائولینیتی نیز نتـایج رضایتبخشی داشته است(۷). بـدین ترتیـب ملاحظـه مـی‌گـردد تقویت خواص خاک به روش افزودن مواد تثبیت کننده می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب در مواجهه بـا خـاک‌هـای مـسأله دار مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش چگونگی تـأثیر کـاربرد آهک و یک پوزولان طبیعی به‌طور مجزا و توامـان بـر مقاومـت فشاری خاک ماسه سیلتی مورد مطالعـه و تحقیـق قـرار گرفتـه است.

مواد و روش‌ها

روش کلی در این تحقیق شامل تهیه نمونه خاک، تهیه و ساخت تیمارهای آزمایشی مختلف، انجام آزمایش‌های شناسـایی خـاک مورد مطالعه و انجام آزمـایش تـراکم و مقاومـت فـشاری تـک محوری بر روی نمونه خاک اصلی و تیمارهـای مـورد بررسـی است.

مصالح مصرفی

با توجه به این‌که در این پژوهش اثر دو ماده آهـک و پـوزولان در تثبیت خاک ماسه سیلتی مورد مطالعه قرار گرفته است، ابتـدا مشخصات این مصالح به‌عنوان بخـشی از مـواد پـژوهش مـورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه خاک مورد استفاده در این پـژوهش خاک ماسه سیلتی با مشخصات مندرج در جدول ۱ است کـه از منطقه جندق-گرمسار تهیه گردیده است.

پوزولان

پوزولان مورد استفاده در این تحقیق از نوع طبیعی بـوده کـه از کارخانه سیمان آبیک تهیه گردید. ماده پوزولانی بایستی قبـل از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

بافت خاک (٪)			چگالی	مشخصات تراکمی		حدود اتربرگ
ماسه	سیلت	رس		وزن واحد حجم خشک ماکزیمم(g/cm^3)	رطوبت بهینه (٪)	
۸۰	۱۶	۴	۲/۵۲	۲/۰۱	۹/۹۶	غیر خمیری (NP)

مصرف به شکل پودر در آید تا سیلیس موجود در آن بتواند در حضور آب با آهک، سیلیکات‌های کلسین پایدار را که دارای خواص چسبندگی‌اند، تشکیل دهد (۳). لذا پوزولان مورد استفاده قبل از اختلاط با خاک خرد و از الک نمره ۶۰ عبور داده شد. آهک مورد استفاده نیز محصول کارخانه آهک قم و از نوع آهک شکفته بود. این آهک از الک نمره ۶۰ عبور داده شده و به همراه پوزولان با خاک مورد مطالعه مخلوط شده است. هم‌چنین به منظور شناسایی نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده مواد و مصالح مورد استفاده آزمایش دیفراکتومتری اشعه X (XRD) بر روی آنها صورت گرفت که نتایج به‌دست آمده از آن در جدول ۲ ارائه شده است.

تیمارهای آزمایش

با توجه به این‌که هدف اصلی پژوهش بررسی اثر مقادیر مختلف آهک و پوزولان بر مشخصات خاک و تعیین ترکیب مناسب مخلوط بود درصدهای مختلفی از آهک و پوزولان در قالب تیمارهای آزمایشی مورد آزمایش قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا، پوزولان، آهک و خاک ماسه سیلتی به‌مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. نسبت‌های پوزولان و آهک در مخلوط‌های پوزولان- خاک، آهک- خاک و پوزولان-آهک- خاک به‌صورت نسبت وزن خشک آنها به وزن خشک مخلوط تعریف شدند. لازم به ذکر است که درصدهای آهک به‌کار رفته در این پژوهش ۰، ۱، ۳، ۵ و ۷ و درصدهای پوزولان به‌کار رفته ۰، ۵، ۱۰و ۱۵ می‌باشد. جزئیات تیمارهای به‌کار رفته در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

انجام آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مصالح ساختمانی مهم‌ترین و اساسی‌ترین ویژگی مکانیکی است که به‌طور مستقیم بیانگر ظرفیت باربری و قابلیت کاربرد مصالح برای مقاصد مختلف در پروژه‌های ساختمانی است. این ویژگی هم‌چنین به‌طور ضمنی بیانگر سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نظیر جذب آب، دانسیته، دوام و پایداری در برابر عوامل جوی و ... نیز است. لذا در اغلب ارزیابی‌های مربوطه به ویژگی‌های مصالح از مقاومت فشاری استفاده می‌شود. اصولاً انتخاب معیار مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت تثبیت خاک، بستگی به جایگاه و هدف از تثبیت خاک دارد. به‌عنوان مثال در مکان‌هایی که خاک تثبیت شده در معرض جریان مستقیم آب است، ارزیابی پتانسیل فرسایش‌پذیری مناسب‌ترین معیار خواهد بود. هم‌چنین در مواردی که تثبیت خاک به منظور ایجاد لایه آببند و جلوگیری از نشت آب انجام می‌شود، میزان نفوذپذیری خاک تثبیت شده می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی کیفیت تثبیت باشد. ولی با توجه به این‌که در این پژوهش هدف مقاوم کردن خاک زیر بستر کانال در برابر نشست و گسیختگی می‌باشد، برای ارزیابی کیفیت خاک‌های تثبیت شده از معیار مقاومت فشاری استفاده گردید.

برای تهیه نمونه آزمایشی مقاومت فشاری از قالب تراکم هاروارد استفاده گردید. مطابق شکل ۱- الف) قالب هاروارد به شکل استوانه با قطرحدود ۳/۵ و طول ۷ سانتی‌متر است. بدین ترتیب که پس از اضافه کردن رطوبت بهینه مربوط به هر یک از مخلوط‌های مورد بررسی، مخلوط یکنواخت حاصل شده در قالب هاروارد در۵ لایه و هر لایه با ۱۶ ضربه چکش خاص

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

جدول ۲. درصد مواد تشکیل دهندهٔ مصالح مصرفی

نوع مصالح	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O
آهک	۱/۳۶	۰/۲۴	۰/۱۳	۵۱/۶۴	۲/۶۵	۰/۸	۰/۰۳
پوزولان	۵۴/۸۷	۱۸/۸۸	۲/۶۲	۲/۶۲	۱/۹۳	۰/۱۵	۵/۵

جدول ۳. مشخصات تیمارهای آزمایش

شماره تیمار	علامت اختصاری	درصد پوزولان	درصد آهک	شماره تیمار	علامت اختصاری	درصد پوزولان	درصد آهک
۱	P0L0	۰	۰	۱۱	P10L0	۱۰	۰
۲	P0L1	۰	۱	۱۲	P10L1	۱۰	۱
۳	P0L3	۰	۳	۱۳	P10L3	۱۰	۳
۴	P0L5	۰	۵	۱۴	P10L5	۱۰	۵
۵	P0L7	۰	۷	۱۵	P10L7	۱۰	۷
۶	P5L0	۵	۰	۱۶	P15L0	۱۵	۰
۷	P5L1	۵	۱	۱۷	P15L1	۱۵	۱
۸	P5L3	۵	۳	۱۸	P15L3	۱۵	۳
۹	P5L5	۵	۵	۱۹	P15L5	۱۵	۵
۱۰	P5L7	۵	۷	۲۰	P15L7	۱۵	۷

الف) قالب هاروارد مورد استفاده

ب) دستگاه آزمایش تک محوری

شکل ۱. قالب هاروارد و دستگاه تک محوری

دستگاه متراکم گردید. شایان ذکر است رطوبت بهینه برای هر یک از تیمار با استفاده از آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D1557-06) تعیین گردیدند. نمونه‌های ساخته شده به منظور عمل‌آوری داخل کیسه پلاستیکی در محیط آزمایشگاه نگه‌داری و پس از رسیدن به سن مورد نظر مطابق استاندارد (ASTM D2166-06) مورد آزمایش مقاومت فشاری تک

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

محوری قرار گرفتند. برای انجام آزمایش، نمونه آزمایشی در زیر دستگاه تک محوری (شکل ۱- ب) قرار گرفته و توسط محور دستگاه بار به‌طور پیوسته و بدون وارد کردن شوک به نمونه اعمال می‌گردد. در طول انجام آزمایش مقادیر نیرو به‌ازای تغییر طول‌های مشخص نمونه تا لحظه گسیختگی یادداشت می‌شود. با تقسیم مقدار نیرو بر سطح مقطع نمونه مقادیر تنش فشاری تعیین و سپس منحنی تغییرات تنش- کرنش ترسیم و براساس آن مقاومت فشاری تعیین می‌گردد. مقاومت فشاری به‌دست آمده به میزان زیادی بستگی به وزن مخصوص، رطوبت حین ساخت، مدت نگه‌داری نمونه‌ها، شرایط محیطی نگه‌داری، درصد افزودنی‌های خاک دارد. بدین ترتیب با توجه به تعداد ۲۰ نوع ترکیب مختلف ذکر شده در جدول ۳ و سه سن عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و در نظر گرفتن سه تکرار برای هر تیمار در مجموع ۱۸۰ نمونه آزمایشی تهیه و مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش تراکم

آزمایش تراکم برای تعیین وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه تیمارهای مورد نظر صورت پذیرفت. تأثیر مقدار پوزولان بر درصد رطوبت بهینه و بر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم به‌ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

شکل‌های ۲ و۳ نشان می‌دهند که با افزایش مقدار پوزولان، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد که این مطلب می‌تواند ناشی از نرمی زیاد پوزولان مصرفی باشد. با افزایش درصد پوزولان به‌علت نرمی زیاد آن، جذب آب سطحی توسط ذرات پوزولان افزایش می‌یابد و این عمل باعث افزایش رطوبت بهینه می‌شود. هم‌چنین با افزایش رطوبت بهینه، آب کم کم جای ذرات خاک، آهک و پوزولان را گرفته و به‌دلیل وزن حجمی کمتر آب نسبت به مصالح مصرفی، حداکثر وزن واحد حجم خشک کاهش می‌یابد. دامنه تغییرات مقدار رطوبت بهینه، از ۹/۹۶ درصد برای خاک طبیعی تا ۱۳ درصد برای حالت P15+L7 مشاهده شد. هم‌چنین، تأثیر مقدار آهک بر درصد رطوبت بهینه و بر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم به‌ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شدند. همان‌طوری‌که از شکل‌های مذکور قابل ملاحظه است، با افزایش مقدار آهک، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم کاهش می‌یابد. شایان ذکر است این نتایج با نتایج ذکر شده در تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد (۷).

نتایج آزمایش تک محوری

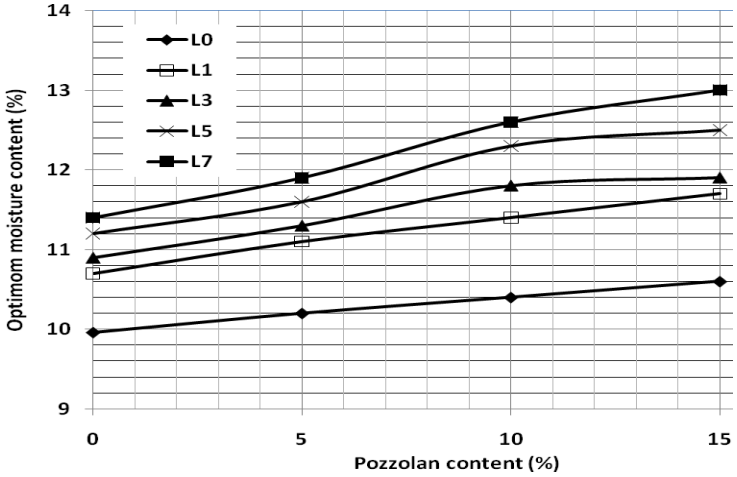
آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی کلیه نمونه‌های تهیه شده در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و در سه تکرار انجام گرفت. جدول ۴ مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد. هم‌چنین چگونگی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه به ازای مقادیر مختلف آهک و پوزولان به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که افزایش مقدار آهک، تا حدی باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری خاک گردیده و بعد از آن حد مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در تمامی مقادیر پوزولان به جز ۵ درصد، بیشترین مقاومت در آهک ۵ درصد به‌دست آمده است. شکل ۷ نیز نشان می‌دهد که پوزولان به تنهایی (منحنی L0) تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری خاک ندارد ولی در نمونه‌های دارای آهک، افزایش پوزولان باعث افزایش مقاومت فشاری شده است و بیشترین میزان مقاومت فشاری در پوزولان ۱۵ درصد به‌دست آمده است. هم‌چنین اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق شکل ۸ نشان داده شده است.

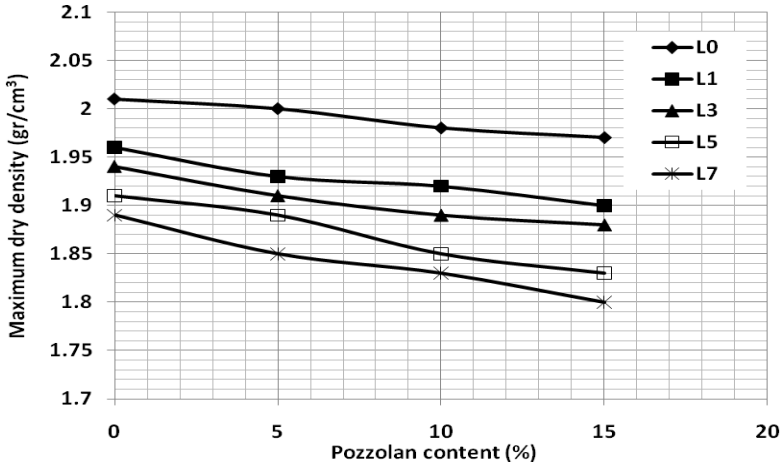
مطابق شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که تقریباً در تمامی موارد، با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در نمونه‌های فقط دارای پوزولان، زمان عمل‌آوری تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری آنها نداشته است. ولی در نمونه‌های فقط دارای آهک، روند افزایش مقاومت متناسب با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

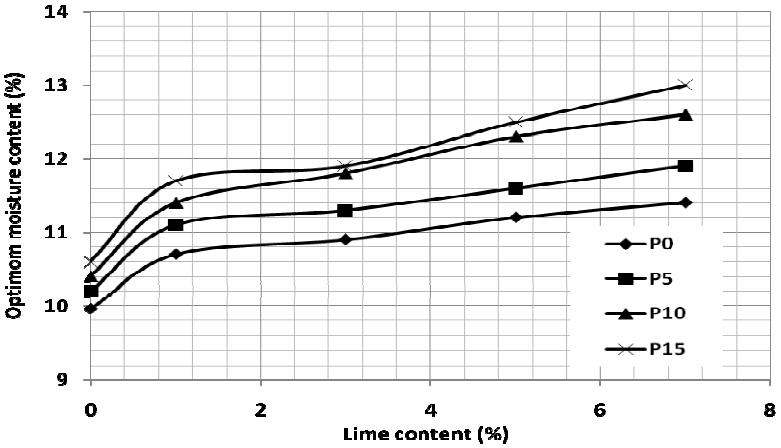
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]



شکل ۲. تاثیر مقدار پوزولان بر درصد رطوبت بهینه



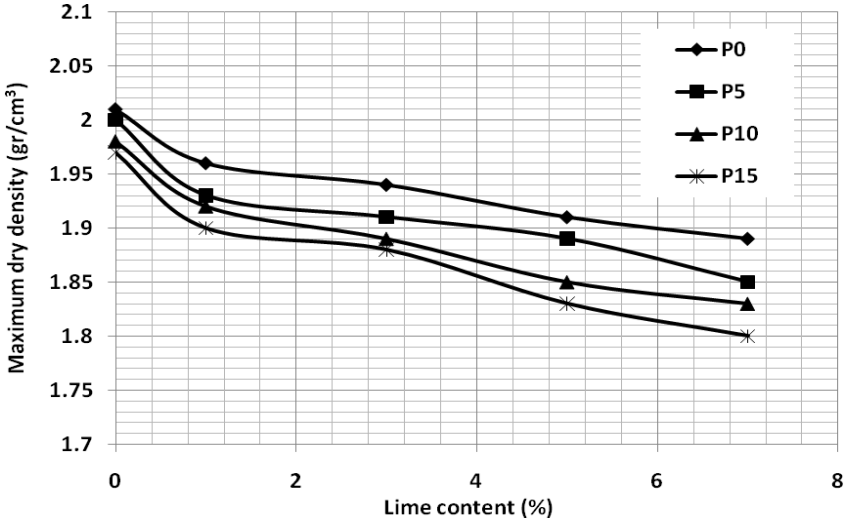
شکل۳. تأثیر مقدار پوزولان بر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم



شکل ۴. تأثیر مقدار آهک بر درصد رطوبت بهینه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]



شکل۵. تأثیر مقدار آهک بر وزن واحد حجم خشک ماکزیمم

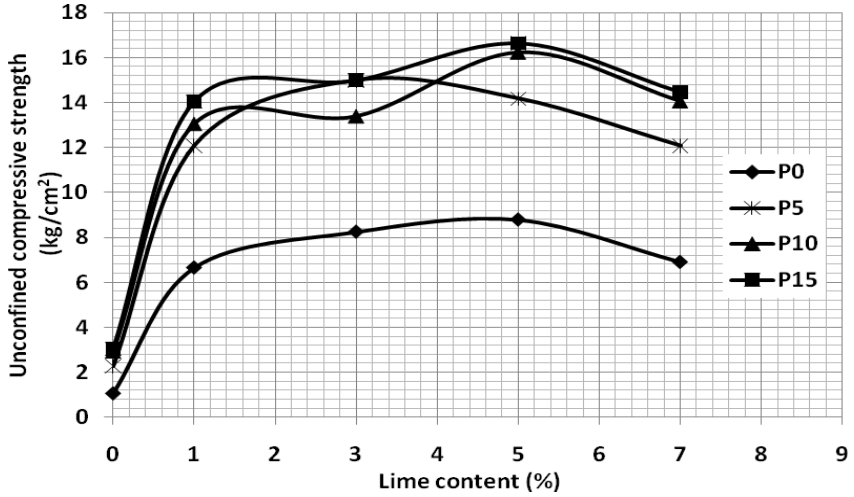
جدول ۴. نتایج مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

نمونه (تیمار)	تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	میانگین
P0L0	۱/۰۵	۰/۹۸	۱/۱۸	۱/۰۷
P0L1	۵/۸۳	۶/۳۷	۷/۷۶	۶/۶۵
P0L3	۸/۵۲	۷/۴۱	۸/۸۰	۸/۲۴
P0L5	۸/۶۱	۹/۹۳	۷/۸۰	۷/۷۸
P0L7	۶/۷۲	۶/۶۷	۷/۳۰	۶/۹۰
P5L0	۲/۳۲	۲/۰۲	۲/۴۵	۲/۲۸
P5L1	۱۲/۲۵	۱۱/۶۸	۱۲/۳۰	۱۲/۰۸
P5L3	۱۵/۳۰	۱۶/۷۴	۱۲/۹۱	۱۴/۹۸
P5L5	۱۳/۱۴	۱۴/۱۶	۱۵/۲۲	۱۴/۱۷
P5L7	۱۲/۵۶	۱۲/۷۹	۱۰/۸۱	۱۲/۰۷
P10L0	۳/۱۰	۲/۹۰	۲/۷۵	۲/۹۲
P10L1	۱۳/۵۶	۱۲/۴۷	۱۲/۸۵	۱۳/۰۴
P10L3	۱۳/۰۱	۱۵/۱۰	۱۲/۰۴	۱۳/۳۸
P10L5	۱۴/۹۴	۱۶/۶۲	۱۷/۱۱	۱۶/۲۲
P10L7	۱۴/۸۱	۱۳/۰۲	۱۴/۳۳	۱۴/۰۵
P15L0	۳/۲۱	۳/۰۴	۲/۹۰	۳/۰۵
P15L1	۱۴/۲۵	۱۳/۸۴	۱۴/۰۵	۱۴/۰۵
P15L3	۱۳/۴۵	۱۵/۶۲	۱۵/۸۹	۱۴/۹۹
P15L5	۱۷/۸۳	۱۵/۴۵	۱۶/۶۰	۱۶/۶۴
P15L7	۱۵/۰۰	۱۳/۹۲	۱۴/۵۰	۱۴/۴۶

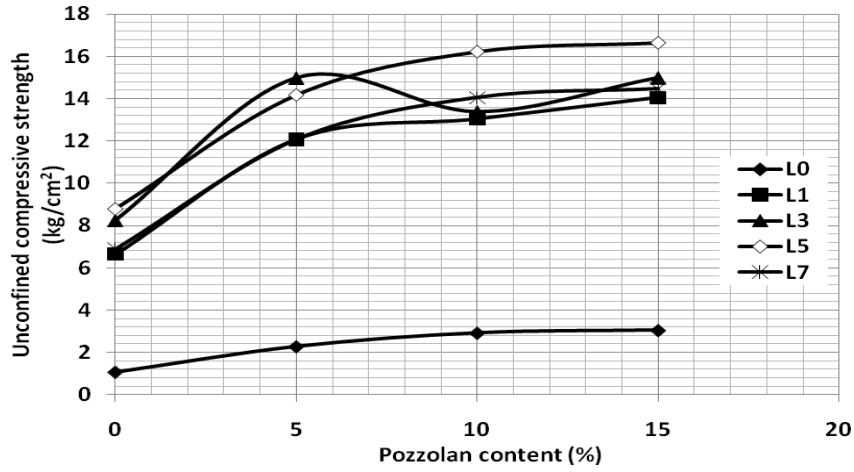
زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز افزایش یافته است. در نمونه‌های دارای آهک و پوزولان، افزایش مقاومت فشاری بیشتر از نمونه‌هائی است که فقط دارای آهک و یا فقط دارای پوزولان می‌باشند. هم‌چنین نرخ افزایش مقاومت فشاری تا ۱۴ روز بسیار چشمگیر بوده و پس از ۱۴ روز، روند افزایش مقاومت کند و حتی در بعضی از موارد روند افزایشی متوقف شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]



شکل۶. تأثیر مقدار آهک روی مقاومت فشاری برای ۲۸ روز عمل‌آوری



شکل۷. تأثیر مقدار پوزولان روی مقاومت فشاری برای ۲۸ روز عمل‌آوری

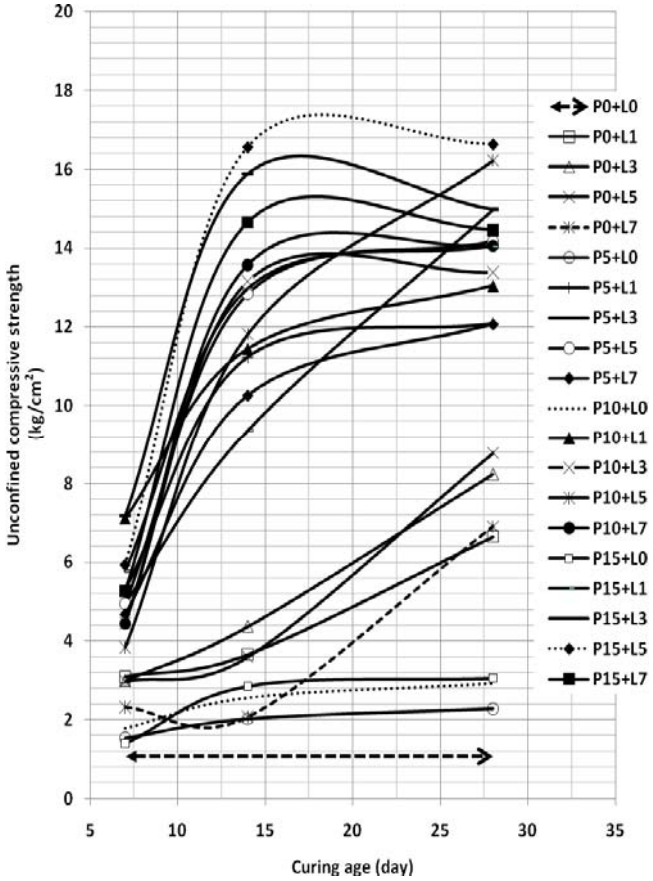
به منظور مقایسه بهتر و جامع تر تأثیر آهک و پوزولان، زمان عمل‌آوری و اثر متقابل آنها در مقاومت فشاری نمونه، تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده های به دست آمده با استفاده از نرم افزار آماری SPSS انجام گرفت که نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

همان‌گونه که از جدول ۵ قابل ملاحظه است، از نظرآماری بین تکرارها، درسطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. بنابراین به احتمال ۹۹ درصد، بین تکرارها تفاوتی وجود ندارد. اما بین مقادیرمقاومت‌های فشاری نمونه‌های مختلف از نظر مقدار آهک و پوزولان و زمان عمل‌آوری، تفاوت معنی‌داری وجود دارد. بنابراین از نظر آماری تأثیر ماده افزودنی و زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت فشاری خاک با احتمال ۹۹ درصد کاملاً معنی‌دار است.

هم‌چنین مقایسه میانگین تیمارها مطابق جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه گردیده‌اند. براساس جداول مذکور ملاحظه می‌گردد که اثر عوامل مختلف آهک، پوزولان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]



شکل ۸. تأثیر زمان عمل‌آوری روی مقاومت فشاری

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر پوزولان، آهک و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تک محوری

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات مقاومت فشاری
تکرار	۲	۰/۷۹۹^{ns}
پوزولان	۳	۳۱۹/۴۷۱**
آهک	۴	۳۸۹/۷۹۹**
زمان	۲	۶۷۱/۲۱۰**
پوزولان × آهک	۱۲	۱۳/۴۵۷**
پوزولان × زمان	۶	۳۵/۰۶۵**
آهک × زمان	۸	۳۵/۹۰۷**
پوزولان × آهک × زمان	۲۴	۳/۷۸۴**
خطای کل	۱۱۸	۰/۶۷۱^{ns}
میانگین کل (kg/cm^2)	۱۷۹	۷/۸۰۳
ضریب تغییرات (٪)		۱۰/۵

**: اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد ^{ns}: غیر معنی‌دار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

جدول ۶. تأثیر مقدار پوزولان بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها

تیمار مورد بررسی (مقدار پوزولان)	تعداد نمونه	زیر گروه‌ها			
		۱	۲	۳	۴
۰	۴۵	۳/۹۶			
۵	۴۵		۸/۲۰		
۱۰	۴۵			۸/۹۴	
۱۵	۴۵				۱۰/۰۶

جدول ۷. تأثیر مقدار آهک بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها

تیمار مورد بررسی (مقدار آهک)	تعداد نمونه	زیر گروه ها		
		۱	۲	۳
۰	۳۶	۱/۹۷		
۷	۳۶		۸/۷۲	
۱	۳۶		۸/۸۶	
۳	۳۶			۹/۵۳
۵	۳۶			۹/۸۸

جدول ۸. تأثیر زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها

تیمار مورد بررسی (زمان)	تعداد نمونه	زیر گروه ها		
		۱	۲	۳
۷	۶۰	۴/۰۵		
۱۴	۶۰		۸/۸۳	
۲۸	۶۰			۱۰/۵۰

فشاری خاک معنی‌دار است و اثر متقابل بین این عوامل وجود دارد. جدول ۶ نشان می‌دهد که در زمان‌های عمل‌آوری مختلف با افزایش پوزولان، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و نمونه‌های با پوزولان ۱۵ درصد، بیشترین مقدار مقاومت را دارند که این مقدار به‌عنوان مقدار پوزولان مناسب محسوب می‌شود.

هم‌چنین جدول ۶ بیانگر این مطلب است که با افزایش ۵ درصد پوزولان، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها از kg/cm^2 ۳/۹۶ به kg/cm^2 ۸/۱۹ (بیش از ۲ برابر) افزایش یافته است و با افزایش پوزولان بیش از ۵ درصد، روند افزایشی مقاومت کندتر می‌شود. جدول ۷ نیز نشان می‌دهد که تغییرات درصد آهک، مقدار مقاومت فشاری را در ۳ سطح تغییر می‌دهد که نمونه‌های بدون آهک، کمترین و نمونه‌های با آهک ۳ و ۵ درصد، بیشترین مقاومت فشاری را دارند که با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، مقدار آهک ۳ درصد مقدار بهینه محسوب می‌شود. نکته قابل توجه در جدول ۷ این است که افزایش تنها ۱ درصد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

آهک، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها را از ۱/۹۷ به ۸/۸۶ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع افزایش داده است. پس از این مقدار، تأثیر افزایش آهک در افزایش میانگین مقاومت فشاری از شدت کمتری برخوردار است. هم‌چنین جدول ۸ تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. بر این اساس، مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته و در زمان ۲۸ روز، بیشترین مقدار به‌دست آمده است. این مسأله موید این مطلب است که واکنش‌های پوزولانی با گذشت زمان بیشتر شده و باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد.

نتیجه‌گیری

براساس مجموعه بررسی‌ها و آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر قابل استنتاج و بیان می‌باشند:

۱. افزودن آهک و پوزولان به تنهایی و به‌صورت توأم به خاک ماسه سیلتی، باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم می‌گردد.
۲. افزودن هرکدام از افزودنی‌های آهک و پوزولان به خاک ماسه سیلتی، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد در حالی‌که استفاده توام از آهک و پوزولان، موجب افزایش چشمگیری حتی تا ۱۶ برابر مقاومت خاک طبیعی می‌شود.
۳. زمان عمل‌آوری نقش بسزایی در افزایش مقاومت فشاری خاک ماسه سیلتی تثبیت شده باآهک و پوزولان دارد. اما در نمونه‌های فقط دارای پوزولان، زمان عمل‌آوری تأثیر چندانی بر تغییر مقاومت فشاری خاک ندارد.
۴. با انجام آزمایش تک محوری مشخص شد که پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری، بیشترین مقدار مقاومت فشاری به‌ترتیب در مقادیر آهک ۱، ۳ و ۵ درصد به همراه ۱۵ درصد پوزولان به‌دست می‌آید که این مطلب موید این است که واکنش‌های پوزولانی آهک زمانبر بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار آهک بیشتری در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌نماید.
۵. براساس تحلیل‌های آماری انجام شده روی مقاومت فشاری تیمارهای مختلف، ترکیب ۳ درصد آهک و ۱۵ درصد پوزولان به‌عنوان ترکیب بهینه برای تثبیت خاک ماسه سیلتی منطقه جندق گرمسار تعیین گردید.

منابع مورد استفاده

۱. رحیمی، ح. ۱۳۷۹. مسائل احداث کانال‌های آبیاری در خاک‌های نامتعارف. مجموعه مقالات کارگاه فنی ساخت کانال‌های آبیاری، محدودیت‌ها و راه حل‌ها. نشریه شماره ۳۹. کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی. صفحه ۱۲۸ الی ۱۶۴

۲. رحیمی، ح و ن. عباسی.۱۳۸۱. تخریب پوشش کانال‌ها در خاک‌های ماسه‌ای مطالعه موردی شبکه آبیاری ساوه. مجله علوم کشاورزی ۳۳(۴):۶۷۱ – ۶۸۲.

۳. رمضانیانپور، ع.، ط. پرهیزکار و ا. طاهری.۱۳۷۶. مواد افزودنی و پوزولانی و کاربرد آن در بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۴۱.

۴. عباسی، ن.، ع. فاخر و ح. رحیمی.۱۳۸۶. تعیین ضریب فشردگی خاک‌های رسی نرم با استفاده از مشخصات فیزیکی آنها "مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ۱۴(۱):۳۵-۲۶.

۵. عباسی، ن.، ر. بهراملو و م. موحدان .۱۳۸۷. بررسی وضعیت موجود و مسائل فرآروی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی ایران " دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، ۸ الی ۱۰ بهمن.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]

۶. عبدی، م. و ف. چرخیاری. ۱۳۸۸. بررسی استفاده از سرباره فولادسازی جهت افزایش مقاومت خاک‌های ریزدانه، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱- ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز.

۷. عبدی، م. و ح. خیاط بهارلویی. ۱۳۸۹. مطالعه اثرات استفاده توام آهک و الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی کائولینیت"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۸. کبیر، ا. و م. هـ. داودی. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر درصد آهک روی مقاومت فشاری تک محوری خاک CL-ML حاوی کلرید سدیم، دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، کرج صفحه۱۲۵ الی ۱۳۵.

9. Basha, E., R. Hashim, B. Mahmud and A.S. Muntohar. 2005. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. Construc. and Buil. Mater. 19 :448-453.
10. Chen, L. and D. Lin. 2009. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. J. Hazardous Mater. 162: 321-327.
11. Lin, D., K. Lin, M. Hung and H. Luo. 2007. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. J. Hazardous Mater. 145: 58-64.
12. Mohamedzein, Y.E.A., M.Y. Al-Aghbari and R.A. Taha. 2006. Stabilization of desert sands using municipal solid waste incinerator ash. Geotech. and Geol. Eng. 24: 1767-1780.
13. Sakr, M.A., M.A. Shahin and Y.M. Metwally. 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. GEGE. 27 :105-113.
14. Zhang, Ji-ru and C. Xing. 2002. Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Edu. 17(4) :73-77

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.20.9]