ارزیابی دوام و پایداری خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه‌های آبی

جهانگیر عابدی‌کوپایی[۱*]، کامیار نوروزیان[۱] و نادر عباسی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۰۳)

چکیده

استفاده از مواد افزودنی مختلف برای اصلاح و بهبود خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه همواره به‌عنوان یکی از روش‌های تثبیت خاک مورد توجه بوده است. در این تحقیق تأثیر آهک هیدراتهبرروی مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت با رطوبت بهینه و رطوبت اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. بدین‌منظور نمونه‌های آزمایشی متعددی با افزودن مقادیر مختلفی از آهک هیدراته شامل صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد به خاک رسی تهیه نموده و تحت آزمایش‌های تراکم استاندارد، تراکم هاروارد و پس از عمل‌آوری با یک طرح فاکتوریلی در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه در سه تکرار مورد آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده با رطوبت بهینه و رطوبت اشباع قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که با افزایش مقدار آهک هیدراته مخلوط در خاک، وزن واحد حجم خشک حداکثر کاهش یافته و رطوبت بهینه افزایش یافته است. همچنین افزایش آهک هیدراته به‌طور قابل ملاحظه‌ای موجب افزایش مقاومت فشاری خاک در دو حالت با رطوبت بهینه و رطوبتاشباع گردیده و این افزایش مقاومت به‌طور معنی‌دار متأثر از زمان عمل‌آوری و مقادیر آهک هیدراته می‌باشد.نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقدار ۵ درصد آهک هیدراته به‌عنوان مقاومت فشاری بیشینه می‌باشد اما با در نظر گرفتن ضریب نرم شوندگی مقدار ۳ درصد آهک هیدراته به‌عنوان مقدار بهینه تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: خاک رسی، آهک هیدراته، تراکم استاندارد، تراکم هاروارد، مقاومت فشاری محصور نشده

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

*:مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

مقدمه

خاک طبیعی موجود در محل عملیات ساختمانی، معمولاً به‌طور کامل برای تحمل سازه موردنظر مناسب نیست. عواملی نظیر ساختار خاک، رطوبت، توزیع دانه‌بندی، نوع کانی‌ها، میزان تراکم، چسبندگی دانه‌ها، هوازدگی شیمیایی و وجود پوشش گیاهی در خاک‌های رسی ویژگی‌های مکانیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خاک‌های رسی از جمله خاک‌هایی می‌باشند که به‌واسطه داشتن ویژگی‌های مهندسی ضعیف، پژوهشگران همواره به‌دنبال تثبیت آن از طریق مواد افزودنی بودند. مشکلات خاک‌های رسی زمانی بیشتر می‌گردد که این نوع خاک‌ها واگرا یا متورم شونده نیز باشند. خاک‌های رسی تقریباً دارای پراکندگی زیادی در نقاط مختلف جهان و ایران می‌باشند که این امر می‌تواند مشکلات زیادی در بستر پروژه‌های عمرانی به‌وجود بیاورد. این مشکلات می‌تواند در سازه‌های آبی، با توجه به افزایش روز افزون شبکه‌های آبیاری و زهکشی، به‌واسطه ارتباط دائم آب با بستر سازه نمود بیشتری پیدا کند. در صورت تماس خاک رس با آب و اشباع شدن آن، مقاومت فشاری خاک رس به‌شدت کاهش یافته و تقریباً برابر صفر می‌گردد. در سازه‌های آبی در صورت عدم تثبیت خاک بستر رسی با مواد افزودنی مناسب ممکن است مشکلات عدیده‌ای در مراحل ساخت و بهره‌برداری رخ داده و حتی منجر به تخریب کامل سازه و شکست پروژه می‌گردد (۹).

تثبیت خاک یک اصطلاح کلی برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، یا ترکیبی از آنها می‌باشد که جهت بهبود ویژگی‌های خاک به‌کار می‌رود و روش‌های اصلاح خاک شامل تراکم، تسلیح، کنترل زهکشی، افزودن مواد شیمیایی، طبیعی یا ترکیبی از هر نوع روش فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. از اهداف اصلی تثبیت خاک: اصلاح خاک، تسریع در عملیات ساختمانی و بهبود مقاومت و پایداری خاک می‌باشد. بهبود ویژگی‌های خاک ممکن است برحسب نیاز به‌منظور افزایش مقاومت فشاری یا مقاومت در برابر نیروهای محیطی به‌کار رود. یکی از راه‌های تثبیت خاک استفاده از آهک هیدراته می‌باشد که این روش اصلاح خاک از زمان‌های قدیم متداول بوده است. تاکنون تحقیقات زیادی برای تثبیت خاک با استفاده از آهک هیدراته انجام شده است. افزودن مقادیر مختلف آهک هیدراته به خاک موجب تغییر در مشخصه های فیزیکی و مکانیکی نظیر حدود اتربرگ، مقاومت فشاری و ویژگی‌های تحکیمی خاک می‌گردد (۹).

لین و همکاران (۱۱) تأثیر خاکستر لجن فاضلاب (SSA) و آهک هیدراته در یک نسبت ثابت ۱:۴ برای تثبیت خاک رس مورد آزمایش‌قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت نشده حدود ۳ تا ۷ برابر نمونه تثبیت نشده است. عبدی و چرخیاری (۵) قابلیت استفاده از سرباره فولاد سازی (BOS slag) ذوب آهن اصفهان به‌همراه آهک هیدراته را به‌منظور تثبیت خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب همزمان آهک و سرباره در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک و یا سرباره به‌تنهایی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است.تابع بردبار و همکاران (۳) به بررسی اثر آهک بر خصوصیات ژئوتکنیکی یک نمونه خاک رسی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن آهک به خاک مورد نظر موجب تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی آن از قبیل کاهش خمیرایی، وزن واحد حجم و پتانسیل تورم و فزایش ضریب تحکیم می‌گردد. کاشفی پور ودریائی (۷) از آهک و ماسه بادی به‌عنوان مصالح افزودنی استفاده نمودند. نتایج حاصل نشان داد که در نسبت اختلاط ۷٪ آهک و ۱۰٪ ماسه بادی ماکزیمم مقاومت محوری حاصل شد. عبدی و خیاط بهارلویی (۶) به بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر کائولینیت تثبیت شده با آهک هیدراته پرداختند. با توجه به نتایج ملاحظه گردید که افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری تابعی از مقدار آهک هیدراته و الیاف و همچنین مدت زمان عمل‌آوری بوده است. ساکر و همکاران (۱۴) تأثیر آهک هیدراته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

ویژگی‌ها	حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری	حد انقباض	G_S
	(٪)				
مقدار	۴۶/۷	۲۶/۱	۲۰/۶	۲۰/۴	۲/۷۲

کانی‌شناسی خاک رس شهر ایدکو مصر که دارای ۱۴ درصد ماده آلی می‌باشد را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید که خاک رسی نرم با مواد آلی بالای ۱۴٪ می‌تواند به‌طور رضایت‌بخشی با افزودن ۷٪ آهک تثبیت شود. ساهو و پرادهان (۱۳) تحقیقاتی جهت تأثیر آهک هیدراته برروی استحکام خاک‌های متورم شونده انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که حداکثر افزایش قدرت در خاک محتوی ۸ ٪ آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز می‌باشد.اثنی‌عشری وجعفری (۱) به‌منظور بررسی رفتار مقاومتی خاک اصلاح شده با آهک و الیاف، از خاک رس کائولینیت و ضایعات نوعی الیاف پلیمری تولیدی کارخانجات نخ تایر، استفاده نمودند. براساس نتایج حاصل، به‌طور کلی با افزودن آهک و الیاف مقدار مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

همچنین حضور الیاف سبب شکل‌پذیری و ایجاد مقاومت باقی‌مانده بیشتری می‌گردد و بدین‌ترتیب ضعف‌های حاصل از تثبیت خاک با آهک را بهبود می‌بخشد.مکارچیان و میرجعفری میانده(۸) از آهک، میکروسیلیس و گچ به‌عنوان موادی برای تثبیت خاک رس کائولینیت استفاده نمودند. نمودارهای به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان دهنده تأثیر مثبت میکروسیلیس بر افزایش مقاومت و کاهش اثرات مخرب سولفات بر خاک رس تثبیت شده با آهک بود. بنده‌زاده و همکاران (۲) تأثیر افزودن خاکستر بادی بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط خاک و آهک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل بیانگر تأثیر فوق العاده خاکستر بادی در مقاومت برشی است به‌ویژه آن که قیمت پایین آن، استفاده از این مخلوط را مقرون به‌صرفه می‌نماید. سکو و همکاران (۱۵) مواد مختلفی شامل آهک هیدراته (LIME)، اکسید منیزیم (PC-7)، خاکستر پوسته برنج (RHFA)، خاکستر احتراق ذغال نیروگاه (CFA)، پلیمر (CS) و آلومینات پرکننده (AF) با ترکیبات مختلفی از این مواد به خاک متورم شونده اضافه نمودند و مورد آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ۵ درصد خاکستر بادی پوسته برنج به‌همراه ۴ درصد آهک هیدراته بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری محصورنشده خاک دارد.مایتاه(۱۲) طی آزمایشاتی دریافت که مقاومت خاک مخلوط شده با درصد آهک هیدراته ۴٪ و درصد سدیم سیلیکات ۲٪ افزایش یافته است.

هدف از این تحقیق تأثیر آهک هیدراته بر روی مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت با رطوبت بهینه و رطوبت اشباع می‌باشد.

مواد و روش‌ها

روش کلی در این تحقیق شامل تهیه نمونه خاک، انجام آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه، تهیه و ساخت تیمارهای آزمایشی مختلف و انجام آزمایش تراکم و مقاومت فشاری تک محوری است.

آزمایش‌های شناسایی خاک و مواد مصرفی

خاک مورد استفاده در این پژوهش برداشت شده از منطقه گلابر واقع در شهرستان ایجرود استان زنجان می‌باشدو تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه شرکت مشاوران تک آزمای زنجان صورت پذیرفته است.

در جدول ۱، کلیه داده‌های مربوط به حدود اتربرگ،

جدول ۲. نتایج تجزیه شمیایی خاک مورد بررسی

یون‌ها	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}
غلظت (meq/L)	۰/۹۲	۲۱	۳	۵	۱۱	۱۰	۲	۸

جدول ۳. مشخصات خاک و آهک هیدراته مورد استفاده

ترکیبات	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	SO_3
غلظت مواد خاک (W/W٪)	۴۵/۷۰	۱۲/۸۰	۱۱/۹۵	۷/۹۸	۴/۰۷	۲/۹۱	۰/۸۲	۰/۴۵	۰/۱۸	۰/۰۸
غلظت مواد آهک (W/W٪)	۲/۵۵	۰/۶۵۶	۶۱/۶۲	۰/۴۳	۳/۸۲	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۸۱

توده ویژه (G_s) و طبقه‌بندی براساس سیستم یونیفاید USCS ارائه گردیده است (۱۰). براساس طبقه‌بندی سیستم یونیفاید خاک مورد مطالعه خاک رسی با خمیرایی پایین (CL) می‌باشد (۱۰).

آزمایش‌هایی جهت تعیین کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک مورد مطالعه در آزمایشگاه فیزیک خاک گروه خاک‌شناسی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت پذیرفت که نتایج طی جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین میزان EC این خاک در نسبت ۲:۱ برابر با ۱/۲ dS/m می‌باشد. همچنین میزان ماده آلی خاک مورد بررسی اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابر ۰/۰۶ درصد گردید.

جهت استفاده از خاک در آزمایشات ابتدا با چکش پلاستیکی کلوخه‌های به‌هم چسبیده خاک کوبیده گردید تا از هم باز شدند و سپس جهت انجام تهیه تیمارها از الک نمره ۴۰ عبور داده شد.آهک هیدراته مورد استفاده در این تحقیق از نوع آهک هیدراته می‌باشد که از یکی از مصالح فروشی‌های موجود در شهر زنجان تهیه گردید. آهک هیدراته هیدراته از الک نمره ۴۰ عبور داده شد و مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور شناسایی خاک رسی و آهک هیدراته مصرفی، آزمایش روش طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام گرفت. آزمایش XRF در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان صورت پذیرفت. نتایج آزمایش XRF برروی خاک و آهک هیدراته مورد مطالعه مطابق جدول ۳ می‌باشد.

تیمارهای آزمایش

با توجه به این‌که هدف اصلی پژوهش بررسی اثر مقادیر مختلف آهک هیدراته بر مشخصات تراکمی و مقاومت فشاری خاک و تعیین ترکیب مناسب مخلوط می‌باشد، درصدهای مختلفی از آهک هیدراته در قالب تیمارهای آزمایشی مورد آزمایش قرار گرفت. بدین‌منظور ابتدا، خاک رس به‌صورت هوا خشک در آمده و سپس مخلوط‌های مورد نظر با در نظر گرفتن نسبت‌های معین تهیه گردیدند. نسبت‌های آهک هیدراته در مخلوط به‌صورت نسبت وزن خشک آنها به وزن خشک خاک تعریف شد. بدین‌منظور چهار سطح آهک هیدراته شامل؛ صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد در نظر گرفته شد که به‌ترتیب با اسم اختصاری L۰، L۱، L۳، L۵ مشخص گردیدند. لذا با درنظر گرفتن ترکیب‌های مختلف از ماده مذکور ۴ نوع مخلوط و به‌عبارتی دیگر ۴ تیمار آزمایشی تهیه گردید.

آزمایش تراکم

مشخصات تراکمی خاک توسط آزمایش‌های پروکتور استاندارد براساس استاندارد ASTM D 698-07 و تراکم

هاروارد براساس استاندارد ASTM D 4609-00 با ۳ تکرار تعیین گردید (۱۰).

در آزمایش پروکتور استاندارد خاک درون قالبی به حجم ۹۴۳/۹ سانتیمتر مکعب متراکم می‌شود. قالب به یک صفحه کف بسته شده و به بالای آن یک دنباله اضافه می‌شود. خاک هر بار با مقادیر مختلفی آب مخلوط شده و سپس در سه لایه مساوی و هر لایه توسط ۲۵ ضربه چکش متراکم می‌شود. وزن چکش ۲۴/۵ نیوتن و ارتفاع سقوط آن ۳۰/۵ سانتی‌متر می‌باشد (۱۰).

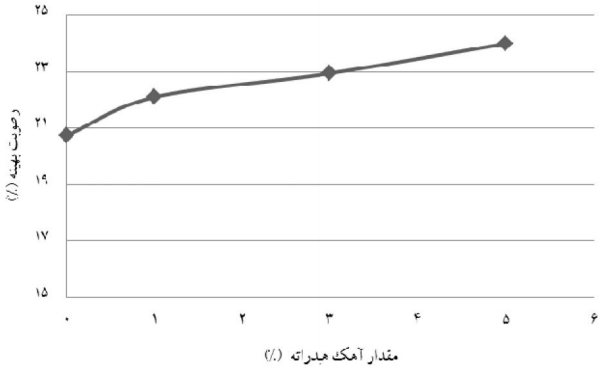
آزمایش تراکم هاروارد نیز به‌روشی مشابه آزمایش پروکتور استاندارد اما با ۵ لایه و هر لایه ۱۵ ضربه انجام شد. وزن چکش ۵۲۸ گرم و ارتفاع سقوط آن ۱۰/۸ سانتی‌متر تنظیم گردید. حجم قالب تراکم هاروارد ۶۱/۰۹ سانتی‌متر مکعب می‌باشد (۱۰).

نتایج حاصل از دو آزمایش پروکتور استاندارد و تراکم هاروارد برای مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر تقریباً یکسان می‌باشد.

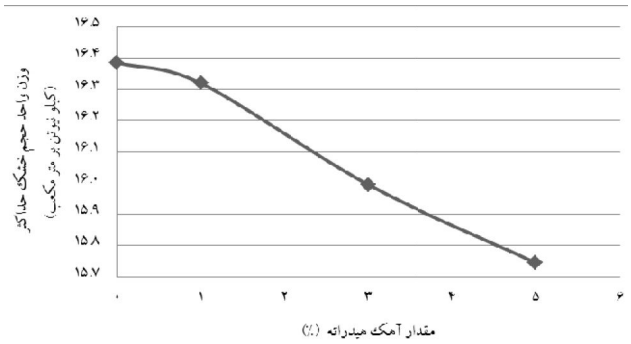
آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری در 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. با توجه به این‌که در این پژوهش هدف مقاوم کردن خاک زیر بستر کانال در برابر نشت و گسیختگی می‌باشد، برای ارزیابی کیفیت خاک تثبیت شده از معیار مقاومت فشاری استفاده گردید.

برای ساخت نمونه‌های حاوی ترکیب آهک هیدراته و خاک ابتدا آهک هیدراته با خاک مخلوط و سپس آب به‌تدریج به اندازه رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم اضافه گردید. سپس مصالح مخلوط در کیسه نایلونی ریخته شده و در آن تا زمان ساخت نمونه‌ها بسته نگه داشته شد تا رطوبت آن از بین نرود. برای نمونه‌سازی، مصالح در ۵ لایه (طول نمونه ۷۱/۵۲ میلی‌متر و به قطر ۳۳/۳۴ میلی‌متر) و هر لایه با ۱۵ ضربه با استفاده از چکش مخصوص قالب تراکم هاروارد با حداکثر وزن مخصوص خشک به‌دست آمده از آزمایش تراکم هاروارد، متراکم گردید. از هر تیمار ۶ نمونه (۳ نمونه جهت آزمایش مقاومت فشاری با رطوبت بهینه و ۳ نمونه جهت آزمایش مقاومت فشاری اشباع) تهیه گردید. به‌منظور اطمینان از گیرش کامل مخلوط خاک –آهک هیدراته کلیه نمونه‌ها به‌مدت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز در کیسه نایلون درون یک کلمن یونولیتی قرار داده شده در دمای مناسب عمل‌آوری شدند. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری اشباع، براساس ۰۰-۴۶۰۹ ASTM، نمونه‌ها پس از طی کردن زمان عمل‌آوری از درون نایلون بیرون آورده شده، وزن آنها یادداشت گردیده و سپس به‌مدت ۲ روز درون آب قرار داده می‌شدند (۱۰). سپس آزمایشات مقاومت فشاری محصور نشده به‌شیوه کرنش کنترل شده با سرعت ۱/۱ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌های اشباع و خشک صورت گرفت. این آزمایش بر طبق استاندارد ۰۰-۲۱۶۶ ASTM D انجام شد. برای انجام آزمایش نمونه دقیقاً در وسط دو فک دستگاه قرار داده شد. فک فوقانی با دقت بر روی سطح فوقانی نمونه مماس شده و سپس عقربه مدرج متصل به حلقه روی صفر قرار داده شد. عقربه مدرج دیگر برای اندازه‌گیری و ثبت حرکت رو به بالای فک پایین دستگاه (یعنی برای ثبت مقدار فشرده شدن نمونه در حین آزمایش) متصل بود. این عقربه نیز در ابتدای آزمایش روی صفر قرار داده شد. سپس دستگاه روشن گردید و بارهای وارده (یعنی قرائت‌های عقربه مدرج متصل به حلقه) و تغییر شکل‌های نمونه تا لحظه گسیختگی ثبت و یادداشت شد. 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



شکل۱. تأثیر مقدار آهک هیدراته بر درصد رطوبت بهینه



شکل۲. تأثیر مقدار آهک هیدراته بر وزن واحد حجم خشک حداکثر

مـی‌گـردد. بـدین‌ترتیـب بـا توجـه بـه‌تعـداد ۴ تیمـار، ۴ سـن عمل‌آوری، در ۲ حالت اشباع و با رطوبت بهینه و ۳ تکرار برای هر تیمار در مجموع ۹۶ نمونه آزمایشی تهیـه و مـورد آزمـایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.

ضریبنرم شوندگی یا حساسیت به آب

این مشخصه که مختص برخی از مصالح ساختمانی حساس بـه آب مانند خاک رس، ملات گچ، ملات آهک، سـنگ و مصـالح مشابه است، نشان دهندهٔ کاهش مقاومت ماده بر اثر جـذب آب و اشباع شدن است. برای بیان این حساسیت از ضریبی موسـوم به ضریب نرم شوندگی که با رابطه زیر بیان مـی‌شـود، اسـتفاده می‌گردد:

$$k_s = \frac{f_s}{f_d} \qquad [۱]$$

کـه در آن f_{sat}مقاومـت فشـاری مـاده در حالـت اشـباع، f_dمقاومـت فشـاری مـاده در حالـت خشـک و k_sضـریب نـرم شـوندگی یـا حساسـیت بـه آب را نشـان مـی‌دهـد. ضـریب k_sمتناسب با میزان حساسیت مصـالح نسـبت بـه آب و مقـدار کاهش مقاومت در اثر جذب آب و اشـباع شـدن بـین صـفر تـا یک، متغیر بوده و هرچه ماده حساس‌تر باشـد، ایـن ضـریب بـه صفر نزدیک‌تر می‌شود. براساس معیارهـای موجـود چنانچـه در مورد مـاده‌ای k_sکوچـک‌تـر از ۰/۸ باشـد، ایـن مـاده نبایـد در مجاورت رطوبت قرار گیرد (۴).

نتایج و بحث

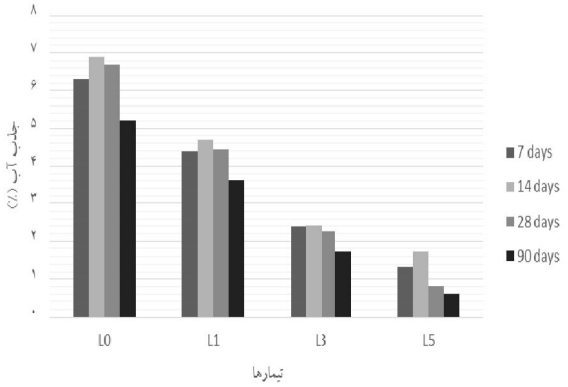
نتایج آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش‌های پروکتور استاندارد و تراکم هاروارد برای مخلوط‌های مختلف خـاک رس و آهـک هیدراتـه جهـت محاسبه رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حـداکثر بـرای تیمارهای مختلف در قالب شکل‌های۱ و ۲ ارائه گردیده است.

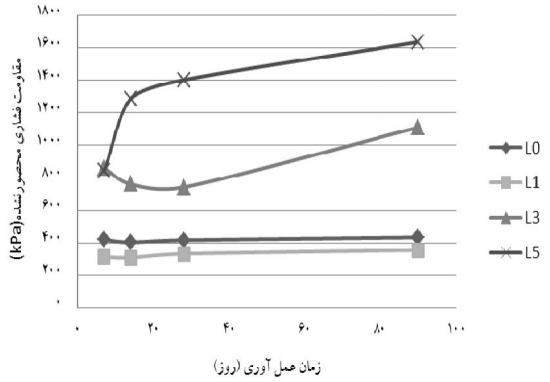
همان‌طوری که از شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشـاهده اسـت، بـا افزایش مقدار آهک هیدراته، درصـد رطوبـت بهینـه افـزایش و وزن واحد حجم خشک حداکثر کاهش می‌یابد. در کل تغییر اثر رطوبت بهینه بین۲۰/۸ درصـد تـا ۲۴/۰ درصـدو تغییـرات وزن واحد حجم خشک بیشـینه بـین ۱۵/۸ تـا ۱۶/۴کیلـو نیـوتن بـر مترمکعـب (kN/m^3) مـی‌باشـد. ایـن تغییـرات از نظـر آمـاری معنی‌دار بوده و تأثیر آهک هیدراته بـر رطوبـت بهینـه (ω_{opt}) و وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ_{dmax}) بـه احتمـال ۹۹ درصـد معنی‌دار می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته به‌علت تفاوت درصـد مواد سازنده آهک هیدراته و متفاوت بودن نـوع خـاک رسـی و همچنین تفاوت در مقادیر مواد افزودنی، نتایج تفاوت انـدکی را نشان می‌دهند، اما در کـل رونـد تغییـرات مشخصـات تراکمـی مشابه پژوهش‌های گذشته می‌باشد.

درصد جذب آب

بـــرای بـــه‌دســـت آوردن درصـــد جـــذب آب، براســـاس ASTM D ۴۶۰۹-۰۰، نمونـه‌هـا پـس از طـی کـردن زمـان



شکل۳. میانگین جذب آب برحسب درصد



شکل۴. تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری همه نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه

جدول ۴. نتایج میانگین ۳ تکرار مقاومت فشاری با حالت رطوبت بهینه

تیمار	اسم تیمار	مقاومت فشاری محصور نشده (kPa)			
		۷روز	۱۴روز	۲۸ روز	۹۰ روز
۱	L۰	۴۱۸	۴۰۳	۴۱۶	۴۳۳
۲	L۱	۳۱۱	۳۰۸	۳۳۱	۳۵۴
۳	L۳	۸۶۰	۷۶۱	۷۴۲	۱۱۱۰
۴	L۵	۸۴۱	۱۲۸۶	۱۴۰۴	۱۶۳۷

عمل‌آوری از درون نایلون بیرون آورده شده، وزن آنها یادداشت گردیده و سپس به‌مدت ۲ روز درون آب قرار داده می‌شدند. پس از ۲ روز نمونه‌ها از آب بیرون آورده شده و سطح آنها توسط حوله نرمی خشک گردید و دوباره وزن آنها یادداشت گردید (۱۰). هرگونه افزایش وزن که به‌علت جذب آب اتفاق می‌افتد به‌عنوان درصدی از وزن خشک نمونه‌ها گزارش گردید. درصد جذب آب برای همه نمونه‌های اشباع ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه محاسبه گردید. درصد آب جذب شده به‌صورت میانگین ۳ تکرار، برای تیمارهای مختلف در شکل۳ نشان داده شده است.

براساس شکل ۳، با افزایش زمان عمل‌آوری درصد جذب آب در اکثر نمونه‌ها کاهش اندکی داشته است. با افزایش زمان عمل‌آوری، احتمالاً واکنش‌های پوزلانی توسعه می‌یابند و باعث گیرش و سفت شدن نمونه‌ها می‌گردد، درنتیجه درصد جذب آب کاهش می‌یابد. از دلایل بالا بودن درصد جذب آب نمونه L۰ در برابر نمونه‌های دیگر، می‌توان به منفی بودن سطح ذرات رس و بالا بودن جذب سطحی ذرات رس اشاره کرد. با افزایش درصد آهک، درصد جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد. ذرات خاک به‌دلیل تبادل کاتیونی با ذرات آهک متراکم می‌گردند و به اصطلاح سفت‌تر می‌شوندو در نتیجه درصد جذب آب کاهش می‌یابد.

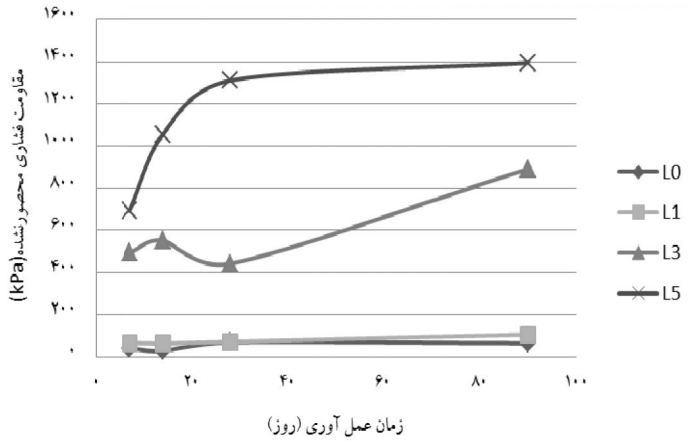
نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برروی کلیه نمونه‌های تهیه شده در زمان‌های عمل‌آوری ۷ ، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز در ۳ تکرار و در ۲ حالت با رطوبت بهینه و اشباع انجام پذیرفت. چگونگی تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه به‌صورت میانگین ۳ تکرار در جدول ۴ و شکل۴ نشان داده شده است.

چگونگی تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های اشباع به‌صورت میانگین ۳ تکرار در جدول ۵ و شکل۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج میانگین ۳ تکرار مقاومت فشاری اشباع

تیمار	اسم تیمار	مقاومت فشاری محصور نشده (kPa)			
		۷روز	۱۴روز	۲۸ روز	۹۰ روز
۱	L۰	۴۱	۲۸	۳۸	۶۴
۲	L۱	۶۶	۶۳	۷۱	۱۰۶
۳	L۳	۴۹۳	۵۵۳	۴۴۱	۸۹۱
۴	L۵	۶۹۲	۱۰۵۵	۱۳۱۰	۱۳۹۵



شکل۵. تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری همه نمونه‌های با حالت اشباع

با توجه به‌شکل‌های ۴ و ۵، به‌طور کلی مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار آهک هیدراته به خاک، مقاومت فشار محصورنشده افزایش می‌یابد. دلیل افزایش مقاومت فشاری محصورنشده را می‌توان افزایش واکنش‌های پوزولانی قلمداد کرد. فعل و انفعالات پوزولانی بین اجزای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی یک پوزولان در صورت مجاورت با هیدروکسید کلسیم در معرض رطوبت اتفاق می‌افتد و خواص چسبندگی و سیمانی شدن را بروز می‌دهد. محصولات اصلی هیدروسیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدروآلومینات کلسیم(C-A-H)، عموماً بعد از ترکیبات سیلیس و آلومین موجود در خاکستر لجن فاضلاب با هیدروکسید کلسیم موجود در آهک به‌دست می‌آید. روابط واکنش‌های پوزولانی به‌صورت زیر می‌باشند:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H\ gel \qquad [۲]$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 \longrightarrow C\text{-}A\text{-}H\ gel \qquad [۳]$$

دلیل افزایش بیشتر مقاومت فشاری محصورنشده حالت اشباع در برابر حالت بهینه را می‌توان به‌علت مقاومت فشاری محصورنشده ناچیز نمونه L۰ در حالت اشباع و همچنین خاصیت ضد آب بودن نمونه‌های با آهک هیدراته دانست. در این پژوهش مشخص شد که در نسبت‌های بالای آهک هیدراته، حالت اشباع تأثیر کمی بر مقاومت فشاری محصورنشده دارد. در پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته نیز نتایج مشابه به‌دست آمده است.

به‌منظور مقایسه بهتر و جامع تر تأثیر آهک هیدراته هیدراته، زمان عمل‌آوری و اثر متقابل آنها در دو حالت مقاومت فشاری با رطوبت بهینه و اشباع نمونه‌ها، تجزیه و تحلیل آماری برروی داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام گرفت که نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای مقاومت فشاری با حالت رطوبت بهینه در جدول‌های ۶ و ۷ و برای مقاومت

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس اثر آهک هیدراتهو زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری با حالت رطوبت بهینه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات مقاومت فشاری	آزمون F
تکرار	۲	۳۹/۵۶۳	۰/۰۱۸ ns
آهک هیدراته	۳	۲۳۸۲۳۱۴/۳۸۹	۱۰۶۹**
زمان	۳	۱۶۰۶۷۷/۹۴۴	۷۲/۱۱۰**
آهک هیدراته × زمان	۹	۸۷۲۹۰/۱۱۱	۳۹/۱۷۵**
خطای کل	۳۰	۲۲۲۸/۲۲۹	–

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ ns : اختلاف غیرمعنی‌دار

جدول ۷. تأثیر مقدار آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه

تیمار	(q_u)	تیمار	(q_u)
L۵	۱۲۹۲^{a}	D۹۰	۸۸۳/۵۸^{a}
L۳	۸۶۸/۲۵^{b}	D۲۸	۷۲۳/۱۷^{b}
L۰	۴۱۷/۵۸^{c}	D۱۴	۶۸۹/۵۸^{b}
L۱	۳۲۶/۱۷^{d}	D۷	۶۰۷/۶۷^{c}

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس اثر آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری با حالت اشباع

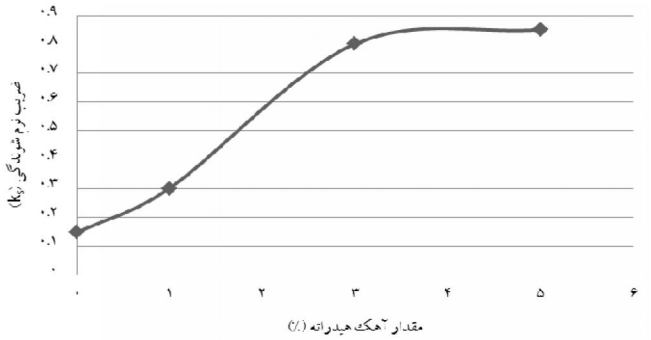
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات مقاومت فشاری	آزمون F
تکرار	۲	۱۵۹۸/۸۱۲	۰/۹۸۳ ns
آهک هیدراته	۳	۳۰۶۲۳۳۹/۱۳۲	۱۸۸۳**
زمان	۳	۱۷۴۶۷۶/۰۷۶	۱۰۷/۳۸۸**
آهک هیدراته × زمان	۹	۸۳۱۸۶/۷۰۶	۵۱/۱۴۲**
خطای کل	۳۰	۱۶۲۶/۵۹۰	–

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ ns : اختلاف غیرمعنی‌دار

جدول ۹. تأثیر مقدار آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها با حالت اشباع

تیمار	(q_u)	تیمار	(q_u)
L۵	۱۱۱۳/۱۰^{a}	D۹۰	۶۱۴/۱۷^{a}
L۳	۵۹۴/۶۷^{b}	D۲۸	۴۶۴/۷۵^{b}
L۱	۷۶/۶۷^{c}	D۱۴	۴۲۵/۰۸^{c}
L۰	۴۲/۸۳^{d}	D۷	۳۲۳/۲۵^{d}

فشاری اشباع در جدول‌های ۸ و ۹ارائه گردیده است. براساس جدول‌های ۶ و۸ مشاهده می‌شود که بین تکرارها، در سطح ۱ درصد از نظر آماری تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. بین مقاومت‌های فشاری به‌دست آمده بر اثر افزودن آهک و زمان عمل‌آوری در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌دار وجوددارد، بنابراین از نظر آماری تأثیر آهک و زمان عمل‌آوری در افزایش



شکل ۶. تغییرات ضریب نرم‌شوندگی در برابر افزایش مقدار آهک هیدراته در نمونه‌های ۹۰ روزه

مقاومت فشاری به احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین این جدول‌ها نشان می‌دهند که اثر عامل آهک/ زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک درسطح ۱ درصد معنی‌دار است و اثر متقابل بین این عوامل وجود دارد.

جدول ۷ تأثیر مقدار آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه را نشان می‌دهد. با افزایش درصد آهک، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری که نمونه‌های بدون آهک دارای کمترین و نمونه‌های با ۵ درصد آهک دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری می‌باشند. براساس جدول ۷ با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری که نمونه‌های ۷ روزه دارای کمترین و نمونه‌های ۹۰ روزه دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری می‌باشند.

جدول ۹ تأثیر مقدار آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌های با حالت اشباع را نشان می‌دهد. با افزایش درصد آهک، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری که نمونه‌های بدون آهک دارای کمترین و نمونه‌های با ۵ درصد آهک دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری می‌باشند. براساس جدول ۹ با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری که نمونه‌های ۷ روزه دارای کمترین و نمونه‌های ۹۰ روزه دارای بیشترین مقدار مقاومت فشاری می‌باشند.

نتایج ضریبنرم‌شوندگی یا حساسیت به آب

مقدار ضریب نرم‌شوندگی برای نمونه‌های تهیه شده در زمان عمل‌آوری۹۰ روز انجام پذیرفت. چگونگی تغییرات ضریب نرم شوندگی برای نمونه‌های ۹۰ روزه در شکل۶ نشان داده شده است.

با توجه به‌نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده و با توجه به‌تحلیل‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار SPSS، مقدار ۵ درصد آهک هیدراته به‌عنوان مقدار بیشینه معرفی گردید، اما با در نظر گرفتن ضریب نرم شوندگی و با توجه به این‌که براساس معیارهای موجود چنانچه در مورد ماده‌ای ضریب نرم‌شوندگی کوچک‌تر از ۰/۸ باشد، این ماده نباید در مجاورت رطوبت قرار گیرد، مقدار آهک بهینه براساس ضریب نرم‌شوندگی را می‌توان مقدار ۳ درصد آهک هیدراته معرفی نمود.

نتیجه‌گیری

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

۱. نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد و تراکم هاروارد نشان داد که به‌طور کلی افزودن آهکبه خاک رس سبب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌گردد.

۲. با افزایش زمان عمل‌آوری درصد جذب آب در اکثر نمونه‌ها کاهش اندکی داشته است. با افزایش درصد آهک، درصد جذب

آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۳. در نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه، افزودن آهک خاک رسی سبب افزایش ۳/۷۸ برابری مقاومت فشاری می‌گردد.

۴. افزودن آهک به خاک رسی سبب افزایش ۲۱/۸۰ برابری مقاومت فشاری در حالت اشباع می‌گردد.

۵. زمان عمل‌آوری نقش به‌سزایی در افزایش مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت با رطوبت بهینه و اشباع با افزودن آهک دارد.

۶. با انجام آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده در دو حالت با رطوبت بهینه و اشباع مشخص شد که پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، بیشترین مقدار مقاومت فشاری چه در حالت اشباع و چه در حالت با رطوبت بهینه، در مقدار آهک ۵ درصد به‌دست می‌آید.

۷. با توجه به‌افزایش بیشتر مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه نسبت به نمونه‌های ۷روزه می‌توان نتیجه گرفت که واکنش‌های پوزولانی آهک زمانبر بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار آهک بیشتری در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌نماید.

۸. با تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده در حالت اشباع و چه در حالت با رطوبت بهینه با استفاده از نرم‌افزار SPSS به‌طور کلی مشخص شد که در این پژوهش، مقدار آهک بیشینه ۵ درصد می‌باشد.

۹. با توجه به‌نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده و با توجه به‌تحلیل‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار SPSS، مقدار ۵ درصد آهک هیدراته به‌عنوان مقدار بیشینه معرفی گردید، اما با در نظر گرفتن ضریب نرم شوندگی و با توجه به این‌که براساس معیارهای موجود چنانچه در مورد ماده‌ای ضریب نرم شوندگی کوچک‌تر از ۰/۸ باشد، این ماده نباید در مجاورت رطوبت قرار گیرد، مقدار آهک بهینه براساس ضریب نرم شوندگی را می‌توان مقدار ۳ درصد آهک هیدراته معرفی نمود.

سپاسگزاری

از مدیریت و کارکنان شرکت مشاور تک آزمای زنجان، به‌خصوص جناب آقای مهندس رهنما، بابت همکاریشان در زمینه انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و ارائه امکانات لازم جهت انجام این پژوهش کمال تشکر را دارم.

منابع مورد استفاده

۱. اثنی عشری، م. و م. جعفری. ۱۳۸۹. مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس تثبیت شده با آهک و مسلح به الیاف پلیمری، مجموعه مقالات چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.

۲. بنده‌زاده، ا.، م. ه. داودی و م. ف. آستانه. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر مخلوط آهک و خاکستر بادی بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه، مجموعه مقالات دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج. ص ۱۳۷.

۳. تابع بردبار، ع.، ع. رئیسی استبرق، ب. پارسایی و غ. اسکندری. ۱۳۸۹. بررسی اثر آهک بر روی پارامترهای مکانیکی خاک رسی، مجموعه مقالات دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج. ص ۳۷۷.

۴. رحیمی، ح. ۱۳۸۵.*مصالح ساختمانی*. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

۵. عبدی، م. و ف. چرخیاری. ۱۳۸۸. بررسی استفاده از سرباره فولادسازی جهت افزایش مقاومت خاک‌های ریزدانه، مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز.

۶. عبدی، م. و ح. خیاط بهار لویی. ۱۳۸۹. مطالعه اثرات استفاده اثر توأم آهک و الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی کائولینیت، مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد.

۷. کاشفی پور، م. و م. دریایی. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مقاومت محوری خاک رس بهسازی شده با آهک توسط افزودن ماسه بادی،

مجموعه مقالات دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کرج. ص ۶۷.

۸. مکارچیان، م. و ی. میرجعفری میانده. ۱۳۸۹. تأثیر رطوبت و میکروسیلیس بر مقاومت تک محوری خاک تثبیت شده با آهک در مجاورت سولفات، مجموعه مقالات چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.

۹. نوروزیان، ک. ۱۳۹۳. استفاده از خاکستر لجن فاضلاب و آهک برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

10. American Society for Testing and Materials (ASTM). 2012. ASTM Annual Book of Standards, Sec. 4, Vol. 04. 08.
11. Lin. D. F., K. L. Lin, M. J. Hung and H. L. Luo. 2007. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. J. Hazard. Mater. 145: 58-64.
12. Maaitah. O. 2012. Soil stabilization by chemical agent. Geotech. Geol. Eng. 30: 1345-1356.
13. Pradhan. P. K. and J. D. P. Sahoo. 2010. Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil. Geotech. Geol. Eng. 28: 889-897.
14. Sakr. M. A., M. A. Shahin and Y. M. Metwally. 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. Geotech. Geol. Eng. 27: 105-113.
15. Seco. A., F. Ramírez, L. Miqueleiz and B. García. 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. Appl. Clay Sci. 51: 348-352.