



ارزیابی تثبیت خاک رس با افزودنی لیگنوسولفونات کلسیم، با در نظر گرفتن روش‌های مختلف اختلاط

امیرسعید گیاهی، مرتضی جیریایی شراهی*، بایرامعلی محمدنژاد

گروه عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک
خاک رس
لیگنوسولفونات کلسیم
زیست سازگار
روش اختلاط

خلاصه: تثبیت خاک، یکی از مهم‌ترین روش‌های بهسازی خاک‌های ضعیف در مهندسی ژئوتکنیک است. تثبیت‌کننده‌های سنتی مثل سیمان و آهک از دیرباز تاکنون مورد استفاده و تحقیق قرار گرفته‌اند اما استفاده از این مواد، مشکلات زیست محیطی در پی دارد. لیگنوسولفونات کلسیم یک پلیمر طبیعی است که از پسماند صنعت کاغذ و تمبرسازی تولید می‌شود و طبق آمارهای دولتی سالانه ۵۰ میلیون تن از آن دور ریخته می‌شود. این پودر قهوه‌ای رنگ، سمی و خورنده نیست و برای سلامت انسان و محیط زیست خطر آفرین نمی‌باشد. در این پژوهش اثر افزودن درصدهای مختلف از لیگنو بر حدود اتبرگ، خصوصیات تراکمی و مقاومت تک محوری خاک رس مورد بررسی قرار می‌گیرد و هم‌چنین اثر افزودن لیگنو با روش‌های مختلف اختلاط بر مقاومت خاک و مورفولوژی خاک بررسی می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن لیگنو به طور کلی باعث بهبود خواص مکانیکی خاک می‌شود، شاخص خمیری خاک (PI) کاهش، مقاومت و شکل‌پذیری خاک افزایش می‌یابد. برای خاک مورد استفاده در این پژوهش، درصد بهینه از افزودنی لیگنوسولفونات کلسیم ۱٪ وزن خشک خاک تعیین شد که توانست پس از ۲۸ روز عمل آوری مقاومت خاک را از ۳۲۲ به ۸۲۸ کیلوپاسکال (۲/۵ برابر افزایش) برساند. هم‌چنین نحوه‌ی اختلاط نیز بر مقاومت نمونه‌ها تاثیر به‌سزایی دارد. در تثبیت خاک توزیع مناسب افزودنی در بین ذرات خاک می‌تواند بر خصوصیات مهندسی خاک اثر گذار باشد به عنوان مثال نمونه‌های مخلوط شده به روش‌های مختلف، مقاومت حداکثری‌شان تا تا ۸۰٪ افزایش یافته است.

۱- مقدمه

۱۵.

تثبیت خاک، به طور گسترده‌ای برای بهسازی خاک‌های ضعیف به خصوص برای راهسازی به کار می‌رود. محققین بسیاری در مورد خواص تثبیت‌کننده‌های سنتی نظیر سیمان، آهک، خاکستر آتشفشانی، ضایعات سنگی و... تحقیق کرده‌اند و نشان داده‌اند که افزودن این مواد به خاک باعث افزایش مقاومت و دوام خاک‌های رسی و کاهش پتانسیل تورم آن‌ها می‌شود [۱، ۶-۸]. مواد مذکور در پروژه‌های راهسازی، به منظور آماده سازی بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. اما استفاده از آن‌ها در سال‌های اخیر به دلیل مشکلاتی که در حوزه سلامت و محیط زیست ایجاد می‌کنند، محدود شده‌است. به‌عنوان مثال این مواد pH خاک و آب‌های زیر زمینی را افزایش

در سال‌های اخیر رشد جمعیت در جهان نیاز به ساخت و توسعه‌ی زیرساخت‌ها را افزایش داده است. بستر مناسب، لازمه‌ی توسعه‌ی زیر ساخت است. خاک‌های رسی که در سرتاسر زمین گسترده شده‌اند مقاومت کمی دارند و در صورت وجود رطوبت، متورم شده و در اثر بارهای وارده فشرده شده و نشست می‌کنند. ساخت راه، راه‌آهن، خاکریز و دیگر سازه‌های خاکی روی بستر رسی می‌تواند مشکلاتی نظیر نشست نامتقارن، جابه جایی جانبی و ناپایداری را ایجاد کند. برای حل مشکل مذکور باید خاک بستر بهسازی شود. یکی از بهترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌ها برای بهسازی، تثبیت خاک است [۱-

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jiryaei@qut.ac.ir



می‌دهند که باعث خوردگی سازه‌های مدفون در خاک و کاهش عمر مفید آنها می‌گردد. تثبیت خاک با این مواد از نظر مکانیکی باعث می‌شود خاک رفتاری شکننده از خود نشان دهد که در مواقعی که خاک تحت بارهای دینامیکی قرار دارد می‌تواند خطر آفرین باشد. در حین فرایند تولید این تثبیت کننده‌ها علاوه بر اینکه انرژی بسیاری مصرف می‌شود، مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای در جو رها می‌شوند که آسیب‌های زیست‌محیطی قابل توجهی را به دنبال دارد [۴، ۱۰، ۱۱].

به‌منظور حل مشکلات تثبیت کننده‌های سنتی، باید به دنبال مواد و مصالحی بود که خصوصیات فنی خاک را بهبود ببخشد [۱۲-۱۴]. پژوهشگران بسیاری افزودنی‌های شیمیایی را مورد ارزیابی قرار دادند و به‌رغم اثر مثبت آن روی خصوصیات مهندسی خاک به دلیل قیمت بالا توجیه اقتصادی نداشته و نمی‌توان به‌عنوان جایگزین تثبیت کننده‌های سنتی، از آن‌ها استفاده کرد [۱۵، ۱۶]. به دلیل گسترش صنایع مختلف در سال‌های اخیر، افزایش دور ریزهای صنعتی و پسماندها در حال تبدیل شدن به یکی از معضلات زیست محیطی است. بسیاری از محققین سعی بر آن دارند تا با استفاده از پسماندها، خاک را بهسازی کنند. لیگنوسولفونات کلسیم پسماند صنعت کاغذ و تمبر سازی طی یک فرایند صنعتی بدست می‌آید و طبق آمارهای موجود سالانه ۵۰ میلیون تن از آن دور ریخته می‌شود [۱۰]. این بدین معناست که تثبیت خاک با این ماده شیمیایی نه تنها خاک را آلوده نمی‌کند و مشکلات زیست محیطی تثبیت کننده‌های سنتی را ندارد، بلکه مقدار زیادی از پسماند صنعتی به کار گرفته شده و آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌شود [۱۷].

در سال‌های اخیر محققین زیادی نشان داده‌اند که افزودن لیگنوسولفونات کلسیم به خاک اثر مثبتی بر مقاومت خاک دارد. بیشتر تحقیقات روی خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی انجام شده‌است [۱۳، ۱۸-۲۱]. همچنین چن و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۴ به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های بهسازی شده با لیگنوسولفونات کلسیم رفتار شکل‌پذیر و دینامیکی مطلوبی از خود نشان داده‌اند و برای سلامتی انسان و محیط زیست خطر آفرین نمی‌باشند [۲۲، ۲۳]. مکانیسم تثبیت خاک در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم تشکیل پیوندهای هیدروژنی و کووالانسی است و در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم به خاک رس پتانسیل تورم خاک رس کاهش می‌یابد [۲۴].

۲۵]. گنبدی و نوروزی در پژوهشی با انجام آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های تثبیت شده و نشده که تحت سیکل‌های ذوب-انجماد قرار گرفته بودند و بررسی تغییرات مقاومت برشی نشان داد که استفاده از این ماده دوام خاک را افزایش می‌دهد [۲۶، ۲۷]. در یک پژوهش میدانی، تثبیت خاک با لیگنوسولفونات کلسیم و آهک مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد که می‌توان تحت شرایطی لیگنوسولفونات کلسیم را به‌عنوان تثبیت کننده در صحرا جایگزین آهک نمود [۲۸]. عمده تحقیقات در مورد تثبیت لیگنوسولفونات کلسیم تا کنون روی نمونه‌های خاک‌های سیلتی و رس با شاخص خمیری بالا بوده است و تحقیقات اندکی روی نمونه‌های خاک با شاخص خمیری پایین صورت گرفته است [۲۶، ۲۸، ۲۹]. ضمناً تاکنون، اثر روش‌های مختلف اختلاط لیگنوسولفونات کلسیم با خاک رس، بر مقاومت بررسی نشده‌است. در تحقیق حاضر اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم بر خاک (CL) با روش‌های مختلف اختلاط بررسی می‌شود و تغییرات حدود اتربرگ، رطوبت بهینه، مقاومت تک محوری و مورفولوژی خاک با اضافه شدن لیگنوسولفونات کلسیم ارزیابی می‌گردد.

۲- مواد و مصالح

۲-۱ خاک رس

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از قسمت جنوبی استان تهران با مختصات $35^{\circ}34'22''$ شمالی و $51^{\circ}23'30''$ شرقی و از عمق ۵۰ سانتی‌متر زمین نمونه برداری شد. پس از خشک کردن خاک طبیعی در دمای اتاق و انجام آزمایش‌های دانه‌بندی (ASTM C136)، تراکم استاندارد (ASTM D4718) و حدود اتربرگ (ASTM D427) طبق طبقه بندی متحد، خاک از نوع رس با شاخص خمیری پایین طبقه بندی گردید.

حد خمیری این خاک ۱۳/۹ و حد روانی آن ۲۴/۳ می‌باشد. شاخص خمیری این خاک ۱۰/۴ به‌دست آمد که به عنوان خاک رس با شاخص خمیری پایین طبقه بندی می‌شود. نتایج دیگر آزمایش‌های شناسایی انجام شده در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

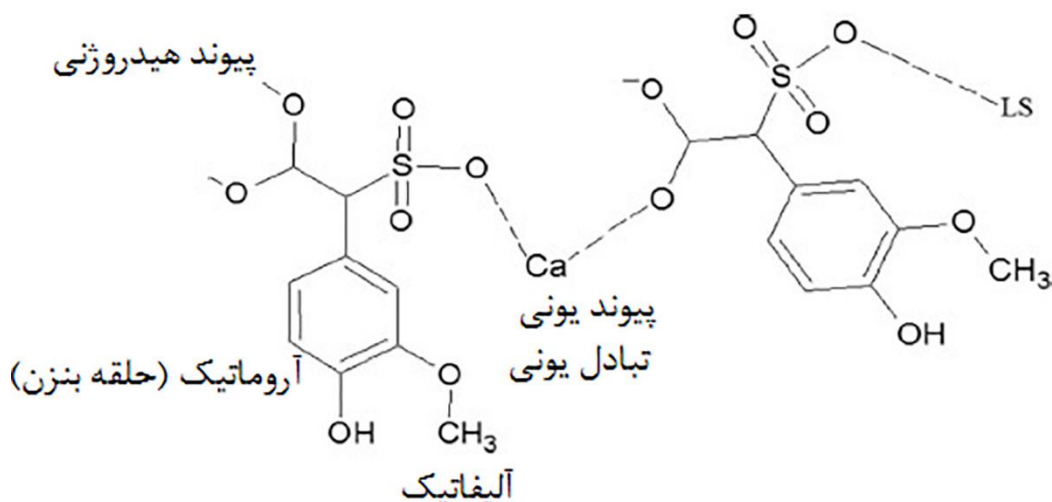
۲-۲ لیگنوسولفونات کلسیم

لیگنوسولفونات کلسیم مورد استفاده، دور ریز و پسماند صنعت کاغذ و تمبر سازی است که طی فرآیند صنعتی پس از جداسازی

جدول ۱. ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Characteristics and physical properties of the soil used in this study

ویژگی/خصوصیت خاک	نام/مقدار
نام گذاری طبق سیستم متحد	CL
چگالی جامد (Gs)	۲/۷۱
رطوبت طبیعی خاک	۴٪
حد روانی (LL)	۲۴/۳٪
حد خمیری (PL)	۱۳/۹
شاخص خمیری (PI)	۱۰/۴
رطوبت بهینه	۱۶/۵
وزن مخصوص حداکثر متناظر با رطوبت بهینه (g/cm ^۳)	۱/۷۴



شکل ۱. ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات کلسیم [۲۵]

Fig. 1. Chemical structure of calcium lignosulfonate

پلیمرهای آمورف (غیر کریستال) که شامل قسمت آلیفاتیک (هیدرو کربن‌های غیر آمورف) و قسمت آروماتیک (ترکیبات حلقوی بنزن) است. ساختار شیمیایی نشان می‌دهد که در مجموع پتانسیل یونی لیگنو سولفونات منفی است بنابراین می‌تواند با کاتیونهای خاک رس پیوند یونی (یا تبادل یونی) تشکیل دهد همین امر مقاومت خاک رس را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر از طریق اکسیژن با مولکول آب پیوند هیدروژنی تشکیل می‌دهد که پیوند هیدروژنی شکل‌پذیری و انعطاف خاک را در برابر بارهای وارده بشدت بالا می‌برد.

تکه‌های چوب به دست می‌آید. ا اندازه و شکل ظاهری پودر لیگنوسولفونات کلسیم شباهت زیادی به سیمان دارد و اندازه دانه‌های آن در حدود ۱۰ الی ۲۵ میکرون است. این پلیمر طبیعی، ترکیبی از گروه‌های آب دوست شامل فنلیک هیدروکسیل و سولفونات و گروه‌های آب گریز شامل کربن است. لیگنوسولفونات بسته به نوع صنعت کاغذ یا چوب یک ترکیب آلی حلقوی بنزن با پایه کلسیم، یا آلومینیوم یا منیزیم استخراج میشود. در این تحقیق لیگنوسولفونات با پایه کلسیم در نظر گرفته شده است. لیگنوسولفونات ترکیبی از

۲-۳ آزمایش پراکتور استاندارد

به منظور تعیین اثر افزودنی بر خصوصیات تراکم پذیری خاک، آزمایش تراکم استاندارد، طبق استاندارد ASTM D4718 انجام شد. بر اساس نظریه پراکتور عوامل موثر در تراکم خاک‌های ریزدانه، رطوبت، انرژی تراکم، تورم پذیری خاک و نوع ریزدانه می‌باشند. در حقیقت هدف از انجام این آزمایش بررسی تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک در اثر افزودن لیگنو بود. بدین منظور ابتدا خاک تثبیت نشده مورد آزمایش قرار گرفت و سپس نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف لیگنو سولفونات کلسیم مورد تست قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های تثبیت شده مقدار از پیش تعیین شده از افزودنی با مقدار آب مورد نیاز برای رساندن نمونه به درصد رطوبت تعیین شده، اضافه شده و محلول حاصله به خاک افزوده و به مدت ۱۰ دقیقه برای رسیدن به نمونه ای همگن مخلوط شد. لازم به ذکر است که در عمل بلافاصله بعد از اختلاط، عملیات تراکم و غلتک انجام می‌شود بنابراین، آزمایش تراکم نیز بلافاصله پس از مخلوط کردن خاک و محلول آب و لیگنو سولفونات کلسیم انجام شده است.

۳-۳ آزمایش مقاومت تک محوری

هدف اصلی از تثبیت خاک‌های ضعیف، افزایش مقاومت برشی و دوام آن‌هاست. به منظور تعیین اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم بر مقاومت برشی تست تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 بر روی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزن خشک خاک و دوره عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شد. برای آماده سازی نمونه‌های تثبیت شده از قالبی با قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر استفاده شد. با استفاده از وزن مخصوص حداکثر مرطوب به دست آمده از آزمایش تراکم و حجم قالب، وزن مخلوط خاک، آب و لیگنو که باید پس از اختلاط در قالب کوبیده شوند به دست می‌آید. آب مورد نیاز با توجه به رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم و مقدار لیگنو سولفونات کلسیم با توجه به درصد مورد نظر به راحتی محاسبه و مقداری از خاک که باید در قالب کوبیده شود تا تراکم به حداکثر وزن مخصوص برسد محاسبه می‌شود. سپس از اختلاط خاک با محلول لیگنو سولفونات کلسیم-آب، نمونه در حداکثر وزن مخصوص خاک که از آزمایش تراکم به دست آمده



شکل ۲. تثبیت کننده غیر سنتی لیگنوسولفونات کلسیم
Fig. 2. Non-traditional calcium lignosulfonate stabilizer

با توجه به ساختار شیمیایی لیگنو سولفونات کلسیم که در شکل ۱ نشان داده شده است، با حضور کاتیون‌هایی نظیر کلسیم، در اثر تبادل یونی ضخامت لایه آب دوگانه در سطح ذرات رس کاهش می‌یابد و پیوندهای ضعیفی نیز شکل می‌گیرد. تبادل یونی در کنار پیوند کوالانسی و هیدروژنی مکانیسم تثبیت خاک در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم را تشکیل می‌دهند [۲۵]. این ماده دوست دار محیط زیست، پودری قهوه ای رنگ و قابل حل در آب است و کار کردن با آن به سلامت انسان آسیب نمی‌رساند. یک نمونه از لیگنو سولفونات کلسیم در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی

۱-۳ حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D427 به منظور بررسی تغییرات شاخص خمیری، در اثر افزودن لیگنو روی نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده انجام شد. در این آزمایش به نمونه‌های خاک ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزن خشک خاک، افزودنی اضافه و به خوبی مخلوط گردید پس از آن نمونه‌ها در اتاقی با دمای کنترل شده و حفظ رطوبت به مدت یک ساعت عمل آوری شدند سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است که LS ابتدا با آب مخلوط شده و سپس محلول حاصله به خاک اضافه گردید.



شکل ۳. آماده سازی نمونه‌های تک محوری، تثبیت شده با درصد‌های مختلف از افزودنی

Fig. 3. Preparation of UCS samples, stabilized with different percentages of additives

اختلاط به دانه‌های بیشتری از خاک برسد پیوندها و واکنش‌های بیشتری حاصل خواهد شد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده‌است در این پژوهش با توجه به اینکه حالت لیگنو سولفونات کلسیم پودر است، سه حالت متفاوت از اختلاط که قابلیت اجرایی در صحرا دارند مورد بررسی قرار گرفت.

- شیوه اختلاط ۱: (پودر لیگنین + آب) + خاک
- شیوه اختلاط ۲: (پودر لیگنین + خاک) + آب
- شیوه اختلاط ۳: (خاک + آب) + پودر لیگنین

نمونه‌های تک محوری مطابق آنچه شرح داده شد با دوره‌های عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه با درصد بهینه از افزودنی، ساخته شدند تا پس از انجام آزمایش تک محوری اثر نحوه اختلاط بر مقاومت مشخص گردد. تمامی نمونه‌ها پس از خارج سازی از قالب، با پلاستیک دو لایه محصور شدند تا تنها متغیر این تست نحوه اختلاط باشد. لازم به ذکر است که تمام نمونه‌ها برای آزمایش حدود اتربرگ و تراکم استاندارد و یافتن مقدار بهینه افزودنی، با استفاده از نحوه اختلاط ۱ ساخته شدند زیرا محققین قبلی نیز از این روش اختلاط استفاده کرده بودند.

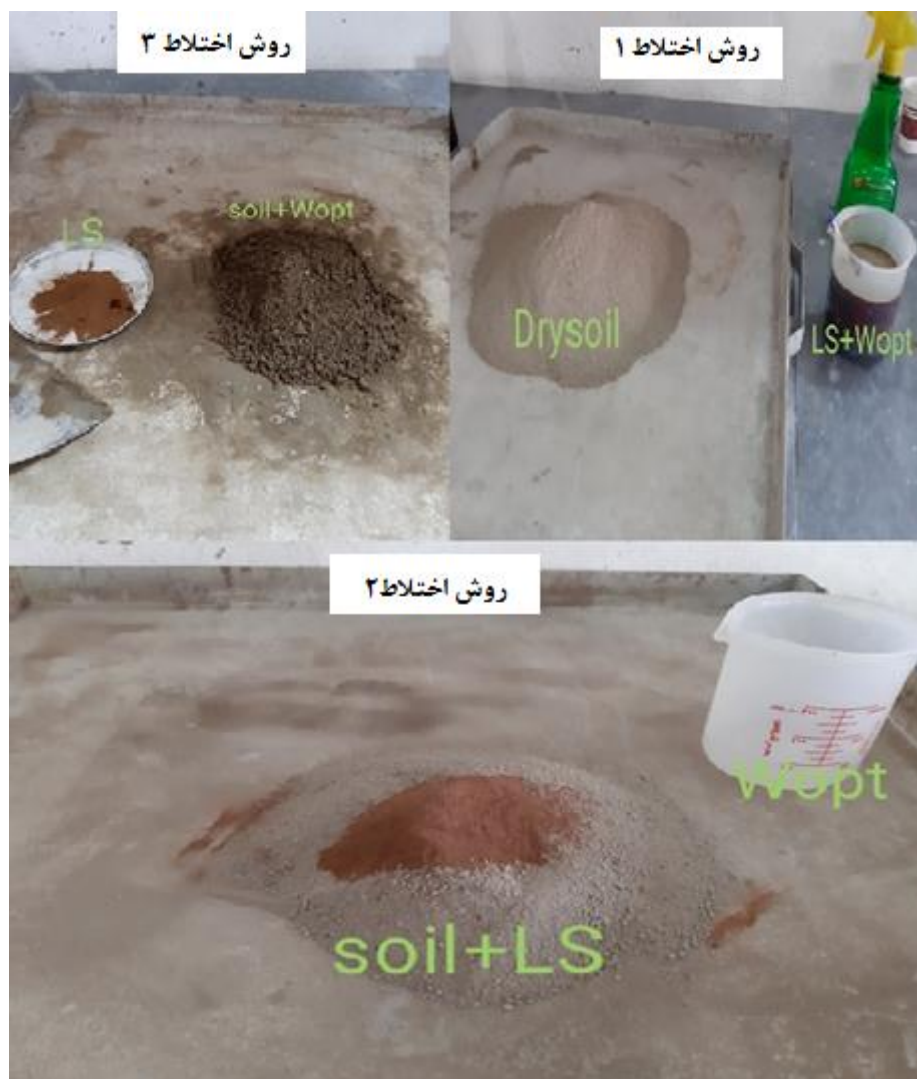
بود، ساخته شد. در همین راستا خاک در ۵ لایه ی یکسان ریخته شد و بصورت استاتیکی متراکم گردید. نحوه ی تراکم نمونه‌های تک محوری به شیوه توصیه شده در پژوهش‌های پیشین در ۵ لایه یکسان و کوبش استاتیکی با وزنه به تعداد ۲۵ ضربه برای هر لایه انجام شد. وزن واحد حجم خشک نمونه‌های تک محوری نیز مطابق با حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل از آزمایش تراکم استاندارد است. نیرو یا فشار استاتیکی بهترین روش تراکم خاکهای چسبنده (سیلت و رس) است. در صحرا خاکهای ریزدانه با غلتک پاچه بزی یا با غلتک لاستیکی هم انجام می‌شود. نیروی ویریه مناسب خاکهای ریزدانه نیست. لازم به ذکر است پس از کوبیدن هر لایه سطح آن به اندازه ۳ میلی متر خراشیده شد تا لایه‌ها از هم جدا نباشند و نمونه‌ای همگن به دست بیاید. این روش که برای دستیابی به نمونه‌ای همگن استفاده می‌شود توسط دیگر محققین نیز توصیه شده‌است [۲۶، ۳۰]. پس از خارج سازی نمونه‌ها از قالب تک محوری، با پلاستیک دو لایه محصور شده و در اتاقی با دمای کنترل شده به مدت ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز عمل آوری شدند.

۳-۴ روش‌های مختلف اختلاط

در تثبیت خاک به ویژه تثبیت شیمیایی خاک‌ها، نحوه اختلاط افزودنی با خاک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. فارغ از نوع تثبیت کننده شیمیایی هر چه توزیع افزودنی مناسب‌تر باشد و در فرآیند

۳-۵ تحلیل مورفولوژی با استفاده از تست SEM

آزمون میکروسکوپ الکترونی (SEM) بر روی ۴ نمونه تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد بهینه افزودنی که به شیوه‌های مختلف



شکل ۴. روش‌های مختلف اختلاط لیگنو سولفونات کلسیم و خاک
 Fig. 4. Different methods of mixing soil and lignosulfonate

۴- نتایج و تحلیل

۴-۱ اثر لیگنوسولفونات کلسیم بر حدود اتربرگ

شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی اثر لیگنو سولفونات کلسیم بر حد خمیری، حد روانی، و شاخص خمیری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم، حد خمیری و حد روانی هر دو افزایش می‌یابند ولی شیب افزایش حد خمیری (PL) بیشتر از حد روانی (LL) است به همین دلیل شاخص خمیری (PI) کاهش می‌یابد. بیشترین نرخ کاهش شاخص خمیری در نمونه بهسازی شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم رخ داد که از ۱۰/۴ در نمونه تثبیت نشده به ۸/۰۲ در نمونه شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم (۲۰٪ کاهش) رسید. علت افزایش حد خمیری و حد روانی در نمونه‌های بهسازی

مخلوط شده و پس از ۲۸ روز عمل آوری در پلاستیک دو لایه محصور شده، انجام شد. در شکل ۵ تصویری از مراحل آماده سازی نمونه‌ها برای تست (SEM) نشان داده شده‌است. در شکل ۵، سه نمونه تثبیت شده با درصد بهینه از افزودنی که به شیوه اختلاط ۱، ۲ و ۳ تثبیت شده بودند و یک نمونه خاک طبیعی قابل مشاهده است.

۳-۶ جمع‌بندی آماده سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده

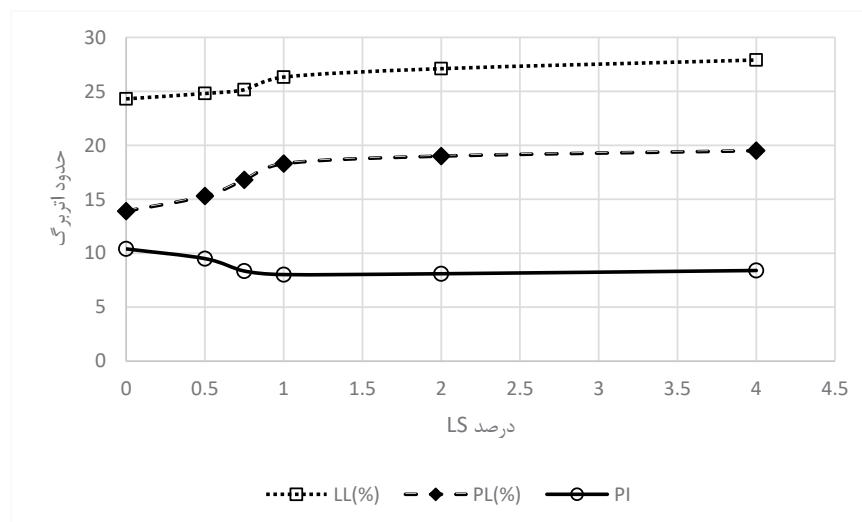
در ادامه خلاصه‌ای از نحوه‌ی آماده سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ آورده شده‌است. به‌عنوان مثال برای آزمایش حدود اتربرگ، درصد‌های ذکر شده از افزودنی به روش ۱ مخلوط شده و سپس آزمایش حدود اتربرگ انجام شد.



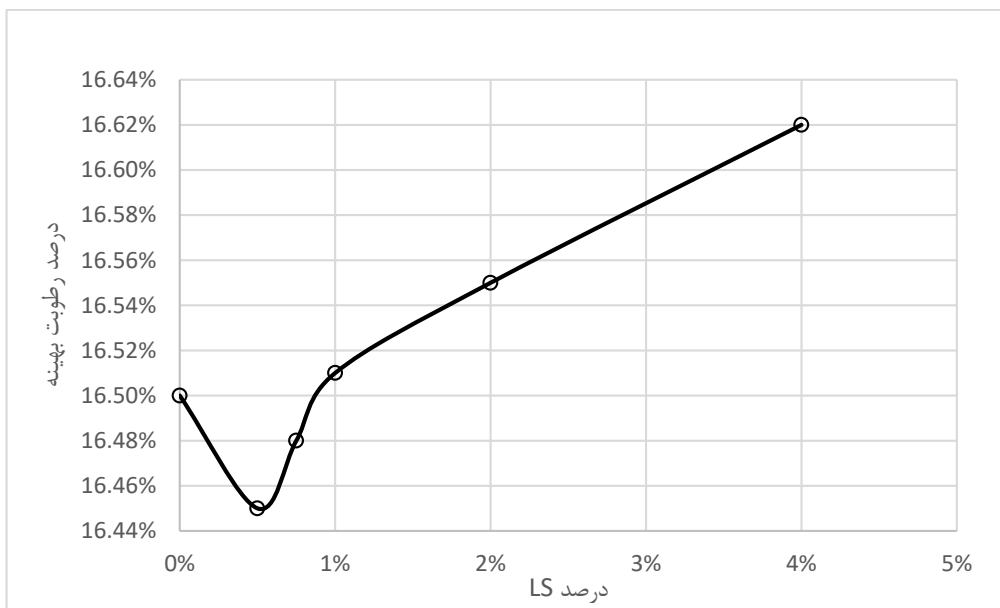
شکل ۵. آماده سازی نمونه‌های تثبیت شده با درصد بهینه از افزودنی به منظور تست SEM
 Fig. 5. Preparation of stabilized samples with optimal percentage of additives for SEM testing

جدول ۲. خلاصه آماده سازی نمونه‌ها
 Table 2. Summary of sample preparation

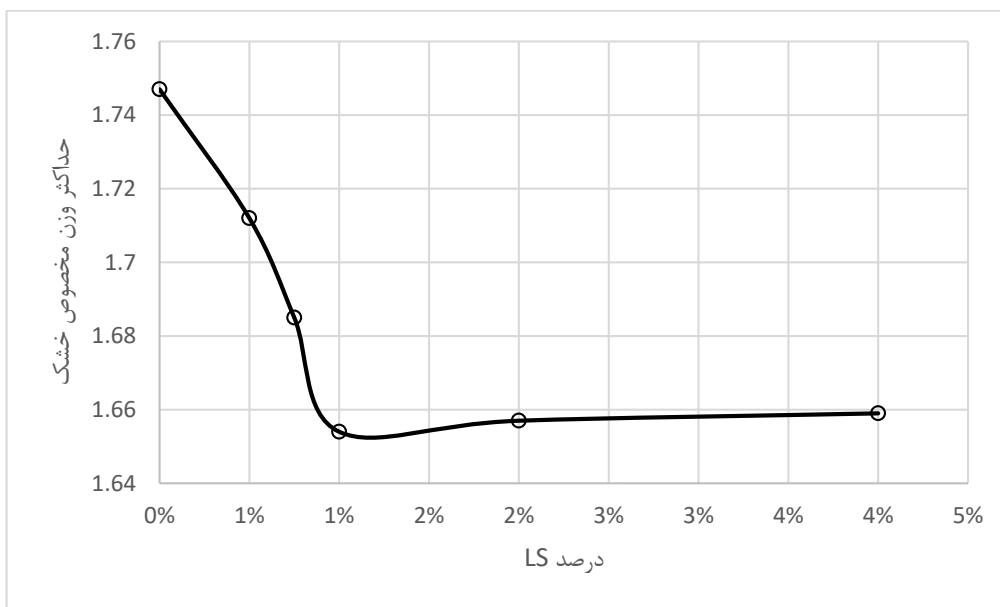
روش اختلاط	زمان عمل آوری (روز)	درصد لیگنو سولفونات کلسیم	آزمایش
روش اختلاط ۱	۱	۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲ و ۴	حدود اتربرگ
روش اختلاط ۱	۱	۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲ و ۴	تراکم استاندارد
روش اختلاط ۱	۷ و ۱۴ و ۲۸	۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۲ و ۴	آزمایش تک محوری به منظور تعیین درصد بهینه
روش اختلاط ۳،۲،۱	۷ و ۱۴ و ۲۸	درصد بهینه	اثر روش‌های اختلاط بر مقاومت تک محوری
روش اختلاط ۳،۲،۱	۲۸	درصد بهینه	SEM



شکل ۶. اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم بر حدود اتربرگ
 Fig. 6. The effect of adding LS on Atterberg limits



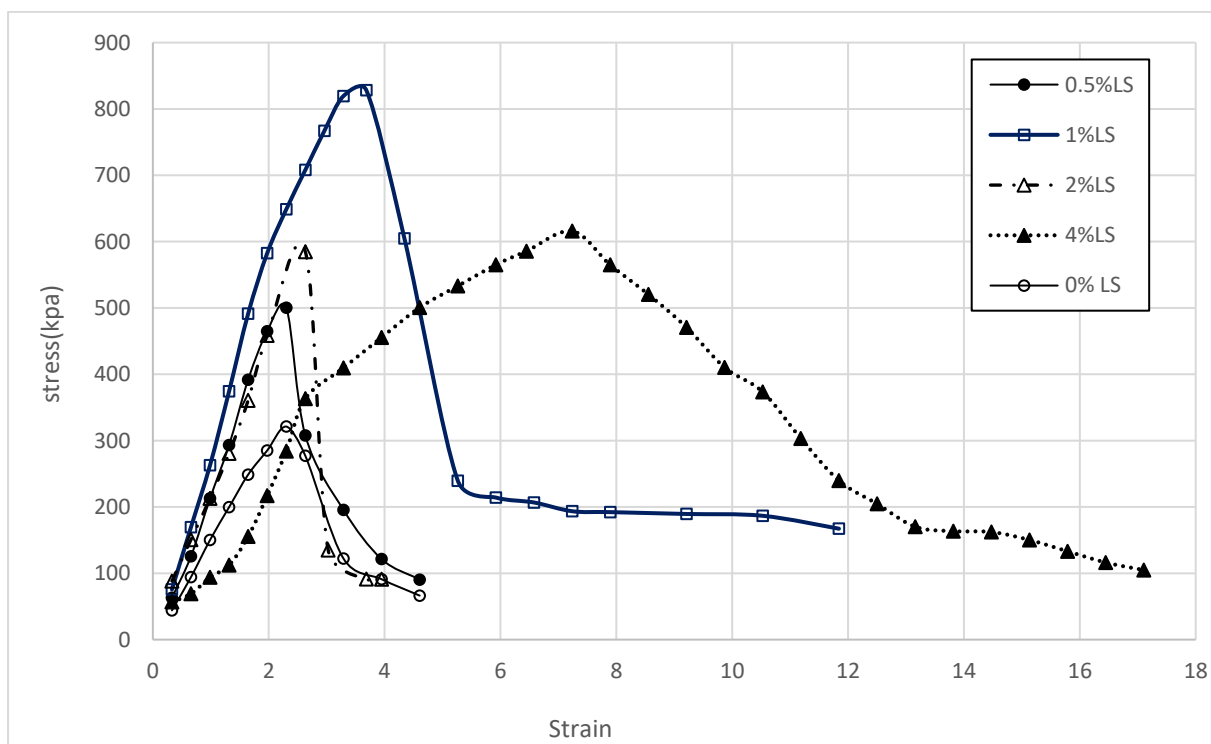
شکل ۷. اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم بر رطوبت بهینه
 Fig. 7. The effect of adding LS on optimal moisture



شکل ۸. اثر افزودن لیگنو بر حداکثر وزن مخصوص خشک
 Fig. 8. The effect of adding LS on the maximum dry density

۲-۴ اثر لیگنوسولفونات کلسیم بر تراکم نمونه‌ها پس از انجام آزمایش تراکم استاندارد روی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های مختلف از افزودنی، تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات

شده با لیگنو سولفونات کلسیم، مقدار آبی است که در حفرات داخلی خاک به دلیل تشکیل پیوندهای بین ذره‌ای محبوس شده‌اند و این یعنی خاک به مقدار بیشتری آب نیاز دارد تا به حد روانی یا خمیری برسد. نتایج مشابه در پژوهش‌های پیشین گواه صحت تغییرات حدود اتربرگ مذکور است [۸].



شکل ۹. اثر افزودن درصد‌های مختلف لیگنو سولفونات کلسیم بر مقاومت تک محوری

Fig. 9. The effect of adding different percentages of calcium lignon sulfonate on UCS test

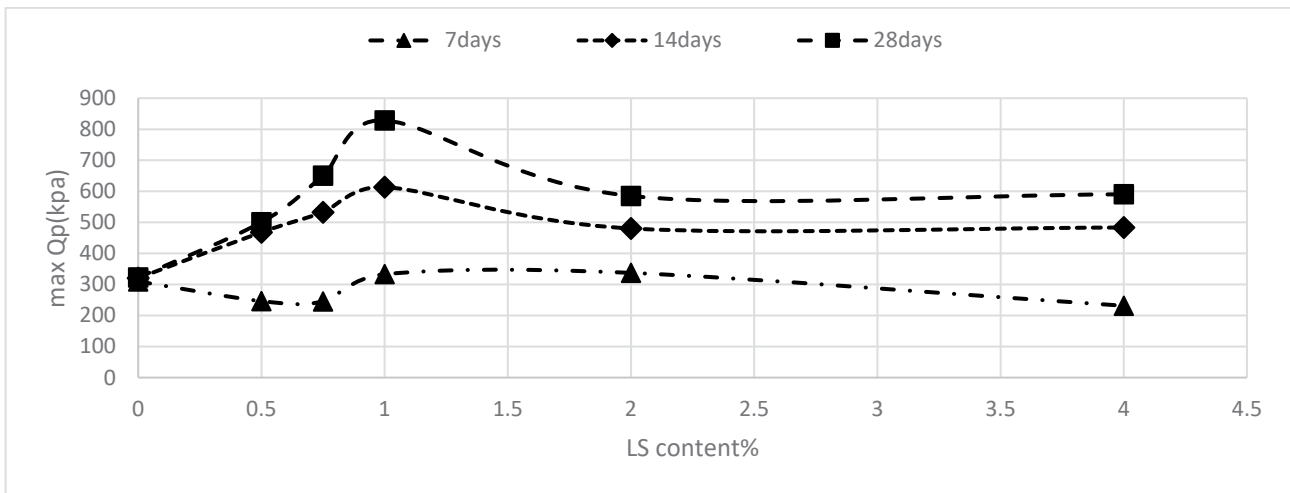
گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده است. کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک، در خاک‌های رسی می‌تواند به دلیل ایجاد پیوند بین ذرات خاک و محبوس شدن اندک آب و هوا در بین دانه‌های خاک باشد. این پدیده باعث می‌شود تا دانه‌های خاک رس در متراکم ترین حالت ممکن قرار نگرفته و در بین ذرات خاک مقدار جزئی آب یا هوا محبوس گردد. لازم به ذکر است که دیگر پژوهش‌ها نیز نتایج نشان داده شده در شکل ۷ و ۸ را گزارش کرده‌اند [۲۹، ۳۱].

۳-۴ اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم بر مقاومت تک محوری

شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با درصد‌های مختلف از لیگنو سولفونات کلسیم و خاک طبیعی را پس از ۲۸ روز عمل آوری نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است افزودن لیگنو سولفونات کلسیم باعث افزایش مقاومت تک محوری شده است و در یک زمان عمل آوری یکسان (۲۸ روزه) نمونه‌ها با درصد‌های مختلف افزودنی، مقاومت‌های متفاوتی را از خود نشان داده‌اند. با افزایش مقدار لیگنو سولفونات کلسیم تا ۱٪ وزن خشک خاک، مقاومت افزایش می‌یابد اما از این مقدار به بعد افزایش لیگنو سولفونات کلسیم

جزیی در حداکثر وزن مخصوص خشک خاک بوجود آمده، با توجه به توصیه‌ی پژوهش‌های پیشین و موارد اجرایی تثبیت خاک، آزمایش تراکم استاندارد بلافاصله پس از ترکیب خاک با افزودنی انجام شد به همین دلیل انتظار می‌رفت تغییرات در رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کم باشد. در اثر افزودن لیگنو حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در اثر افزودن لیگنو، رطوبت بهینه خاک ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته و از ۱۶/۵ به ۱۶/۶۲ درصد رسیده است. این بدین معناست که مقدار آب بیشتری نیاز است تا دانه‌های خاک در متراکم ترین حالت خود کنار یک‌دیگر قرار بگیرند. این افزایش می‌تواند ناشی از حبس مقداری از رطوبت خاک در بین دانه‌های خاک در اثر افزودن لیگنو و تشکیل پیوندهای بین ذره‌ای باشد. به دلیل محبوس شدن مقداری از رطوبت خاک در بین ذرات خاک، باید مقدار بیشتری آب اضافه شود تا خاک به رطوبت بهینه برسد.

با توجه به شکل ۸ افزودن لیگنو سولفونات کلسیم موجب کاهش جزئی حداکثر وزن مخصوص خشک خاک شده و از ۱/۲۴ به ۱/۶۵



شکل ۱۰. اثر افزودن درصدهای مختلف لیگنو سولفونات کلسیم بر مقاومت حداکثری نمونه در زمان

Fig. 10. The effect of adding different content of calcium lignosulfonate on the maximum strength of the sample after 28 days of curing

مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند، همچنین در تست‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌های بهسازی شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم بالاترین مقاومت را از خود نشان دادند که برای این نوع خاک درصد بهینه افزودنی تعیین شد. لازم به ذکر است که این عدد برای هر خاک منحصر به فرد است و به ظرفیت تبادل یونی و ترکیب شیمیایی خاک پایه بستگی دارد. افزایش مقاومت خاک که ناشی از تشکیل پیوندهای یونی و هیدروژنی می‌باشد به شدت از خصوصیات شیمیایی خاک پایه تأثیر می‌پذیرد. به همین دلیل میزان افزایش مقاومت در خاک‌های مختلف متفاوت ارزیابی می‌گردد. در هر صورت در پژوهشی نتایج مشابهی از تثبیت خاک رس با شاخص خمیری بالا با افزودنی لیگنوسولفونات کلسیم ارائه شده‌است [۲۶].

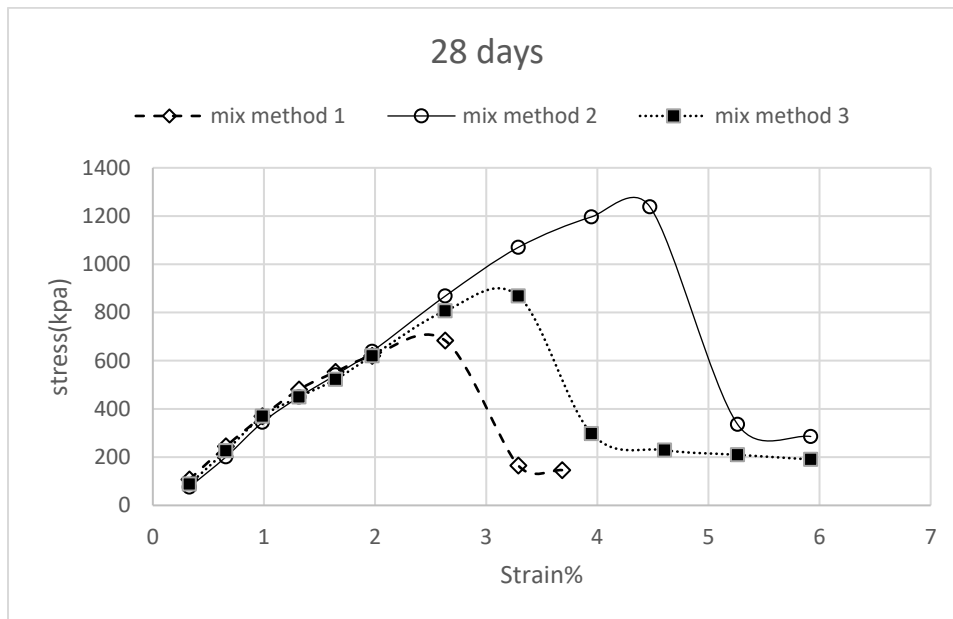
۴-۴ تأثیر روش اختلاط بر مقاومت تک محوری

شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم به روش‌های مختلف اختلاط را پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت از اختلاط به روش اختلاط ۲ به دست آمده و کمترین مقاومت از روش اختلاط ۱ حاصل گشته است. علت این اختلاف در مقاومت می‌تواند توزیع نامناسب افزودنی بین دانه‌های خاک در روش اختلاط ۱ باشد. زیرا هنگامی که پودر لیگنو سولفونات کلسیم با آب مخلوط می‌شود در محلول حاصله به سرعت واکنش‌هایی رخ می‌دهد و در

موجب کاهش مقاومت حداکثری نمونه می‌شود. بیشترین مقاومت حاصل شده مربوط به ۱٪ افزودنی بود که درصد افزودنی بهینه برای این نوع خاک محسوب می‌شود.

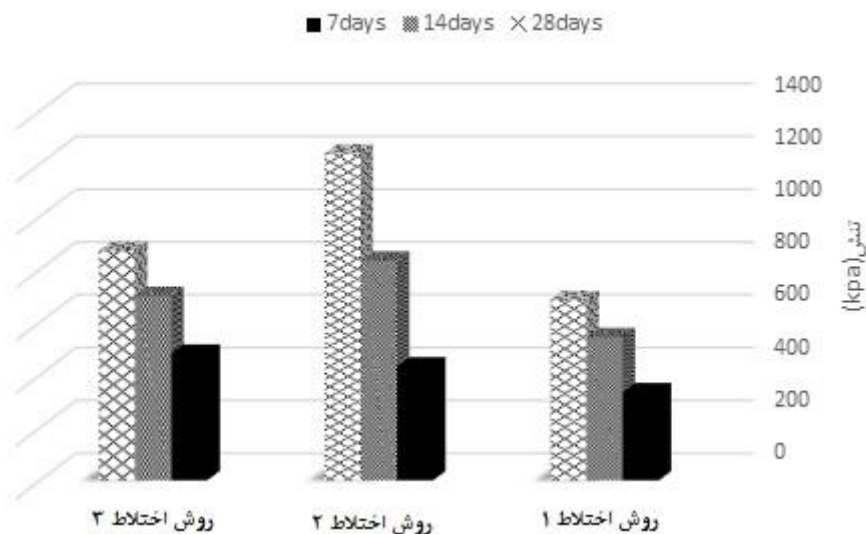
با توجه به نمودار تنش-کرنش با افزایش درصد افزودنی علاوه بر افزایش مقاومت نسبت به خاک طبیعی، رفتار نمونه به طور محسوسی شکل پذیر می‌شود. به عنوان مثال نمونه بهسازی شده با ۴٪ لیگنو سولفونات کلسیم مقاومتش پس از ۲۸ روز عمل‌آوری از ۳۲۲ کیلوپاسکال به ۵۹۰ کیلوپاسکال (۸۰٪ افزایش) رسید و تا ۱۷٪ کرنش وارده را تحمل کرد. این بدین معناست که اگر مقدار افزودن لیگنو سولفونات کلسیم بیش از مقدار بهینه تعیین شده باشد، علاوه بر افزایش مقاومت نسبت به خاک تثبیت نشده، شکل‌پذیری خاک نیز افزایش می‌یابد. نمونه‌ی بهسازی شده با درصد بهینه از افزودنی (۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم) نیز پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مقاومتش از ۳۲۲ به ۸۲۸ کیلوپاسکال (۲/۵ برابر افزایش) رسید. علت اینکه نمونه‌ها در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم شکل پذیر شده اند را می‌توان ایجاد پیوند هیدروژنی (که از انعطاف بالایی برخوردار است) و محبوس شدن مقدار اندکی آب و هوا در بین دانه‌های خاک در خلال تشکیل پیوندها دانست. افزایش مقاومت خاک در اثر تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم مرهون ایجاد پیوندهای بین ذره‌ای (یونی، کووالانسی و هیدروژنی) می‌باشد.

به‌منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت، نقاط پیک نمودار تنش-کرنش با یکدیگر مقایسه شده اند. همان‌طور که در شکل ۱۰



شکل ۱۱. اثر افزودن درصد بهینه افزودنی به روش‌های مختلف بر خاک پس از ۲۸ روز عمل آوری

Fig. 11. The effect of adding the optimal percentage of additives to the soil in different methods after 28 days of curing



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت به دست آمده از روش‌های مختلف اختلاط

Fig. 12. Comparison of resistance obtained by different mixing methods

اختلاط ۲، ۱۲۳۸ کیلوپاسکال و نمونه مخلوط شده به روش اختلاط ۱، ۶۸۳ کیلوپاسکال به دست آمد که اهمیت نحوه ی اختلاط را روشن می‌کند. نتایج تست‌های ۷ و ۱۴ روزه نیز نشان از برتری روش اختلاط ۲ نسبت به دیگر روش‌های اختلاط دارد. در همه تحقیقات گذشته از روش اختلاط ۱ استفاده شده‌است در حالیکه همانطور که نشان

قسمت‌هایی از محلول توده ای چسبناک تشکیل می‌شود. بنابراین این رفتار چسبناک محلول لیگنو سولفونات کلسیم موجب توزیع نامناسب افزودنی در خاک شده و مقاومت کمتری حاصل می‌گردد.

به‌علاوه همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود پس از طی دوره عمل آوری ۲۸ روزه مقاومت نمونه ی مخلوط شده به روش

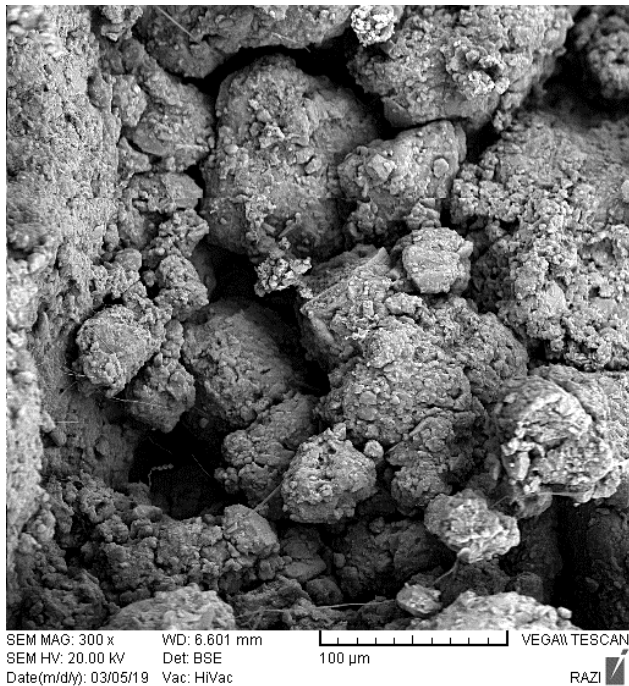
اثر تشکیل توده، بافت خاک از حالت ریز دانه به حالت درشت‌تر مشابه سیلت نزدیک می‌شود که بین ذرات آن پیوندهای مستحکمی برقرار است. از بین رفتن مرزهای مشخص بین ذرات رس و کاهش تعداد حفرات موجود، از دیگر تغییراتی هستند که در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم به خاک رخ می‌دهد.

در بخش قبل مشاهده شد که افزودن درصد بهینه از لیگنو سولفونات کلسیم به روش‌های مختلف به خاک، موجب تغییر در مقاومت تک محوری نمونه‌ها می‌شود. با توجه به شکل ۱۵ نیز می‌توان دریافت که نمونه‌های تثبیت شده به روش اختلاط ۲ پیوندهای بیشتری برقرار کرده و ساختار مستحکم تری تشکیل داده است. علت آن را می‌توان توزیع بهتر ذرات لیگنو سولفونات کلسیم در بین ذرات خاک و ایجاد پیوندهای قوی تر بیان کرد. همچنین در شکل ۱۶ می‌توان دریافت که در خاک تثبیت شده به روش ۳، فرآیند پیوندها و بزرگتر شدن دانه‌های خاک به صورت موثری ایجاد نشده‌است به این دلیل که کانی‌های خاک رس آب را جذب کرده و درگیر خود کرده است و مانع از اثر آب بر ذرات لیگنو سولفونات کلسیم شده‌است.

داده شد، روش اختلاط ۲ مناسب‌تر است به نحوی که مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری حاصل می‌شود بنابراین اصلی ترین نوع آوری تحقیق حاضر بررسی تاثیر روش اختلاط بر رفتار نمونه‌های تثبیت شده‌است.

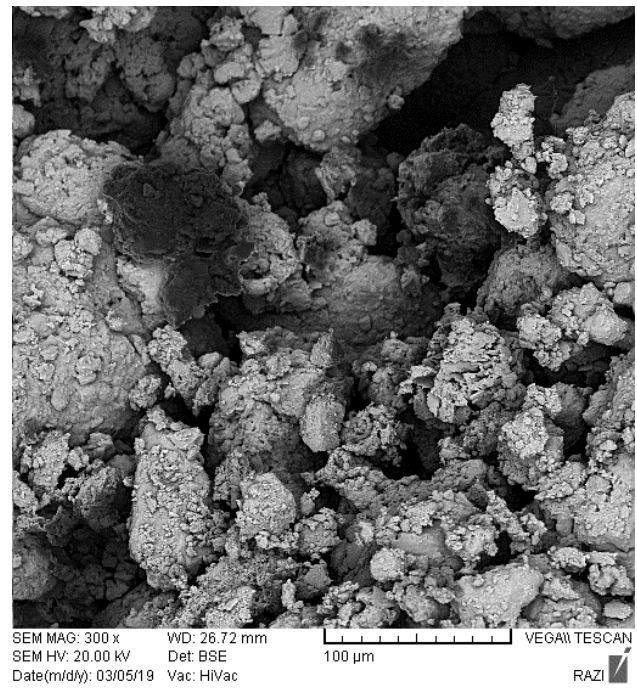
۴-۵ اثر لیگنوسولفونات کلسیم بر مورفولوژی خاک

آزمون میکروسکوپ الکترونی به منظور بررسی تغییرات مورفولوژی خاک، در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم به روش‌های مختلف، انجام شد. نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد بهینه از افزودنی به روش‌های مختلف ترکیب شدند و پس از ۲۸ روز عمل آوری بوسیله میکروسکوپ الکترونی SEM تصویر برداری شدند که نتایج آن در شکل‌های ۱۳-۱۶ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل، خاک رس به طور طبیعی ورقه ورقه است و بین ذرات خاک مرزهای مشخصی وجود دارد و از یکدیگر جدا هستند هم چنین حفرات زیادی در خاک بهسازی نشده قابل مشاهده است. در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم، بین ذرات رس پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی برقرار شده و توده‌ای از دانه‌های رس تشکیل می‌شود. در



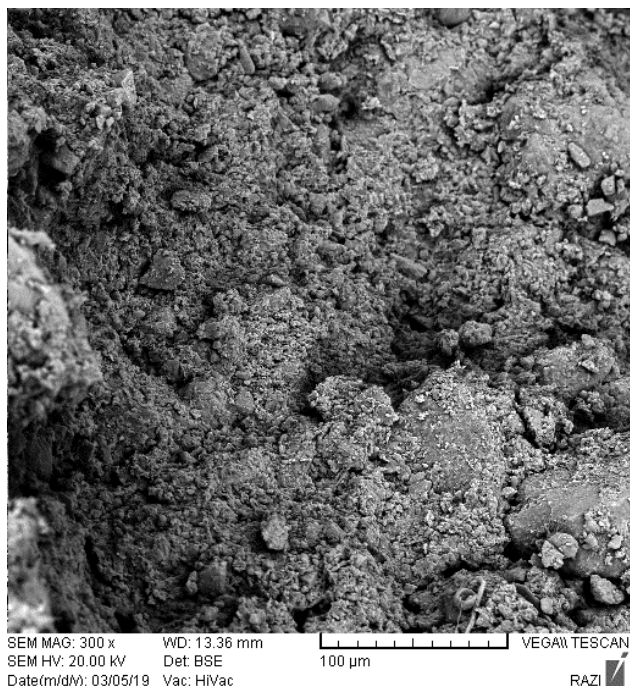
شکل ۱۴. تصویر میکروسکوپی از نمونه بهسازی شده با ۱٪ افزودنی به روش اختلاط ۱ و پس از ۲۸ روز عمل آوری

Fig. 14. Microscopic image of the sample treated with 1% additive by mixing method 1 and after 28 days of curing



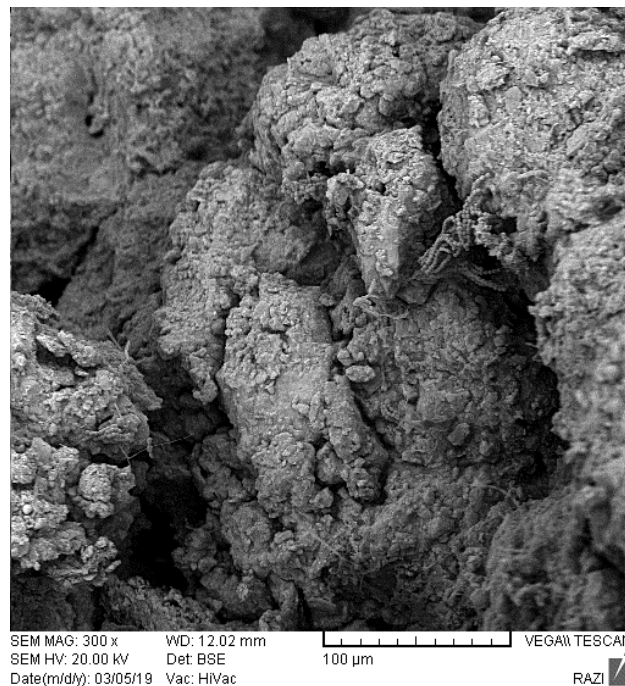
شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپی از نمونه بهسازی نشده

Fig. 13. Microscopic image of untreated sample



شکل ۱۶. تصویر میکروسکوپی از نمونه بهسازی شده با ۱٪ افزودنی به روش اختلاط ۳ و پس از ۲۸ روز عمل آوری

Fig. 16. Microscopic image of the sample treated with 1% additive by mixing method 3 and after 28 days of curing



شکل ۱۵. تصویر میکروسکوپی از نمونه بهسازی شده با ۱٪ افزودنی به روش اختلاط ۲ و پس از ۲۸ روز عمل آوری

Fig. 15. Microscopic image of the sample treated with 1% additive by mixing method 2 and after 28 days of curing

با درصدهای مختلف از لیگنو سولفونات کلسیم انجام شد. نتایج نشان داد که به طور کلی در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم مقاومت خاک افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش مقاومت در نمونه تثبیت شده با ۱٪ افزودنی رخ داد که از ۳۲۲ به ۸۲۸ کیلوپاسکال (۲/۵ برابر افزایش) رسید. مقدار بهینه از افزودنی برای خاک مورد استفاده در این پژوهش ۱٪ تعیین گردید. لازم به ذکر است مقدار بهینه از افزودنی برای هر خاک منحصر به فرد است و به ترکیب شیمیایی خاک پایه بستگی دارد.

- نمودار تنش-کرنش آزمایش تک محوری نشان داد، در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم به خاک، کرنش قابل تحمل خاک افزایش می‌یابد و نمونه شکل پذیر می‌شود. به عنوان مثال نمونه تثبیت شده با ۰.۴٪ لیگنوسولفونات کلسیم علاوه بر افزایش ۸۰٪ مقاومت نسبت به خاک پایه، کرنش قابل تحمل خاک را از ۵٪ به ۱۶٪ رسانده است.

- نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های مخلوط شده به روش‌های مختلف نشان داد که نحوه ی اختلاط تاثیر به سزایی بر مقاومت

۵- جمع بندی نتایج

در این پژوهش اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم به خاک رس با شاخص خمیری پایین مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم ترین تغییرات صورت گرفته در حدود اتربرگ، خصوصیات تراکمی، مقاومت تک محوری و ساختار خاک به شرح زیر بیان می‌گردد:

- نتایج آزمایش حدوداتربرگ، افزایش حد خمیری و حد روانی را نشان داده است که شیب افزایش حد خمیری بیشتر از حد روانیست و به همین دلیل شاخص خمیری کاهش می‌یابد. علت افزایش حد خمیری و روانی، محبوس شدن مقدار اندکی آب بین ذرات خاک است و در نتیجه خاک به مقدار بیشتری آب نیاز دارد تا به حد خمیری و روانی برسد.

- نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد، در اثر افزودن لیگنو سولفونات کلسیم درصد رطوبت بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. این تغییرات به دلیل محبوس شدن مقدار اندک آب و هوا در بین ذرات خاک است.

- آزمایش تک محوری روی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده

- soils, *Engineering Geology*, 104(1) (2009) 119-125
- [8] A. Roohbakhshan, B. Kalantari, Stabilization of clayey soil with lime and waste stone powder, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(4) (2016) 429-438.
- [9] F. Moghadasnejad, A. Modarres, Soil Stabilization with Waterproof Cement for Road Applications, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 42(1) (2010) 55-63.
- [10] T. Zhang, G. Cai, S. Liu, A.J. Puppala, Engineering properties and microstructural characteristics of foundation silt stabilized by lignin-based industrial by-product, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(7) (2016) 2725-2736
- [11] B.M. Sunil, S. Nayak, S. Shrihari, Effect of pH on the geotechnical properties of laterite, *Engineering Geology*, 85(1) (2006) 197-203.
- [12] J.S. Tingle, R.L. Santoni, Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives, *Transportation Research Record*, 1819(1) (2003) 72-84.
- [13] R.L. Santoni, J.S. Tingle, S.L. Webster, Stabilization of Silty Sand with Nontraditional Additives, *Transportation Research Record*, 1787(1) (2002) 61-70.
- [14] J.S. Vinod, B. Indraratna, M.A.A. Mahamud, Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 163(1) (2010) 43-51.
- [15] A.H. H. TAHERKHANI, V. SHARIFI Evaluating the use of CBR PLUS for Constructing the Pavement Layers from Stabilized Soils, *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 3(4) (2012) 339-347.
- [16] H. Taherkhani, Investigation and Comparison of Compressive Strength of Clay Soils Stalized by Cement, Lime and CBR Plus, *Modares Civil Engineering journal*, 16(4) (2016) 161-174.
- [17] B. Indraratna, T. Muttuvel, H. Khabbaz, R. Armstrong, Predicting the Erosion Rate of Chemically Treated Soil Using a Process Simulation Apparatus for Internal Crack Erosion, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6) (2008) 837-844.
- [18] B. Indraratna, R. Athukorala, J. Vinod, Estimating the Rate of Erosion of a Silty Sand Treated with Lignosulfonate,

نمونه‌ها دارد. نمونه‌ی مخلوط شده به روش ۲ نسبت به نمونه‌ی مخلوط شده به روش پیش فرض ۱، ۸۰٪ بیشتر مقاومت کرد که بدلیل توزیع بهتر افزودنی در بین ذرات خاک و پیوندهای بیشتر و قوی تر است. در همه تحقیقات گذشته از روش اختلاط ۱ استفاده شده‌است در حالیکه روش اختلاط ۲ مناسب تر است به نحوی که مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری حاصل می‌شود بنابراین اصلی ترین نوع آوری تحقیق حاضر بررسی تاثیر روش اختلاط بر رفتار نمونه‌های تثبیت شده‌است.

• بررسی تغییرات مورفولوژی خاک با استفاده از نتایج تست میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم، مرزهای بین ذرات رس از بین رفته و دانه‌های خاک با ایجاد پیوندهای هیدروژنی و کووالانسی توده تشکیل داده اند. در اثر تشکیل این پیوندها تعداد حفرات موجود در خاک کمتر شده و ذرات رس بزرگتر شده اند. این تغییرات در مورفولوژی خاک باعث بهبود خواص مکانیکی خاک تثبیت شده نسبت به خاک پایه شده‌است.

مراجع

- [1] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4) (1996) 223-237.
- [2] A.L. Fernandez, J.C. Santamarina, Effect of cementation on the small-strain parameters of sands, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1) (2001) 191-199.
- [3] S. Horpibulsuk, N. Miura, D.T. Bergado, Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10) (2004) 1096-1105.
- [4] P. Sherwood, Soil stabilization with cement and lime, Her Majesty Stationary Office, London, 1993.
- [5] A. Behnood, Soil and clay stabilization with calcium- and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques, *Transportation Geotechnics*, 17 (2018) 14-32.
- [6] P. Sherwood, Soil stabilization with cement and lime (State of the art review), London, Transport Research Laboratory, 1993.
- [7] F. Sariosseiri, B. Muhunthan, Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State

- Mechanisms of stabilization of expansive soil with lignosulfonate admixture, *Transportation Geotechnics*, 14 (2018) 81-92.
- [26] B. Ta'negonbadi, R. Noorzad, Stabilization of clayey soil using lignosulfonate, *Transportation Geotechnics*, 12 (2017) 45-55.
- [27] B. Ta'negonbadi, R. Noorzad, Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation, *Transportation Geotechnics*, 17 (2018) 41-50.
- [28] T. Zhang, G. Cai, S. Liu, Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation, *Journal of Cleaner Production*, 142 (2017) 4243-4257.
- [29] T. Zhang, S. Liu, G. Cai, A.J. Puppala, Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt, *Engineering Geology*, 196 (2015) 1-11.
- [30] Q. Chen, B. Indraratna, Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8) (2015) 1180-1185.
- [31] A.H. Vakili, J. Ghasemi, M.R. bin Selamat, M. Salimi, M.S. Farhadi, Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber, *Construction and Building Materials*, 193 (2018) 405-415.
- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5) (2013) 701-714
- [19] B. Chen, Polymer-clay nanocomposites: an overview with emphasis on interaction mechanisms, *British Ceramic Transactions*, 103(6) (2004) 241-249.
- [20] T. Zhang, S. Liu, G. Cai, A.J. Puppala, Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt, *Engineering Geology*, 196 (2015) 1-11.
- [21] A.H. Vakili, M. Kaedi, M. Mokhberi, M.R.b. Selamat, M. Salimi, Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application, *Applied Clay Science*, 152 (2018) 1-8.
- [22] Q. Chen, B. Indraratna, Deformation Behavior of Lignosulfonate-Treated Sandy Silt under Cyclic Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1) (2015) 06014015.
- [23] Q. Chen, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, Behaviour of lignosulfonate-treated soil under cyclic loading, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 169(2) (2016) 109-119.
- [24] D.P. Alazigha, B. Indraratna, J.S. Vinod, L.E. Ezeajugh, The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 169(3) (2016) 182-193.
- [25] D.P. Alazigha, B. Indraratna, J.S. Vinod, A. Heitor,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. S. Giahi, M. Jiryaei Sharahi, B. Mohammadnezhad, *Evaluation of a by-product and environmental-friendly chemical additives for clay soils with different mixing and curing methods, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 659-674.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.16461.6238](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16461.6238)



