مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۵/ شماره ٤/سال ۱۳۹۳/ص ۱۰۸-۹۳

استفاده از خاکستر لجن فاضلاب برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های رسی در سازه‌های آبی

کامیار نوروزیان، نادر عباسی* و جهانگیر عابدی کوپایی**

* نگارنده مسئول: کرج، بلوار شهید فهمیده، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰(۰۲۶)، پیام‌نگار: nader_iaeri@yahoo.com

** به‌ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشیار بخش تحقیقات آبیاری و زهکشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ و استاد گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۰

چکیده

استفاده از مواد افزودنی مختلف برای بهبود خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه همواره به‌عنوان یکی از روش‌های تثبیت خاک مورد توجه بوده است. در این تحقیق، تاثیر خاکستر لجن فاضلاب بر مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت با رطوبت بهینه و اشباع بررسی شده است. بدین منظور، با افزودن مقادیر مختلفی از خاکستر لجن فاضلاب شامل؛ صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به خاک رسی، چهار نوع مخلوط (تیمار آزمایشی) ساخته شد. مشخصات تراکمی هر یک از تیمارها با استفاده از آزمایش تراکم هاروارد تعیین شد. با در نظر گرفتن چهار سن عمل‌آوری (۷، ۱٤، ۲۸ و ۹۰ روزه) و سه تکرار، ۲٤ نمونه آزمایشی از هر تیمار و در مجموع ۹٦ نمونه آزمایشی با استفاده از قالب تراکم هاروارد تهیه شد و پس از عمل‌آوری در سنین مورد نظر، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده روی آنها اجرا شد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب به خاک، وزن واحد حجم خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. همچنین، افزایش خاکستر لجن فاضلاب مقاومت فشاری خاک را در دو حالت با رطوبت بهینه و اشباع افزایش داده است. این افزایش مقاومت معنی‌دار در سطح یک درصد (با احتمال ۹۹ درصد)، متاثر از زمان عمل‌آوری و مقادیر خاکستر لجن فاضلاب است.

واژه‌های کلیدی

تراکم استاندارد، تراکم هاروارد، خاک رسی، خاکستر لجن فاضلاب، مقاومت فشاری محصور نشده

مقدمه

خاک طبیعی موجود در محل عملیات ساختمانی، ممکن است به‌طور کامل برای تحمل سازه مورد نظر مناسب نباشد. عواملی نظیر ساختار خاک، رطوبت، دانه‌بندی، نوع کانی‌ها و کاتیون‌ها، میزان تراکم، چسبندگی دانه‌ها، هوازدگی شیمیایی و وجود پوشش گیاهی در خاک‌های رسی ویژگی‌های مکانیکی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند. خاک رسی خاکی است با ویژگی‌های مهندسی ضعیف که پژوهشگران همواره به‌دنبال تثبیت آن از طریق مواد افزودنی بوده‌اند. مشکلات خاک‌های رسی زمانی که از نوع خاک‌های مسئله‌دار نظیر واگرا یا متورم‌شونده نیز باشند، دوچندان خواهد شد. خاک‌های رسی تقریبا دارای پراکندگی زیادی در نقاط مختلف جهان و ایران هستند که این امر می‌تواند مشکلات زیادی در بستر پروژه‌های عمرانی به‌وجود آورد. با توجه به افزایش روز افزون شبکه‌های آبیاری و زهکشی و به‌واسطه ارتباط دایم آب با بستر سازه، این مشکلات می‌تواند در سازه‌های آبی نمود بیشتری پیدا کند. در

© 2016,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

صورت تماس خاک رس با آب و اشباع شدن آن، مقاومت فشاری و یا مقاومت برشی خاک رس به‌شدت کاهش می‌یابد و تقریبا برابر صفر می‌شود. در سازه‌های آبی اگر خاک بستر رسی با مواد افزودنی مناسب تثبیت نشود ممکن است مشکلات فراوانی در مراحل ساخت و بهره‌برداری رخ دهد و حتی منجر به تخریب کامل سازه و شکست پروژه شود.

تثبیت خاک اصطلاحی کلی برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، یا ترکیبی از آنهاست که برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی و یا فیزیکی خاک به‌کار می‌رود. روش‌های اصلاح خاک شامل تراکم، تسلیح، زهکشی، افزودن مواد شیمیایی، مصنوعی، طبیعی یا ترکیبی از آنهاست. از اهداف اصلی تثبیت خاک: بهسازی خاک، تسریع در عملیات ساختمانی، بهبود مقاومت و پایداری خاک است. بهبود ویژگی‌های خاک ممکن است بر حسب نیاز به‌منظور افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت در مقابل فرسایش، کاهش نشت و غیره به‌کار رود. خاکستر لجن فاضلاب (SSA)[1]، از موادی است که در سال‌های اخیر برای حصول این هدف مورد توجه قرار گرفته است.

لین و همکاران (Lin *et al*., 2007) تاثیر خاکستر لجن فاضلاب و آهک هیدراته را در یک نسبت ثابت ۱:۴ برای تثبیت خاک رس آزمایش کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده حدود ۳ تا ۷ برابر نمونه تثبیت نشده است. عبدی و چرخیاری (Abdi & Charkhyari, 2009) قابلیت استفاده از سرباره فولادسازی ذوب آهن اصفهان را به‌همراه آهک هیدراته به‌منظور تثبیت خاک‌های رسی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده نشان داده است که مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب هم‌زمان آهک و سرباره، در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک یا سرباره به تنهایی، افزایش قابل توجهی داشته است. چن و لین (Chen & Lin, 2009) تاثیر خاکستر لجن فاضلاب و سیمان را در یک نسبت ثابت ۱:۴ برای تثبیت خاک رس آزمایش کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده حدود ۳ تا ۷ برابر نمونه تثبیت نشده است.

سکر و همکاران (Sakr *et al*., 2009) تاثیر آهک هیدراته را بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و کانی‌شناسی خاک رس شهر ایدکو مصر، که دارای ۱۴ درصد ماده آلی است، بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که خاک رسی نرم با مواد آلی بالای ۱۴ درصد را می‌توان با افزودن ۷ درصد آهک به شکلی رضایت‌بخش تثبیت کرد. ایلماز و سیولکوگلو (Yilmaz & Civelekoglu, 2009) از گچ به‌عنوان ماده‌ای برای درمان تورم و بهبود مقاومت خاک‌های متورم‌شونده استفاده کردند. آزمایش‌هایی شامل حدود اتربرگ و مقاومت فشاری محصور نشده و تورم آزاد روی نمونه‌ها اجرا شد. تغییرات به‌دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که با افزودن ۵ درصد گچ، مقاومت با شیب تند افزایش می‌یابد و مقادیر بالاتر از ۵ درصد از نظر مقاومتی تفاوت معنی‌داری ندارند. دریایی و کاشفی‌پور (Daryaei & Kashefipoor, 2010) از آهک و ماسه بادی به‌عنوان مصالح افزودنی استفاده کردند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که در نسبت اختلاط ۷ درصد آهک و ۱۰ درصد ماسه بادی، ماکزیمم مقاومت تک محوری به‌دست می‌آید. نتایج تحقیقات رادهام و ساهو (Pradhan & Sahoo, 2010) در زمینه تاثیر آهک هیدراته روی استحکام خاک‌های متورم نشان می‌دهد که حداکثر افزایش مقاومت در خاک محتوی ۸ درصد آهک هیدراته و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز حاصل می‌شود. مکارچیان و میرجعفری میانده (Makkarchian & Mirjafari Miandeh, 2010) از آهک، میکروسیلیس، و گچ برای تثبیت خاک رس کائولینیت استفاده کردند. نمودارهای به‌دست آمده از نتایج

1- Sewage Sludge Ash (SSA)

آزمایش‌های تک‌محوری نشان‌دهنده تاثیر مثبت میکروسیلیس بر افزایش مقاومت و کاهش تاثیرات مخرب سولفات بر خاک رس تثبیت شده با آهک است. نتایج بررسی‌های بنده‌زاده و همکارن (Bandehzadeh *et al.*, 2010) درباره تاثیر افزودن خاکستر بادی بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط خاک و آهک بیانگر تاثیر فوق العاده خاکستر بادی بر مقاومت برشی است به‌ویژه آنکه قیمت پایین آن، استفاده از این مخلوط را مقرون به‌صرفه می‌نماید. سکو و همکاران (Seco *et al.*, 2011) موادی گوناگون شامل آهک هیدراته، اکسید منیزیم، خاکستر پوسته برنج، خاکستر احتراق زغال نیروگاه‌های حرارتی، پلیمر و آلومینات پرکننده را با ترکیباتی مختلف به خاک متورم‌شونده اضافه کردند و آن را از لحاظ مقاومت فشاری محصور نشده آزمودند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ۵ درصد خاکستر پوسته برنج به‌همراه ۴ درصد آهک هیدراته بیشترین تاثیر را بر افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک دارد. مایتا (Maaitah, 2012) از نتایج آزمایش‌های خود دریافت که مقاومت خاک مخلوط شده با ۴ درصد آهک هیدراته و ۲ درصد سدیم سیلیکات افزایش یافته است. تمپست و پاندو (Tempest & Pando, 2013) تاثیر خاکستر لجن فاضلاب را برای تثبیت یک خاک رسی بررسی کردند. این محققان پس از اجرای آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و بارگذاری صفحه‌ای به این نتیجه رسیدند که خاکستر لجن فاضلاب می‌تواند باعث بهبود استحکام و سفتی خاک‌هایی شود که با سایر خاکسترها درمان نمی‌شوند. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که در پژوهش‌های گذشته از پوزولان‌های مختلفی برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رسی استفاده شده است. اخیرا نیز ایده استفاده از خاکستر لجن فاضلاب مورد توجه قرار گرفته ولی به‌دلیل تجربه کمتر استفاده از این مواد و روشن نبودن چگونگی تاثیر آنها بر رفتار مکانیکی خاک‌ها، تحقیق در زمینه ابعاد مختلف آن را ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده است.

خاکستر لجن فاضلاب به‌علت دارا بودن ترکیبات سیلیس و آهک می‌تواند به‌عنوان ماده‌ای پوزولانی عمل نماید. ماده سیلیسی یا سیلیسی- آلومینی به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با دماهای معمولی با هیدروکسیدکلسیم واکنش شیمیایی دارد و ترکیباتی را به‌وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند. بنابراین، لازم است قبل از انتخاب خاکستر لجن با آزمایش XRF، میزان سیلیس و سایر ترکیبات موثر آن تعیین شود.

امروزه با توجه به محدودیت منابع آب و لزوم بازچرخانی منابع آب نامتعارف به‌منظور استفاده مجدد در مصارف گوناگون، احداث تصفیه‌خانه‌های آب و تصفیه فاضلاب شهری و صنعتی تولید شده، از ضروریات جدانشدنی مدیریت شهری و بهداشت عمومی است. از سوی دیگر، حجم لجن خشک تولید شده در تصفیه‌خانه‌ها عموما زیاد است و مشکل انباشت لجن خشک در محوطه تصفیه‌خانه‌ها همواره مطرح بوده است. دفع این مواد به‌دلیل رعایت نکات زیست محیطی و محدودیت‌های نگهداری آنها، اهمیت خاصی دارد. از این‌رو مدیریت صحیح لجن تولیدی برای متولیان تصفیه‌خانه‌ها بسیار بااهمیت و اجتناب‌ناپذیر است. اگر تاثیر این مواد بر خواص مهندسی خاک‌ها قابل توجه باشد، ممکن است به‌عنوان جایگزینی مناسب برای انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی به‌کار گرفته شوند. این موضوع در مقایسه با سایر پوزولان‌ها از نظر اقتصادی بسیار مقرون به‌صرفه خواهد بود. بدین صورت که تصفیه‌خانه‌ها ترجیح می‌دهند با سوزاندن پسماندها، حجم آنها را به‌میزان ۹۵ درصد کاهش دهند. بدین ترتیب خاکستر لجن فاضلاب از یک طرف به‌عنوان منبع قرضه مناسب در نزدیکی شهرها در

دسترس خواهد بود و از طرف دیگر کمک بسیار مناسبی در مدیریت پسماند تصفیه خانه‌های شهری خواهد بود. استفاده از لجن فاضلاب برای تثبیت خاک می‌تواند از اهمیت و توجیه فنی و اقتصادی دوچندان برخوردار باشد. از این‌رو در این پژوهش اثر خاکستر لجن فاضلاب بر مقاومت فشاری یک نوع خاک رسی در حالت رطوبت بهینه و اشباع بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

روش کلی در این تحقیق مشتمل است بر؛ تهیه نمونه خاک، اجرای آزمایش‌های شناسایی خاک مورد مطالعه، تهیه و ساخت تیمارهای آزمایشی مختلف و اجرای آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری روی نمونه خاک اصلی و تیمارهای تهیه شده.

آزمایش‌های شناسایی خاک و مواد مصرفی

خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه گلابر واقع در شهرستان ایجرود استان زنجان تهیه شد. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه شرکت مشاوران تک‌آزمای زنجان صورت پذیرفته است.

در جدول ۱، کلیه داده‌های مربوط به حدود آتربرگ، توده ویژه (G_s) و طبقه‌بندی بر اساس سیستم یونیفاید USCS ارایه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

حد روانی (درصد)	حد خمیری (درصد)	دامنه خمیری (درصد)	حد انقباض (درصد)	توده ویژه
۴۶/۷۰	۲۶/۱۰	۲۰/۶۰	۲۰/۴۰	۲/۷۲

بر اساس طبقه‌بندی سیستم یونیفاید، خاک مورد مطالعه خاک رسی با خمیرایی کم (CL) تشخیص داده شد. آزمایش‌هایی برای تعیین کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک مورد مطالعه در آزمایشگاه فیزیک خاک گروه خاکشناسی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی خاک مورد بررسی

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

همچنین، میزان EC این خاک در نسبت ۲:۱ برابر با ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر و میزان ماده آلی خاک مورد بررسی برابر ۰/۰۶ درصد به‌دست آمده است.

در شروع آزمایش، ابتدا کلوخه‌های به‌هم چسبیده خاک با چکش پلاستیکی کوبیده شد تا از هم باز شوند، برای تهیه تیمارها، خاک از الک نمره ۴۰ عبور داده شد. لجن فاضلاب برای تهیه خاکستر، از محل تصفیه‌خانه زنجان تهیه شد. روش تصفیه آب در این تصفیه‌خانه به‌صورت لجن فعال است؛ تصفیه‌خانه دارای سیستم تغلیظ و تثبیت لجن است. لجن فاضلاب ابتدا با حرارت‌دهی از حالت مایع به‌حالت خمیری تبدیل و پس از آن در داخل آون موجود در گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان خشک

شد و سرانجام با حرارت دادن نمونه‌های لجن در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس در کوره به‌مدت یک ساعت و آسیاب کردن کلوخه‌های حاصل، خاکستر لجن تهیه گردید. سوزاندن و خاکستر سازی لجن، حجم آن را در حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد کاهش داد. خاکستر لجن فاضلاب مورد استفاده پس از آسیاب شدن، از الک نمره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر) عبور داده شد.

به‌منظور شناسایی خاک رسی و خاکستر لجن فاضلاب مصرفی، آزمایش روش طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام گرفت. آزمایش اشعه ایکس در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان صورت پذیرفت. نتایج آزمایش اشعه ایکس روی خاک و خاکستر لجن فاضلاب مورد مطالعه در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات خاک و خاکستر لجن فاضلاب 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 (درصد وزنی)	۴۵/۷۰	۱۲/۸۰	۱۱/۹۵	۷/۹۸	۴/۰۷	۲/۹۱	۰/۸۲	۰/۴۵	۰/۱۸	۰/۰۸
غلظت مواد خاکستر لجن (درصد وزنی)	۲۷/۱۹	۸/۳۲	۱۹/۹۴	۵/۵۵	۲/۳۴	۲/۳۵	۰/۷۳	۰/۵۲	۱۱/۴۰	۷/۴۲

تیمارهای آزمایش

هدف اصلی پژوهش، بررسی اثر مقادیر مختلف خاکستر لجن فاضلاب بر مشخصات تراکمی و مقاومت فشاری خاک و تعیین ترکیب مناسب مخلوط است. برای رسیدن به این هدف، درصدهای مختلفی از خاکستر لجن فاضلاب در قالب تیمارهای آزمایشی آماده شد و مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا، خاک رس به‌صورت هواخشک درآمد و مخلوط‌های مورد نظر در نسبت‌های معین تهیه شدند. نسبت‌های خاکستر لجن فاضلاب در مخلوط به‌صورت نسبت وزن خشک آنها به وزن خشک خاک تعریف شد. چهار سطح خاکستر لجن فاضلاب شامل؛ صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شد که به‌ترتیب با اسم اختصاری S0، S5، S10 و S15 مشخص شدند. با در نظر گرفتن ترکیب‌های مختلف از ماده مذکور، ۴ نوع مخلوط و به‌عبارتی دیگر ۴ تیمار آزمایشی تهیه شد.

آزمایش pH: در این پژوهش برای تعیین pH محیط از آزمون استاندارد ASTM D6276-99a استفاده شده است (Anon, 2012). دستگاه pHمتر مورد استفاده در این پژوهش از نوع WTW-pH 7110 بود. ابتدا ۵۰ گرم از هر یک تیمارهای مختلف در ظروف پلاستیکی به‌طور جداگانه ریخته شد، مقدار ۱۰۰ سی‌سی آب به هر یک از ظرف‌ها اضافه و آزمایش pH در نسبت ۲:۱ (خاک:آب) دنبال شد. دمای ایده‌آل مخلوط نیز باید در لحظه اندازه‌گیری pH در سطح ۲۵ درجه سلسیوس نگه‌داشته شود که در صورت تغییرات دما، دستگاه به‌طور خودکار مقدار pH را تصحیح می‌کند.

آزمایش تراکم: مشخصات تراکمی خاک با آزمایش‌های پروکتور استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D 698-07 و تراکم هاروارد بر اساس استاندارد ASTM D 4609-00 با ۳ تکرار تعیین شد. وزن چکش دستگاه تراکم هاروارد ۵۲۸ گرم، ارتفاع سقوط ۱۰/۸سانتی‌متر، و حجم قالب ۶۱/۰۹ سانتی‌متر مکعب است.

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده: 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، چگالی(دانسیته)، دوام و پایداری در برابر عوامل جوی و سایر ویژگی‌ها است. به‌همین دلیل است که در اغلب ارزیابی‌های مربوط به ویژگی‌های مصالح از مقاومت فشاری استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز برای ارزیابی کیفیت خاک تثبیت شده از معیار مقاومت فشاری استفاده شد.

برای ساخت نمونه‌های حاوی ترکیب خاکستر لجن فاضلاب و خاک ابتدا خاکستر لجن فاضلاب با خاک مخلوط و پس از آن آب به اندازه رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم برای هر تیمار، به تدریج اضافه شد. سپس مصالح مخلوط در کیسه نایلونی ریخته شد؛ در حین ساخت، نمونه‌ها بسته نگه‌داشته شد تا رطوبت آن از بین نرود. برای نمونه‌سازی، مصالح در ۵ لایه (طول و قطر نمونه به‌ترتیب نمونه ۷۱/۵۲ و ۳۳/۳۴ میلی‌متر) و با استفاده از چکش مخصوص قالب تراکم هاروارد با حداکثر وزن مخصوص خشک به‌دست آمده از آزمایش تراکم هاروارد، هر لایه با ۱۵ ضربه متراکم گردید. از هر تیمار ۶ نمونه تحت رطوبت بهینه (۳ نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری با رطوبت بهینه و ۳ نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری اشباع) تهیه شد. به‌منظور حصول اطمینان از گیرش کامل مخلوط خاک - خاکستر لجن فاضلاب کلیه نمونه‌ها به‌مدت ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز در کیسه نایلون درون یک کلمن یونولیتی قرار داده شده در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. برای اجرای آزمایش مقاومت فشاری اشباع، بر اساس ASTM D 4609-00، وزن نمونه‌ها پس از طی شدن دوره عمل‌آوری تعیین و یادداشت شد؛ نمونه‌ها سپس به‌مدت ۲ روز درون آب قرار داده شدند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده به شیوه کرنش کنترل شده با سرعت ۱/۱ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌ها، تحت حالت رطوبت بهینه و اشباع، و طبق استاندارد ASTM D 2166-00 اجرا شد. با تقسیم مقدار نیرو بر سطح مقطع اصلاح شده نمونه مقادیر تنش فشاری تعیین، منحنی تغییرات تنش-کرنش رسم و بر اساس آن مقاومت فشاری تعیین شد. بدین ترتیب با توجه به تعداد ۴ تیمار، ۴ سن عمل‌آوری، در ۲ حالت اشباع و با رطوبت بهینه و ۳ تکرار برای هر تیمار در مجموع ۹۶ نمونه آزمایشی تهیه و آزمایش‌های مقاومت فشاری روی آنها دنبال شد.

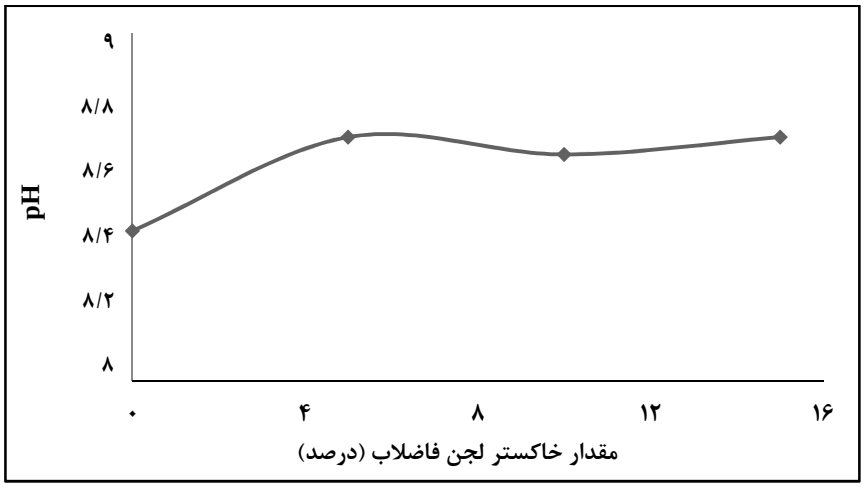
مدول کشسانی تیمارهای مختلف: مدول کشسانی بنا به تعریف عبارت است از شیب قسمت خطی منحنی تنش- کرنش. برای بررسی تغییرات مدول الاستیک در مقابل زمان عمل‌آوری برای مخلوط‌های مختلف خاک رس و خاکستر لجن فاضلاب در دو حالت اشباع و با رطوبت بهینه، ابتدا منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های مختلف رسم شد. با رسم این منحنی‌ها، می‌توان به بررسی تغییرات در خصوصیات شکست و رفتار مقاومتی نمونه‌های مختلف پرداخت.

نتایج و بحث

تغییرات pH

نتایج آزمایش‌های pH مطابق با استاندارد ASTM 6276-99a، در شکل ۱ ارائه شده است.

شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی، مقدار pH افزایش می‌یابد و محیط قلیایی‌تر و در نتیجه شرایط برای واکنش‌های پوزولانی مهیا می‌شود.



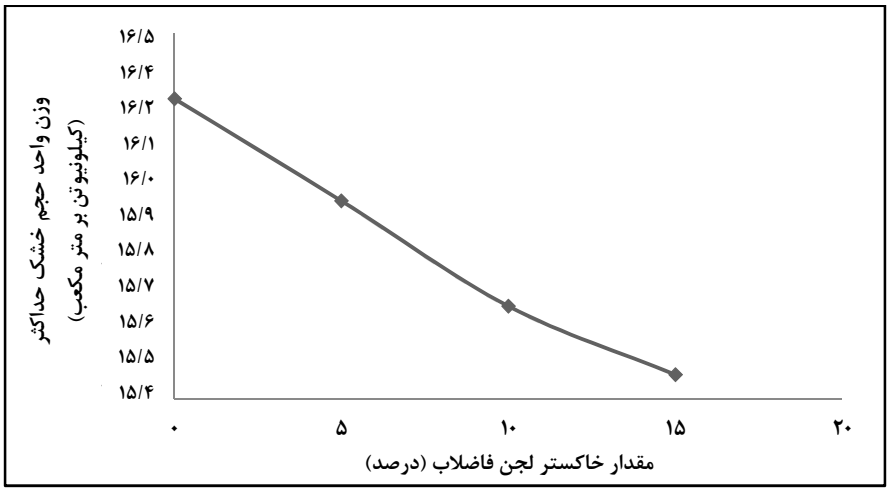
شکل ۱- تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب بر pH

نتایج آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد و تراکم هاروارد برای مخلوط‌های مختلف خاک رس و خاکستر لجن فاضلاب جهت محاسبه رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر برای تیمارهای مختلف در قالب شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که به‌طورکلی افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رس سبب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر می‌شود. با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب به‌دلیل نرمی زیاد آن، جذب آب سطحی توسط ذرات خاکستر لجن فاضلاب افزایش می‌یابد و این عمل باعث افزایش رطوبت بهینه می‌شود. همچنین، با افزایش رطوبت بهینه، آب کم‌کم جای ذرات خاک، آهک و خاکستر لجن فاضلاب را می‌گیرد و به‌دلیل پایین‌تر بودن وزن حجمی آب نسبت به مصالح مصرفی، وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش می‌یابد. در کل، تغییرات رطوبت بهینه بین ۲۰/۸ تا ۲۴ درصد و تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه بین ۱۵/۸ تا ۱۶/۴ کیلونیوتن بر مترمکعب است.

شکل ۲- تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب بر درصد رطوبت بهینه

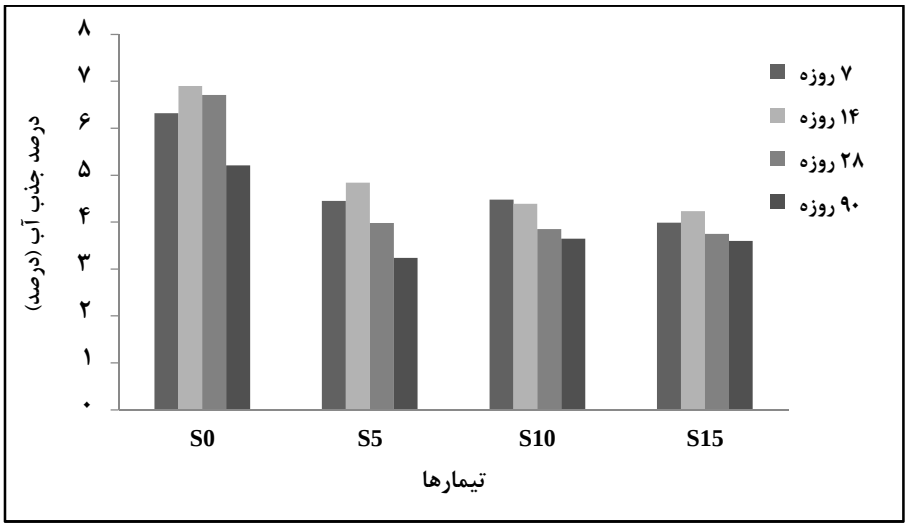


شکل ۳- تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب بر وزن واحد حجم خشک حداکثر

درصد جذب آب

برای به‌دست آوردن درصد جذب آب، بر اساس ASTM D 4609-00، وزن نمونه‌ها پس از طی شدن دوره عمل‌آوری، تعیین و یادداشت گردیده؛ نمونه‌ها پس از آن به‌مدت ۲ روز درون آب قرار داده شدند. پس از این مدت زمان، نمونه‌ها از آب بیرون آورده شدند، سطح آنها با حوله نرم خشک و دوباره وزن آنها یادداشت شد. هر افزایش وزن ناشی از جذب آب به‌عنوان درصدی از وزن خشک نمونه‌ها گزارش گردید. درصد جذب آب برای همه نمونه‌های اشباع ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه محاسبه و به‌صورت میانگین ۳ تکرار، برای تیمارهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.

از دلایل بالا بودن درصد جذب آب نمونه S0 در برابر نمونه‌های دیگر، می‌توان به خاصیت خمیرایی و حد روانی نسبتا زیاد خاک رسی (جدول ۱) و بالا بودن جذب سطحی ذرات رس اشاره کرد.



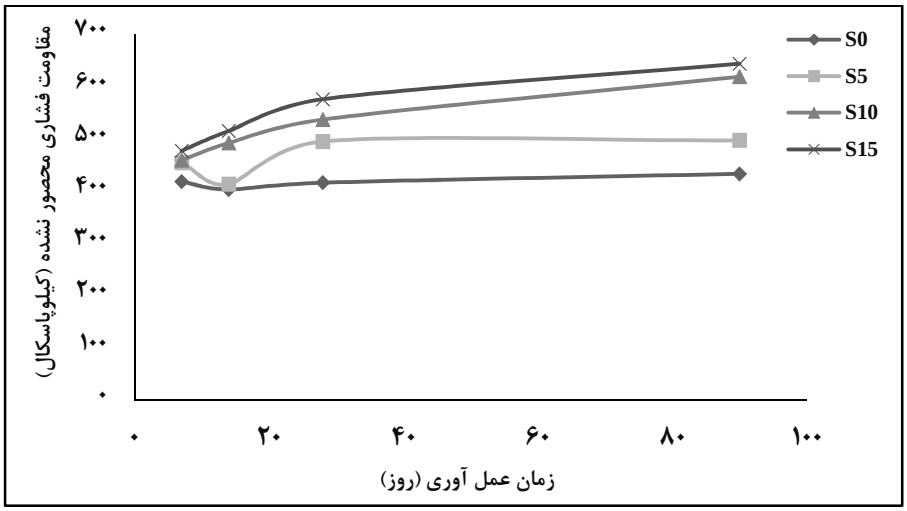
شکل ۴- میانگین جذب آب (درصد)

نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

مقاومت فشاری روی 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، آزمایش شد. چگونگی تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های با حالت رطوبت بهینه، به‌صورت میانگین ۳ تکرار در جدول ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج میانگین ۳ تکرار مقاومت فشاری تحت رطوبت بهینه

تیمار	نام تیمار	مقاومت فشاری محصور نشده (کیلوپاسکال)			
		۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
۱	S0	۴۱۸	۴۰۳	۴۱۶	۴۳۳
۲	S5	۴۵۴	۴۱۳	۴۹۵	۴۹۷
۳	S10	۴۵۹	۴۹۲	۵۳۷	۶۱۹
۴	S15	۴۷۷	۵۱۵	۵۷۶	۶۴۴



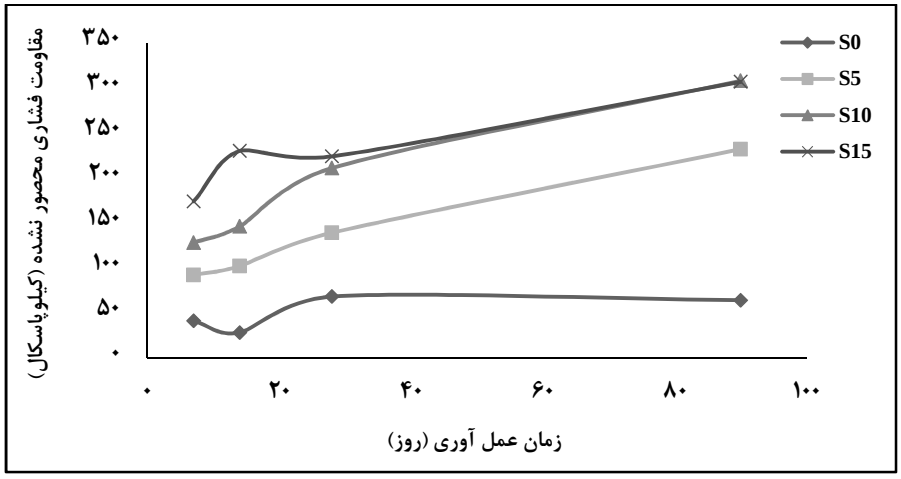
شکل ۵- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری همه نمونه‌ها تحت رطوبت بهینه

چگونگی تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های اشباع به صورت میانگین ۳ تکرار در جدول ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ به‌طورکلی مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب به خاک، مقاومت فشاری محصورنشده افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان افزایش واکنش‌های پوزولانی دانست. واکنش‌های 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)، عموما بعد از ترکیبات سیلیس و آلومین موجود در خاکستر لجن فاضلاب با هیدروکسید کلسیم موجود در آهک به‌دست می‌آید.

جدول ۵- نتایج میانگین ۳ تکرار مقاومت فشاری اشباع

تیمار	اسم تیمار	مقاومت فشاری محصور نشده (کیلوپاسکال)			
		۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
۱	S0	۴۱	۲۸	۳۸	۶۴
۲	S5	۹۲	۱۰۲	۱۳۹	۲۳۲
۳	S10	۱۲۸	۱۴۶	۲۱۱	۳۰۸
۴	S15	۱۷۴	۲۳۰	۲۲۴	۳۰۷



شکل ۶- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری همه نمونه‌ها تحت اشباع

به منظور مقایسه بهتر و جامع‌تر تاثیر خاکستر لجن فاضلاب، زمان عمل‌آوری، و اثر متقابل آنها در دو حالت مقاومت فشاری با رطوبت بهینه و اشباع نمونه‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام گرفت که نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای مقاومت فشاری تحت رطوبت بهینه در جداول ۶ و ۷ و برای مقاومت فشاری اشباع در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است.

در جداول ۶ و ۸ مشاهده می‌شود که بین تکرارها، در سطح ۱ درصد از نظر آماری تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. بین مقاومت‌های فشاری به‌دست آمده بر اثر افزودن خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌دار وجود دارد، بنابراین از نظر آماری تاثیر خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت فشاری به احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار است. نتایج این جداول همچنین نشان می‌دهند که اثر عامل خاکستر لجن فاضلاب × زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک در سطح ۱ درصد نیز معنی‌دار است و بین این عوامل اثر متقابل وجود دارد.

جدول ۷ تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری تمام نمونه‌ها را بر میانگین مقاومت فشاری در حالت رطوبت بهینه نشان می‌دهد. با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری‌که نمونه‌های بدون خاکستر لجن فاضلاب دارای کمترین و نمونه‌های با ۱۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب بیشترین مقدار مقاومت فشاری را دارند. در نمونه‌های تحت رطوبت بهینه، افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی سبب افزایش ۱/۵ برابری مقاومت فشاری می‌شود. بر اساس جدول ۷، با افزایش زمان

عمل‌آوری، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری‌که نمونه‌های ۷ روزه کمترین و نمونه‌های ۹۰ روزه بیشترین مقدار مقاومت فشاری را نشان می‌دهند.

در جدول ۹، تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌های با حالت اشباع نشان داده شده است. با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، مقاومت فشاری به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری‌که نمونه‌های بدون خاکستر لجن فاضلاب کمترین و نمونه‌های با ۱۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب بیشترین مقدار مقاومت فشاری را دارند. افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی سبب افزایش ۴/۸۰ برابری مقاومت فشاری در حالت اشباع می‌شود. بر اساس جدول ۹، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری نیز به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد به‌طوری‌که نمونه‌های ۷ روزه کمترین و نمونه‌های ۹۰ روزه بیشترین مقدار مقاومت فشاری را دارند.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری تحت رطوبت بهینه

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات مقاومت فشاری	آزمون F
تکرار	۲	۴۵/۵۸۳	۰/۰۶۸ ns
خاکستر لجن	۳	۴۴۷۷۶/۴۱۰	۶۶/۸۷۴**
زمان	۳	۲۴۹۱۹/۷۴۳	۳۷/۲۱۸**
خاکستر لجن × زمان	۹	۳۵۲۴/۳۹۱	۵/۲۶۴**
خطای کل	۳۰	۶۶۹/۵۶۱	-

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns نبود اختلاف معنی‌دار

جدول ۷- تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌های تحت رطوبت بهینه

تیمار	q_u (کیلوپاسکال)	تیمار	q_u (کیلوپاسکال)
S15	۵۵۲/۹۲a	D90	۵۴۸/۰۸a
S10	۵۲۶/۷۵b	D28	۵۰۵/۹۲b
S5	۴۶۴/۶۷c	D14	۴۵۵/۶۷c
S0	۴۱۷/۵۸d	D7	۴۵۲/۲۵c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس اثر خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری در حالت اشباع

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات مقاومت فشاری	آزمون F
تکرار	۲	۱۸۰/۳۳۳	۰/۴۵۵ns
خاکستر لجن	۳	۸۹۹۴۳/۰۲۸	۲۶۷/۹۷۶**
زمان	۳	۳۳۶۱۹/۸۰۶	۸۴/۸۴۱**
خاکستر لجن × زمان	۹	۴۳۵۸/۷۵۰	۱۱/۰۰۰**
خطای کل	۳۰	۳۹۶/۲۶۷	-

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns نبود اختلاف معنی‌دار

جدول ۹- تاثیر مقدار خاکستر لجن فاضلاب و زمان عمل‌آوری بر میانگین مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها در حالت اشباع

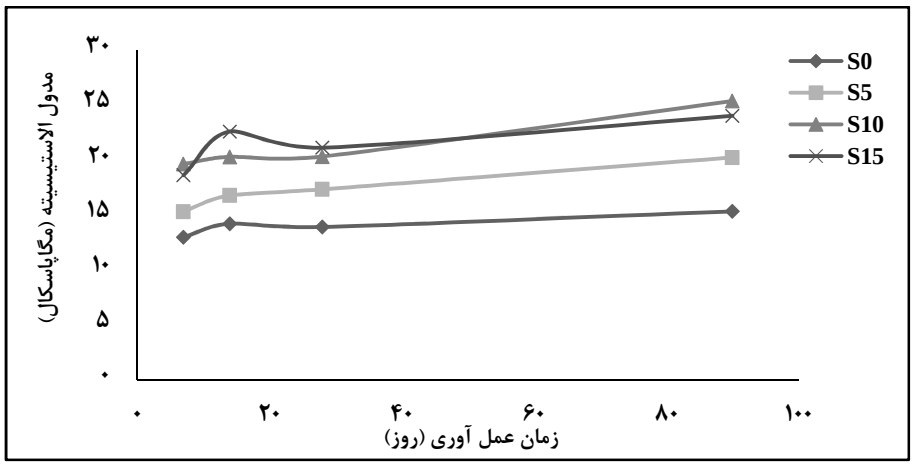
تیمار	q_u (کیلوپاسکال)	تیمار	q_u (کیلوپاسکال)
S15	۲۳۳/۵۸a	**D90**	۲۲۷/۶۷a
S10	۲۱۴/۷۵b	**D28**	۱۶۹/۳۳b
S5	۱۴۱/۰۰c	**D14**	۱۲۶/۴۲c
S0	۴۲/۸۳d	**D7**	۱۰۸/۷۵d

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

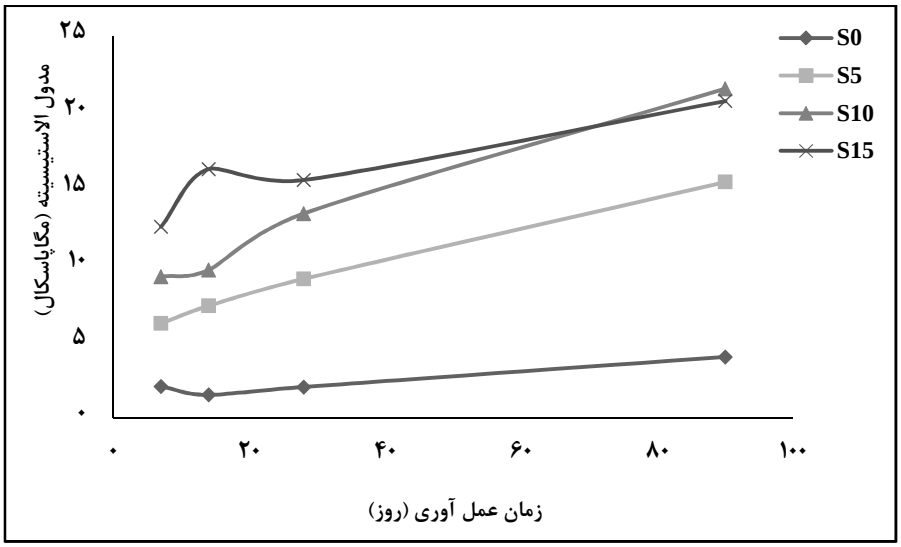
اثر خاکستر لجن فاضلاب بر مدول کشسانی تیمارهای مختلف

برای مخلوط‌های مختلف خاک رس و خاکستر لجن فاضلاب، ابتدا منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های مختلف رسم و پس از آن مدول کشسانی به روش وتری محاسبه شد (Bowles, 1992). چگونگی تغییرات مدول کشسانی کلیه نمونه‌های تحت رطوبت بهینه به‌صورت میانگین ۳ تکرار در شکل ۷ نشان داده شده است.

چگونگی تغییرات مقاومت فشاری کلیه نمونه‌های اشباع به‌صورت میانگین ۳ تکرار در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک، مدول کشسانی افزایش می‌یابد. شکست نمونه‌های S0 و خاک رس و خاکستر لجن فاضلاب به‌صورت نرم اتفاق می‌افتد. البته به مرور زمان رفتار مقاومتی خاک رسِ همراه خاکستر لجن فاضلاب تغییر می‌کند؛ هرچه زمان عمل‌آوری طولانی‌تر شود، به‌علت واکنش‌های هیدراسیون صورت پذیرفته، رفتار تردتر می‌شود. با مقایسه نمودارهای تغییرات مدول کشسانی نمونه‌های مختلف با تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های مختلف تحت رطوبت بهینه می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مدول کشسانی با روند تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده تقریبا مشابه است.



شکل ۷- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول کشسانی همه نمونه‌ها تحت رطوبت بهینه



شکل ۸- تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول کشسانی همه نمونه‌ها در حالت اشباع

نتیجه‌گیری

بر اساس مجموعه بررسی‌ها و آزمایش‌های آزمایشگاهی مرتبط با این پژوهش، موارد زیر قابل استنتاج است:

- نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم استاندارد و تراکم هاروارد نشان می‌دهد که به‌طورکلی افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رس سبب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود.
- با افزایش زمان عمل‌آوری، درصد جذب آب در اکثر نمونه‌ها اندکی کاهش می‌یابد اما با افزایش درصد خاکستر لجن فاضلاب، درصد جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
- در نمونه‌های تحت رطوبت بهینه، افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی سبب افزایش ۱/۵ برابری مقاومت فشاری می‌شود.
- افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک رسی سبب افزایش ۴/۸ برابری مقاومت فشاری در حالت اشباع می‌گردد.
- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب، زمان عمل‌آوری نقش بسزایی در افزایش مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت تحت رطوبت بهینه و اشباع دارد.
- با آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در دو حالت تحت رطوبت بهینه و اشباع پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، مشخص شد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری تحت هر دو رطوبت، در مقدار خاکستر لجن فاضلاب ۱۵ درصد به‌دست می‌آید.
- با تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در حالت اشباع و تحت رطوبت بهینه با استفاده از یک طرح فاکتوریلی، مشخص شد که با افزایش مقدار خاکستر لجن فاضلاب مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد.
- با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به خاک، مدول کشسانی افزایش می‌یابد. شکست نمونه‌های S0 و خاک رس و خاکستر لجن فاضلاب به‌صورت نرم اتفاق می‌افتد. البته به مرور زمان رفتار مقاومتی خاک رس به همراه خاکستر لجن فاضلاب تغییر می‌کند بدین معنا که هرچه زمان عمل‌آوری طولانی‌تر شود، به‌علت واکنش‌های

هیدراسیون صورت پذیرفته، رفتار تردتر خواهد شد. با مقایسه نمودارهای تغییرات مدول کشسانی نمونه‌های مختلف با تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های مختلف در حالت رطوبت بهینه می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مدول کشسانی با روند تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده تقریبا مشابه است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیریت و کارکنان شرکت مهندسین مشاور تک آزمای زنجان، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، و شرکت صنایع مس نوین به خاطر مساعدت و ارائه امکانات لازم جهت اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Abdi, M. and Charkhyari, F. 2009. Evaluation of BOS slag to increase the strength of fine soils. Proceeding of the 10th International Congress on Civil Engineering. Shiraz. Iran. (in Farsi)

Anon. 2012. Annual Book of Standards. American Society for Testing and Materials (ASTM).

Bandehzadeh, A., Davoodi, M. H. and Astaneh, M. F. 2010. Effect of mixture of lime and fly ash on soil physical and mechanical properties of fine-grained. Proceeding of the 2nd National Seminar on Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Networks. May. 13. Karaj. Iran. (in Farsi)

Bowles, J. E. 1992. Engineering Properties of Soils and Their Measurement. 4th Ed. McGraw-Hill, New York.

Chen, L. and Lin, D. F. 2009. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. J. Hazard. Mater. 162, 321-327.

Daryaei, M. and Kashefipoor, M. 2010. Evaluation of Changes in the clay core strength improved by adding lime and fly sand. Proceeding of the 2nd National Seminar on Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Networks. May. 13. Karaj. Iran. (in Farsi)

Lin, D. F., Lin, K. L., Hung, M. J. and Luo, H. L. 2007. Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. J. Hazard. Mater. 145, 58-64.

Maaitah. O. 2012. Soil stabilization by chemical agent. Geotech. Geol. Eng. 30, 1345-1356.

Makkarchian, M. and Mirjafari Miandeh, Y. 2010. Effects of soil moisture and micro silica on the uniaxial resistance stabilized with lime in the presence of sulfate. 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics. Tehran. Iran. (in Farsi)

Pradhan, P. K. and Sahoo, J. D. P. 2010. Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil. Geotech. Geol. Eng. 28, 889-897.

Sakr, M. A., Shahin, M. A. and Metwally, Y. M. 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. Geotech. Geol. Eng. 27, 105-113.

Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. and García, B. 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. Appl. Clay Sci. 51, 348-352.

Tempest, Q. B. and Pando, M. A. 2013. Characterization and demonstration of reuse applications of sewage sludge ash. Int. J. Geomate. 4, 552-559.

Yilmaz, I. and Civelekoglu, B. 2009. Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. Appl. Clay Sci. 44, 166-172.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.15/No.4/2015/P:93-108

Application 0f Sewage Sludge Ash to Improve Engineering Properties of Clay Soil in Water Structures

K. Norouzian, N. Abbasi* and J. Abedi-Koupai

* Corresponding author: Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, Karaj, Iran. Email: nader_iaeri@yahoo.com
Received: 10 September 2014, Accepted: 10 January 2015

Different additives have been considered to improve stabilization of the engineering properties of fine-grained soil. The present study investigated the effect of the addition of sewage sludge ash on the compressive strength of clay soil at optimum moisture content and under saturated conditions. The four treatments tested were the addition of 0%, 5%, 10% and 15% sewage sludge ash to clayey soil. The compaction characteristics of the treatments were determined using a Harvard compaction test. Then 24 specimens from each treatment were prepared at curing times of 7, 14, 28 and 90 days. Testing included three replications for a total of 96 specimens created using a Harvard compaction mold. The specimens were subjected to unconfined compressive strength tests. The results showed that increasing the sewage sludge ash content of the soil decreased the maximum dry unit weight and increased the optimum moisture content. The compressive strength of the soil treated with sewage sludge ash increased for both the optimum moisture and saturated conditions. It was found that the compressive strength of the treated soil significantly increased as the curing time increased.

Keywords: Clayey Soil, Harvard Compaction, Sewage Sludge Ash, Standard Compaction, Unconfined Compressive Strength