

بررسی تاثیر اندازه ذرات ماسه بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک بهسازی شده با آهک

قاسم کعب عمیر^۱، امیر ناصرین^{۲*}، مهدی دریائی^۳، محمدرضا انصاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹

چکیده

استفاده از مواد افزودنی موجب بهبود خصوصیات مکانیکی خاکهای مورد استفاده در پروژه های عمرانی مانند احداث کانال های آبیاری می شود. در این میان، در سالیان اخیر، موادی مانند ماسه علاوه بر افزایش مقاومت خاک، با طبیعت سازگار می باشند. از این رو استفاده از ماسه در ساخت شبکه های آبیاری گسترش یافته است. در تحقیق حاضر تاثیر اندازه و مقدار ماسه بر خصوصیات مقاومتی خاک های تثبیت شده با آهک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا خاک مورد نظر برای تعیین نسبت بهینه آهک با درصدهای مختلفی از آهک مخلوط شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. نسبت بهینه آهک به منظور ایجاد بیشترین مقاومت فشاری برابر ۷ درصد تعیین شد. سپس با سه اندازه ماسه درشت ($D_{50} = 0.4mm$)، متوسط ($D_{50} = 0.45mm$) و ریز ($D_{50} = 0.22mm$) با سه مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و افزودن به مخلوط خاک-آهک در مجموع ۱۰ تیمار آزمایشی تهیه شده که در سه تکرار برای سه دوره ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که افزودن ماسه درشت به میزان ۵ درصد به مخلوط خاک-آهک باعث افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به میزان متوسط به ترتیب برابر ۱۳ درصد و ۱۶ درصد برای ۳ دوره نگهداری می شود. همچنین، افزودن ماسه های ریز و متوسط منجر به کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته مخلوط خاک-آهک می شود.

واژه های کلیدی: خاک رسی، آهک، ماسه، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته

مقدمه

این رو تثبیت آنها به منظور کاهش هزینه های اجرایی در مرحله ساخت و هزینه های بهره برداری و نگهداری پس از ساخت به عنوان راهکاری مناسب برای جلوگیری از مشکلات احتمالی تبدیل شده است.

خاک های نرم و ریزدانه به ویژه خاک های رسی در حالت خشک مقاومت نسبتا بالایی دارند. ولی در صورت تماس با آب و اشباع شدن، مقاومت آنها به شدت کاهش یافته و تقریبا برابر صفر می گردد. این امر در بستر سازه های آبی به دلیل اینکه دائم در ارتباط با آب هستند مشکلات زیادی را باعث می شود. بنابراین در سازه های آبی در صورتی که خاک رسی بستر با مواد افزودنی مناسب تثبیت نشود ممکن است مشکلات متعددی در مراحل مختلف ساخت و بهره برداری بروز نماید و حتی منجر به تخریب کامل سازه و شکست پروژه گردد (نوروزیان و همکاران، ۱۳۹۳).

بهسازی یا تثبیت خاک، یک اصطلاح کلی است که به هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی یا ترکیبی از آنها که جهت بهبود خواص خاک به کار می رود، اطلاق می شود. بهبود خواص خاک ممکن است

گسترش برنامه های توسعه ای کشور در احداث پروژه های کلان ساختمانی، راه سازی، سد سازی، خطوط انتقال آب و شبکه های آبیاری و زهکشی از یک طرف و در عین حال وفور خاک های نرم و ریزدانه رسی در نقاط مختلف کشور (از جمله خوزستان) از طرف دیگر، باعث شده است که اجرای این برنامه ها بر روی چنین خاک هایی دارای ریسک بالایی باشد. خاک های ریزدانه دارای مقاومت برشی پایین بوده که تحت تاثیر بارهای وارده دچار تغییر شکل بسیار می گردند. از

- ۱- دانش آموخته سازه های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
 - ۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
 - ۳- استادیار گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
 - ۴- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
- * - نویسنده مسئول: (Email: a.naserin@asnrkh.ac.ir)

مقدار ۷ درصد آهک و زمان عمل آوری ۴۵ روزه به عنوان مقادیر بهینه برای بهسازی خاک مورد مطالعه پیشنهاد گردید. دریایی و کاشفی پور (۱۳۸۸) از آهک و ماسه بادی به عنوان مصالح افزودنی به خاک رسی استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که در نسبت اختلاط ۷ درصد آهک و ۱۰ درصد ماسه بادی، ماکزیمم مقاومت محوری حاصل می‌شود.

سکو و همکاران با اضافه کردن مواد مختلفی چون آهک هیدراته، اکسید منیزیم، خاکستر پوسته برنج، خاکستر احتراق ذغال نیروگاه، پلیمر و آلومینات پراکننده به خاک متورم شونده آنها را مورد آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که ۵ درصد خاکستر پوسته برنج به همراه ۴ درصد آهک هیدراته بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک دارد (Seco et al, 2011). روح بخشانی و کلاتنری از پودر ضایعات سنگی برای تثبیت خاک رس به همراه آهک استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان داد که در زمان‌های عمل آوری مختلف، افزودن پودر ضایعات سنگی و آهک به ترتیب تا ۶ و ۷ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری شده و برای درصدهای بیشتر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد (Roohbakhshani and Kalantari., 2016).

پور اکبر و همکاران به منظور بررسی تاثیر استفاده از خاکستر بسیار ریز کف سوخت روغن به صورت جداگانه و در ترکیب با سیمان جهت تثبیت خاک‌های رسی به انجام آزمایشاتی مانند تراکم، حدود آتربرگ و مقاومت فشاری محصور نشده پرداختند. یافته‌های حاصل نشان داد که اصلاح با خاکستر سوخت روغن به صورت جداگانه و در ترکیب با سیمان باعث کاهش قابل توجهی در شاخص خمیری (PI) می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمایشات تراکم نیز نشان داد که استفاده از خاکستر سوخت روغن به صورت جداگانه و در ترکیب با سیمان باعث کاهش رطوبت اپتیمم و افزایش وزن مخصوص حداکثر می‌شود. از دیگر یافته‌های این تحقیق نتایج حاصل از مقاومت فشاری محصور نشده بود که نشان داد استفاده از خاکستر سوخت روغن به صورت جداگانه باعث افزایش جزئی در مقاومت فشاری نمونه‌ها تا زمان عمل آوری ۲۸ روز می‌شود. در حالی که در ترکیب با سیمان افزایش شدیدی در مقاومت فشاری نمونه‌ها در همان زمان عمل آوری را ایجاد می‌نماید (Pourakbar et al., 2015).

با توجه به تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود که از بین مواد افزودنی استفاده شده، آهک بیشترین میزان استفاده را به خود اختصاص داده است. آهک به علت ارزانی و اقتصادی بودن به عنوان روش نتیجه‌بخشی در افزایش توان باربری و کاهش تغییر شکل‌پذیری و خواص خمیری بسیاری خاک‌ها (بویژه خاک رسی) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مواردی نیز، ممکن است افزودن مواد شیمیایی (آهک) به خاک جهت تثبیت آن به تنهایی

برحسب نیاز به منظور تقویت مشخصه‌ی خاصی نظیر کنترل نشست، افزایش مقاومت فشاری و یا بهبود مقاومت در برابر نیروهای محیطی صورت گیرد (Seco et al, 2011).

روش‌های تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی به منظور اصلاح خاک چندین سال است که به کار گرفته می‌شود. تجربه آزمایشگاهی کاربرد تثبیت‌کننده‌های شیمیایی از حدود سال ۱۹۳۰ آغاز شد. از این افزودنی‌های شیمیایی می‌توان به آهک، سیمان پرتلند، خاکستر بادی، قیر، تقاله کوره ذوب آهن، پوزولان‌ها، میکروسیلیس، پلیمرها و ... اشاره کرد. این مواد افزودنی با ایجاد یکسری واکنش‌های شیمیایی در توده خاک موجب بهسازی آن می‌شوند. (McDowell, 1959). اصغری و همکاران به بررسی اثرات دو نوع مواد افزودنی (آهک و سیمان) بر خواص ژئوتکنیکی و مهندسی یک نوع خاک رسی با پلاستیسیته پایین پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مقدار رطوبت بهینه، حداکثر وزن مخصوص خشک و شاخص خمیری تحت تاثیر اضافه کردن سیمان یا آهک قرار دارد. همچنین نتایج حاصل از مقاومت فشاری محدود نشده نشان داد که تغییر در مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت تاثیر مقدار رطوبت اولیه و زمان عمل‌آوری آن است. به طوری که کاهش مقدار آب اولیه و یا افزایش زمان عمل‌آوری، افزایش مقاومت فشاری محدود نشده را به همراه دارد (Asgari et al., 2015).

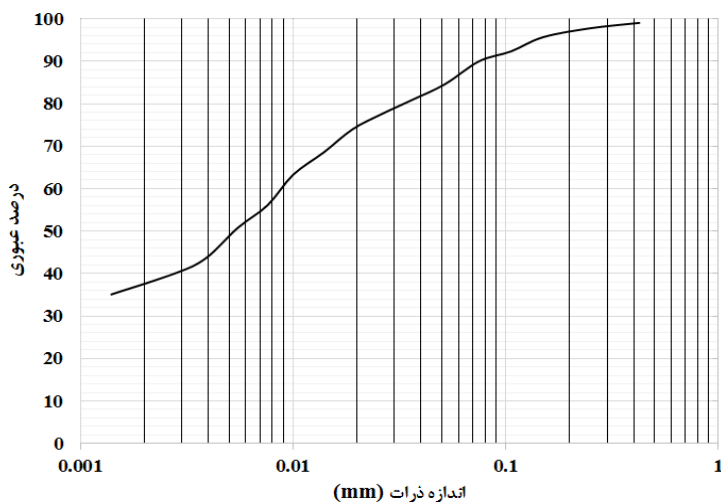
ماویک و همکاران تاثیر افزودن آهک بر روی سیر تکاملی مقاومت دو نوع خاک کائولن و خاک بنتونیت Ca^{2+} را بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که افزودن آهک منجر به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت خاک‌ها شده است. این میزان بهبود در خاک بنتونیت Ca^{2+} سریعتر انجام شد. همچنین اتصال بین جنبه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها نشان داد که این بهبودها به توسعه‌ای از ترکیبات ثانویه مانند کلسیم سیلیکات هیدراته، هیدروگانت و کلسیم هیدراته کربوآلومینات مرتبط است (Maubec et al., 2017).

چن و لین خاکستر سوزانده لجن فاضلاب و سیمان را جهت بهبود مقاومت خاک چسبنده‌ی نرم با پنج نسبت وزنی مختلف ۰، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ درصد به خاک اضافه کردند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های با سیمان و خاکستر لجن فاضلاب تقریباً ۳ تا ۷ برابر بهتر از خاک بدون مواد افزودنی بهبود یافته است (Chen and Lin., 2009). قبادی و همکاران (۱۳۹۱) خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه منطقه جنوب غرب همدان را با به کارگیری نسبت‌های وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد از آهک و دوره‌های عمل آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که خاصیت خمیری خاک پس از گذشت ۷ روز از افزودن آهک از بین رفته و به خاک غیرخمیری تبدیل شده است. همچنین رطوبت بهینه و مقاومت فشاری تک محوری افزایش و حداکثر وزن واحد حجم خشک کاهش یافت. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده

تثبیت شده با آهک، تغییرات ایجاد شده در مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

خاک رسی استفاده شده در این تحقیق مربوط به یکی از منابع قرصه موجود در استان خوزستان به نام سویسه، واقع در مسیر اهواز-آبادان می‌باشد. منحنی دانه‌بندی، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این خاک به ترتیب مطابق شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک

مقاومت فشاری به میزان ۷ درصد تعیین شد. جهت تهیه نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق در مجموع ۱۰ ترکیب مختلف که عبارتند از خاک-آهک به عنوان شاهد و ۹ ترکیب از خاک-آهک-ماسه بادی با سه اندازه مختلف از ماسه (مطابق جدول (۲)) و سه مقدار مختلف از ماسه‌ها (۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) تهیه گردید. برای ساخت نمونه‌ها قالبی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۵ سانتی‌متر مطابق استانداردهای موجود به همراه چکشی برای متراکم کردن نمونه درون قالب طراحی و ساخته شد (Bowles., 1992).

مطابق استاندارد برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌ها باید بر اساس رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم ساخته شوند. لذا برای تمام نسبت‌های اختلاط استفاده شده، آزمایش تراکم با توجه به استاندارد ASTM D 698 در سه تکرار انجام شد. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم و استفاده از رابطه وزن واحد حجم و داشتن حجم قالب، مقدار خاک با نسبت‌های مختلف از مواد افزودنی مورد نیاز برای ریختن درون قالب محاسبه گردید. پس از آن با توجه به حجم محاسبه شده، رطوبت بهینه به مخلوط اضافه و در

جوابگوی نیازهای پروژه موردنظر نباشد (نیازی چون مقاومت فشاری) و مقاومت بیشتری مورد نیاز باشد. علاوه بر آهک در بسیاری از کارهای اجرایی جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، از مصالح شن و ماسه‌ای، به دلیل وفور آن‌ها به عنوان مواد افزودنی به همراه آهک استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تهیه و حمل ماسه به محل پروژه هزینه‌بر می‌باشد، لذا تعیین مقدار دقیق آن اهمیت زیادی دارد. همچنین، از آنجایی که اندازه ذرات ماسه بر میزان مقاومت خاک مؤثر است، بنابراین بررسی مقدار دقیق ماسه مورد استفاده و اندازه آن می‌تواند موجب بهبود استفاده از این ماده افزودنی شود. به این جهت در تحقیق حاضر با اضافه کردن سه اندازه مختلف ماسه به خاک

ماسه‌های استفاده شده به عنوان مواد افزودنی در این تحقیق به اندازه‌های مورد نظر با استفاده از سری الک‌ها به صورت مکانیکی در سه اندازه متفاوت (ریز، متوسط و درشت) مطابق جدول (۲) تجزیه شد. با توجه به ضرایب یکنواختی ماسه‌های مورد استفاده به صورت یکنواخت می‌باشند.

آهک استفاده شده، از نوع هیدراته موجود در بازار است. برای اطمینان از یکنواختی اندازه ذرات آهک و در نتیجه یکنواختی توزیع آن در خاک، قبل از اضافه شدن از الک شماره ۴۰ عبور داده شد.

تهیه نمونه و انجام آزمایش مقاومت فشاری

همان‌طور که عنوان شد هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با آهک بر اثر افزودن مقادیر مختلفی از ماسه با اندازه‌های متفاوت می‌باشد. لذا قبل از افزودن ماسه‌ها به خاک، خاک موردنظر با درصد بهینه‌ای از آهک برای رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری، مخلوط شد. این نسبت بهینه با اختلاط درصدهای مختلفی از آهک با خاک و انجام آزمایش‌های



شکل ۴- متراکم کردن نمونه درون قالب با سرعت ۱/۵ میلیمتر بر دقیقه

پس از آماده سازی نمونه ها، بایستی تا گذشت دوره های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، رطوبت آن ها حفظ شود. بدین منظور نمونه ها درون پلاستیک قرار داده شد و پلاستیک ها به دلیل ظرفیت گرمایی بالای آب در مقابل دما، درون آب و در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. به دلیل ظرفیت گرمایی بالای آب، تغییرات دمای محسوسی در طول دوره نگهداری برای نمونه ها رخ نداد.

پس از گذشت دوره، نمونه ها مطابق استاندارد ASTM D 2166-85 مورد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند. نحوه انجام آزمایش به این صورت بود که نمونه باید به صورت کاملاً قائم در دستگاه قرار داده شده و رینگ بالای نمونه، در حالت تماس بر آن قرار گیرد. سپس، گیج های تغییر طول محوری و بار قائم روی صفر تنظیم شدند. قرائت بار و تغییر طول همزمان صورت می گرفت. زمان قرائت گیج ها بر حسب تغییر طول محوری تنظیم شد. کوچکترین تقسیم بندی گیج مورد استفاده برابر ۰/۰۱ میلی متر بود. قرائت بار برای تغییر طول های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ صدم میلیمتر انجام شد. قرائت ها تا زمانی ادامه یافت که قرائت بار قائم ثابت شده یا به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش یابد. در این تحقیق از هر نسبت اختلاط و برای هر دوره زمانی، جهت کاهش خطای اندازه گیری سه نمونه تهیه و تحت بارگذاری قرار گرفت. سپس میانگین مقاومت محوری حاصل از این سه نمونه به عنوان مقاومت محوری در آن نسبت اختلاط در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به نمودار تنش- کرنش حاصل از هر نسبت اختلاط، مدول الاستیسیته با استفاده از روش وتر برای آن نسبت تعیین شد. این روش عبارت است از تقسیم تنش به کرنش متناظر آن روی نمودار تنش-کرنش. در تحقیق حاضر پس از رسم نمودار تنش-کرنش برای نمونه ها، تنش در نزدیکی لحظه شکست تقسیم بر کرنش متناظر آن به عنوان مدول الاستیسیته برای هر نمونه در نظر گرفته شد.

سه لایه با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری و با سرعت ۱/۵ میلی متر بر دقیقه مطابق شکل (۴) متراکم شدند (Estabragh et al., 2015).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک

مقدار	خصوصیت
۳۸	درصد رس
۱۱	درصد ماسه
۵۱	درصد لای
۳۱/۳	(LL) حد روانی
۲۰/۴۸	(PL) حد خمیری
۱۶/۶	(w _p) حد انقباض
۱۰/۸۲	(PI) نشانه خمیری
CL	(USCS) رده بندی در سیستم متحد
A-6	(AASHTO) رده بندی در سیستم آشتو
۹	(GI) نشانه گروه
۱/۷۳۵	(g/cm ³) جرم واحد حجم خشک ماکزیمم
۱۸	درصد رطوبت بهینه
۰/۳۵	(kg/cm ²) مقاومت فشاری
۸/۷	(Kg/cm ²) مدول الاستیسیته
قهوه ای	رنگ

جدول ۲- خصوصیات ماسه های استفاده شده

اندازه ماسه	اندازه متوسط (mm)	ضریب یکنواختی
ماسه ریز	D ₅₀ = 0.22mm	۱/۴۱
ماسه متوسط	D ₅₀ = 0.45mm	۱/۴۵
ماسه درشت	D ₅₀ = 1.40mm	۱/۶۰



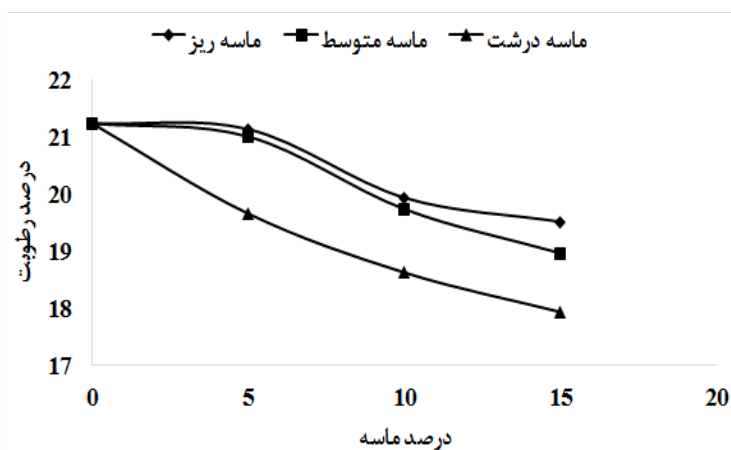
شکل ۳- تهیه نسبت های اختلاط مختلف به صورت خشک

نتایج و بحث

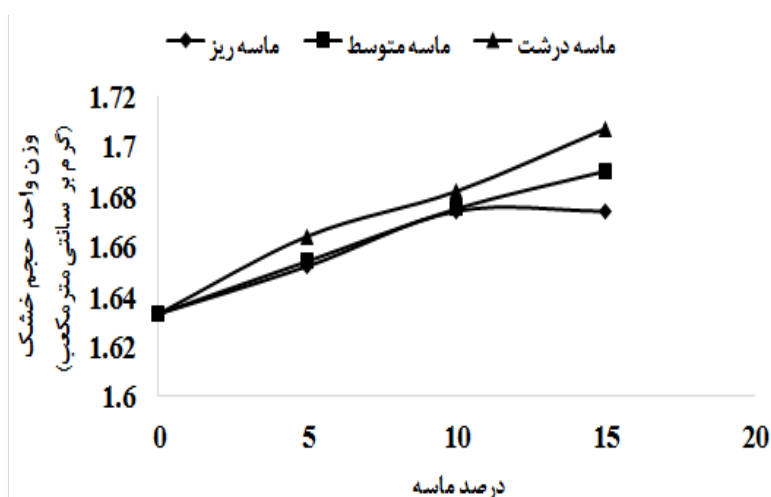
نتایج آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش تراکم در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش درصد‌های موردنظر از سه اندازه ماسه نسبت به نمونه شاهد خاک‌آهک، رطوبت بهینه آن کاهش می‌یابد. دلیل این امر عدم تمایل جذب آب توسط ماسه بر خلاف آهک و خاک رس است که در ماسه‌های درشت به دلیل به تراکم رسیدن در رطوبت کمتر بیشتر نمایان شده است. این میزان کاهش رطوبت در دو نوع ماسه ریز و متوسط تا مقادیر ۱۰ درصد ماسه تقریباً نزدیک به هم بوده و تا مقادیر ۱۵ درصد این تغییرات بیشتر شده است. به طوری که با افزایش ۱۵ درصدی ماسه ریز و متوسط به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد کاهش در رطوبت اپتیمم صورت گرفت. در حالی که این میزان تغییرات برای

ماسه درشت با شیب بیشتری انجام شده و با افزایش ۱۵ درصدی آن، به میزان ۱۵ درصد کاهش در رطوبت اپتیمم ایجاد شد. همچنین با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود روند تغییرات وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک در مقابل افزایش مقادیر مختلف ماسه، برای سه اندازه مختلف به صورت افزایشی است. با این تفاوت که میزان این تغییرات برای دو ماسه ریز و متوسط تا مقادیر ۱۰ درصد تقریباً یکسان بوده و تا ۱۵ درصد متغیر است. حال اینکه این میزان تغییرات برای ماسه‌های درشت نسبت به دو ماسه‌ی دیگر با شیب بیشتر انجام شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که افزایش تا ۱۵ درصد از هر سه نوع ماسه ریز، متوسط و درشت به ترتیب باعث افزایش ۲، ۳ و ۴ درصدی وزن واحد حجم خشک حداکثر نسبت به خاک شاهد شده است.



شکل ۵- روند تغییرات رطوبت بهینه در مقابل افزایش ماسه برای سه اندازه مختلف



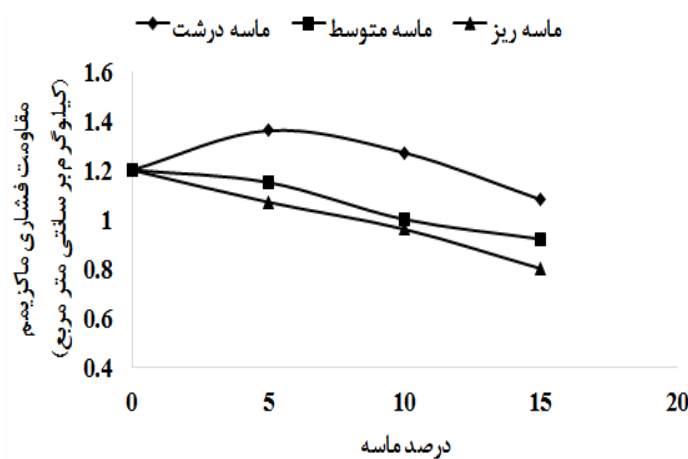
شکل ۶- روند تغییرات وزن واحد حجم خشک حداکثر در مقابل افزایش ماسه برای سه اندازه مختلف

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

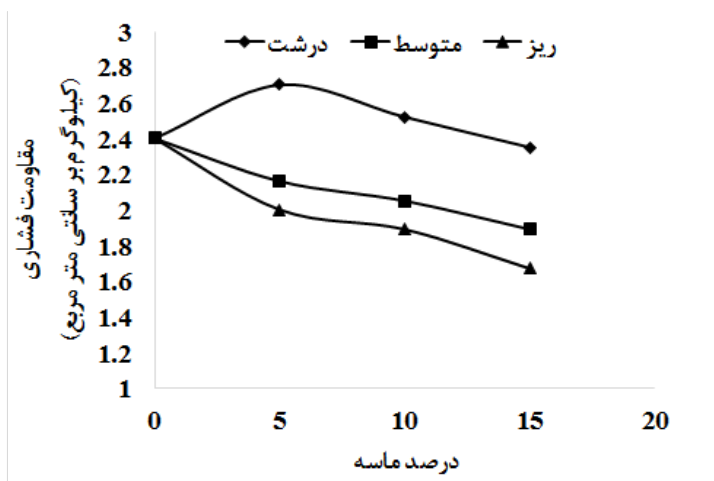
آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی ۹۰ نمونه آماده شده برای سه دوره ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شد. چگونگی تغییرات مقاومت فشاری به صورت نمودارهایی در شکل‌های (۷) تا (۹) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقاومت ۷ روزهی مخلوط خاک-آهک ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. به عبارت دیگر افزودن آهک به میزان ۷ درصد به خاک برای دوره ۷ روزه به میزان ۲۴۲ درصد مقاومت فشاری خاک را افزایش داده است. دلیل افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با آهک به علت ترکیب دوغاب آهک با کانی‌های رسی و تشکیل سیلیکات و آلومینات کلسیم است که سبب چسباندن دانه‌های خاک به یکدیگر می‌شود. این پدیده را واکنش پوزولانی می‌نامند. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن مقادیر مختلفی از ماسه درشت، به صورت افزایشی-کاهشی و برای ماسه‌های ریز و متوسط به صورت کاملاً کاهشی تغییر کرده است. به عنوان مثال برای نمونه‌های ۷ روزه با افزودن ۵ درصد ماسه درشت، ماکزیمم مقاومت فشاری با مقدار تقریبی ۱۴ درصد افزایش به ۱/۳۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر رسیده است. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توجیه نمود که ذرات درشت دانه به دلیل گوشه‌دار بودن دارای اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به ذرات ریزدانه هستند. لذا به کار بردن ذرات ماسه درشت‌تر تا درصد مشخصی به همراه چسبندگی ایجاد شده توسط آهک باعث افزایش مقاومت می‌شود. در صورتی که اگر درصد افزایش از یک میزان مشخصی بیشتر شود، به دلیل جایگزینی خاک رس با ماسه، از چسبندگی مخلوط حاصل کم می‌شود. لذا همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ماسه درشت از ۵

تا ۱۵ درصد به میزان تقریبی ۲۱ درصد از مقاومت نمونه کاسته می‌شود. همچنین دلیل کاهش مقاومت برای ماسه‌های ریز و متوسط از همان ابتدای افزایش درصد ماسه را می‌توان به افزایش نسبت حجمی ماسه‌ها در درصد‌های کمتر و در نتیجه پخش بیشتر آن‌ها در نمونه نسبت به ماسه‌های درشت و جایگزینی بیشتر آن‌ها به جای خاک رس دانست. بدین صورت که با افزایش ماسه‌های ریز و متوسط تا ۱۵ درصد در نمونه‌ها، به ترتیب مقاومت نسبت به نمونه شاهد به میزان ۳۴ و ۲۴ درصد کاهش یافت. شکل‌های (۸) و (۹) نیز دارای روندی مشابه شکل (۷) بوده که با استدلال مشابه قابل توجیه می‌باشد. نتایج آنها به صورت کمی در جدول (۳) ارائه شده است.

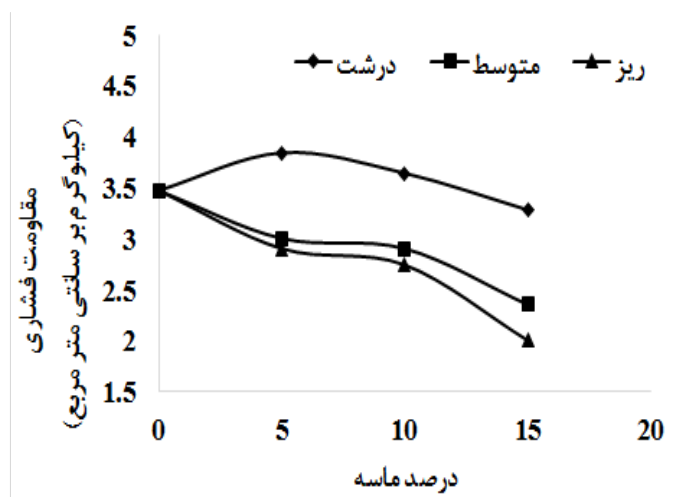
در جدول (۳) درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای افزایش درصد ماسه نسبت به حالت قبل برای دوره‌های نگهداری مختلف ارائه شده است. اعداد مثبت در این جدول به منزله افزایش مقاومت و اعداد منفی به منزله کاهش مقاومت می‌باشند. به عنوان مثال برای دوره نگهداری ۱۴ روزه افزایش ماسه با اندازه متوسط تا ۱۵ درصد منجر به کاهش مقاومت به میزان ۸ درصد نسبت به حالتی است که نمونه شامل ۱۰ درصد ماسه با اندازه متوسط می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام دوره‌های نگهداری افزودن ماسه درشت تا ۵ درصد به نمونه خاک-آهک منجر به افزایش مقاومت فشاری آن و در سایر حالات مقاومت کاهش یافته است. لازم به ذکر است مقاومت موردنظر برای طراحی، مقاومت ۲۸ روزه بوده که مشاهده می‌شود با افزودن ماسه درشت تا ۵ درصد می‌توان مقاومت مخلوط خاک-آهک را به میزان تقریبی ۱۱ درصد افزایش داده و به مقدار ۳/۸۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رساند.



شکل ۷- تغییرات مقاومت محوری به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه اندازه ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۷ روزه



شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه اندازه ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۱۴ روزه



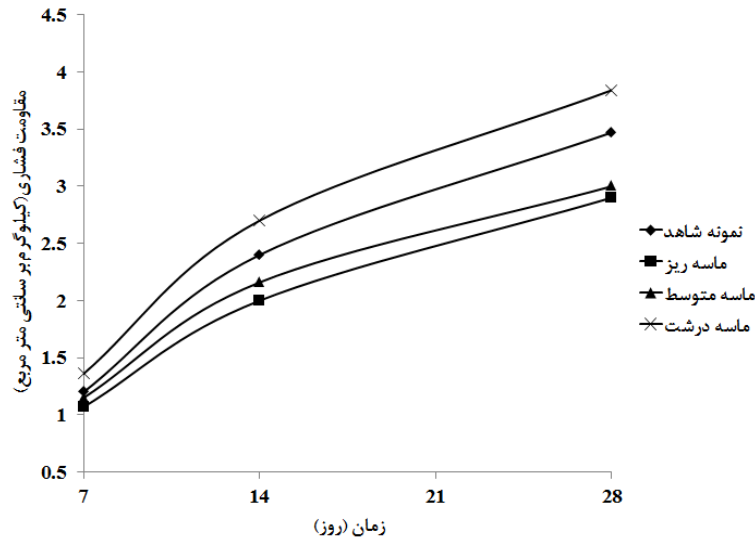
شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه اندازه ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۲۸ روزه

جدول ۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای افزایش درصد ماسه نسبت به حالت قبل برای دوره‌های نگهداری مختلف

دوره نگهداری			۷ روزه			۱۴ روزه			۲۸ روزه		
درصد ماسه			۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵
ماسه درشت			+۱۴	-۷	-۱۵	+۱۳	-۷	-۷	+۱۱	-۵	-۱۰
ماسه متوسط			-۴	-۱۷	-۴	-۱۰	-۵	-۸	-۱۴	-۴	-۱۹
ماسه ریز			-۱۱	-۱۰	-۱۷	-۱۷	-۶	-۱۲	-۱۶	-۶	-۳

جدول (۴) تمامی درصدهای افزایش مقاومت فشاری تا ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد ارائه شده است. همانطور که عنوان شد دلیل افزایش مقاومت فشاری خاک بهسازی شده با آهک انجام واکنش پیوزولانی بوده که تابع زمان می‌باشد. بدین معنی که با گذشت زمان به دلیل انجام این واکنش مقاومت افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۰) به منظور بررسی تاثیر زمان نگهداری بر تغییرات مقاومت فشاری، یک نمودار برای بررسی افزایش ۵ درصد ماسه با اندازه‌های مختلف رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان نگهداری در تمامی حالات اندازه ماسه، میزان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال برای ماسه درشت پس از ۲۸ روز میزان مقاومت فشاری به اندازه ۱۸۲ درصد اضافه شده است. در



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری بر حسب روز برای افزایش ماسه درشت تا ۵ درصد

جدول ۴- درصد افزایش مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد

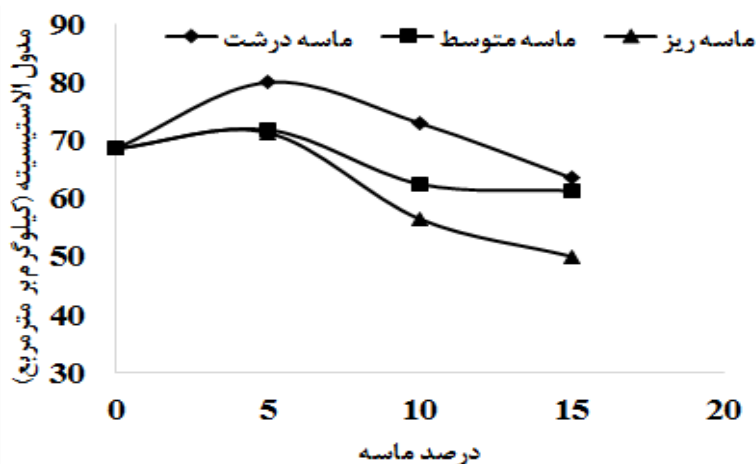
درصد ماسه			
۵	۱۰	۱۵	
۱۸۹	۱۸۹	۱۸۹	شاهد
۱۷۱	۱۸۵	۱۵۰	ماسه ریز
۱۶۱	۱۹۰	۱۵۵	ماسه متوسط
۱۸۲	۱۸۶	۲۰۳	ماسه درشت

است، اما همانطور که عنوان شد مبنای محاسبات طراحی، نتایج حاصل از نمونه‌های با دوره نگهداری ۲۸ روزه بوده که مشاهده می‌شود در این دوره نگهداری برای ماسه‌های متوسط و ریز کاهش در مدول الاستیسیته اتفاق افتاده است. در جدول (۵) تغییرات مدول الاستیسیته برای مقادیر و اندازه‌های مختلف ماسه ارائه شده است. بالاترین مدول الاستیسیته مربوط به نمونه ۲۸ روزه با افزودن ۵ درصد ماسه درشت و به میزان ۲۴۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع حاصل گردید که نسبت به حالت بدون ماسه به میزان ۱۹ درصد افزایش یافته است.

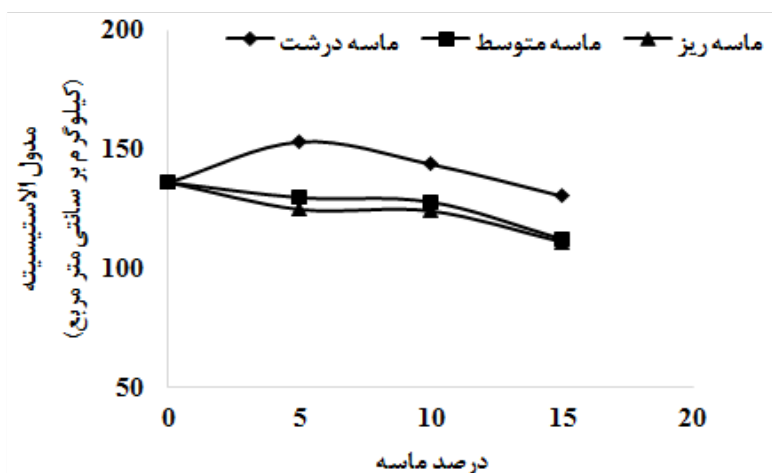
همانطور که عنوان شد در تحقیق حاضر علاوه بر مقاومت فشاری ماکزیمم، پارامتر مدول الاستیسیته به روش وتری نیز تعیین شد. از جمله کاربردهای مهم این پارامتر استفاده در محاسبه نشست الاستیک (آنی) می‌باشد. همانطور که در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مشاهده می‌شود مدول الاستیسیته نیز همانند مقاومت محوری تنها برای ۵ درصد ماسه درشت در تمامی دوره‌های نگهداری افزایش یافته است. هر چند در نمونه‌های ۷ روزه برای ماسه‌های ریز و متوسط نیز تا افزایش ۵ درصد ماسه اندکی افزایش در مدول الاستیسیته رخ داده

جدول ۵- تغییرات مدول الاستیسیته نمونه‌ها به ازای افزایش درصد ماسه نسبت به حالت قبل برای دوره‌های نگهداری مختلف

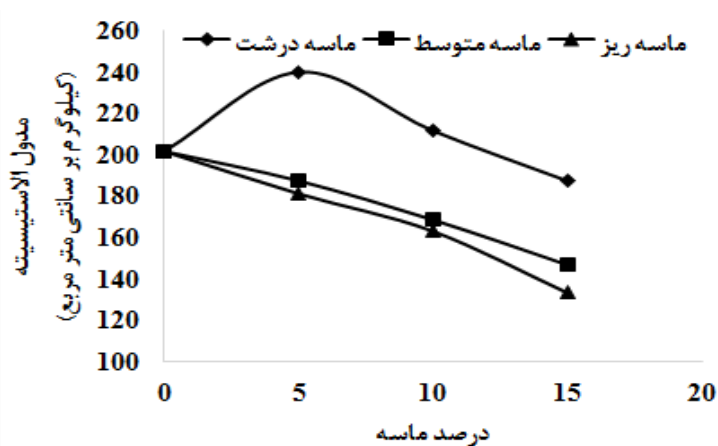
دوره نگهداری			۷ روزه			۱۴ روزه			۲۸ روزه		
درصد ماسه			۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵
ماسه درشت			+۱۹	-۱۲	-۱۱	+۱۳	-۶	-۹	+۱۷	-۹	-۱۳
ماسه متوسط			-۷	-۱۳	-۱۰	۰	-۸	-۱۱	+۴	-۱۲	-۲
ماسه ریز			-۱۰	-۱۰	-۱۸	-۸	۰	+۴	-۲۱	-۱۲	-۱۲



شکل ۱۱- تغییرات مدول الاستیسیته به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه نوع ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۷ روزه



شکل ۱۲- تغییرات مدول الاستیسیته به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه نوع ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۱۴ روزه



شکل ۱۳- تغییرات مدول الاستیسیته به ازای افزایش مقادیر مختلفی از سه نوع ماسه در درصد ثابت آهک برای نمونه‌های ۲۸ روزه

تحقیقات ممکن است از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت باشند. همچنین دوره نگهداری نمونه‌ها نیز یکسان نمی‌باشد. لذا، تاثیر

به منظور مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با سایر محققین، جدول (۶) ارائه شد. لازم به ذکر است خاک‌های مورد استفاده در این

میزان ۷ درصد در دوره نگهداری ۴۵ روزه، افزایش ۱۰۰۰ درصدی مقاومت محوری را در پی دارد. همچنین، افزودن خاکستر لجن فاضلاب به میزان ۱۵ درصد، در دوره نگهداری ۴۵ روزه منجر به افزایش ۴۹ درصدی مقاومت محوری شده، که مقدار قابل توجهی نمی باشد.

مواد افزودنی یکسان به این خاکها ممکن است نتایج متفاوتی را تولید نماید. نتایج مربوط به مقاومت محوری در این جدول مربوط به بیشترین دوره نگهداری مربوط به آزمایش های هر تحقیق می باشد. به عنوان مثال با توجه به جدول (۶) مشاهده می شود افزودن سیمان به

جدول ۶- مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری در تحقیقات مختلف

محقق	ماده افزودنی	درصد افزودن	دوره نگهداری (روز)	افزایش مقاومت محوری (درصد)
نوروزیان و همکاران (۱۳۹۳)	خاکستر لجن فاضلاب	۱۵	۹۰	۴۹
قبادی و همکاران (۱۳۹۱)	آهک	۷	۴۵	۴۳۳
عسگری و همکاران (۲۰۱۵)	سیمان	۷	۴۵	۱۰۰۰
سکو و همکاران (۲۰۱۱)	آهک هیدراته و پوسته برنج	۴ و ۵	۲۸	۳۲۲
	آهک و ماسه بادی ریز	۷ و ۱۰	۲۸	۱۸۵
تحقیق حاضر	آهک و ماسه بادی متوسط	۷ و ۱۰	۲۸	۱۹۰
	آهک و ماسه بادی درشت	۷ و ۱۵	۲۸	۲۰۳

نتیجه گیری

از مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق، بر اساس آزمایش های انجام شده، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- افزودن هر سه نوع ماسه درشت، متوسط و ریز به مخلوط خاک-آهک باعث کاهش رطوبت اپتیمم شد. به نحوی که بیشترین و کمترین کاهش رطوبت اپتیمم به ترتیب در ماسه های درشت و ریز اتفاق افتاد.

۲- افزودن هر سه نوع ماسه درشت، متوسط و ریز به مخلوط خاک-آهک باعث افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر شد. به نحوی که بیشترین و کمترین افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر به ترتیب در ماسه های درشت و ریز اتفاق افتاد.

۳- با افزودن ماسه درشت به میزان ۵ درصد به مخلوط خاک-آهک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته برای سه دوره ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه افزایش و پس از آن کاهش یافت. بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر ۹ و ۱۱ درصد برای افزودن ماسه درشت تا ۵ درصد تعیین گردید.

۴- با افزایش ماسه ریز و متوسط به مخلوط خاک-آهک، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته کاهشی، برای سه دوره ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه حاصل شد.

۵- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته تمامی نسبت های اختلاط سه نوع ماسه های درشت، متوسط و ریز و مخلوط خاک-آهک با گذشت دوره نگهداری تا ۲۸ روز به صورت افزایشی تغییر می یابد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع

طبیعی خوزستان به دلیل حمایت هایشان تشکر و قدردانی به عمل می آید.

منابع

دریایی، م. و کاشفی پور، م. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاکهای رسی. نشریه آب و خاک. ۲۵: ۲۳۰-۲۳۹.

قبادی، م.ح.، بابازاده، ر. و عبیدی، ی. ۱۳۹۱. بهسازی خصوصیات زمین شناسی مهندسی خاک های ریزدانه منطقه سد اکباتان همدان با استفاده از آهک. یافته های نوین زمین شناسی کاربردی. ۶: ۱۲-۸.

نوروزیان، ک.، عباسی، ن. و عابدی کوپایی، ج. ۱۳۹۳. استفاده از خاکستر لجن فاضلاب برای بهبود خواص مهندسی خاک های رسی در سازه های آبی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۵: ۹۳-۱۰۸.

Asgari, M.R., Baghbanzadeh Dezfuli, A. and Bayat, M., 2015. Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. Arab Journal GeoSciences, pp.1439-1452.

Bowles, J., 1992. Engineering properties of soils and their measurement, McGraw-Hill publication, 4th ed.

Chen, L. and Lin, D.F., 2009. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. Journal of Hazardous Materials 162, pp.321-327.

Estabragh, A.R., Khatibi, M. and Javadi, A.A., 2015. Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol. Journal of Materials in Civil Engineering, pp.1-10.

- cement Transportation Geotechnics. 3, pp.24-35.
- Roohbakhshan, A. and Kalantari, B., 2016. Stabilization of Clayey Soil with Lime and Waste Stone Powder. *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp. 429-438.
- Seco, A., Ramírez, f. Miqueleiz, l. and García, b., 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. *Appl. Clay Sci.* 51, pp.348-352.
- Zhang, Ji-ru. and Xing, c., 2002. Stabilization of expansive soil by lime and fly ash, *Journal. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Edu*, 17(4), Pp.73-77.
- McDowell, C., 1959. Stabilization of Soils with Lime, Lime-Flyash, and Other Lime Reactive Materials. In *Highway Research Board Bulletin*, No. 231, HRB, National Research Council, Washington, pp.60-66.
- Maubec, N., Deneele, D. and Ouvrard, G., 2017. Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material. *Applied Clay Science* 137, pp.107-114.
- Pourakbar, Sh., Asadi, A. Huat, B.K. and Fasihnikoutalab, M.H., 2015. Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and

Evaluation of the Effect of Sand Grain Size on Compressive Strength and Elasticity Module of Lime-Treated Soil

G. Ka'ab Omeir¹, A. Naserin^{2,*}, M. Daryae³, and M. R. Ansari⁴

Received: Nov.13, 2018

Accepted: Feb.18, 2019

Abstract

Using additives can improve the mechanical properties of soils of construction projects such as irrigation canals. The materials such as sand, in addition to improving soil conditions, are compatible with the environment. So, in recent decades, the utilization of sandy soils in the construct of irrigation networks has been extended. In this study, the effect of size and amount of sand on the strength characteristics of lime treated soils. In this way, at first, to determine the best soil-lime mixture, the soil was mixed by different amount of lime and unconfined compressive strength of these has been investigated. The highest unconfined compressive strength was achieved by adding 7 percent lime to the soil. Then, a set of tests conducted on coarse (D50= 1.4 mm), medium (D50= 0.45 mm) and fine (D50= 0.22 mm) and by applying 5, 10 and 15 percent of sand to lime-clay mixture in three replicates. The unconfined compressive strength was performed on the specimen at curing time of 7, 14 and 28 days. Results showed that adding 5 percent of coarse sand to clay-lime mixture can increase compressive strength and elasticity module about 13 percent and 16 percent, respectively, on average. In addition, adding medium and fine sands can cause to deteriorate soil's strength and elasticity module.

Keywords: Clayey soil, Lime, Sand, Compressive Strength, Elasticity Module

1- Former M.Sc. Student of Water Structure, Department of Water Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. Mollasani, Iran

3-Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.naserin@ramin.ac.ir)